



Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050)

ARBEITSPAPIER zum Projekt

„Klimaschutz-Maßnahmen“

Im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung und Begleitung des BMDV zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS-III)

Rollierende Entwurfsversion v2.1

Karlsruhe 31.10.2023

Ansprechpartner:

Dr. Wolfgang Schade

Tel: +49 721 824 818 90

Fax: Tel: +49 721 824 818 91

wolfgang.schade@m-five.de

**M-Five GmbH Mobility, Futures,
Innovation, Economics**

Bahnhofstr. 46, 76137 Karlsruhe

<http://www.m-five.de>

Autor*innen des Arbeitspapiers:

M-Five GmbH Mobility, Futures, Innovation,
Economics (M-Five)

Dr. Wolfgang Schade, Ines Haug, Julian
Emmerich, Daniel Berthold, Rafael Oehme,
Marcel Streif, Dr. Arpita Khanna, Cornelia
Emmerich

Fraunhofer Institut für System- und
Innovationsforschung (ISI)

Dr. Michael Krail

Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft
(IUE) – Technische Universität Hamburg

Philipp Anstett

PTV Planung Transport Verkehr GmbH (PTV)

Prof. Dr. Christoph Walther

PTV Transport Consult GmbH (PTV)

Dr.-Ing. Volker Waßmuth

**Vorgeschlagene Zitierweise des
Arbeitspapiers:**

Schade W., Anstett P., Berthold D., Emmerich C.,
Emmerich J., Haug I., Khanna A., Krail M., Oehme
R., Streif M., Walther C., Waßmuth V. (2023):
*Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die
Periode 2022 bis 2050 (REF-2050)*. Arbeitspapier
im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales
und Verkehr (BMDV), Karlsruhe.

Hinweise:

Die Darstellungen in diesem
Dokument spiegeln nicht
notwendigerweise die Meinung
des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	22
2	Einleitung.....	24
3	Konzept des Referenzszenarios (REF-2050).....	27
3.1	Stichtag für Instrumente im MKS-Referenzszenario (REF-2050)	28
3.2	Konzept der MKS-Szenario-Architektur	28
3.3	Infrastruktur der Verkehrsnetze.....	29
3.4	Überblick Modellsystem ASTRA-VALIDATE-Kraftstoffe.....	33
3.5	THG-Berechnung mit dem System-Modell ASTRA-M.....	34
4	Aktualisierung der Rahmenbedingungen	37
4.1	Bevölkerung in Deutschland	37
4.2	Bruttoinlandsprodukt (BIP)	40
4.3	Inflationsindex.....	43
4.4	Kraftstoffpreise.....	44
4.4.1	Flüssige Kraftstoffe	44
4.4.2	Gasförmige Kraftstoffe.....	47
4.4.3	EEG-Umlage	48
4.5	Strompreise	49
4.5.1	Haushaltsstrompreis	49
4.5.2	Industriestrompreis und Großverbraucher im Verkehr.....	50
4.6	Wasserstoffpreise	53
4.7	Anteil Biokraftstoffe und Preiseffekte	55
4.8	CO ₂ -Preisfad.....	61
4.9	Energiepreise im Vergleich	64
4.10	Die Effekte der Corona-Pandemie	64
4.11	Die Effekte der Automatisierung im Verkehr	66
5	Berücksichtigung von Instrumenten in REF-2050	69
5.1	Liste der Instrumente im Referenzszenario (REF-2050)	69
5.2	Beschreibung, Erläuterung und Modellierung zu den einzelnen Instrumenten.....	71

5.2.1	BEHG – CO ₂ Preis.....	71
5.2.2	THG-Quote (Umsetzung RED-II)	72
5.2.3	Abschaffung der EEG-Umlage.....	74
5.2.4	Erhöhung der Entfernungspauschale.....	75
5.2.5	Ausbau (Tank- und) Ladeinfrastruktur für PKW und LKW	76
5.2.6	Steuerermäßigung von Erdgas	78
5.2.7	MwSt-Senkung im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV).....	78
5.2.8	Schienenverkehr – Trassenpreise.....	79
5.2.9	Förderung Kombiniertes Verkehr, Gleisanschlüsse und Seehafen-Hinterland-Verkehr.....	80
5.2.10	Förderung EHV - Anlagenkosten.....	82
5.2.11	Ausbau 740-Meter-Netz	82
5.2.12	Digitale automatische Kupplung (DAK)	83
5.2.13	Umsetzung Deutschlandtakt	84
5.2.14	Starterkit ETCS.....	85
5.2.15	(Rangier-)Diesel-Lokomotiven mit Bio-Kraftstoff	86
5.2.16	Alternative Antriebe im Schienenverkehr	87
5.2.17	Abschaffung der Kanalgebühren für die Binnenschifffahrt.....	87
5.2.18	Alternative Antriebe in der Binnenschifffahrt	88
5.2.19	CO ₂ -Standards Pkw-Flotten.....	88
5.2.20	Umweltbonus PKW und LNF - Förderung E-Mobilität	90
5.2.21	KFZ-Steuerbefreiung für E-PKW und CO ₂ -Differenzierung	91
5.2.22	Absenkung Dienstwagenbesteuerung für E-PKW	92
5.2.23	Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharings.....	93
5.2.24	Mauttarife und Befreiung für Gas- und Null-Emissions-LKW	94
5.2.25	CO ₂ -Standards für LKW.....	95
5.2.26	Nutzfahrzeug-Förderung: 80% der Mehrkosten für leichte sowie schwere elektrische Nutzfahrzeuge	97
5.2.27	Weiterentwicklung und Erprobung elektrischer Antriebe bei SNF	98
5.2.28	Lang-LKW: Ausweitung des Positiv-Netzes	98
5.2.29	CO ₂ -Standards für leichte Nutzfahrzeuge (LNF)	99
5.2.30	Förderprogramme für fortschrittliche und strombasierte synthetische Kraftstoffe	100
5.2.31	Förderung zur Elektrifizierung der Linien-Busflotte.....	101
5.2.32	Clean Vehicles Directive / SaubFahrzeugBeschG	102
5.2.33	Erhöhung Regionalisierungsmittel (RegG)	102
5.2.34	Maßnahmenbündel ÖPNV	103

5.2.35	Radverkehrs- und Städtebauinstrumente.....	104
5.3	Reisezeitreduktion in ÖPNV und Fahrrad-Verkehr.....	107
5.4	Hinweis auf Maßnahmen in Ergänzung zum Referenzszenario	109
6	Referenzszenario der PKW-Flotte.....	110
6.1	Modellhochlauf von E-PKW und Entwicklung der Batteriekosten und – technologie	110
6.2	Rolle und Aufbau der Ladeinfrastruktur.....	115
6.3	Übersicht über die Modellierung der PKW-Flotte	117
6.3.1	Modellierung des PKW-Kaufs und der PKW-Flotte im Kohortenmodell.	117
6.3.2	Entscheidungsfunktionen für den PKW-Kauf	119
6.3.3	Dekompositionsanalyse der Treiber des Hochlaufs von E-PKW	121
6.3.4	Aktualisierung der Fahrzeugpreise von PKW	127
6.3.5	Aktualisierung des Energieverbrauchs von PKW	132
6.3.6	Modellierung der PKW-Kosten in ASTRA	136
6.3.7	Kalibrierung der PKW-Flotte	143
6.4	Entwicklung der PKW-Flotte	144
6.4.1	Bestand und Kauf von PKW.....	146
6.4.2	Alters- und Antriebsstruktur der PKW-Flotte	150
6.4.3	Effizienzentwicklung der PKW	151
7	Referenzszenario der Flotte leichter Nutzfahrzeuge (LNF)	157
7.1	Übersicht über die Modellierung der LNF-Flotte.....	157
7.2	Das Kaufentscheidungsmodell für LNF.....	158
7.3	Aktualisierung der Inputdaten und Kalibrierung.....	160
7.4	Entwicklung der Flotte von LNF	163
7.5	Entwicklung der Neuzulassungen von LNF.....	164
7.6	Effizienzentwicklung LNF	166
8	Referenzszenario der Flotte schwerer Nutzfahrzeuge (SNF)	169
8.1	Modellüberblick.....	169
8.2	Parameter und Inputs	172
8.2.1	Komponenten und Fahrzeugpreise.....	172
8.2.2	LKW-Maut.....	174
8.2.3	Spezifische Effizienz von SNF	176
8.2.4	Gesamtbetriebskosten von SNF (TCO).....	177

8.3	Änderungen in der Modellierung zu REF-2020	180
8.4	Entwicklung der SNF-Flotte	181
8.4.1	Neuzulassungen von SNF	181
8.4.2	SNF-Bestandsflotte.....	184
8.4.3	Altersstruktur der SNF-Flotte	185
8.4.4	Durchschnittliche Effizienzentwicklung in der Flotte	186
8.4.5	Elektrische Fahrleistung von SNF	188
8.4.6	Einordnung von gasbetriebenen SNF	189
9	Referenzszenario der Bus-Flotte	191
9.1	Übersicht über die Modellierung der Bus-Flotte	191
9.2	Aktualisierung der Inputdaten	192
9.3	Entwicklung der Bus-Neuzulassungen.....	192
9.4	Entwicklung der Bus-Flotte	193
10	Aufbau der Energieinfrastruktur für Verkehr.....	195
10.1	Alternative Lade- und Betankungsinfrastruktur für PKW und LNF.....	195
10.2	Lade- und Betankungsinfrastruktur für alternative SNF	202
10.3	Erzeugungsinfrastruktur für erneuerbare Energien	207
11	Modellierung und Referenzszenario Personenverkehr.....	210
11.1	Das 4-Stufen Verkehrsmodell	210
11.2	Verkehrsnachfrage im Personenverkehr.....	211
11.3	Kritische Würdigung der Ergebnisse und der Statistik im Personenverkehr	222
12	Modellierung und Referenzszenario Güterverkehr	226
12.1	Das 4-Stufen Verkehrsmodell	226
12.2	Verkehrsnachfrage im Güterverkehr	226
12.3	Kritische Würdigung der Ergebnisse und der Statistik im Güterverkehr	231
13	Einnahmen und Investitionen im Verkehr.....	232
14	Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr	238
14.1	Entwicklung des Endenergieverbrauchs (EEV).....	238
14.2	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs (PEV).....	242
15	Entwicklung der THG-Emission des Verkehrs.....	246

16	Synthese und Ausblick.....	253
17	Anhang	254
17.1	Vergleich von REF-2050 mit anderen Szenarien	254
	Personenverkehr	254
	Güterverkehr.....	257
	PKW-Flotte	259
	Endenergieverbrauch.....	261
	THG-Emissionen	262
17.2	Einordnung der PKW Flottenstruktur 2030 in REF-2050 in den europäischen Kontext	263
17.3	Anmerkung zu Statistiken im Verkehr – Bandbreite und Variabilität	265
18	Referenzen	268

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Einordnung der historischen Entwicklung der THG-Emissionen und der Einflüsse auf die Emissionen in den MKS-Referenzszenarien	29
Abbildung 2	Integrierte Anwendung der drei Modelle in der MKS-Beratung.....	34
Abbildung 3	Prinzipienskizze der Ermittlung von EEV und THG im Verkehr (ASIF-Konzept)	35
Abbildung 4	Überblick über Module und Modelle von ASTRA-M	36
Abbildung 5	Bevölkerungsentwicklung im Vergleich zu REF-2020	39
Abbildung 6	Entwicklung der Altersgruppen der Bevölkerung.....	40
Abbildung 7	Bevölkerung nach Altersgruppen	40
Abbildung 8	Entwicklung des Bruttoinlandprodukts, 2021 = 100.....	41
Abbildung 9	Jährliche BIP-Wachstumsraten.....	42
Abbildung 10	Reale BIP-Entwicklung	43
Abbildung 11	Entwicklung des Inflationsindex bis 2050 mit Basis 2010.....	44
Abbildung 12	Jährliche Inflationsrate.....	44
Abbildung 13	Entwicklung des Rohölpreises	45
Abbildung 14	Entwicklung der Diesel-Preisbestandteile	45
Abbildung 15	Entwicklung der Benzin-Preisbestandteile	46
Abbildung 16	Entwicklung der Kraftstoffpreise Diesel und Benzin im Vergleich.....	46
Abbildung 17	Entwicklung des Erdgaspreises	47
Abbildung 18	Entwicklung der CNG-Preisbestandteile	48
Abbildung 19	Entwicklung des CNG-Preises	48
Abbildung 20	Entwicklung der Preisbestandteile von Haushaltsstrom	50
Abbildung 21	Varianz der Industriestrompreise für Großverbraucher im Jahr 2020	51
Abbildung 22	Entwicklung der Preisbestandteile des Großverbraucherstroms	52
Abbildung 23	Entwicklung der Strompreise Haushalt, Gewerbe und Großverbrauch im Vergleich.....	53
Abbildung 24	Entwicklung des Wasserstoffpreises in der Mobilität	54

Abbildung 25	Einsatz von Biokraftstoffen zwischen den Jahren 2020 und 2030, aufgeteilt nach Kraftstoffart; angegebene Mengen für die Jahre 2020 und 2021 nach BLE (2021)	60
Abbildung 26	Darstellung der eingesetzten Mengen an Biodiesel (N-&FM und IX A und B) und Bioethanol (N-&FM, IX A) sowie Beimischungsgrenzen nach DIN EN:228:2012+A1:2017 und DIN EN 590:2013+A1:2017 (N- & FM – Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln; IX A und B – Biokraftstoffe nach RED II Anhang IX Teil A und B)	61
Abbildung 27	Entwicklung des CO ₂ -Preispfades	62
Abbildung 28	Entwicklung des CO ₂ -Preisaufschlags für verschiedene Kraftstoffe	63
Abbildung 29	Entwicklung der Einnahmen aus der CO ₂ -Bepreisung	63
Abbildung 30	Entwicklung und Vergleich der Energiepreise aus Nutzersicht.....	64
Abbildung 31	Reduktion der Kraftstoffkosten durch primäre Effekte im Automatisierungs-Szenario gegenüber der Referenz ohne Automatisierung.....	67
Abbildung 32	Reduktion der Vollkosten durch Rückgang der Fahrerkosten.....	68
Abbildung 33	Anzahl der E-Bikes/Pedelecs in privaten Haushalten in Deutschland ...	106
Abbildung 34	Beschleunigung im Radverkehr durch Zunahme Pedelecs	107
Abbildung 35	Treiber, Modellstufen und Entscheidungsfunktionen des PKW-Kaufmodells	118
Abbildung 36	Aufbau des PKW-Kohortenmodells in REF-2050	119
Abbildung 37	Dekompositionsanalyse des E-PKW Absatzes von 2022 – 2035 in den Jahren 2030 und 2035.....	122
Abbildung 38	Modellpolitik, Modellhochlauf und Kaufwiderstand.....	124
Abbildung 39	Einfluss CO ₂ -Standards auf Produktionsplanung und E-PKW-Absatz...	125
Abbildung 40	Dekompositionsanalyse des Verbleibs des E-PKW Absatzes von 2022 – 2035 in den Jahren 2030 und 2035.....	126
Abbildung 41	Kostenentwicklung von Batteriezellen und –packs pro kWh nach BloombergNEF (2021) und modifiziert für REF-2050.....	129
Abbildung 42	Auf 2022 normierte Listenpreisentwicklung von BEV nach Segment nach ICCT (2019).....	130
Abbildung 43	Listenpreisentwicklung BEV gegenüber Benzin in der Kompaktklasse .	131
Abbildung 44	Relativer Preisunterschied und Erreichung der Preisparität von Benzin-PKW gegenüber BEV nach Segmenten im Zeitraum 2020 bis 2035.....	131

Abbildung 45	Effizienzklassen von BEV-PKW-Neuzulassungen nach Segment im Jahr 2022	134
Abbildung 46	Verbrauch (WLTP) von BEV-PKW im Vergleich zu Benzin-PKW im Segment Offroad/SUV im Zeitraum 2010 – 2050	135
Abbildung 47	Vergleich der PKW-Käufe für REF-2050 ggü. KBA-Daten: (a) im Jahr 2019 nach Antriebsarten sowie (b) insgesamt in den Jahren 2019-2022	144
Abbildung 48	Vergleich des Bestandes an BEV, PHEV für REF-2050 ggü. KBA-Daten zum jeweils 1.1. der Jahre 2020-2023	144
Abbildung 49	Entwicklung des PKW-Bestandes nach Halterart bis 2050	145
Abbildung 50	Entwicklung der PKW-Neuzulassungen nach Halterart bis 2050	145
Abbildung 51	Entwicklung des PKW-Bestandes bis 1.1.2051 nach Antriebsart	146
Abbildung 52	Entwicklung der jährlichen PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart bis 2050 (in Intervallen)	148
Abbildung 53	Entwicklung der Segmente im PKW-Bestand bis zum 1.1.2051	149
Abbildung 54	PKW-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur im Jahr 2030	150
Abbildung 55	Entwicklung des CO ₂ -Flottenwertes der Neuzulassungen (nach WLTP) und des Bestandes an PKW (Realbetrieb, RDE)	152
Abbildung 56	CO ₂ -Typprüfwerte nach Segmenten von PKW-Neuzulassungen (WLTP)	153
Abbildung 57	CO ₂ -Emissionswerte nach Segmenten der PKW-Flotte (RDE)	153
Abbildung 58	CO ₂ -Typprüfwerte nach Antriebsart von PKW-Neuzulassungen (WLTP)	154
Abbildung 59	Ableitung von spezifischen CO ₂ -Emissionen nach NEFZ-, RDE- und WLTP-Prüf- und RDE-Werten in ASTRA-M	156
Abbildung 60	Entwicklung des LNF-Bestandes bis 2050 nach Segmenten	163
Abbildung 61	Bestand an LNF nach Antriebsart bis 2050	164
Abbildung 62	Entwicklung der LNF-Käufe bis 2050 nach Segmenten	165
Abbildung 63	Kauf von LNF nach Antriebsart bis 2050	165
Abbildung 64	LNF-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur im Jahr 2030	166
Abbildung 65	Entwicklung des CO ₂ -Flottenwertes der Neuzulassungen (nach NEFZ) und des Bestandes an LNF (Realbetrieb)	167
Abbildung 66	Aufbau des Kaufentscheidungs-Modells für SNF	170

Abbildung 67	Entwicklung der SNF-Kosten und -Preise der verschiedenen Antriebsarten am Beispiel Sattelzugmaschine (SZM), 2019 und 2025	173
Abbildung 68	Entwicklung der zukünftigen SNF-Kosten und -Preise der verschiedenen Antriebsarten am Beispiel Sattelzugmaschine (SZM), 2030 und 2035 ..	173
Abbildung 69	Preise der verschiedenen Antriebsarten in den übrigen vier SNF-Gewichtsklassen für die Jahre 2030 und 2035.....	174
Abbildung 70	Mauttarife und deren Wirkung auf Flotten, Fahrleistung und Mauteinnahmen	175
Abbildung 71	Entwicklung der Effizienz neuer SNF in kleinen Gewichtsklassen.....	176
Abbildung 72	Entwicklung der Effizienz neuer SNF in großen Gewichtsklassen.....	177
Abbildung 73	Gesamtbetriebskosten von Sattelzugmaschinen bei hohen Jahresfahrleistungen im Vergleich	178
Abbildung 74	Gesamtbetriebskosten von Sattelzugmaschinen bei niedrigen Jahresfahrleistungen im Vergleich	178
Abbildung 75	Neuzulassungen von SNF nach Antriebsart	182
Abbildung 76	Absatzerwartungen der Nutzfahrzeughersteller zu elektrifizierten Nutzfahrzeugen bis 2030.....	183
Abbildung 77	Vergleich KBA Daten zu SNF-Neuzulassungen mit ASTRA Modellierung	184
Abbildung 78	Bestand an SNF nach Antriebsart, jeweils zum 1.1. des entsprechenden Jahres.....	185
Abbildung 79	Aufteilung der SNF-Flotte im Jahr 2030 nach Alter und Antriebsarten ..	186
Abbildung 80	Entwicklung der Energieeffizienz der Antriebsarten in der SNF-Flotte ..	187
Abbildung 81	Entwicklung der Energieeffizienz des LKW-Transports	187
Abbildung 82	Entwicklung des elektrischen Fahranteils von SNF	188
Abbildung 83	Entwicklung der gasbetriebenen SNF-Flotte	190
Abbildung 84	Anzahl Neuzulassungen Stadtbusse nach Antriebsart	193
Abbildung 85	Anzahl Neuzulassungen Reisebusse nach Antriebsart	193
Abbildung 86	Bestand Busse nach Antriebsart	194
Abbildung 87	Bedarf an Aufbau zusätzlicher Ladestationen.	196
Abbildung 88	Ausstattung mit Ladepunkten relativ zur Entwicklung des Fahrzeugbestandes.	197

Abbildung 89	Bestand an PKW-Ladestationen in REF-2050	198
Abbildung 90	Bestand an PKW-Ladepunkten in REF-2050	199
Abbildung 91	Kapazität der Ladestationen für PKW und LNF in REF-2050	200
Abbildung 92	Angebotene Ladekapazität im Verhältnis zur Zahl der Fahrzeuge.	200
Abbildung 93	Jährliche Investitionen in Ladestationen für E-PKW.	201
Abbildung 94	Bedarf an privaten SNF-Ladesäulen (REF-2050).....	203
Abbildung 95	Bedarf an öffentlich unterstützten SNF-Ladesäulen (REF-2050).....	204
Abbildung 96	Bestand an privaten SNF-Ladesäulen (REF-2050)	205
Abbildung 97	Angebotene Ladekapazität an SNF-Ladesäulen (REF-2050).....	205
Abbildung 98	Ladekapazität für SNF für verschiedene Nutzungen (REF-2050).....	206
Abbildung 99	Investition in zusätzliche Energieinfrastruktur für SNF mit alternativen Antrieben	207
Abbildung 100	Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Personenverkehr (REF-2050)	208
Abbildung 101	Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Güterverkehr (REF-2050)	209
Abbildung 102	Aufbau der Modellierung des Personenverkehr-Moduls in ASTRA-M ...	211
Abbildung 103	Distanzklassen und Verkehrsmittel in ASTRA-M.....	212
Abbildung 104	Entwicklung der Personenverkehrsleistung in REF-2050	218
Abbildung 105	Entwicklung der Modalanteile im Personenverkehr in REF-2050	218
Abbildung 106	Aufkommen im Personenverkehr nach Distanzbändern in REF-2050...	219
Abbildung 107	Verkehrsleistung im Personenverkehr nach Distanzbändern im REF-2050	219
Abbildung 108	Entwicklung des Verkehrsaufkommens für PKW, Bahn und Bus nach der Anzahl der Fahrten	220
Abbildung 109	Entwicklung der Verkehrsleistung für die Verkehrsmittel PKW, Bahn und Bus in REF-2050	221
Abbildung 110	PKW-Fahrleistung berechnet nach verschiedenen Konzepten u. Quellen	225
Abbildung 111	Modellierung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr und Kopplung mit Nutzfahrzeug-Flottenmodell	226

Abbildung 112	Verkehrsleistung im Güterverkehr (in Mrd. tkm).....	229
Abbildung 113	Modalanteile der Verkehrsmittel im Güterverkehr im REF-2050.....	230
Abbildung 114	Güterverkehrsfahrleistung nach verschiedenen Quellen und Verkehrsträgern.....	231
Abbildung 115	Verteilung der Einnahmen aus der Energiesteuer in den Jahren 2005, 2020, 2025 und 2030 (REF-2050)	232
Abbildung 116	Verteilung der Einnahmen aus der Energiesteuer in den Jahren 2035, 2040, 2045 und 2050 (REF-2050)	233
Abbildung 117	Entwicklung der Einnahmen aus der Energiesteuer (REF-2050)	234
Abbildung 118	Verteilung der modellierten Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2050)	235
Abbildung 119	Entwicklung verschiedener Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2050)	236
Abbildung 120	Entwicklung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2050).....	237
Abbildung 121	Entwicklung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2050).....	237
Abbildung 122	Endenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2050)	238
Abbildung 123	Endenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2050)	239
Abbildung 124	Stromnachfrage der verschiedenen Verkehrsmittel (nur direkte Nutzung als Fahrstrom).....	240
Abbildung 125	Aufteilung des EEV von Bio-Kraftstoffen auf Energieträger (REF-2050)	241
Abbildung 126	Vergleich des EEV im Verkehr von REF-2050 mit anderen Quellen	242
Abbildung 127	Primärenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2050)	244
Abbildung 128	Primärenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2050).....	245
Abbildung 129	Entwicklung der THG-Emission im Verkehr in REF-2050.....	247
Abbildung 130	Verteilung der THG-Emissionen auf die Verkehrsmittel zu verschiedenen Zeitpunkten (REF-2050)	248
Abbildung 131	Entwicklung der THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr (REF-2050)	249
Abbildung 132	Vergleich der THG-Emissionen im Verkehr von REF-2050 mit anderen Quellen.....	250

Abbildung 133	Dekompositionsanalyse der THG-Minderung im Personenverkehr	251
Abbildung 134	Dekompositionsanalyse der THG-Minderung im Güterverkehr	252
Abbildung 135:	Szenarienvergleich Personenverkehr gesamt und MIV	254
Abbildung 136	Szenarienvergleich Personenverkehrsleistung Bus	255
Abbildung 137	Szenarienvergleich Personenverkehrsleistung Bahn	256
Abbildung 138	Szenarienvergleich Personenverkehrsleistung Rad und zu Fuß	256
Abbildung 139	Szenarienvergleich Güterverkehrsleistung gesamt und Straßengüterverkehr	257
Abbildung 140	Szenarienvergleich Güterverkehrsleistung Schiene und Binnenschifffahrt	257
Abbildung 141	Szenarienvergleich PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart	259
Abbildung 142	Szenarienvergleich PKW-Bestand nach Antriebsart	260
Abbildung 143	Szenarienvergleich Endenergieverbrauch nach Energieträger.....	261
Abbildung 144:	Szenarienvergleich THG-Emissionen im inländischen Verkehr	262
Abbildung 145	Vergleich der Verkehrsleistung des MIV mit Statistiken und Studien.....	266

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Übersicht über wichtige Zielgrößen und Kern-Indikatoren in REF-2050 ..22
Tabelle 2	Bevölkerungsentwicklung bis 205038
Tabelle 3	BIP-Wachstumsraten in Prozent42
Tabelle 4	Übersicht über die energetischen Ober- bzw. Unterquoten und Anrechnungsgrenzen für Erfüllungsoptionen nach BlmSchG/V sowie insgesamt zu erreichende THG-Minderungsquote für die Jahre 2022, 2025 und 2030.....56
Tabelle 5	Übersicht über die Erfüllungsoptionen nach BlmSchG/V sowie über die definierten Anrechnungsfaktoren für die unterschiedlichen erneuerbaren Kraftstoffe und Energieträger bei der Berechnung der THG-Minderungsquote57
Tabelle 6	Anrechenbare Pauschalwerte für nicht-öffentliche Ladepunkte.....58
Tabelle 7	Übersicht der im Jahr 2020 und 2021 eingesetzten Biokraftstoffmengen zur Erfüllung der BlmSchG/V-Vorgaben nach BLE (2021)58
Tabelle 8	Maßnahmen des MKS-Referenzszenarios (REF-2050)69
Tabelle 9	Potentiale zur Kostensenkung von E-PKW nach NPM (2021).....111
Tabelle 10	Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugcharakteristika von BEV113
Tabelle 11	Kostenentwicklung von Batteriepacks in der Literatur (Schätzungen) in € ₂₀₁₀ /kWh114
Tabelle 12	Nach tatsächlichen Käufen gemittelte Listenpreise im Jahr 2022 nach ADAC (2023), KBA (2023a), EV-Database (2023), EEA (2022)128
Tabelle 13	Quellen und Berechnungsgrundlage des PKW-Verbrauchs nach Antriebsart im Zeitraum 1971 bis 2050133
Tabelle 14	Durchschnittlicher Verbrauch nach Antriebsart und Segment im Jahr 2022133
Tabelle 15	Entwicklung der jährlich anfallenden Kosten (ohne Energie) von neuen PKW (gewerblich)137
Tabelle 16	Entwicklung der jährlich anfallenden Kosten (ohne Energie) von neuen PKW (privat)138
Tabelle 17	Entwicklung der Energiekosten von neuen PKW (gewerblich)139
Tabelle 18	Entwicklung der Energiekosten von neuen PKW (privat)140

Tabelle 19	Entwicklung der Beschaffungskosten von neuen PKW (gewerblich)	141
Tabelle 20	Entwicklung der Beschaffungskosten von neuen PKW (privat)	142
Tabelle 21	Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Neuzulassung (WLTP)	155
Tabelle 22	Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Bestandsflotte (RDE)	155
Tabelle 23	Fahrzeugkosten für LNF nach Antriebsart (in € ₂₀₁₀).....	161
Tabelle 24	Kosten im LNF-Kaufentscheidungsmodell (Gewerbe, in € ₂₀₁₀ /km)	162
Tabelle 25	Entwicklung der Energieeffizienz im Realbetrieb der LNF-Flotte (in kWh/km)	168
Tabelle 26	Prozentuale Restwerte nach 4 Jahren für SNF-Kostenkalkulationen	179
Tabelle 27	Parameter für die TCO-Berechnung: Jahresfahrleistung nach Gewichtsklasse.....	180
Tabelle 28	Parameter für die TCO-Berechnung: Anteile der Nutzungsszenarien ...	180
Tabelle 29	Start-Parameter für den Bedarf an Ladestationen bei PKW und LNF....	196
Tabelle 30	Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei PKW und LNF	201
Tabelle 31	Bedarf an Ladestationen je zusätzlichem SNF [in Stationen je SNF]	203
Tabelle 32	Aufbau von öffentlicher oder öffentlich beauftragter Ladeinfrastruktur je zusätzlich gekauftem BEV-SNF [in Stationen je SNF].....	204
Tabelle 33	Spezifische Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei SNF	206
Tabelle 34	Parameter für die Bedarfsrechnung der EE-Infrastruktur	208
Tabelle 35	Besetzungsgrade der Personenverkehrs-Fahrzeuge nach Modus, Wegezweck und Distanz.....	215
Tabelle 36	Entwicklung des Aufkommens, der Verkehrs- und Fahrleistung im Personenverkehr	216
Tabelle 37	Einordnung verschiedener Datenquellen im Verkehr (nicht vollständig)	222
Tabelle 38	Entwicklung der Nachfrage im Güterverkehr	228
Tabelle 39	Primärenergiefaktoren	243
Tabelle 40	Mengengerüst zur Einordnung des deutschen Beitrages zur Erreichung des EU-Minderungszieles im Jahr 2030 im REF-2050 (exemplarisch) ..	264

Verzeichnis der Abkürzungen

AFID	Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (2014/94/EU)
AFIR	Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (2021/0223/COD)
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
ASTRA	Assessment of Transport Strategies, System-Modell
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BImA	Bundesanstalt für Immobilienaufgaben
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung (besonders BImSchV 37, 38)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (jetzt BMDV)
BMF	Bundesfinanzministerium
BMI	Bundesministerium des Innern und für Heimat
BMJ	Bundesministerium der Justiz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (jetzt BMUV)
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (jetzt BMWK)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
BNetzA	Bundesnetzagentur
BReg	Bundesregierung

BVerfG	Bundesverfassungsgericht
BVWP	Bundesverkehrswegeplan 2030
CEP	Clean Energy Partnership
CNG	(Druck-)Erdgas, Compressed Natural Gas
CO₂	Kohlendioxid
CO₂eq.	Alle Treibhaus-wirksamen Emissionen umgerechnet auf die Wirkung einer vergleichbaren CO ₂ Emissionsmenge
CsgG	Carsharinggesetz
Ct	Eurocent
DAK	Digitale Automatische Kupplung
DeStatis	Statistisches Bundesamt
EEA	European Environment Agency
EEV	Endenergieverbrauch
EKM	Expertenbeirat Klimaschutz in der Mobilität
EnergieStG	Energiesteuergesetz
ESt, EStG	Einkommenssteuer bzw. Einkommenssteuergesetz
ETCS	European Train Control System, Europäisches Zugbeeinflussungssystem
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
Fit455	Fit-for-55-Politikvorschlag der EU-Kommission (14 Einzelpolitiken)
GV	Güterverkehr
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
H₂	Wasserstoff
HB-EFA	Handbuch Emissionsfaktoren
HDE	Handelsverband Deutschland
ISLa	Interministerielle Steuerungsgruppe Ladeinfrastruktur
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz (Stand 2019), -42%-Ziel für Verkehr
KSG-neu	Bundes-Klimaschutzgesetz (Stand 2021), -48%-Ziel für Verkehr

KSP2050	Klimaschutzplan 2050
KSPr	Klimaschutzprogramm 2030 von Juli 2019 mit Ergänzungen 2020, Ambition -42%
KSPr+	Noch zu beschließendes Klimaschutzprogramm 2030 mit Ambition - 48% (KSG-neu)
KSSP	Klimaschutz-Sofort-Programm, Erarbeitung in 2022
KTF	Klima- und Transformations-Fonds
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat Batterie (LiB)
LIB	Lithium-Ionen-Batterien
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge mit zulässigem Gesamtgewicht bis 3,5t
LNG	Flüssigerdgas, Liquefied Natural Gas
LUV III	Dritte Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung mit der Deutschen Bahn
MiD	Mobilität in Deutschland, Verkehrsdatenerhebung
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung
MoP	Mobilitätspanel, Verkehrsdatenerhebung
Mt	Millionen Tonnen
MwSt.	Mehrwertsteuer
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NFz	Nutzfahrzeug
NLL	Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid Batterie (LiB)
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
NZL	Neuzulassungen
OEM	„Original Equipment Manufacturer“ hier: Autohersteller
PbefG	Personenbeförderungsgesetzes

PjB	Projektionsbericht der Bundesregierung z.B. PjB-2021
PKW	Personenkraftwagen
PtL	Power-to-liquid, strombasierter synthetischer Flüssigkraftstoff
PV	Personenverkehr
RDE	Real-driving emissions, Fahrzeug-Emission im Realbetrieb
RED	Erneuerbare Energien Richtlinie
REF	Referenzszenario
REF-2017	MKS-Referenzszenario hinterlegt mit Instrumenten bis 30.6.2017
REF-2020	MKS-Referenzszenario hinterlegt mit Instrumenten bis 31.8.2020
REF-2050	MKS-Referenzszenario hinterlegt mit Instrumenten bis 31.8.2022
RFNBO	Erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs
RegM	Regionalisierungsmittel für den öffentlichen Verkehr
RSW	Radschnellweg/e
SchnellLG	Schnellladegesetz
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge (zulässiges Gesamtgewicht >3,5t)
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SZM	Sattelzugmaschine
TCO	Total-cost-of-ownership, Vollkostenrechnung, Gesamtbetriebskosten
THG	Treibhausgas, Treibhausgasemission
TtW	Tank-to-wheel Emissionen, Emissionen während der Fahrt
UBA	Umweltbundesamt
VECTO	Vehicle Energy Consumption calculation Tool
ViZ	Verkehr in Zahlen, Verkehrsdaten, verschiedene Jahrgänge
VP2030	Verkehrsprognose 2030 des Bundes
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
WtW	Well-to-Wheel Emissionen, Emissionen inkl. Energiebereitstellung
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht, insbesondere bei LKW

1 Zusammenfassung

Mit diesem Arbeitspapier wird das überarbeitete Referenzszenario der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) zum Stand Ende August 2022 vorgestellt. Die zentrale Entwicklung gegenüber früheren Versionen ist die Erweiterung des Zeithorizonts bis 2050, weshalb das Szenario als REF-2050 bezeichnet wird.

Die Quantifizierung des Referenzszenarios dient als Basis zur Bewertung der Wirkung von politischen Instrumenten im Verkehr, die zur Erreichung der THG-Minderungsziele für den Verkehrssektor nach Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) in der Fassung von 2021 herangezogen werden könnten. Durch den Zeithorizont 2050 bietet REF-2050 auch eine Grundlage, um die Entwicklung zur Klimaneutralität des Verkehrs bis 2045 zu bewerten.

Die Rahmenbedingungen von REF-2050 sind mit dem *Projektionsbericht der Bundesregierung 2023* (PjB, UBA 2023b) weitestgehend konsistent. Das unterstellte Instrumentenbündel ist vergleichbar dem PjB und wurde mit Stichtag 31.8.2022 in der Modellierung von REF-2050 berücksichtigt. Vereinzelt wurden auch Instrumente mit in das REF-2050 aufgenommen, deren formeller Beschluss erst nach dem Abschneidezeitpunkt lag, deren Realisierung jedoch bereits absehbar war.

Die THG-Emission des Verkehrs beträgt im Jahr 2030 106 Mt CO_{2äq.}. Die Sektor-Ziele aus dem KSG werden in REF-2050 deutlich verfehlt und es bleibt eine THG-Minderungs-Lücke von 22,5 Mt CO_{2äq.}, die durch zusätzliche Instrumente zu schließen ist. Der Hochlauf der E-Mobilität, gemessen an einer Zielgröße von 15 Mio. E-PKW im Bestand im Jahr 2030, ist mit 10,5 Mio. vollelektrischen PKW unzureichend. Der elektrische Fahranteil von LKW (>3,5t zGG) beträgt etwa 13,1% im Jahr 2030 und verfehlt somit die Zielgröße von einem Drittel elektrischer Fahrleistung. Die verkehrlichen Zielgrößen zur Verlagerung insbesondere auf die Schiene im Personen- und Güterverkehr können mit den bisher ergriffenen Instrumenten noch nicht erreicht werden.

Tabelle 1 Übersicht über wichtige Zielgrößen und Kern-Indikatoren in REF-2050

	Zielgröße 2030	Erreicht 2030
Anzahl BEV in der PKW-Flotte [<i>in Millionen</i>]	15	10,5
CO ₂ -Flottenemissionen der Neuzulassungen in DE	% vs. Basisjahr	
PKW	-55%	-64,8%
LNF	-50%	-56,1%
SNF	-30%	-31,5%
Elektrische Fahrleistung LKW [<i>Anteil in %</i>]	33%	13,3%
Personenverkehr		
Verdopplung Verkehrsleistung Schiene [<i>Mrd. pkm</i>]	200 Mrd. Pkm	148
Verdopplung Verkehrsleistung Rad [<i>Mrd. pkm</i>]	60 Mrd. Pkm	54
Güterverkehr		
Modal-Anteil der Schiene	25%	18,5%
Modal-Anteil Binnenschifffahrt		6,3%
THG-Emission Verkehr [<i>Mt CO_{2äq.}</i>]	83,7	105,9

Quelle: M-Five / Fraunhofer ISI, ASTRA-M, eigene Berechnungen

Mit einer THG-Emission von 106 Mt CO_{2äq.} aus dem Verkehr im Jahr 2030 liegt die erreichte Minderung deutlich über dem *Projektionsbericht 2023* (UBA 2023, dort 118 Mt CO_{2äq.}). Diese Differenz lässt sich auf die Berücksichtigung von langfristig verstetigten Wirkungen der Corona-Pandemie, auf Effekte der beginnenden Automatisierung im Straßenpersonen- und -güterverkehr (SAE Level 3 und erste Umsetzungen von Level 4) in REF-2050 bis 2030 sowie auf die deutlich höhere Durchdringung mit voll-elektrischen PKW im Jahr 2030 in REF-2050 zurückführen.

2 Einleitung

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) arbeitet an der Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) (BMVI 2013, BMVI 2018)¹. Die Weiterentwicklung der MKS und die Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen wird unterstützt und wissenschaftlich beraten durch ein Projekt-Konsortium unter Führung von M-Five GmbH Mobility, Futures, Innovation, Economics mit den Partnern Fraunhofer ISI, PTV Group, Technische Universität Hamburg Harburg (TUHH), Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS), IVE mbH, Technische Universität Dresden, Trimode und Kanzlei BBG und Partner. Neben der langjährigen wissenschaftlichen Erfahrung in der Mobilitäts- und Energieforschung und -beratung bringt dieses Konsortium eine Reihe von etablierten Methoden und Modellen in die wissenschaftliche Begleitung der MKS ein.

Primäres Ziel der MKS-Methodik ist die Berechnung des Endenergieverbrauches (EEV) und der Treibhausgasemissionen (THG) im Verkehr in Deutschland bis 2050. Mit der Quantifizierung des EEV geht die Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an fossilen Kraftstoffen und damit der Fortschritte bei der Defossilisierung des Verkehrs einher. Als zweites Ziel der MKS-Methodik werden Szenarien, bestehend aus verschiedenen Instrumenten und Instrumentenbündeln zum Klimaschutz im Verkehr, gebildet und deren Wirkungen gegenüber dem hier dargestellten Referenzszenario bewertet. Ergebnisse der Modellierung werden mindestens in Fünf-Jahres-Intervallen für die Jahre 2025² bis 2050 ausgewiesen. Zum besseren Verständnis der Entwicklungen werden bei Bedarf auch Zwischenjahre dargestellt. Aus dem EEV des Verkehrs lassen sich als abgeleiteter zentraler Indikator die Treibhausgas (THG)-Emissionen des Verkehrs ermitteln und als CO₂-Äquivalente (CO_{2äq.}) ausweisen. Da sich EEV und THG-Emission nur als Ergebnis einer vollständigen Modellierung des Verkehrssystems und der Fahrzeugflotten belastbar berechnen lassen, beinhaltet die Methodik sowohl eine vollständige Modellierung des Verkehrssystems in Deutschland als auch der Fahrzeugflotten im Straßenverkehr mit einem strategischen und dynamischen Ansatz.

Ziel dieses Arbeitspapiers ist die Dokumentation der Entwicklung eines auf den Stand 2022 aktualisierten Referenzszenarios mit dem Zeithorizont 2050 (REF-2050). Dieses Referenzszenario baut auf dem bisherigen MKS-Referenzszenario zum Stand 2020 (REF-2020) (Schade et al. 2020) auf und berücksichtigt dabei zusätzlich zwischen September 2020 und August 2022 ergriffene Instrumente sowie die technologische und kostenseitige Entwicklung der Verkehrstechnologien und der Energiepreise in diesem Zeitraum. REF-2020 diente als Vergleichsfall zur Instrumentenanalyse für die Entwicklung von Klimaschutzinstrumenten und -programmen in 2021 bis 2023. Das neue Referenzszenario

¹ Solange die zitierten Referenzen aus der Zeit stammen, in der das heutige BMDV noch mit BMVI abgekürzt wurde, werden die Quellen mit der Abkürzung BMVI angegeben.

² Die verwendete Modellierung mit ASTRA-M berechnet auch historische Werte zur Überprüfung und Darstellung der Güte des Modells. Zu diesem Zweck werden im Bericht neben statistischen Werten für 2019 bis 2021 auch ausgewählte Modellergebnisse dargestellt. Kapitel 11.3 und 17.3 erläutern den Kontext der amtlichen Statistik.

REF-2050 soll als Vergleichsfall für die Entwicklung von Klimaschutzpolitiken im Verkehr zur Erreichung der durch nationale und europäische Zielerhöhungen ambitionierteren Klimaschutzziele für 2030 und 2035 dienen und einen langfristigen Ausblick bis 2050 geben. Die Erreichung der Klima-Neutralität im Jahr 2045 war ausdrücklich kein Element des Szenarios, da Klima-Neutralität bisher nicht ausreichend mit Instrumenten hinterlegt ist. Die bisher vorgelegten Referenzszenarien der MKS (REF-2017, REF-2020) und jetzt REF-2050 sind alle als Instrumentenszenarien angelegt. D.h., die prognostizierten zukünftigen Entwicklungen von 2022 bis 2050 ergeben sich aus den aktuell beschlossenen Instrumenten in Verbindung mit den jeweils unterstellten Rahmenbedingungen, wie z.B. Wachstum des Bruttoinlandsproduktes (BIP) oder Entwicklung der Energiepreise.

Gegenüber REF-2050 sollen Maßnahmen bzw. Politikprogramme zur Erreichung einer THG-Minderung von -48% im Jahr 2030 quantifiziert und bewertet werden. Die Aktualisierung des Referenzszenarios wird auch notwendig, weil:

- (1) das Bruttoinlandsprodukt durch die Corona-Pandemie und den von Russland begonnenen Krieg in der Ukraine kurzfristig einen Einbruch erlitten hat und vermutlich auch langfristige ökonomische und verkehrliche Effekte verbleiben werden. Beispielsweise führen eine erhöhte Homeoffice-Nutzung und mehr virtuelle Meetings statt Dienstreisen zu einer Verringerung der Nachfrage im Personenverkehr. Hohe Energie- und Kraftstoffpreise verändern die Modalwahlentscheidungen. In Verbindung mit einer hohen Inflationsrate wird auch die wirtschaftliche Entwicklung gedämpft und die Nachfrage im Güterverkehr beeinflusst.
- (2) die technischen und Preis-Parameter, z.B. im Bereich der elektrischen Straßenfahrzeuge, sich deutlich gegenüber der Situation bis Ende 2020 verändert haben. Die Produktionsplanung und -struktur der Automobilhersteller für eine stärkere Elektrifizierung des Angebots ist weiter fortgeschritten, wurde aber gebremst durch gerissene Lieferketten (z.B. Kabelbäume), krisen-induzierte Knappheiten (z.B. Halbleiter) und in der Folge sich auch verteuern Rohstoffe (z.B. Nickel, Lithium). Damit konnten die in REF-2020 erwarteten Senkungen der Preise von Hochvolt-Batterien und für vollelektrische PKW bisher nicht realisiert werden. Stattdessen stiegen die PKW-Preise, der PKW-Markt erholte sich nicht von der „Corona-Delle“ und vor allem margenträchtige, meist größere PKW wurden verkauft.

Die MKS-Methodik nutzt drei existierende Modelle: ASTRA, VALIDATE und ein Kraftstoff-Modell zur Quantifizierung der Szenarien und der Instrumentenwirkungen. Erläuterungen zur Methodik der Modelle ASTRA und VALIDATE sind im Arbeitspapier aus 2016 beschrieben (Schade et al. 2016) und für die Modellierung von REF-2020 ergänzt und im zugehörigen Bericht dokumentiert worden (Schade et al. 2022). Zur Entwicklung von REF-2050 sind weitere Verbesserungen vorgenommen und das Kraftstoff-Modell ergänzt worden. Die Verbesserungen sind in diesem Arbeitspapier vertieft dargestellt. Den Kern der Szenario- und Instrumenten-Modellierung bildet das integrierte System-Modell ASTRA-M. Für dieses wird im Kapitel 3.4 ein Überblick gegeben.

Das vorliegende Arbeitspapier ist inhaltlich in 14 Teile gegliedert. Im ersten Teil (Kapitel 3) wird das Konzept für die Erstellung des neuen Referenzszenarios erklärt. In Kapitel 4 wird die Entwicklung wichtiger Rahmenbedingungen wie Bevölkerung und Energiepreise vorgestellt. Kapitel 5 listet die in REF-2050 berücksichtigten Instrumente auf und erläutert die jeweilige modellseitige Abbildung. Die Kapitel 6, 7, 8 und 9 beschreiben die Prognosen der Fahrzeugflotten für PKW, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und Busse. Der Aufbau der notwendigen Energieinfrastruktur wird in Kapitel 10 überschlägig abgeschätzt. Anschließend wird im Kapitel 11 die Entwicklung des Personenverkehrs dargestellt. Das Kapitel 12 widmet sich dem Güterverkehr. In Kapitel 13 wird eine Zusammenfassung über die monetäre Seite des Verkehrssystems mit Investitionen sowie Einnahmen und Ausgaben für Staat und Verbraucher gegeben. Die Kapitel 14 und 15 stellen den Endenergieverbrauch (EEV) bzw. die THG-Emissionen des Verkehrs dar. Das letzte Kapitel 16 zieht ein Fazit zu den Erkenntnissen aus REF-2050. Das Arbeitspapier wird durch einen Anhang (Kapitel 17) und die Auflistung der verwendeten Referenzen (Kapitel 18) abgeschlossen.

3 Konzept des Referenzszenarios (REF-2050)

Fünf Ziele sollen mit der Neugestaltung und Erweiterung des hier vorgelegten Referenzszenarios (REF-2050) erreicht werden:

- Erstellung einer soliden, detaillierten und **nachvollziehbaren Basis für die Berechnung und Bewertung** weiterer Instrumente für zukünftige Ergänzungen des Klimaschutzprogramms (KSP+).
- **Aktualisierung des Basisjahres** des Referenzszenarios auf den IST-Stand 2022. REF-2020 basierte auf den historischen Werten verfügbar bis 2019 bzw. 2020.
- **Verlängerung** der Modellierung und Quantifizierung über 2035 hinaus und **bis 2050**.
- **Gestaltung als Aktuelles-Maßnahmen-Szenario (AMS)**, d.h. Maßnahmen bzw. Instrumente, die bis Ende August 2022 beschlossen und damit wirksam werden, sollen im Referenzszenario enthalten sein. Weitere noch nicht von der Bundesregierung zu diesem Zeitpunkt beschlossene und in der Umsetzung befindliche Vorhaben hingegen nicht. Auch die Vorschläge der EU im Fit-for-55 Paket sind teilweise nicht Bestandteil des REF-2050, weil bis Ende August 2022 noch keine finale Ausgestaltung im Trilog erreicht und beschlossen wurde.
- Die Entwicklung bis 2050 soll als **plausibles Trendszenario** gestaltet werden, d.h. insbesondere die langfristige Quantifizierung nach 2030 soll in sich konsistent und nicht nur ein fiktives Rechenszenario sein. Enthalten sind die aktuellen Entwicklungen, wie z.B. die verlangsamte Senkung der Fahrzeugpreise von E-Fahrzeugen (durch z.B. teurere Rohstoffe, die die Senkung der Batteriekosten verlangsamen), aber keine spezifischen Maßnahmen oder Instrumente zur Verbesserung der Kosten bzw. der Wettbewerbsposition von vollelektrischen PKW nach August 2022.
- Das Referenzszenario ist aber auch als ein fiktives Szenario zu sehen, welches in dieser Form nicht eintreten wird, da zwischen 2022 und 2030 sicher weitere Maßnahmen ergriffen werden.
- Nicht berücksichtigt sind mögliche negative Folgen des Klimawandels, die z.B. zur Beeinträchtigung oder Zerstörung von Verkehrsinfrastrukturen führen und mit über die Zeit steigender Wahrscheinlichkeit in den Jahren bis 2050 häufiger eintreten und das Verkehrsgeschehen beeinflussen werden (siehe z.B. Schade et al. 2021).

Die Quantifizierung des Referenzszenarios erfolgt wie gehabt durch das Modellsystem ASTRA-VALIDATE in Kombination mit einem Kraftstoffmodell. Die im Folgenden dargestellten Berechnungen basieren weitgehend auf Simulationen mit dem ASTRA-Modell.

3.1 Stichtag für Instrumente im MKS-Referenzszenario (REF-2050)

Grundsätzlich sollen Instrumente im Referenzszenario enthalten sein, die bis **Ende August 2022** soweit **bindend beschlossen** sind, dass sie im Szenario-Horizont bis 2050 wirksam werden können. Die Bezeichnungen „bindend“ und „wirksam“ lassen einen gewissen Spielraum offen. Bindende Wirksamkeit erfordert aber zumindest einen Beschluss des Kabinetts, des Bundestages oder auf der EU-Ebene (Kommission oder Rat). Die Länder- oder Kommunal-Ebene wäre demnach nicht ausreichend (z.B. Effekt von Fahrverboten für Dieselfahrzeuge).

In Einzelfällen wurde in Abstimmung mit dem BMDV die Umsetzung eines Instrumentes auch ausgesetzt, z.B. wenn ein Instrument zwar beschlossen, aber nicht wirksam ist, weil dessen Umsetzung entweder nicht aktiv verfolgt wird oder die Verfehlung der Wirkung absehbar ist (z.B. in der Vergangenheit die Verfehlung der 10% Biokraftstoffquote bis 2020). Ein weiterer Ausnahmefall von der Stichtagsregelung betrifft Instrumente, welche absehbar reformiert werden, die Reform aber noch nicht abgeschlossen ist und es für die Konsistenz von REF-2050 problematischer wäre, das Instrument nicht angepasst zu hinterlegen, als es bereits sinngemäß zu reformieren (z.B. der Beschluss zur Verschärfung der CO₂-Standards für PKW für 2030 auf -55% anstatt -37,5%).

3.2 Konzept der MKS-Szenario-Architektur

Die Einordnung der bisher in der MKS erarbeiteten Referenzszenarien und der Effekte der letzten Krisenjahre ist in Abbildung 1 dargestellt. Dabei wird der Indikator *THG-Emission aus Verkehr in der territorialen Abgrenzung des KSG* und damit der Ziel-Indikator aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) genutzt, um die Szenarien zu illustrieren. Zwischen den Abschneidezeitpunkten 06/2017 des REF-2017, 08/2020 des REF-2020 und 08/2022 des REF-2050 verändern drei Treiber die THG-Entwicklung:

- **Neue historische Daten**, die zunächst für die Jahre 2017 bis 2019 und dann für 2020 bis 2022 verfügbar sind, werden zur Parametrisierung (z.B. Technologiekosten der Batterien) oder zur Kalibrierung (z.B. Verkehrsleistung im Personen- oder Güterverkehr) genutzt.
- **Corona-Schock** mit kurzfristigen Effekten der Corona-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 und langfristigen Effekten bis 2030 und darüber hinaus. Potenzielle langfristige Wirkungen durch verstetigte Verhaltensänderungen aufgrund der Pandemie waren nicht in REF-2020 berücksichtigt, sind jetzt aber Teil der Entwicklungen in REF-2050.
- **Energie- und Rohstoffkrise**, die durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine in Europa ausgelöst wurde, übt über Rohstoff-Knappheiten, Inflation und Unsicherheit dämpfende Effekte auf eine fortschrittliche Entwicklung aus, da die Preise von E-Fahrzeugen langsamer sinken, kurzfristig sogar gestiegen sind, und so der Antriebswechsel verzögert wird.

- Bereits beschlossene Instrumente**, zunächst zwischen 06/2017 und 08/2020 und dann von 08/2020 bis 08/2022. In der ersten Phase sind durch das Klimaschutzprogramm (KSP-2019) in 12/2019 oder die verschiedenen pandemiebedingten Konjunkturprogramme (z.B. 06/2020) eine Vielzahl von Instrumenten beschlossen worden, deren Wirkungen bereits in REF-2020 sichtbar wurden (z.B. Innovationsprämie E-PKW, CO₂-Bepreisung). Auch auf der EU-Ebene wurden Instrumente beschlossen (z.B. CO₂-Standards PKW mit -37,5% Ziel in 2030). In der zweiten Phase wurden weitere Instrumente beschlossen (z.B. gesteigerte Förderung für den Radverkehr, Erhöhung der Ziele der CO₂-Standards für PKW auf -55% in 2030) und führen zu zusätzlichen THG-Minderungen in REF-2050. Aber auch bis 08/2022 wurden noch nicht alle Instrumente des KSP-2019 beschlossen und umgesetzt. Als eines der wichtigsten fehlenden Instrumente ist die CO₂-differenzierte LKW-Maut zu nennen, für die zunächst die Novelle der Euro-Vignetten Richtlinie (EU RL 1999/62/EG) auf EU-Ebene zu erfolgen hatte, bevor die nationale Umsetzung, wie im KSP-2019 angelegt, erfolgen kann.

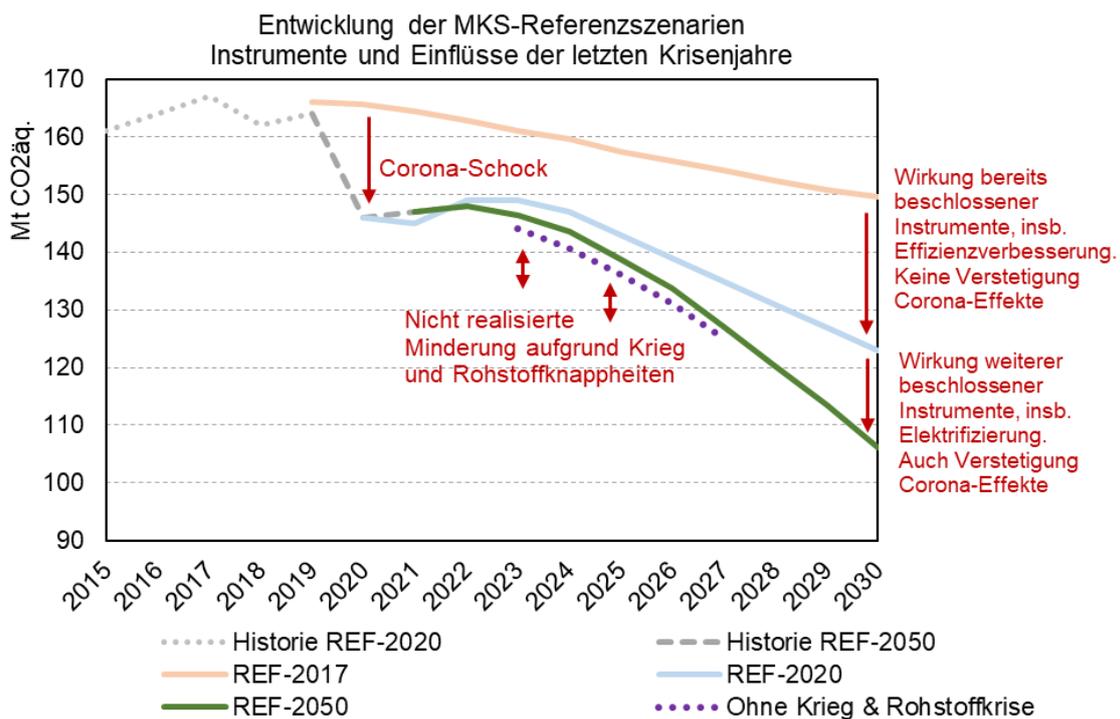


Abbildung 1 Einordnung der historischen Entwicklung der THG-Emissionen und der Einflüsse auf die Emissionen in den MKS-Referenzszenarien

3.3 Infrastruktur der Verkehrsnetze

Grundlage einer Verkehrsprognose sind auch Überlegungen zur Entwicklung des Verkehrsangebots und als Teil davon der Verkehrsinfrastruktur. Das Verkehrsangebot

beeinflusst prinzipiell die Verkehrsnachfrage in allen individuellen Entscheidungen. Hierzu wurde u.a. der Bundesverkehrswegeplan für das Zieljahr 2030 (BVWP 2030) als Grundlage herangezogen (BMVI 2016).

So führt z.B. ein Ausbau der **Straßeninfrastruktur** häufig zu einer Zunahme der Straßen-Verkehrsleistung durch modale Verlagerungen, längere Wege (Zielwähländerung) und veränderte Routenwahl. Aufgrund der hohen Dichte der Straßennetz-Infrastruktur in Deutschland sind die Auswirkungen in der Regel aber nur lokal, z.B. durch Verlagerungen aus dem nachgelagerten Straßennetz auf die Bundesfernstraßen, sichtbar. Als Netzgrundlage des Sektors Straße für das Referenzszenario dient die Umsetzung der Maßnahmen des BVWP 2030 (fest disponiert und Vordringlicher Bedarf) mit überregionaler Bedeutung. Auch wenn aus aktueller Sicht das Risiko besteht, dass nicht alle dort enthaltenen Maßnahmen zum Jahr 2030 realisiert werden können, ist es nicht möglich und nicht sinnvoll, für die strategische Modellierung in REF-2050 eine Auswahl zu treffen. Durch das Gesetz zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren im Verkehrsbereich, das kurz vor seiner Annahme im Bundestag steht, können Projekte von herausragendem gesamtwirtschaftlichen Interesse in einem gestrafften Verfahren umgesetzt werden, das dabei aber alle Anforderungen des Natur- und Umweltschutzes einhalten muss. Im Bereich Straße kommen hierfür festdisponierte Vorhaben und solche des Vordringlichen Bedarfs mit Engpassauflösung (VB-E) in Frage.

Für den Bereich Schieneninfrastruktur ergibt sich eine deutlich differenziertere Struktur der Annahmen, basierend auf entsprechenden Investitionsplanungen: Im Rahmen der dritten Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LUFV III) sollen 86,2 Mrd. € bis 2030 in die Erhaltung und Ertüchtigung der Schieneninfrastruktur fließen.

Im Sommer 2024 startet die Sanierung der Hochleistungskorridore (HLK). Dies bedeutet, dass im Halbjahresrhythmus ein oder mehrere Korridore für jeweils sechs Monate komplett gesperrt werden und alle Sanierungsarbeiten an Gleisbett, Oberleitungen und Sicherungssystemen inkl. vorbereitenden Arbeiten für ETCS auf einmal durchgeführt werden. Es wird mit dem Korridor Frankfurt – Mannheim begonnen, die gesamten Sanierungsarbeiten werden im Jahr 2030 beendet. Temporäre Rückverlagerungen auf die Straße ergeben sich im Wesentlichen für den Schienenpersonennahverkehr und den Schienengüterverkehr. Für das REF-2050 wird angenommen, dass die finanziellen Mittel für die Sanierung der HLK bereitgestellt werden können, auch das nachrangige Schienennetz im gleichen Zeitraum die notwendige Erhaltung erfährt und genügend Fachkräfte für Beides zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei einer Regelsanierungszeit für die HLK von sechs Monaten Sanierungsmaßnahmen an Brückenkörpern (Gründung, Widerlager etc.) nicht vorgenommen werden können. Hier ist mit späteren zusätzlichen Einschränkungen des Betriebs zu rechnen.

Insofern wird von einer vollständigen Umsetzung aller notwendigen Erhaltungsmaßnahmen im Sinne einer *conditio sine qua non* ausgegangen. Da die Erhaltungs- und Ersatzinvestitionen planmäßig (BVWP 2030) 70% aller Investitionsmittel für den Schienensektor ausmachen sollen, ist dies die zentrale Annahme für das MKS REF-2050.

Die Beschlüsse zur verstärkten Finanzierung der Schiene sind vor dem 31.8.2022 gefallen. Die Art der Umsetzung durch Sanierung der HLK hinterher. Deshalb ist kein Einfluss des tatsächlichen Sanierungsprozesses in REF-2050 modelliert, aber eine funktionierende Infrastruktur mit leicht verbessertem Zustand und Ausstattung unterstellt. Dies führt im Schienenpersonenfernverkehr in der Modellierung zu Zeitverbesserungen von 4-6% bis 2030 und in ähnlicher Größenordnung bis 2040.

Ab dem 1.1.2024 werden die DB Netz und DB Stations in eine gemeinwohlorientierte Infrastrukturgesellschaft (InfraGO) überführt, wobei Netz und Betrieb weiterhin unter dem Dach der DB AG zusammenbleiben. Hiermit verbunden soll auch die Reduktion von fast 200 Haushaltstiteln für Bahninvestitionen auf maximal fünf Haushaltstitel. Hierdurch lassen sich Infrastrukturprojekte wesentlich einfacher planen.

Die fest disponierten Maßnahmen und die Maßnahmen des Vordringlichen Bedarfs werden gemäß der Zeitschiene des BVWP 2030 realisiert. Dies bedeutet, dass die im BVWP vorgesehenen Investitionen für den Zeitraum 2030 bis 2035, die sogenannte „Schleppe“, auch erst nach 2030 umgesetzt werden. Damit ist aber nicht ausgeschlossen, dass die Verkehrsleistungsprognose 2030 (z.B. 100 Mrd. Pkm) erreicht werden kann. Sie wurde annähernd bereits vor Corona im Jahr 2019 erreicht. Diese Verkehrsleistung kann dann aber nicht mehr mit 100%-iger Engpassfreiheit erreicht werden.

Das Maßnahmenbündel „Netzkapazitäten erhöhen – kleinere und mittlere Maßnahmen“ aus dem KSPr von 2019, hinterlegt mit 1,4 Mrd. EUR bis 2030, sieht vor, akute (Engpass-)Probleme im Bahnnetz bei einzelnen Knoten, Stellwerken, Weichen, Überholgleisen etc. mit minimalem Planungsaufwand umzusetzen. Auch dieses Maßnahmenbündel wird als im Wesentlichen realisiert unterstellt, weil ansonsten die Vorhaben des BVWP 2030 und des Deutschlandtaktes ihre volle Wirkung nicht entfalten könnten.

Aufgrund der hohen Aufwendungen und Bindung von Kapazitäten im Eisenbahninfrastrukturbau durch die beschriebenen Erhaltungsmaßnahmen sowie die zahlreichen notwendigen zusätzlichen Infrastrukturprojekte für den Deutschlandtakt, auch um genügend Trassen für den Güterverkehr zu haben, wird davon ausgegangen, dass eine vollständige Umsetzung des Deutschlandtaktes erst zwischen 2045 und 2050 erfolgt.

- Kapazitätserweiterungen der Schieneninfrastruktur lassen sich ebenfalls durch die Einführung von ETCS 2 erreichen. Dabei ist zu beachten, dass neben der Verkürzung der Blockabstände auf Strecken die ETCS-Steuerung der Durchfahrten im Knoten und die Fahrstraßenbildung mit Digitalen Stellwerken (DSTW) höchste Relevanz haben. Ein reiner ETCS 2-Betrieb auf Korridoren bringt deutlich höhere Kapazitätswachse als ein Mischbetrieb mit konventioneller Signalisierung. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 der Großknoten Stuttgart (Durchmesser ca. 50-60km), die Neubaustrecken Köln-Rhein/Main und der TEN-T-Korridor Scan-Med mit ETCS 2 ausgestattet sind. Der flächendeckende Rollout von ETCS 2 ist bis 2040 geplant und für REF-2050 unterstellt.

- Weitere Vorhaben an der Schieneninfrastruktur betreffen deren Elektrifizierung. Diese ist immer dann besonders kostenintensiv, wenn ein „Freischnitt“ erfolgen muss, also Einschnitte, Brücken oder Tunnel für eine Elektrifizierung mit Masten etc. erweitert werden müssen. Es wird daher von einer Elektrifizierung und parallel intensiver Ausnutzung von Hybriden Antrieben ausgegangen, die helfen, Elektrifizierungslücken im Personenverkehr von bis zu 40 km zu überbrücken. Insgesamt könnten so ca. 50% der CO₂-Emissionen durch die bisherige Dieseltraktion entfallen. Darüber hinaus können Diesel-Lokomotiven zunehmend mit Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) betrieben werden. Dieser Kraftstoff wird aus biologischen Rest- und Abfallstoffen hergestellt.
- Mögliche Kapazitäten der Schieneninfrastruktur werden am ineffizientesten genutzt, wenn sich verschiedene Zuggattungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungsverhalten einen Streckenabschnitt teilen. Dies ist in Deutschland aber sehr häufig mit paralleler Nutzung durch langsame Güterzüge und schnelle Personenzüge im Fernverkehr der Fall. Es wird davon ausgegangen, dass das BVWP-Sammelprojekt mit ca. 80 740m-Überholgleisen für den Güterverkehr bis 2030 realisiert ist.
- Zur erweiterten Schieneninfrastruktur gehören auch Terminals für den Kombinierten Verkehr (KV) als dem Wachstumssegment des Schienengüterverkehrs. Es wird von einem deutlichen Ausbau bahnseitiger und privater Terminals aufgrund entsprechender Förderprogramme ausgegangen. Es wird weiterhin angenommen, dass in den Ländern der EU bis 2040 einheitliche Technologien für die Umladung der Sattelaufleger eingesetzt werden. Bis 2024 wird ebenfalls von einer finanziellen Unterstützung des Vor- und Nachlaufs des KV ausgegangen.

Förderprogramme der Bundesregierung zur Reaktivierung, Erhaltung oder für den Neubau von Gleisanschlüssen im Güterverkehr werden bis 2030 aufrechterhalten. Dabei geht es prioritär um Gleisanschlüsse mit hohem Aufkommen, was auch über mehrere Jahre nachgewiesen werden muss.

Zusammengefasst: Bis 2030 ist die schnellstmögliche Elektrifizierung der Straße sowie ein Beitrag durch den ÖPNV und die nicht-motorisierten Verkehre und hier insbesondere den Radverkehr prioritär für die Erreichung der THG-Minderungsziele. Nach 2030 und mit Fertigstellung der genannten Infrastruktur- und Technologieerweiterungen sollte der Schiene auf Mittel- und Fernstrecken eine größere Bedeutung für Verlagerung zukommen als vor 2030. Damit passen auch die Pfade der Schienenverbesserung und der beschleunigten Ausphasung von Verbrennern auf der Straße nach 2030 zusammen. Gerade weil die Schiene in der 2020er Dekade ertüchtigt wurde, können nach 2030 die verbliebenen Verbrenner-PKW und -LKW zu immer größeren Anteilen durch Verlagerung auf die Schiene ersetzt werden anstatt durch ein neues elektrifiziertes Straßenfahrzeug. Prinzipiell nimmt aber mit einer immer „grüneren“ Kfz-Flotte die Bedeutung der Verlagerung von Personen und Gütern auf die Bahn im Hinblick auf THG-Minderungen ab. Davon

unbenommen ist aber der extreme Vorteil der Bahn in den Bereichen Energieeffizienz, Sicherheit und Verbrauch an Verkehrsfläche je transportierter Einheit.

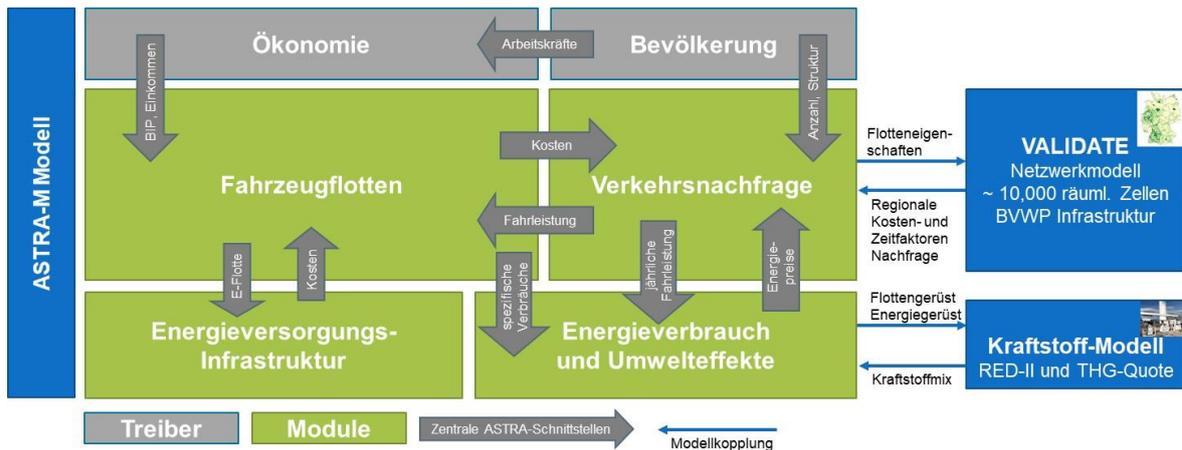
Die Fertigstellung zentraler Ausbau-Vorhaben, die die Schiene gegenüber der Straße wettbewerbsfähiger machen würden, sind auf das Jahr 2040 (und später) verschoben worden:

- Ausstattung des Netzes und des Lok-Materials mit dem europäischen elektronischen Zugsteuerungssystem (ETCS),
- Umstellung auf digitale Stellwerke,
- die vollständige Einführung der digitalen Kupplung, die ihr Potenzial erst richtig entfaltet, wenn es keine gemischten Wagenparks oder zumindest Züge mehr gibt,
- Einführung des Deutschlandtaktes, der wiederum infrastrukturseitig von der Fertigstellung zahlreicher Aus- und Neubauvorhaben abhängt.

3.4 Überblick Modellsystem ASTRA-VALIDATE-Kraftstoffe

Die folgende Abbildung 2 stellt den integrierten Ansatz der Nutzung der Modelle ASTRA und VALIDATE dar. Sowohl ASTRA als auch VALIDATE sind so konzipiert, dass sie die Verkehrsnachfrage bzw. Fahrleistungen abschätzen und unter Berücksichtigung der technischen Eigenschaften der Fahrzeuge den Endenergieverbrauch des Verkehrs berechnen können. Der Unterschied der Methoden und Modelle liegt in dem Ansatz auf der strategischen Ebene ohne Netzmodell von ASTRA und dem netzbasierten Ansatz von VALIDATE. Außerdem ist VALIDATE auf den Straßenverkehr konzentriert und nutzt exogene Vorgaben für die Fahrzeugeffizienz, während ASTRA die Fahrzeugeffizienz endogen über Flottenmodelle berechnet und alle territorialen Verkehre abbildet. Zusätzlich wird durch weitgehend exogene Inputs für den internationalen See- und Luftverkehr eine Energienachfrage abgeschätzt. ASTRA wird genutzt, um die Entwicklung von Treibern der Verkehrsnachfrage in VALIDATE bereitzustellen. Damit eignet sich ASTRA für die strategischen Analysen des Gesamt-Systems und von integrierten Instrumenten-Bündeln, während VALIDATE für regionale und netz-fokussierte Analysen herangezogen wird. Für die Arbeiten in der MKS wurde in den letzten Jahren eine erweiterte ASTRA-Modellvariante entwickelt, die zur Verdeutlichung als ASTRA-M bezeichnet wird.

Als drittes Modell wird ein Kraftstoff-Modell eingesetzt, mit dem die in ASTRA-M generierten Energienachfragen auf die verfügbaren Mengen-Potenziale für synthetische Kraftstoffe unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Einhaltung der Vorgaben der THG-Quote und der Produktionskosten der einzelnen synthetischen Kraftstoffe aufgeteilt werden.



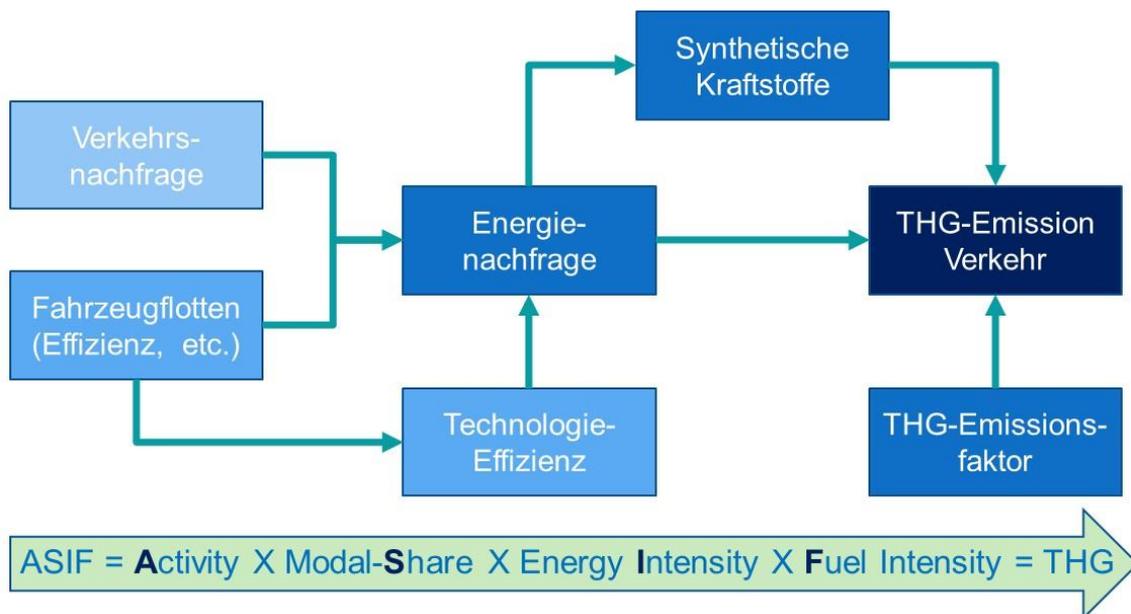
Quelle: MKS-Konsortium.

Abbildung 2 Integrierte Anwendung der drei Modelle in der MKS-Beratung

Der Fokus der Arbeiten für REF-2050 lag auf Verbesserungen und Erweiterungen in ASTRA-M sowie auf der verbesserten Abbildung einzelner Instrumente, z.B. im Kraftstoffbereich.

3.5 THG-Berechnung mit dem System-Modell ASTRA-M

Die Berechnung von Endenergieverbrauch (EEV) und THG-Emissionen aus dem Verkehr erfolgt sowohl in einfachen als auch in komplexen Modellierungsansätzen nach demselben Prinzip, welches wir als ASIF bezeichnen. Das Akronym leitet sich aus dem Englischen ab (siehe Abbildung 3). Es weist aber deutsche Pendanten auf: mit A für Verkehr-Aktivität, S für Modal-Split, I für Energie-Intensität und F für CO₂-Emission des Kraftstoffs (Fuel Intensity). Im ASIF-Konzept werden die Verkehrsnachfrage, die modale Verteilung, technische Eigenschaften der Fahrzeuge und chemische Eigenschaften der Kraftstoffe berücksichtigt. Die verschiedenen komplexen Ansätze zur THG-Berechnung unterscheiden sich meist dadurch, (1) wie viele Einflussparameter berücksichtigt werden und (2), ob eine lineare Modellierung (in Abbildung 3 von links nach rechts) oder eine komplexe Modellierung mit Berücksichtigung der verschiedensten Rückkopplungen – teils auch sektorübergreifend zwischen Verkehr, Energie und Ökonomie – erfolgt.



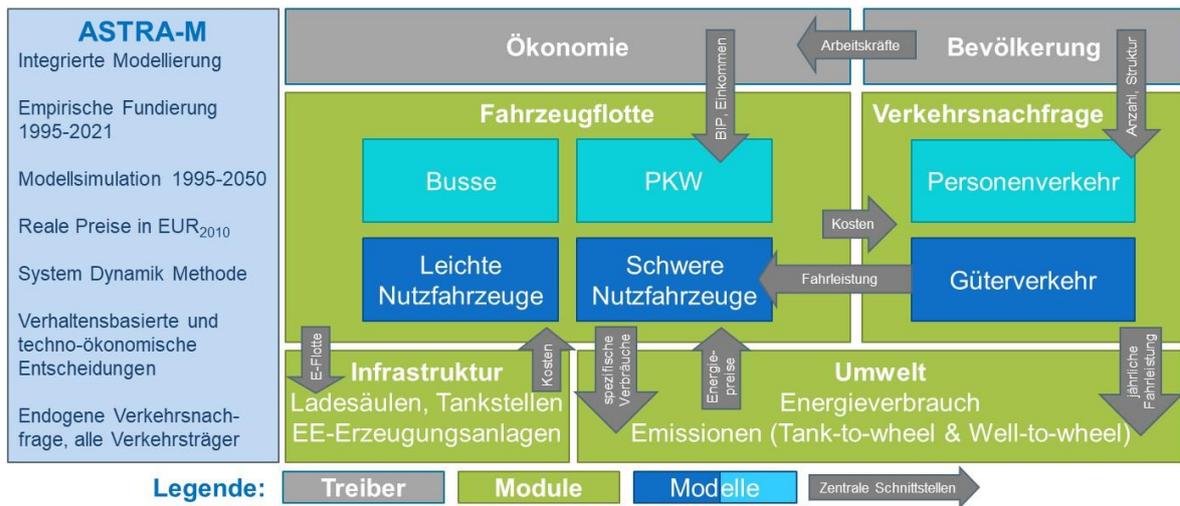
Quelle: M-Five.

Abbildung 3 Prinzipienskizze der Ermittlung von EEV und THG im Verkehr (ASIF-Konzept)

Die Modellierung von ASTRA-M stellt eine komplexe Berücksichtigung zahlreicher Rückkopplungen sowohl innerhalb des Verkehrssystems (z.B. Flottenkosten und damit Technologieparameter beeinflussen Modalwahl und Emissionen) als auch mit anderen Systemen wie dem Energiesektor (z.B. E-PKW-Hochlauf beeinflusst Investitionen im Energiesystem) dar. ASTRA-M ist dazu in Module und Modelle unterteilt, zwischen denen verschiedene Rückkopplungen berücksichtigt sind (siehe Abbildung 4). Das Modell simuliert den historischen Zeitraum von 1995 bis 2021, um die Parameter der Funktionsgleichungen empirisch zu kalibrieren und die Güte der Modellierung im Gesamtsystem zu testen.³ Durch die Betrachtung des Gesamtsystems kann eine zusätzliche Dimension der Validierung des Modells genutzt werden, weil Gleichungen, die verschiedene Teile des Systems beschreiben, ineinandergreifen und ein mathematisch stimmiges Ganzes ergeben. Vergleichbar einem Hausbau, bei dem Wände, Türen, Fenster, Dach, Rohre und Elektrik alle an der richtigen Stelle und in passender Anordnung zueinander angebracht sein müssen, um ein stimmiges und funktionsfähiges Gebäude zu erstellen.

Ab 2022 beginnt das Modell die Zukunft zu simulieren und quantifiziert diese in Form von Szenarien bis 2050. Dabei werden verschiedene mathematische Modelle genutzt, um Wahlentscheidungen der Verkehrsnutzer und Fahrzeugkäufer zu simulieren. Insbesondere werden Discrete-Choice Ansätze (Logit-Modelle) eingesetzt, wenn unterschiedliche Präferenzen und nicht-monetäre Faktoren zu berücksichtigen sind; ebenso Vollkostenrechnungen (Total-Cost of Ownership, TCO), wenn Entscheider rein rational als Homo Oeconomicus agieren.

³ In den Darstellungen der Berechnungsergebnisse ab Kapitel 6 sind auch für historische Zeiträume (d.h. ab 2010 bzw. 2015 und bis 2020) die Modellergebnisse dargestellt. Diese können leicht von amtlichen Statistiken abweichen. Es werden Hinweise zur Höhe der Abweichung gegeben.



Quelle: M-Five.

Abbildung 4 Überblick über Module und Modelle von ASTRA-M

Details zu den Berechnungen und den Rückkopplungen zwischen den Modellen werden in den verschiedenen Kapiteln anhand der Funktionalitäten erläutert.

4 Aktualisierung der Rahmenbedingungen

Aufbauend auf der bisherigen Referenz REF-2020 (Schade et al. 2022) wurden die zentralen Rahmenbedingungen Bevölkerung, Bruttoinlandsprodukt (BIP), Inflation und Energiepreise anhand der aktuellen Entwicklungen sowie neuer Prognosen überarbeitet und bis zum Jahr 2050 verlängert. Dabei wurde soweit möglich auf ressortabgestimmte Annahmen aus Szenarien aus dem Bereich der Energie- und Klimapolitik zurückgegriffen. Wesentliche Abweichungen zur Referenz des Projektionsberichts 2023 der Bundesregierung werden in den einzelnen Unterkapiteln kenntlich gemacht.

Dieses Kapitel 4 fokussiert auf die quantitative Darstellung der Rahmenbedingungen. Teilweise werden einzelne Aspekte der Rahmenbedingungen nochmals bei den Erläuterungen zu den Instrumenten aufgegriffen (siehe Unterkapitel zu Kapitel 5.2). Dort werden zusätzliche Hintergründe zur Modellierung der Instrumente und zu den Unterschieden zur vorhergehenden Ausgestaltung des jeweiligen Instruments erläutert.

Für die Anpassung der Rahmenbedingungen gilt nicht, wie bei den Instrumenten, der Abschneidezeitpunkt 08/2022 als letzter Kenntnisstand. Insbesondere aufgrund stetiger Veränderungen der Prognosen zentraler Rahmenbedingungen wie BIP, Inflation und Energiepreisen wurden letzte Anpassungen zum Kenntnisstand 04/2023 vorgenommen.

4.1 Bevölkerung in Deutschland

Für REF-2050 wurden in der Bevölkerungsmodellierung die neuesten Daten integriert. Die Entwicklungen bis 2050 wurden schon im Zuge der letzten Revision für REF-2020 überarbeitet und konnten für diese Version beibehalten werden.

Die Geburtenraten wurden für die Jahre 2021 und 2022 an die Datenlage angepasst. Durch die Pandemie entstand eine Abweichung von den mehrjährigen Trends aus der Zeit bis 2020 – Zunahme bis auf 1,59 Geburten pro Frau 2012 bis 2016, gefolgt von einem Rückgang von 2017 bis 2020 auf 1,53. Im Jahr 2021 kam es dann zu einem sprunghaften Anstieg der Geburten auf 1,58 pro Frau, verursacht vor allem in den Monaten der Lockdown-Lockerung Mai und Juni 2020. 2022 sanken die Geburten dann deutlich ab, entsprechend einer Rate von 1,48⁴ (verursacht möglicherweise durch die besonderen Belastungen von Familien während der Pandemie, verzögerte Verfügbarkeit von Impfstoffen für junge Menschen und deren späte Empfehlung für Schwangere und/oder möglicherweise auf 2021 vorgezogene Geburten, die dann zu einem Abflachen in den Jahren danach führen). Die rapiden Veränderungen und relativ unklaren Gründe dahinter erschweren belastbare Prognosebildung. Wir orientieren unsere Modellierung weiterhin an der moderaten Variante G2 des statistischen Bundesamtes. In dieser steigen Geburtenraten zunächst auf 1,65 und fallen dann auf 1,55.

Die ukrainischen Flüchtlinge wurden im Projektionsbericht 2023 nicht berücksichtigt, in unserem neuen Referenzszenario werden sie es. Das liegt einerseits an inzwischen besser

⁴ Vorläufige Schätzung von Destatis auf Basis der Geburten der ersten drei Quartale.

verfügbaren Daten und andererseits daran, dass die Annahme, dass die allermeisten Flüchtlinge in die Ukraine zurückkehren werden, nicht haltbar erscheint. Nach einer Befragung ukrainischer Flüchtlinge in Deutschland wollen 26% für immer bleiben, 11% für mehrere Jahre, während etwa ein Viertel unentschieden ist (Tagesschau, 15.12.2022). Eine europäische Befragung ergab, dass in Deutschland mit 42% der höchste Anteil der Flüchtlinge bleiben wolle, während 30% in die Ukraine zurückkehren wollen (Business Insider Deutschland, 28.02.2023).

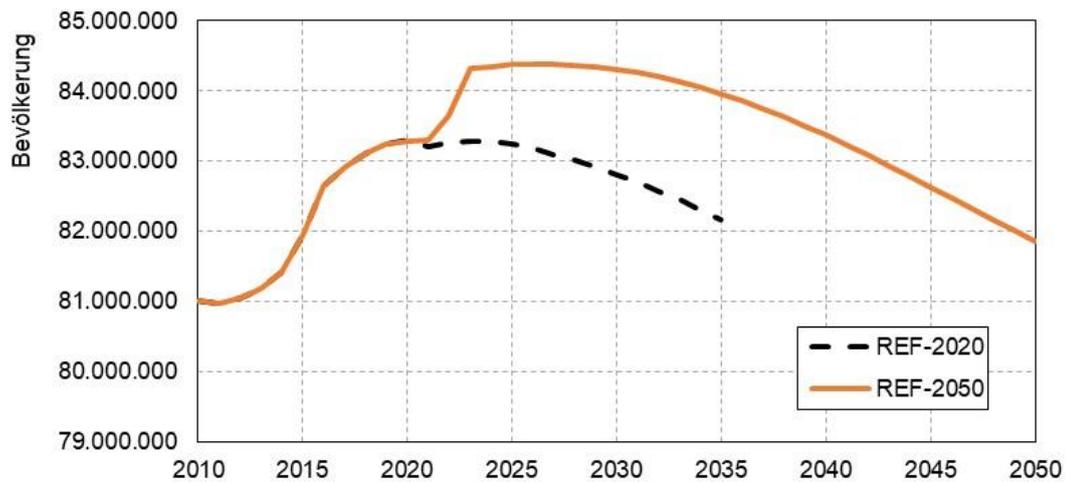
In der Modellierung wurde in Anlehnung an den Projektionsbericht letztlich auf eine Modellierung von Rückkehrern verzichtet. Es bleibt damit eine zusätzliche Einwanderung von ca. 1 Mio. Menschen. Die sonstigen neu verfügbaren Migrationsdaten entsprechen recht genau den zuvor implementierten Prognosen nach Destatis W3-Szenario (DeStatis 2023a).

Insgesamt ergibt sich im Modell eine Bevölkerung von 84,32 zum Jahresanfang 2023 (vgl. ff. Tabelle 2). Dies entspricht genau der Bevölkerungsstatistik zum Ende von 2022. Der Vergleich mit den Prognosen von REF-2020 für 2030 und 2035 zeigt, dass die aktuelle Prognose deutlich höher liegt. Sie ist in diesen Jahren nahe an den Werten des Projektionsberichts (PjB), wobei der Unterschied zu PjB nach 2035 und bis 2050 stetig wächst. Eine auf hohem Niveau bis 2050 stabile Bevölkerungsentwicklung ergibt sich in unserem Modell nicht.

Tabelle 2 Bevölkerungsentwicklung bis 2050

	2022	2023	2030	2035	2040	2045	2050
PjB 2023	83,2		83,5	83,3	83,2		82,7
REF-2020		83,3	82,8	82,2	81,3	80,2	79,1
REF-2050	83,6	84,3	84,3	84,0	83,4	82,6	81,9

Quelle: M-Five, ASTRA-2023; Projektionsbericht 2023.

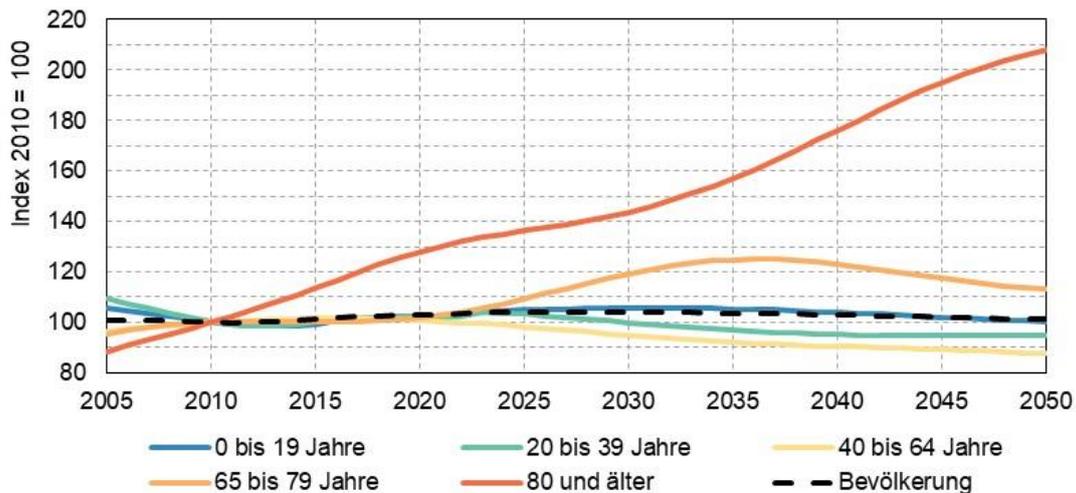


Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 5 Bevölkerungsentwicklung im Vergleich zu REF-2020

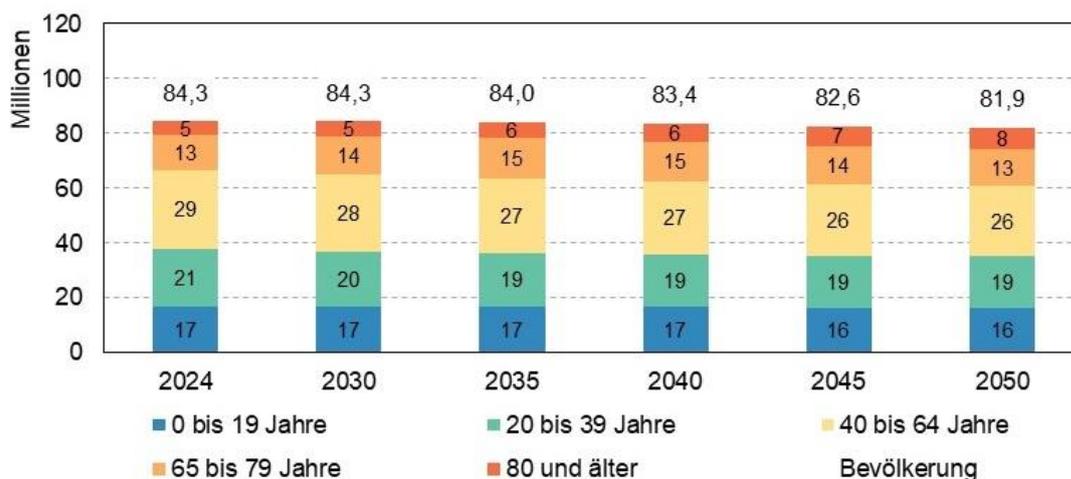
Die Bevölkerung ist durch die neuen Daten und Parameter in der Prognose deutlich größer als in REF-2020. Sie ist mittelfristig auch deutlich stabiler durch die Einwanderung vieler junger Menschen und die etwas höheren Geburtenraten in den 2020er Jahren. Die etwas größere Bevölkerung gegenüber früherer Modellversionen führt zu einer erhöhten Nachfrage im Personenverkehr. Diese führt wiederum zu einem Anstieg von Verkehrsleistung und PKW-Flottengröße.

Über die Zeit führen die sinkenden Sterberaten zu einer Verdopplung der Größe der Altersgruppe über 80 Jahren. Auch die Altersgruppe von 65 bis 79 Jahren nimmt deutlich zu, ab den späten 2030er Jahren aber wieder ab. Dies geschieht im Rahmen einer insgesamt schrumpfenden Bevölkerung. Die Migrationsraten in dieser Altersgruppe sind negativ, da einige Einwanderer im Ruhestand in ihre Heimatländer zurückkehren.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 6 Entwicklung der Altersgruppen der Bevölkerung



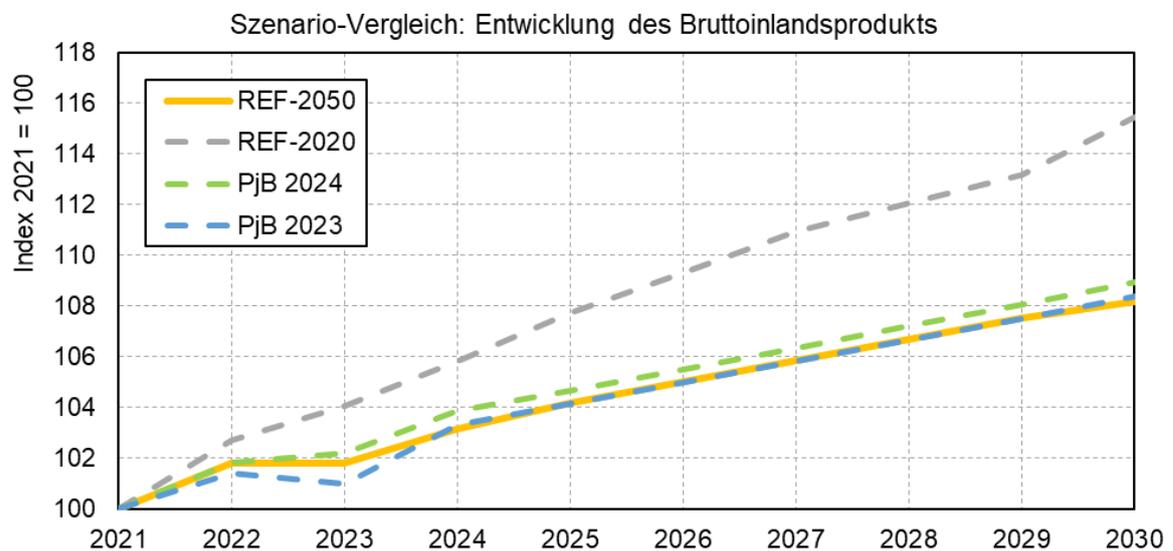
Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 7 Bevölkerung nach Altersgruppen

4.2 Bruttoinlandsprodukt (BIP)

Das BIP-Wachstum wurde für die Jahre 2023 und 2024 an neuere internationale Prognosen angepasst, während die mittel- und langfristigen Prognosen an den Projektionsbericht angeglichen wurden. Im Rahmen von Arbeiten für den Expertenbeirat Klimaschutz in der Mobilität (EKM) wurden die Wachstumsraten Ende 2022 bereits nachjustiert. Diese Anpassungen waren – ähnlich wie der Projektionsbericht – geprägt von der drohenden Energiekrise durch den Lieferstopp von russischem Gas. Die Prognosen gingen daher von einem deutlich negativen Wachstum 2023 und einer deutlichen Erholung 2024 aus. Die Modifikation war daher pessimistischer als REF-2020.

Seit den negativen Wachstumserwartungen Ende 2022 stellte sich heraus, dass die Energiekrise zunächst weniger einschneidend als erwartet war. Die Wachstumsprognosen wurden daher zwischenzeitlich nach oben angepasst – zum Beispiel in der Frühjahrsprojektion der Bundesregierung (BMWK, 2023) auf 0,4% für 2023. Seitdem haben sich die Wachstumsaussichten allerdings wieder eingetrübt und einige Institute erwarten wieder negatives Wachstum in Deutschland 2023. Exemplarisch sei hier die Erwartung des IWF (2023) von -0,3% dargestellt. Der Economic Outlook der OECD (2023) liegt in etwa zwischen Frühjahrsprognose der Bundesregierung und IWF und wurde daher von uns für die Jahre 2023 und 2024 als Orientierung gewählt. Die Wachstumsrate 2025 wurde aufgrund der etwas schwächeren Erholung davor leicht nach oben angepasst. Dahinter steht unsere Annahme, dass die Erholung entsprechend in das Jahr 2025 hineinreichen wird.



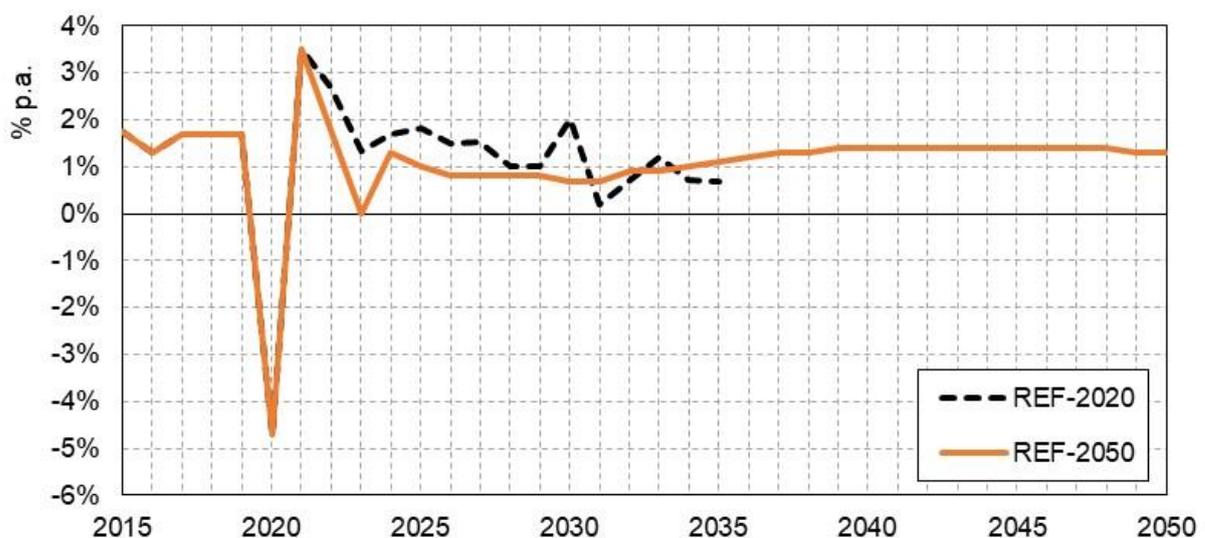
Quelle: verschiedene Quellen, eigene Zusammenstellung, M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 8 Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts, 2021 = 100

Tabelle 3 BIP-Wachstumsraten in Prozent

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2030	2035	2040	2045	2050
PjB 2023	1,4	-0,4	2,3	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,4	1,4	1,3
REF-2020	2,7	1,3	1,7	1,8	1,5	1,5	2,0	0,7	1,4	1,4	1,3
REF-2050	1,8	0,0	1,3	1,0	0,8	0,8	0,7	1,1	1,4	1,4	1,3
Frühj.prog. 2023	1,8	0,4	1,6	0,8	0,8	0,8					
OECD Economic Outlook - Juni 2023	1,9	0,0	1,3								
IWF - Juli 2023	1,8	-0,3	1,3								

Quellen: in erster Spalte angegeben.

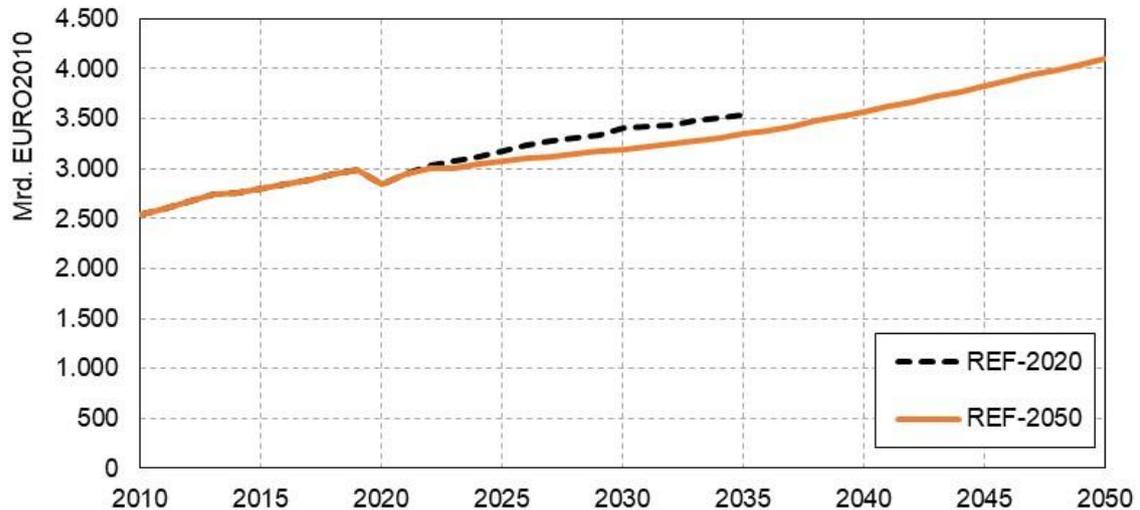


Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 9 Jährliche BIP-Wachstumsraten

Die EU Recommended Parameters sehen für die Zeit nach 2030 ein höheres Trendwachstum vor. Nach den Wachstumsraten unter 1% bis 2030 steigen sie auf 1,1% (2035) und 1,4% (2040 und 2045), bevor sie wieder leicht auf 1,3% zurückgehen (2050). Im Projektionsbericht wurden diese Wachstumsraten übernommen. Sie ähneln auch einer Studie von PwC (2017), die für Deutschland zwischen 2030 und 2050 auf durchschnittliche Wachstumsraten von 1,34% kommt (eigene Berechnung anhand der BIP-Werte der genannten Jahre). Das ist etwas niedriger als in den G7-Nationen insgesamt, die auf einen Durchschnitt von 1,6% kommen. Diese im Vergleich niedrigen Wachstumsraten spiegeln zum Teil eine geringere prognostizierte Bevölkerungsentwicklung für Deutschland als zum Beispiel für Frankreich und Großbritannien wider. Die Prognosen der letzten Jahre

tendieren aber zu einer auf höherem Niveau verharrenden Bevölkerungsentwicklung in Deutschland, so dass Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum nicht mehr ideal aufeinander abgestimmt sind und stärker auseinanderfallen.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

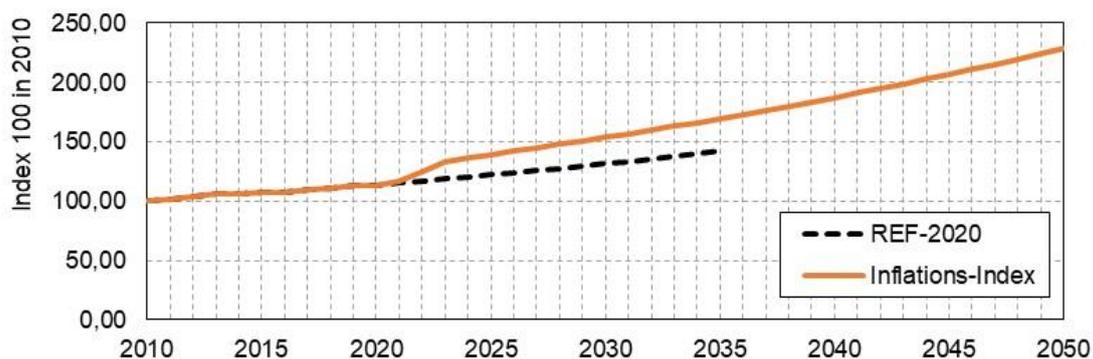
Abbildung 10 Reale BIP-Entwicklung

4.3 Inflationsindex

Monetäre Werte werden in ASTRA preisbereinigt (real) zum Basisjahr 2010 angegeben. Um Unterschiede in der nominalen und realen Preisentwicklung von beispielsweise Energiepreisen und Steuersätzen zu verdeutlichen, werden bei Bedarf auch nominale Werte ausgewiesen. Diese werden dann mit dem im Modell hinterlegten Inflationsindex berechnet. Außerdem können nominal Eingangsgrößen (z.B. Fördersummen) anhand des Inflationsindex in reale Werte zur Nutzung in ASTRA-M umgerechnet werden.

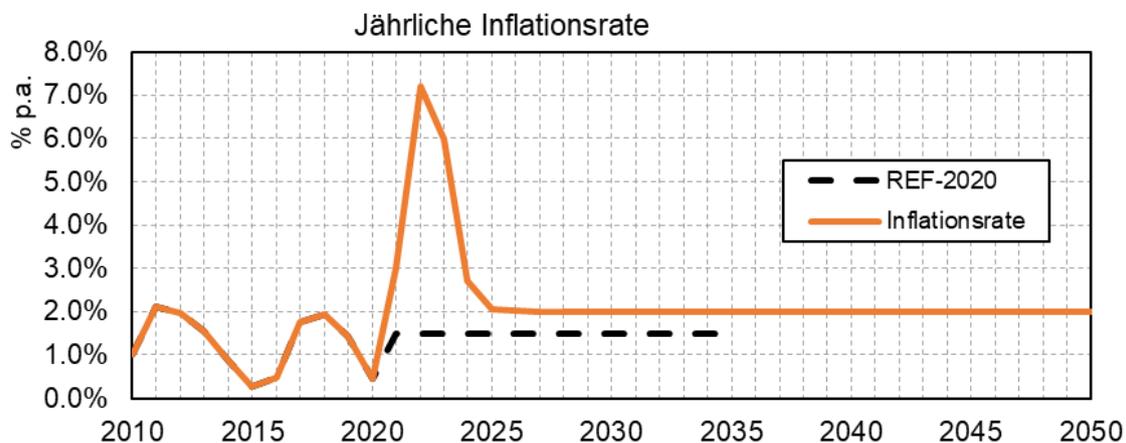
Die historischen Inflations-Daten stammen aus Destatis (2023) und wurden bis 2022 verlängert. Für die vergangenen Jahre 2021 und insbesondere 2022 ist ein starker Anstieg der Inflationsrate zu beobachten, auch getrieben durch den Anstieg der Energiepreise. Es wird angenommen, dass die Inflationsrate in den folgenden Jahren abnimmt und sich ab dem Jahr 2027 langfristig auf ca. 2,0% pro Jahr einpendelt. Die prognostizierte Entwicklung für die Jahre 2023 und 2024 ist angelehnt an die Frühjahrsprojektion 2023 des BMWK und beträgt 5,9% im Jahr 2023 und 2,7% in 2024 (BMWK 2023). Die langfristige Prognose der jährlichen Inflationsrate wurde von 1,5% auf 2,0% erhöht und bis 2050 verlängert.

Der Anstieg der Inflation führt zu real deutlich sinkenden (Energie-)Steuersätzen, da diese als konstante, nominale Aufschläge festgelegt sind. Somit reduziert sich deren Lenkungswirkung, was zu Mehr-Emissionen im Verkehrssektor führt. Die folgende Abbildung 11 zeigt die Entwicklung des Inflationsindex mit Basis 2010 = 100. Abbildung 12 zeigt die Entwicklung der jährlichen Inflationsrate.



Quelle: M-Five, Destatis, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 11 Entwicklung des Inflationsindex bis 2050 mit Basis 2010



Quelle: M-Five, Destatis, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

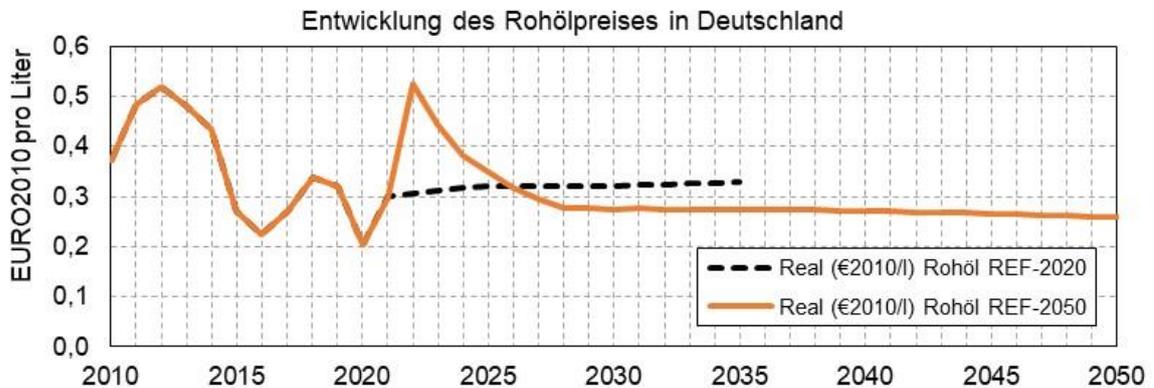
Abbildung 12 Jährliche Inflationsrate

4.4 Kraftstoffpreise

4.4.1 Flüssige Kraftstoffe

Die historischen Daten für Rohöl stammen aus BAFA (2021a) und wurden bis 2022 verlängert. Im Jahr 2020 sieht man einen deutlichen Rückgang der Preise, ausgelöst durch die weltweite Covid-19-Pandemie und der damit verbundenen Reduktion in der Nachfrage. In den beiden darauffolgenden Jahren steigen die Preise für Rohöl wieder deutlich an. Zuerst unter anderem aufgrund von Nachholeffekten, gegen Ende des Jahres 2021 auch aufgrund knapper Vorräte an Energierohstoffen und einer sich anbahnenden Energiekrise. Im Jahr 2022 steigen die Ölpreise durch den Beginn des Angriffskrieges der Russischen Föderation auf die Ukraine enorm an. Dies schlägt sich auch in steigenden Kraftstoffpreisen nieder.

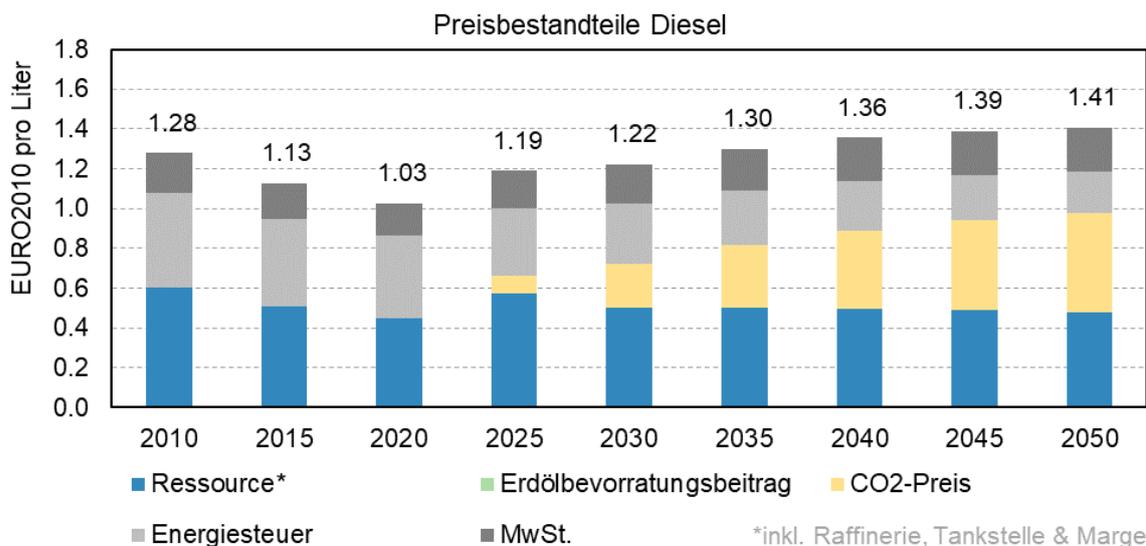
Für die Jahre 2023-2028 wird ein Absinken der Preise erwartet. Die langfristige Prognose basiert, angelehnt an den Projektionsbericht 2023, auf real konstanten bis leicht sinkenden Preisen bis 2050. Die folgende Abbildung 13 zeigt die Entwicklung des Rohölpreises bis 2050.



Quelle: BAFA; M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 13 Entwicklung des Rohölpreises

Die dominanten Kraftstoffe im Verkehr sind aktuell Diesel und Benzin. Die Preise der beiden Kraftstoffe setzen sich dabei zusammen aus: (1) dem Ressourcenpreis, inklusive Aufschlägen für Raffinerie, Tankstelle und Marge, (2) dem Erdölbevorratungsbeitrag, (3) der Energiesteuer, (4) dem CO₂-Preis, der ab 2021 erhoben wird, und (5) dem Mehrwertsteuersatz, wobei der Erdölbevorratungsbeitrag aufgrund seiner geringen Größe vernachlässigbar ist. Abbildung 14 und Abbildung 15 weisen die einzelnen Preisbestandteile für Diesel und Benzin sowie deren Entwicklung im Zeitverlauf aus.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 14 Entwicklung der Diesel-Preisbestandteile

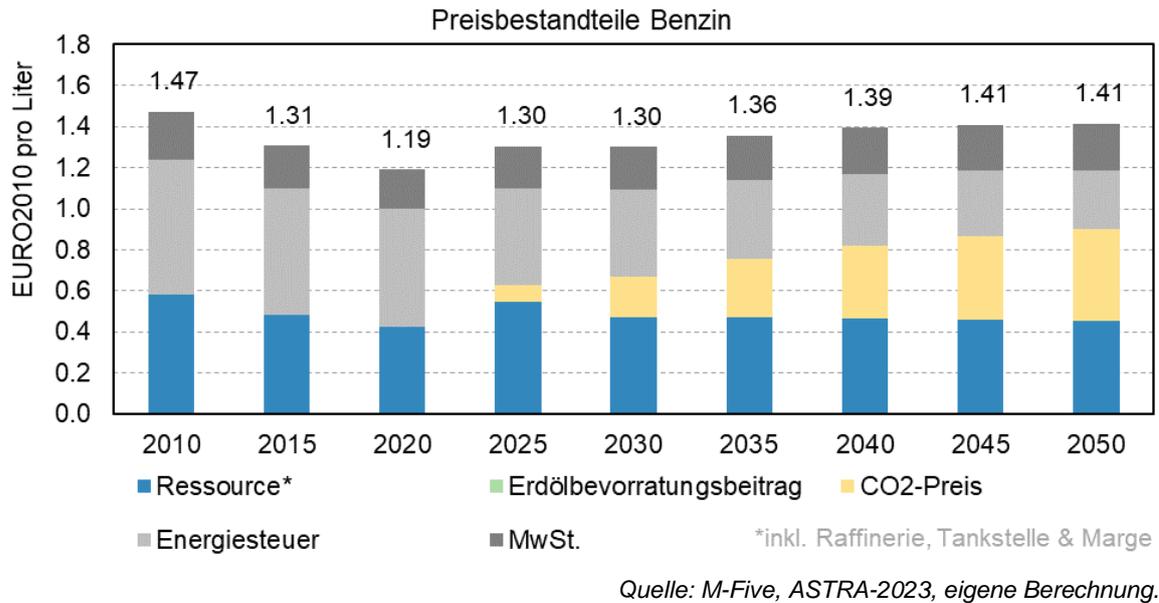


Abbildung 15 Entwicklung der Benzin-Preisbestandteile

Bei der Darstellung der Entwicklung einzelner Preisbestandteile in realen Preisen wird die Reduktion der Wirkung der Energiesteuersätze im Zeitverlauf verdeutlicht. Während die nominalen Energiesteuersätze für Diesel und Benzin seit 2003 konstant bleiben, sind sie real deutlich gesunken. Dies führt auch dazu, dass trotz steigendem CO₂-Preis der Gesamtpreis weniger stark ansteigt und so einen Teil der Lenkungswirkung des CO₂-Preises dämpft. Ein Vergleich der Entwicklung von realen und nominalen Preisen für Diesel und Benzin ist in Abbildung 16 dargestellt.

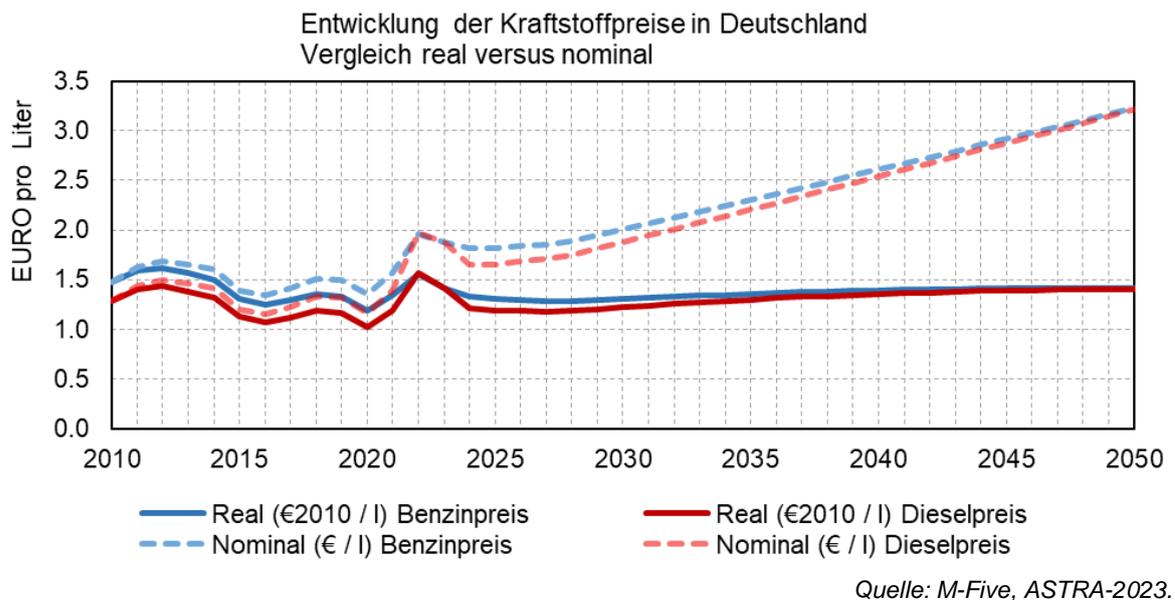


Abbildung 16 Entwicklung der Kraftstoffpreise Diesel und Benzin im Vergleich

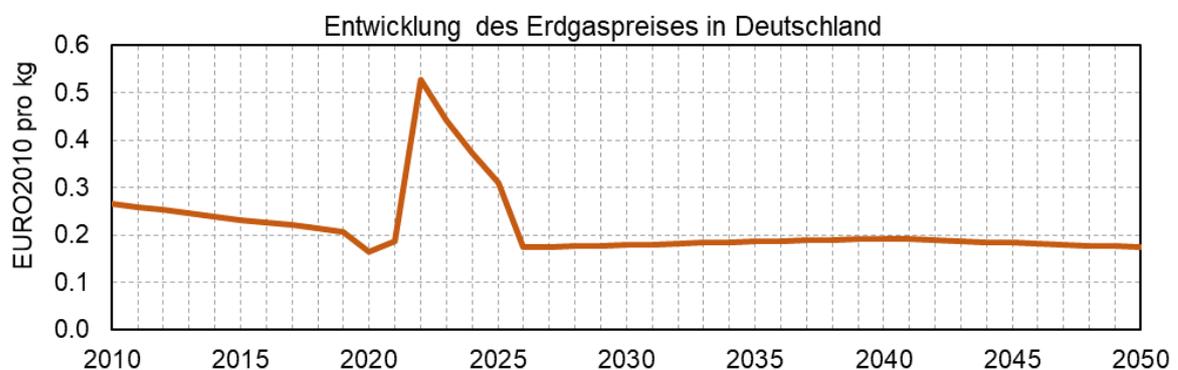
In REF-2050, und damit ohne weitere Maßnahmen, werden strombasierte Kraftstoffe nicht im territorialen Verkehr eingesetzt. Es wurden aber Analysen durchgeführt, welche Preise im Jahr 2030 zu erwarten sind. Dabei wurden die folgenden drei Optionen unterschieden (inkl. MwSt.):

- PtL-Import (eDiesel, eKerosin) pessimistisch 2030: 20,89 ct₂₀₁₀/kWh
- PtL-Import (eDiesel, eKerosin) optimistisch 2030: 15,39 ct₂₀₁₀/kWh
- PtL nationale Herstellung 2030: 29,10 ct₂₀₁₀/kWh.

Es ergibt sich selbst für den optimistischen Importpfad ein Dieselpreis von 1,49 €₂₀₁₀/l, der damit noch über dem realen Preis des fossilen Pendantes inklusive CO₂-Preis liegt.

4.4.2 Gasförmige Kraftstoffe

Die historischen Daten für Erdgas stammen aus BAFA (2021b) und wurden bis 2022 verlängert. Im Jahr 2020 sieht man einen Rückgang der Preise, ausgelöst durch die weltweite Covid-19-Pandemie und der damit verbundenen Reduktion in der Nachfrage. In den beiden darauffolgenden Jahren steigen die Preise für Erdgas, analog der Entwicklung des Rohöls, aufgrund der sich entwickelnden Energiekrise deutlich an. Ein Absinken der Preise auf Ausgangsniveau wird für Erdgas bereits ab 2026 erwartet. Die langfristige Prognose ist angelehnt an den Projektionsbericht 2023 und geht von real konstanten Preisen bis 2050 aus. Die folgende Abbildung 17 zeigt die Entwicklung des Erdgaspreises bis 2050.



Quelle: M-Five, BAFA, ASTRA-2023.

Abbildung 17 Entwicklung des Erdgaspreises

Erdgas, Compressed Natural Gas (CNG), wird als alternativer Kraftstoff im Verkehr eingesetzt und an Tankstellen in Kilogramm verkauft. Der CNG-Preis setzt sich zusammen aus: (1) dem Ressourcenpreis, inklusive Aufschlägen für Tankstelle und Marge, (2) dem Netzentgelt, (3) der Konzessionsabgabe, (4) der Energiesteuer, (5) dem CO₂-Preis, der ab 2021 erhoben wird, und (6) dem Mehrwertsteuersatz. Die Energiesteuer auf Erdgas ist bis einschließlich 2026 reduziert, wird aber bereits ab 2024 schrittweise auf das Endniveau von 0,42 €/kg angehoben (nach EnergieStG). Abbildung 18 weist die einzelnen Preisbestandteile für CNG sowie deren Entwicklung im Zeitverlauf aus. Ein Vergleich der Entwicklung von realen und nominalen Preisen für CNG ist in Abbildung 19 dargestellt.

Verflüssigtes Erdgas, Liquefied Natural Gas (LNG), ist ein weiterer, im Verkehr eingesetzter, gasförmiger Kraftstoff. Hier liegen die Kosten ca. 8% über den Kosten von CNG.

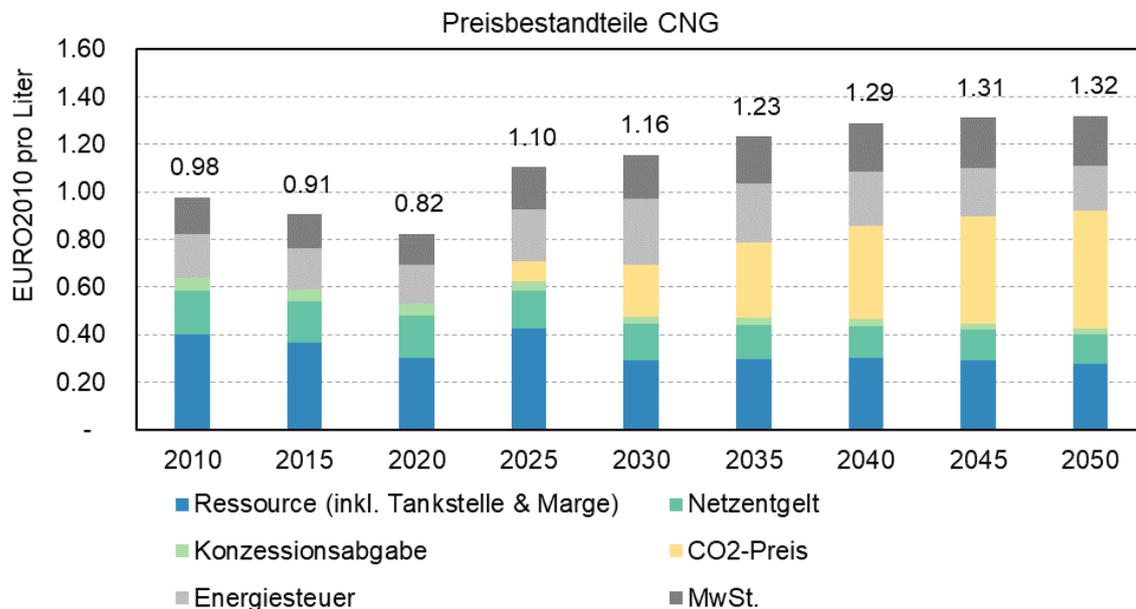


Abbildung 18 Entwicklung der CNG-Preisbestandteile

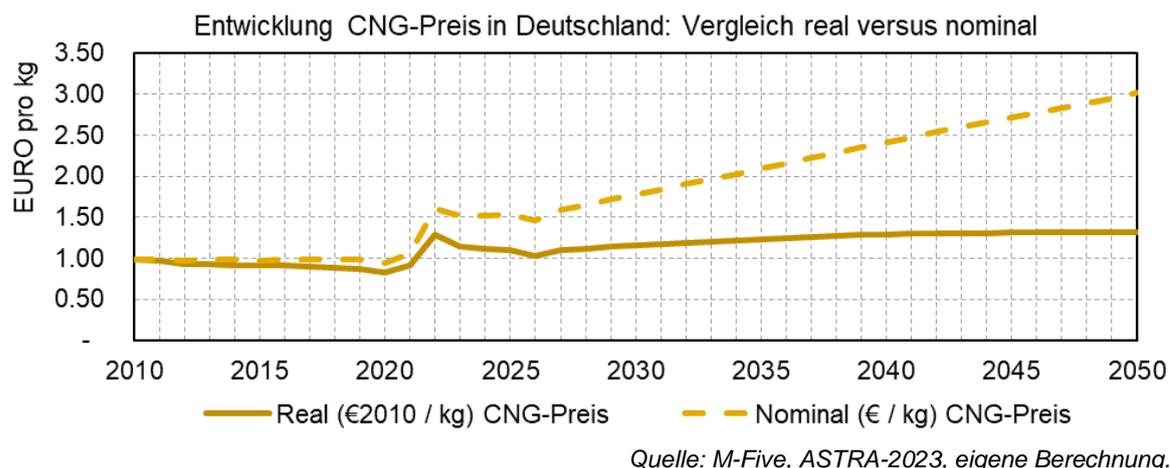


Abbildung 19 Entwicklung des CNG-Preises

4.4.3 EEG-Umlage

In der Vergangenheit gingen verschiedene Studien von einer sukzessiven Absenkung der EEG-Umlage, bis hin zu deren Entfall bis 2030 aus. Im Jahr 2020 lag sie bei 6,76 ct/kWh für private Haushalte und gewerbliche bzw. industrielle Kleinverbraucher. Im Jahr 2021 wäre sie aufgrund der Pandemie-bedingten niedrigen Strompreise um über 40% auf 9,65

ct/kWh gestiegen.⁵ Im Klimaschutzprogramm (KSP) hat die Bundesregierung aber eine Deckelung für 2021 auf 6,5 ct/kWh und für 2022 auf 6 ct/kWh beschlossen. Mit dem „Gesetz zur Absenkung der Kostenbelastung durch die EEG-Umlage und zur Weitergabe dieser Absenkung an die Letztverbraucher“ wurde die Zahlung der EEG-Umlage ab Juli 2022 ausgesetzt und schließlich ab 2023 formell und dauerhaft abgeschafft. Anlass für die vorzeitige Abschaffung waren die in Folge des Russland-Ukraine-Krieges gestiegenen Energiepreise und die als Gegenmaßnahme beschlossenen Entlastungspakete. Die zugesicherte Vergütung der EEG-Umlage für geförderte Anlagen erfolgt seither über den Haushalt bzw. den Klima- und Transformation-Fonds (KTF).

4.5 Strompreise

Die Strompreise werden in ASTRA nach Haushaltsstrompreis, Industriestrompreis und Großverbraucherstrompreis unterschieden. Es hat sich gezeigt, dass neben den Haushaltsstrompreisen für private PKW-Nutzung für den zukünftigen Verkehr sowohl der Strompreis an der Mittelspannung von Bedeutung ist (z.B. als Ladestrom von elektrifizierten SNF) als auch der Strompreis an der Hochspannung bzw. zur direkten Nutzung durch Großverbraucher (z.B. von Elektrolyseuren bei der H₂-Herstellung oder in Lade-Hubs mit LKW-Megawatt Ladestationen). Da die Entwicklung der einzelnen Strompreisbestandteile eine wichtige Rolle spielt und Gegenstand politischer Diskussion ist, sind diese in der Modellierung alle separat abgebildet und können individuell angepasst werden.

4.5.1 Haushaltsstrompreis

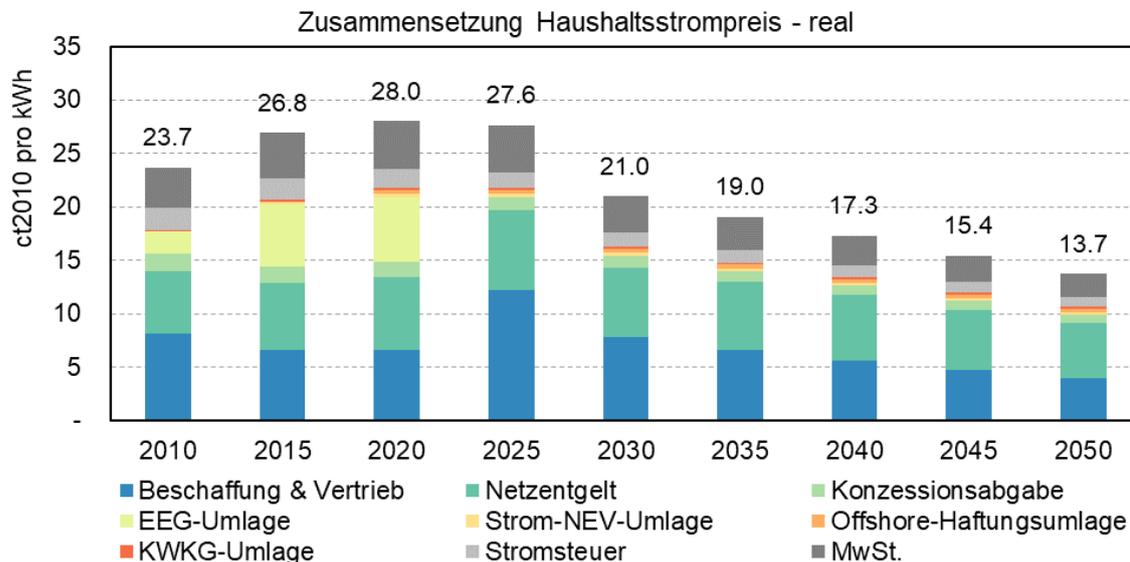
Mit einer zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeugflotten steigt auch die Bedeutung des Haushaltsstrompreises im Verkehr. PKW, die zu Hause geladen werden, kleine gewerbliche Nutzer und viele Ladestationen am Arbeitsplatz laden zu diesen Strompreisen.

Die historischen Daten stammen aus BDEW (2022) und wurden bis 2022 verlängert. Die Fortschreibung basiert auf in der NPM AG1 abgestimmten Entwicklungen bis 2030 (NPM, 2020). Die EEG-Umlage stellte bisher einen zentralen Kostenblock dar, wurde aber, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, aufgrund des starken Anstiegs der Strompreise Mitte 2022 abgeschafft. Der starke Anstieg des Bestandteils „Beschaffung und Vertrieb“, insbesondere in 2022, überkompensiert jedoch den Entfall der EEG-Umlage und führt zu steigenden Strompreisen. Im Zeitraum von 2024 bis 2026 werden sinkende Strompreise für Haushalte erwartet. Langfristig wird mit real leicht sinkenden Strompreisen für Haushalte, und damit real sinkenden Energiekosten für BEV, die in Haushalten laden, gerechnet.

Der Haushaltsstrompreis setzt sich zusammen aus: (1) dem Preis für Beschaffung und Vertrieb, (2) dem Netzentgelt, (3) der Konzessionsabgabe, (4) der EEG-Umlage, (5) der

⁵ Die Höhe der EEG-Umlage wird stark durch die Differenz zwischen dem Strommarktpreis (Börse Leipzig) und den garantierten Vergütungssätzen für EE-Anlagen bestimmt. Ein niedriger Strommarktpreis bedeutet eine hohe EEG-Umlage, ein hoher Strommarktpreis führt zu einer niedrigen EEG-Umlage. 2020 und 2021 sind zwei sehr konträre Jahre, mit 2020 und dem sehr niedrigen Marktpreis, sowie 2021 und dem durch hohe Rohstoffpreise (insb. Gas) angetriebenen hohen Marktpreis von Strom.

Strom-NEV-Umlage, (6) der Offshore-Haftungsumlage, (7) der KWKG-Umlage, (8) der Stromsteuer und (9) dem Mehrwertsteuersatz. Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Preisbestandteile im Zeitverlauf.

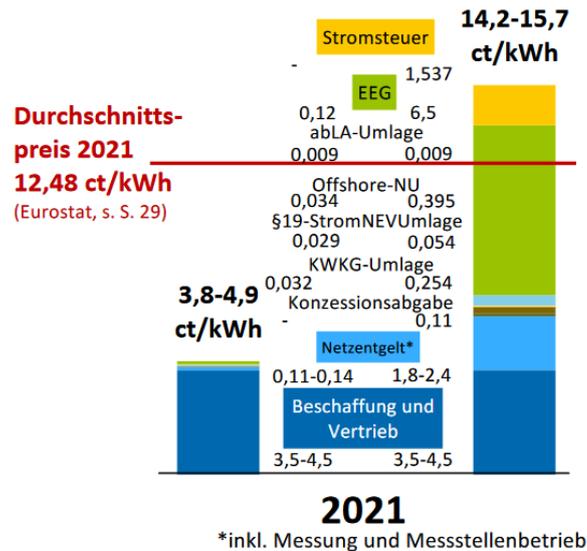


Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 20 Entwicklung der Preisbestandteile von Haushaltsstrom

4.5.2 Industriestrompreis und Großverbraucher im Verkehr

Industrielle Stromnutzer können bei den meisten Umlagen auf Strom reduzierte Sätze bis hin zum vollständigen Entfall in Anspruch nehmen. Dabei unterscheiden sich die Preise für kleinere Industriebetriebe, die an die Mittelspannung angeschlossen sind, von größeren Industriebetrieben, die entweder an die Mittel- oder die Hochspannung angeschlossen sein können. Neben der Anschlussleistung hängt der tatsächliche Strompreis auch von der Höhe der Stromnachfrage ab, der Steuerbarkeit bzw. Netzdienlichkeit und weiteren Faktoren. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW 2022) zeigt auf, dass die Preise für Großverbraucher im Jahr 2021 dadurch zwischen 3,8 ct/kWh und 15,7 ct/kWh liegen konnten (siehe Abbildung 21).



Quelle: BDEW (2022).

Abbildung 21 Varianz der Industriestrompreise für Großverbraucher im Jahr 2020

In ASTRA-M werden industrielle Strompreise für den Anschluss an die Mittelspannung von mittleren bis großen Verbrauchern bestimmt, ferner für Großverbraucher, die an die Hochspannung angeschlossen sind. Bisher wird für elektrifizierte SNF unterstellt, dass diese an der Mittelspannung laden. Zukünftig wäre aber auch denkbar, dass in großen Ladeparks geladen wird, bei großen Industriebetrieben mit niedrigeren Preisen oder die Oberleitung für OH-LKW mit niedrigeren Preisen angeschlossen ist.

Der Großverbraucher-Strompreis setzt sich dabei zusammen aus: (1) dem Preis für Beschaffung und Vertrieb, (2) dem Netzentgelt, (3) der EEG-Umlage, (4) weiteren Umlagen und (5) der Stromsteuer. Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der Preisbestandteile im Zeitverlauf. Die Struktur der Strompreise für Großverbraucher zeigt, dass auch sie in den letzten Jahren von dem Anstieg der EEG-Umlage betroffen waren, auch wenn sie diese nur in Teilen tragen mussten. Dementsprechend profitieren sie ebenfalls von deren Abschaffung.

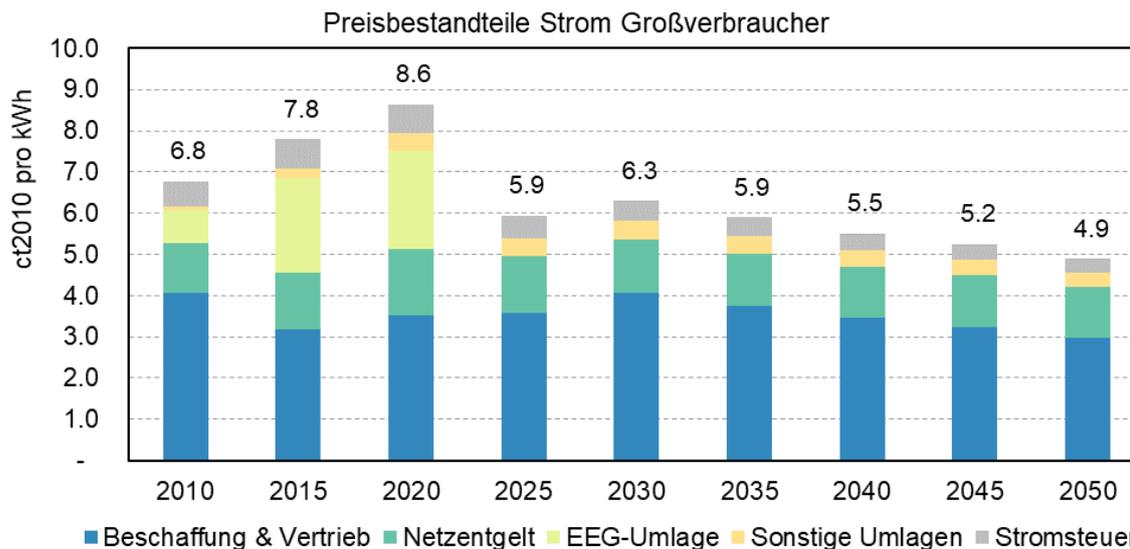


Abbildung 22 Entwicklung der Preisbestandteile des Großverbraucherstroms

Abbildung 23 stellt die reale und nominale Preisentwicklung der Stromkosten für Haushalt, Industrie und Großverbrauch im Zeitverlauf dar. Während alle Tarife einen starken Preisanstieg im Jahr 2022 zeigen, werden für die langfristige Entwicklung real leicht sinkende, nominal konstante Preise angenommen.

Sollten BEV-SNF in begünstigten Industrieanlagen laden können oder das Oberleitungssystem für OH-LKW als Großverbraucher ausgerollt werden, dann könnte der Strompreis deutlich sinken. Wir gehen für REF-2050 davon aus, dass Oberleitungs-LKW oder -Busse mit Industriestrom fahren, d.h. Industriestrompreise bei Abnahme aus dem Mittelspannungsnetz bezahlen werden. Die Bahn als Großabnehmer und teilweise mit Produktion von Strom in eigenen Kraftwerken wird mit einem Preis von 1-2 ct/kWh unter diesem Industriestrompreis veranschlagt.

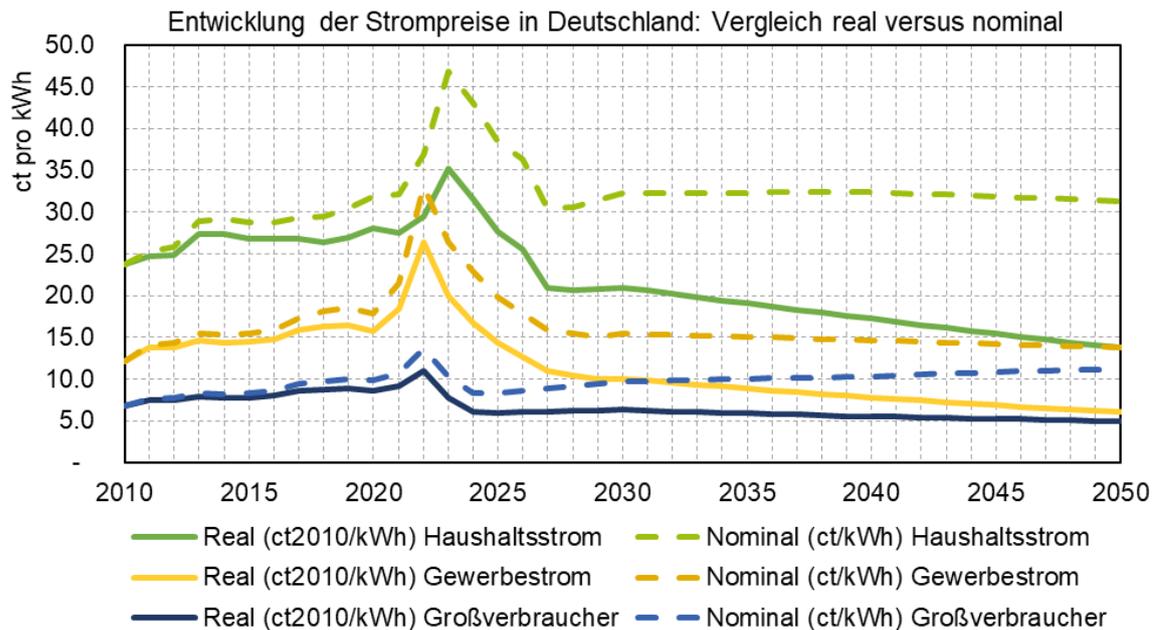


Abbildung 23 Entwicklung der Strompreise Haushalt, Gewerbe und Großverbrauch im Vergleich

4.6 Wasserstoffpreise

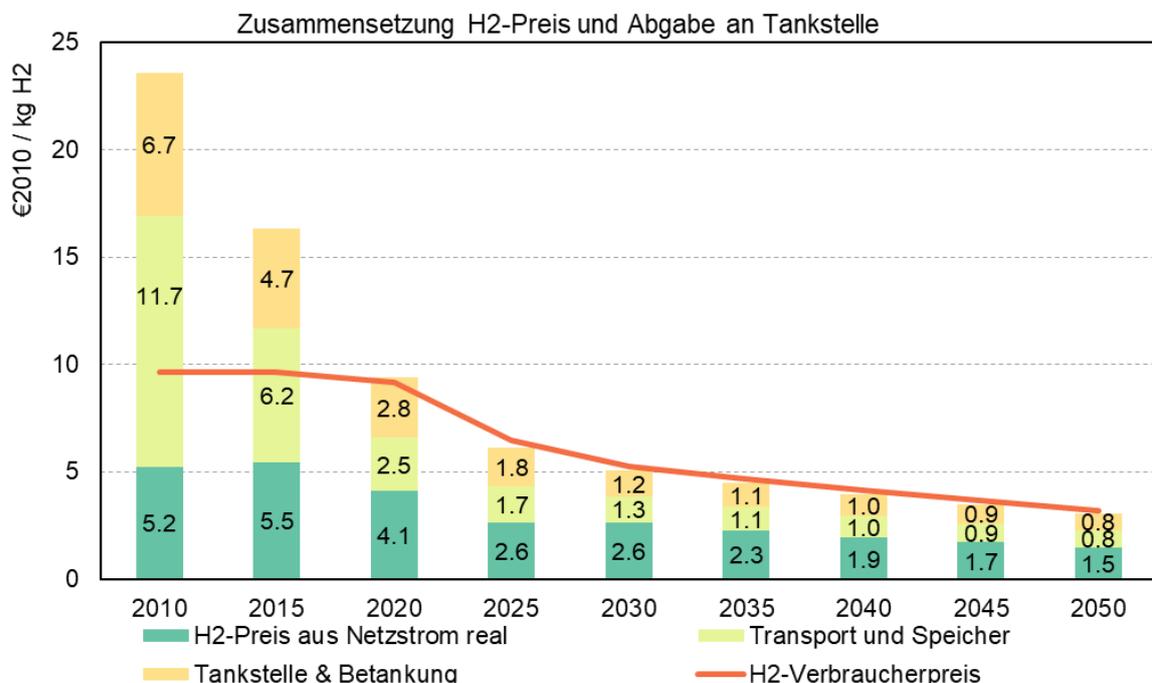
Wasserstoff hat bisher noch keinen liquiden Markt in der Mobilitätswirtschaft und deshalb keinen Marktpreis. Es liegt eine große Unsicherheit zu zukünftigen Preisentwicklungen vor, da Produktionskosten im In- und Ausland berücksichtigt werden müssen, ebenso wie anfallende Transport- und Infrastrukturkosten, sowie steigende Preise aufgrund begrenzter Verfügbarkeiten. Erst wenn die Zahl an Fahrzeugen und Tankstellen signifikant zunimmt und die Abgabemenge steigt, wird sich ein realer Preis herausbilden. Dieser ist u.a. abhängig von der Gestaltung des Steuer- und Abgabenregimes sowie der Marktgröße. Die Herstellungs-, Konditionierungs- sowie die Transport- und Verteiloptionen von Wasserstoff sind vielfältig. H₂-Mobility, der Betreiber von Wasserstofftankstellen in Deutschland, hat im Jahr 2022, nach zehn Jahren, eine erste Preiserhöhung von 9,50 €/kg auf 12,85 €/kg durchgeführt. Im Jahr 2023 liegt der Preis bei 13,85 €/kg (H₂-Mobility 2023).

Der Preis für Wasserstoff, aufbereitet zur unmittelbaren Nutzung, wurde in der MKS aus drei Komponenten zusammengestellt: Gesteungskosten, Tankstellenkosten und Kosten für Transport und Speicherung. Solange die nachgefragte Wasserstoff-Menge einen Elektrolyseur so auslastet, dass er rund 3 000 Volllaststunden erreicht, kann als Strompreis 57 €/MWh angenommen werden. Dies ist der niedrigste Strompreis aus dem Klimaschutzszenario (ÖKO/ISI, 2017). Bei maximal 3 000 Volllaststunden im Jahr existieren genügend Zeitpuffer, um die Elektrolyse dann durchzuführen, wenn der Strompreis niedrig liegt. Somit ergeben sich reale Produktionskosten im Jahr 2030 von 12,5 ct/kWh (siehe z.B. auch Smolinka et al., 2011).

Die Tankstellenkosten werden durch die Investitionskosten einer Tankstelle bestimmt und hängen von der sich im Bestand befindlichen Anzahl von H₂-Brennstoffzellen-Fahrzeugen ab. Bei 7-stelligen Bestandszahlen schätzen Robinius et al. (2018) diese auf ca. 5 ct/kWh. Die Kosten für Transport und Speicherung des Wasserstoffes wurden mit ca. 4 ct/kWh angenommen. Hierbei wurde unterstellt, dass der Wasserstoff per Pipeline transportierbar ist und daher trotz Zusatzkosten für die Komprimierung weniger kostenintensiv ausfällt (Robinius et al., 2018).

Somit ergibt sich für national produzierten H₂ ein Gesamtpreis von nominal 28 ct/kWh für das Jahr 2030 bzw. 33 ct/kWh inklusive MwSt. Umgerechnet auf reale Preise auf Basis Euro 2010 betragen die Gesamtkosten 25 ct/kWh für das Jahr 2030. Die Energie-Besteuerung ist weiterhin mit Nullkosten angesetzt und führt damit die heutige Befreiung von Wasserstoff zur Nutzung in der Mobilität fort. Die Darstellung des BDEW zeigt, dass aber auch deutlich niedrigere Strompreise in Deutschland in der Größenordnung von 5 ct/kWh möglich sind (siehe Abbildung 21), mit denen die H₂-Erzeugung in großem Maßstab kostengünstiger als bisher in REF-2020 erfolgen könnte. Der Preispfad für H₂ in REF-2050 berücksichtigt diese Option.

Abbildung 24 zeigt die Struktur des H₂-Preises und den Verbraucherpreispfad. Der H₂-Preis wird aus der Erzeugung durch Elektrolyse, dem Transport und der Speicherung sowie den Kosten der Betankung zusammengesetzt. Bei allen drei Komponenten können starke Kostensenkungen erzielt werden. Die Daten dazu stammen aus der NPM (NPM, 2020) bzw. aus einer Systemanalyse (Robinius et al., 2018).



Quelle: M-Five, ASTRA-2023; NPM (2020); eigene Berechnung.

Abbildung 24 Entwicklung des Wasserstoffpreises in der Mobilität

4.7 Anteil Biokraftstoffe und Preiseffekte

Der Einsatz von Biokraftstoffen geht aus den regulatorischen Rahmenbedingungen hervor. Auf europäischer Ebene ist dieser Rahmen durch die Renewable Energy Directive (auch „RED II“) gegeben, die auch für die nationale Gesetzgebung die Mindestanforderungen festlegt. National werden die zu erreichenden Vorgaben für den Verkehr im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BlmSchG) sowie in den zugehörigen Verordnungen (36. bis 38. BlmSchV) bestimmt. Die jeweils gültigen Fassungen, die für das REF-2050 mit dem Abschneidedatum 31.08.2022 berücksichtigt werden (nachfolgend „BlmSchG/V“ genannt), sind dabei:

- BlmSchG (Letzte Änderung: 08.07.2022),
- 36. BlmSchV (Letzte Änderung: 12.11.2021)
- 37. BlmSchV (Letzte Änderung: 21.12.2020),
- 38. BlmSchV (Letzte Änderung: 12.11.2021).

Kraftstoff-Inverkehrbringer müssen gegenüber einer fossilen Referenz eine THG-Minderung erreichen, die über die THG-Minderungsquote vorgegeben wird. Dies kann beispielsweise über den Einsatz von Bio-Reinkraftstoffen geschehen, die in Deutschland aber nur eine untergeordnete Rolle spielen, oder über die Beimischung von Biokraftstoffen zu fossilem Kraftstoff. Während die THG-Minderungsquote das allgemeine Minderungsniveau vorgibt, macht das BlmSchG/V auch Vorgaben bezüglich der energetischen Mengen beim energetischen Einsatz bestimmter Kraftstoffe.⁶ Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der zu berücksichtigenden energetischen Ober- und Unterquoten bzw. Anrechnungsgrenzen für Kraftstoffe aus bestimmten Rohstoffen bzw. Erfüllungsoptionen⁷ sowie die insgesamt zu erreichende THG-Minderungsquote für die Jahre 2022, 2025 und 2030.

⁶ *Energetischer Einsatz* meint den Einsatz der Kraftstoffe zur Energieerzeugung im Verkehr. *Energetische Menge* bestimmt die in Energieeinheiten (z.B. PJ, GWh) gemessene Menge an Kraftstoffen. Aus den energetischen Mengen werden die nach BlmSchG/V vorgeschriebenen Anteile (d.h. Ober- und Unterquoten) an alternativen Kraftstoffen gegenüber der gesamten im Verkehr eingesetzten energetischen Menge berechnet.

⁷ *Erfüllungsoptionen* sind die Arten von alternativen Kraftstoffen oder Strom, die zur Erfüllung der THG-Quote und der darin enthaltenen Ober- und Unterquoten eingesetzt werden können bzw. müssen.

Tabelle 4 Übersicht über die energetischen Ober- bzw. Unterquoten und Anrechnungsgrenzen für Erfüllungsoptionen nach BlmSchG/V sowie insgesamt zu erreichende THG-Minderungsquote für die Jahre 2022, 2025 und 2030

Angaben in %	2022	2025	2030
Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln ^{a,c}	4,4	4,4	4,4
Biokraftstoffe nach RED II Annex IX Teil A ^{b,c}	0,2	0,7	2,6
Biokraftstoffe nach RED II Annex IX Teil B ^{a,c}	1,9	1,9	1,9
Anrechnungsgrenze für Strom in Straßenfahrzeugen (in PJ)	5	19	88
Upstream-Emissionsminderungen (UER) ^d	1,2	1,2	-
Insgesamt zu erreichende THG-Minderungsquote	8,0	10,5	25

^a Oberquote ^b Unterquote ^c Bezugsgröße: Endenergieverbrauch im Straßen- und Schienenverkehr
^d Anrechenbar bis zum Jahr 2026 bis maximal 1,2 % der Referenzemissionen des jeweiligen Jahres

Das BlmSchG/V erlaubt es Verpflichteten, bei der Berechnung der THG-Minderungsquote Mehrfachanrechnungen der energetischen Mengen alternativer Kraftstoffe zu nutzen. Diese Mehrfachanrechnungen ermöglichen es, entsprechend dem Anrechnungsfaktor tatsächlich eingesetzte Mengen mehrfach zu bilanzieren. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die geltenden Anrechnungsfaktoren im BlmSchG/V.

Tabelle 5 Übersicht über die Erfüllungsoptionen nach BImSchG/V sowie über die definierten Anrechnungsfaktoren für die unterschiedlichen erneuerbaren Kraftstoffe und Energieträger bei der Berechnung der THG-Minderungsquote

Kraftstoff/Energieträger	Anrechnungsfaktor
Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln	1
Biokraftstoffe nach RED II Annex IX Teil A ^a	1 / 2
Biokraftstoffe nach RED II Annex IX Teil B	1
Strom in Straßenfahrzeugen	3
Wasserstoff in Straßenfahrzeugen / RFNBOs ^b	2
Wasserstoff in Raffinerien	2
Biogener Wasserstoff in Straßenfahrzeugen ^c	2
^a Einfachanrechnung für Mengen, die zur Erfüllung der Unterquote notwendig sind; darüberhinausgehende Mengen können mit dem Zweifachen des Energiegehaltes angerechnet werden	
^b Strombasierte Kraftstoffe und Energieträger (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, z. B. Wasserstoff und Folgeprodukte)	
^c Nur anrechenbar mit Ausgangsrohstoffen nach RED II Anhang IX Teil A	

Das BImSchG/V erlaubt darüber hinaus die Nutzung von Strom in Straßenfahrzeugen als Erfüllungsoption, setzt aber auch Grenzen für die Anrechenbarkeit. Zwar können Verpflichtete über diese Grenzen hinaus Strom als Erfüllungsoption nutzen, dies löst jedoch einen Anpassungsmechanismus aus. Dieser Mechanismus erhöht die THG-Minderungsquote des Verpflichteten in Folge einer Überschreitung der Anrechnungsgrenze ab dem übernächsten Erfüllungsjahr nach Überschreitung um das 0,5 bis 1,5-fache der THG-Minderung des zusätzlich eingebrachten Stroms (gilt für alle folgenden Verpflichtungsjahre). Nachfolgend wird eine Erhöhung der THG-Minderungsquote um das 1,0-fache der durch die zusätzliche Strommenge im Verkehr erbrachte THG-Minderung unterstellt.

Während öffentlich geladene Strommengen zu 100 % anrechenbar sind, können nicht-öffentlich getankte Lademengen nur über einen veröffentlichten Pauschalwert geltend gemacht werden. Für schwere Nutzfahrzeuge wurde bis zum Abschneidedatum noch kein Schätz- bzw. Pauschalwert veröffentlicht. Es wird daher angenommen, dass diese zu 100 % berücksichtigt werden können. Würden diese Mengen nicht berücksichtigt werden, so würde die von schweren Nutzfahrzeugen genutzte Energie (hier in Form von Strom) nicht mehr im Verkehrssektor bilanziert werden können und nach den Mechanismen der BImSchG/V zusätzlich zu einer weiteren „Einsparung“ an Endenergie führen (da die

Strommengen in der Bilanzierung wegfallen würden). Tabelle 6 zeigt die berücksichtigten Pauschalwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge.

Tabelle 6 Anrechenbare Pauschalwerte für nicht-öffentliche Ladepunkte

Rein batterieelektrische Fahrzeuge nach Fahrzeugart	Pauschalwerte
Pkw	2 000 kWh
Leichte Nutzfahrzeuge (N1)	3 000 kWh
Busse (M3)	72 000 kWh

Zum Stichtag des REF-2050 (31.08.2022) existiert noch keine Regulierung im BImSchG/V, die über den Zeitraum 2020 bis 2030 hinaus Vorgaben macht. Für den Zeitraum 2030 bis 2035 wird daher angenommen, dass die Ober- und Unterquoten unverändert gelten und entsprechend vollständig eingebracht bzw. erfüllt werden. Es wird ebenfalls davon ausgegangen, dass mindestens die nominelle THG-Minderungsquote aus dem Jahr 2030 in Höhe von 25 % weiterhin erfüllt wird, jedoch wird kein weiteres Ansteigen für die Folgejahre unterstellt.

Für die Jahre 2020 und 2021 werden die historischen Daten aus dem „Evaluations- und Erfahrungsbericht 2021“ (BLE 2021) der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung anstelle der Modellierungsgrößen ausgewiesen (Tabelle 7).

Tabelle 7 Übersicht der im Jahr 2020 und 2021 eingesetzten Biokraftstoffmengen zur Erfüllung der BImSchG/V-Vorgaben nach BLE (2021) (Biokraftstoffe aus N- & FM – Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln; IX B – Biokraftstoffe nach RED II Anhang IX Teil B; IX A – Biokraftstoffe nach RED II Anhang IX Teil A)

Kraftstoffoption	Energiemenge 2020 (in PJ)	Energiemenge 2021 (in PJ)
Biokraftstoffe aus N-&FM	122	99
IX B	39	31
IX A	6	9

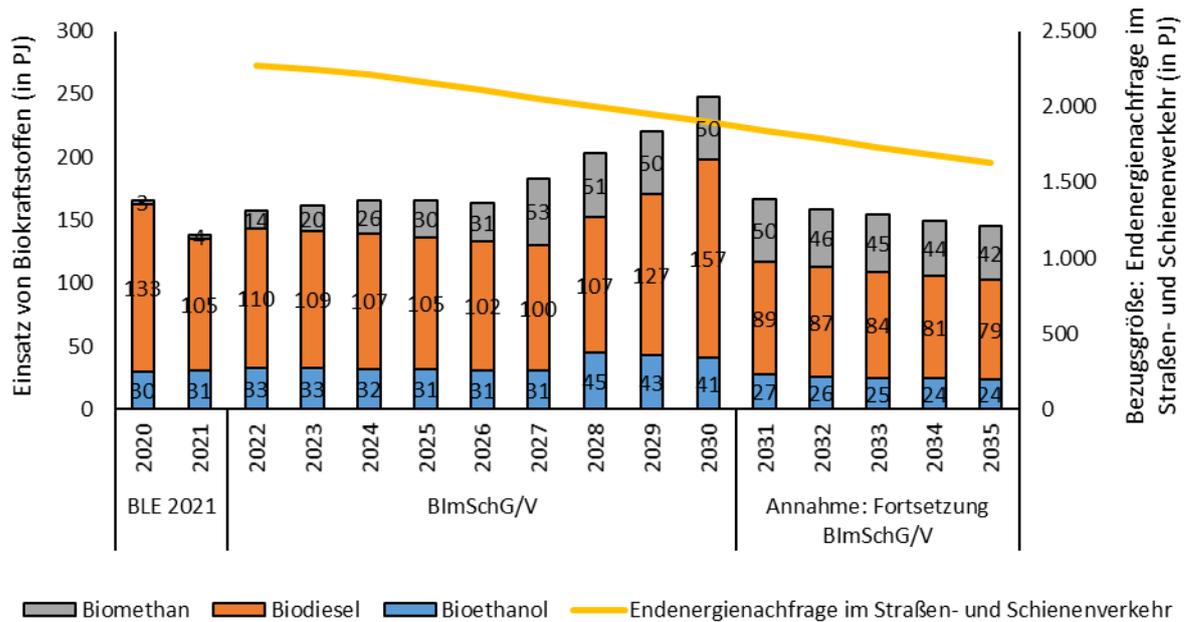
Neben dem Gesetzesrahmen können flottenseitige und technische Restriktionen zu Einschränkungen beim Einsatz bzw. bei der Beimischung von Biokraftstoffen führen. So ist die maximal einsetzbare Menge an Biomethan über die insgesamt im Flottengerüst auftretende Nachfrage nach methanbasierten Kraftstoffen begrenzt. Für die Beimischung von Bioethanol und Biodiesel zu fossilem Otto- bzw. Dieselmotorkraftstoff sind ebenfalls Restriktionen zu beachten. So dürfen nach DIN EN:228:2012+A1:2017 nicht mehr als 10 %-v/v Bioethanol zu fossilem Ottokraftstoff zugemischt werden (E10). Für Biodiesel (FAME, engl. Fatty-acid methyl esters) gilt nach DIN EN 590:2013+A1:2017 eine Beimischungsgrenze von 7 %-v/v (B7).

Zur Bestimmung der notwendigen Kraftstoffmengen zum Erreichen der THG-Minderungsquote werden zunächst die verpflichtenden Unterquoten angesetzt. Anschließend werden unter Berücksichtigung der geltenden Oberquoten so lange weitere Erfüllungsoptionen eingesetzt, bis die THG-Minderungsquote erreicht ist. Es zeigt sich, dass in der Zeit zwischen 2022 und 2030 der Einsatz von Biokraftstoffen im Rahmen der Unterquote und bis zum Erreichen der Oberquoten nicht genügt, um die Gesamtverpflichtung zu erfüllen. Als „Auffülloption“ werden daher fortschrittliche Biokraftstoffe aus Rohstoffen nach RED II Anhang IX Teil A gewählt. Hierbei wird zunächst Biomethan als abgeschätzt günstigste Option der fortschrittlichen Biokraftstoffe eingesetzt. Ist die Methannachfrage vollständig über Biomethan gedeckt, wird als nächste Erfüllungsoption fortschrittliches Bioethanol und danach fortschrittlicher Biodiesel (z. B. Biomass-to-Liquid, biogene Fischer-Tropsch-Kraftstoffe) eingebracht. Alternativ zu fortschrittlichen Biokraftstoffen könnten auch RFNBO (z. B. Power-to-Liquid-Kraftstoffe) zum „Auffüllen“ genutzt werden.

Unter Berücksichtigung der festgelegten Ober- und Unterquoten und der beschriebenen Vorgehensweise ergeben sich die in Abbildung 25 dargestellten Einsatzmengen für Biokraftstoffe zur Erfüllung der THG-Minderungsquote. Es ist ein Anstieg der eingesetzten Biokraftstoffmengen ab dem Jahr 2022 bis zum Jahr 2030 zu sehen, der auf die ansteigende THG-Minderungsquote und die zusätzliche Erhöhung durch den Stromanpassungsmechanismus zurückzuführen ist. Der aus dem Energiegerüst des REF-2050 hervorgehende Stromeinsatz führt zur Überschreitung der Anrechnungsgrenzen für die Stromrechnung im BImSchG/V und damit zu einer Erhöhung der THG-Minderungsquote. Diese steigt bis zum Jahr 2030 um 3,2 %-Pkt. auf insgesamt 28,2 % und erhöht entsprechend den Kraftstoffbedarf.

Ab dem Jahr 2028 ist die Nachfrage im Straßen- und Schienenverkehr nach Methanbasierten Kraftstoffen vollständig durch biogene Kraftstoffe abgedeckt. Diese Methanmengen resultieren z. T. auch aus der Übererfüllung der Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe, um die THG-Minderungsquote zu erreichen. Im Rahmen dieser Übererfüllung werden ab 2028 bis 2030 auch fortschrittliches Bioethanol und fortschrittlicher Biodiesel benötigt, um die Gesamtverpflichtung zu erfüllen.

Ab dem Jahr 2031 sinken die eingesetzten Mengen wieder (siehe Abbildung 25), da einerseits nur noch die nominelle THG-Quote von 25 % unterstellt wird und auch keine weitere Erhöhung durch den Stromanpassungsmechanismus angenommen wird. Der im Zeitverlauf ansteigende Stromeinsatz genügt ab dem Jahr 2031 auch neben den erfüllten sonstigen Ober- und Unterquoten, um die THG-Quote von 25 % zu erfüllen bzw. zu übertreffen.



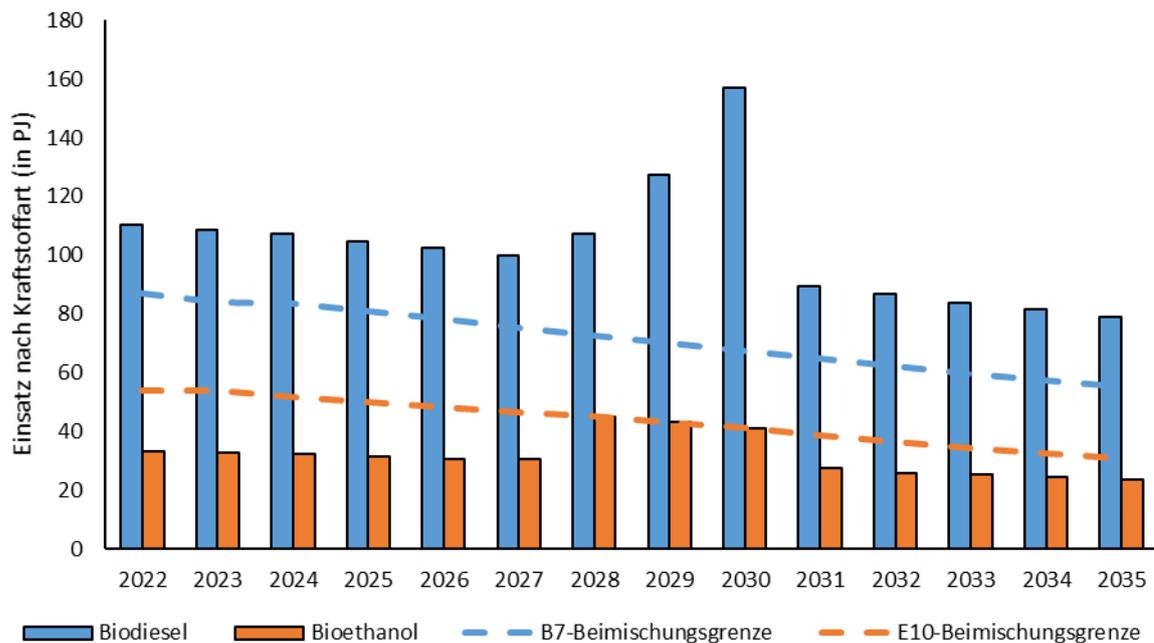
Quelle: IUE.

Abbildung 25 Einsatz von Biokraftstoffen zwischen den Jahren 2020 und 2030, aufgeteilt nach Kraftstoffart; angegebene Mengen für die Jahre 2020 und 2021 nach BLE (2021)

Der Abfall der energetischen Menge der Biokraftstoffe (insbesondere Biodiesel) nach 2030 entsteht durch die Annahme, dass der Anpassungsmechanismus zur Erhöhung der Menge alternativer Kraftstoffe durch die steigende Stromnutzung im Verkehr ab 2031 ausgesetzt wird, weil (1) die Regulierungen nur bis 2030 explizit Pfade für Quoten festgelegt haben, und (2) weil der nach 2030 stark steigende Stromeinsatz sonst zu überproportionalen und teils unrealistischen Mengen an einzusetzenden alternativen Kraftstoffen führen würde. Außerdem würden die Beimischungsgrenzen insbesondere für Bioethanol im Benzin überschritten. Deswegen wurde ab 2031 der Stand der Regulierung und damit der nominelle Fortbestand der THG-Quote mit einem Anteil von 25% THG-Minderung fortgeschrieben.

In Abbildung 26 sind die Anteile der nach obiger Methodik anfallenden Biokraftstoffmengen für Bioethanol und Biodiesel dargestellt. Es zeigt sich, dass die Beimischungsgrenze für Bioethanol unter den gegebenen Annahmen zunächst nicht ausgereizt wird und eine Beimischung der entsprechenden Mengen von Biokraftstoffen zu Benzin möglich ist. Für die Jahre 2028 bis 2030 wird die Beimischungsgrenze für E10 jedoch erreicht und darüber hinaus benötigte Biokraftstoffmengen können nur noch in Form von Biodiesel (FAME, HVO) eingesetzt werden.

Für Biodiesel kann beobachtet werden, dass über den gesamten Zeitverlauf Mengen über die Beimischungsgrenze hinaus in Verkehr gebracht werden müssen. Diese Mengen können entsprechend nicht in Form von FAME, sondern müssen beispielsweise als HVO-Kraftstoffe beigemischt werden. Für diesen Kraftstofftyp können zusätzlich zum FAME-Anteil 26 %-v/v (bezogen auf die Gesamtmenge an fossilem und erneuerbarem Kraftstoff) beigemischt werden (BMUV 2023). Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung kann die dargestellte Menge an Biodiesel jedoch grundsätzlich in Verkehr gebracht werden.



Quelle: IUE.

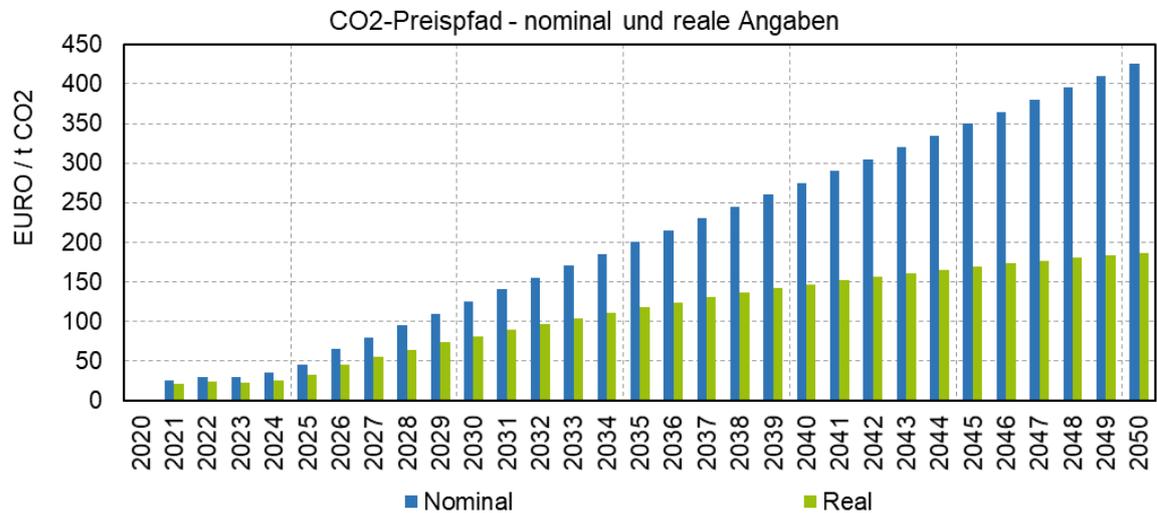
Abbildung 26 Darstellung der eingesetzten Mengen an Biodiesel (N-&FM und IX A und B) und Bioethanol (N-&FM, IX A) sowie Beimischungsgrenzen nach DIN EN:228:2012+A1:2017 und DIN EN 590:2013+A1:2017 (N- & FM – Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln; IX A und B – Biokraftstoffe nach RED II Anhang IX Teil A und B)

4.8 CO₂-Preisfad

Mit dem Beschluss zum Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) wurde Ende 2019 der CO₂-Preis für die Sektoren Gebäude und Verkehr neu eingeführt. Dabei müssen ab 2021 die Inverkehrbringer der Kraftstoffe (z.B. Mineralölkonzerne) CO₂-Zertifikate in der Höhe ihres in CO₂-äquivalenten ausgedrückten Marktumsatzes an Kraftstoffen nachweisen.

Abbildung 27 zeigt den CO₂-Preisfad in realen und nominalen Preisen. Der Preisfad sollte zunächst bei 10 €/t CO₂-Emission im Jahr 2021 beginnen, wurde dann aber in Verhandlungen mit dem Bundesrat auf 25 €/t CO₂ erhöht. Vor dem Hintergrund der Energiekrise wurde mit dem Kabinettsbeschluss vom 13.07.2022 der ursprüngliche

Preisfad angepasst, indem die für 2023 geplante Erhöhung ausgesetzt wurde. Ab 2024 wird der Preis für eine Tonne CO₂ von 30 € auf 35 € erhöht. Im Jahr 2025 steigt der Preis auf 45€/t. Für 2026 ist ein Preis-Korridor zwischen 55 und 65 €/t CO₂ vorgesehen. Ab 2027 könnte das System in einen Emissionshandel überführt werden, in dem dann die Menge vorgegeben wird und sich am Markt der Inverkehrbringer ein CO₂-Preis bildet. Für die Phase ab 2027 wurden Annahmen getroffen, so dass im Jahr 2030 der CO₂-Preis bei 125 €/t CO₂ liegt und in 2035 bei 200 €/t CO₂ (siehe Abbildung 27, jeweils nominale Preise).⁸ Bis 2050 wird ein Anstieg auf 425 €/t CO₂ angenommen. Diese Annahmen stimmen mit den Annahmen des Projektionsberichts 2023 der Bundesregierung überein. Aufgrund der hohen Inflationsrate im Jahr 2022 und 2023 steigen die realen CO₂-Preise entsprechend geringer als die nominalen.

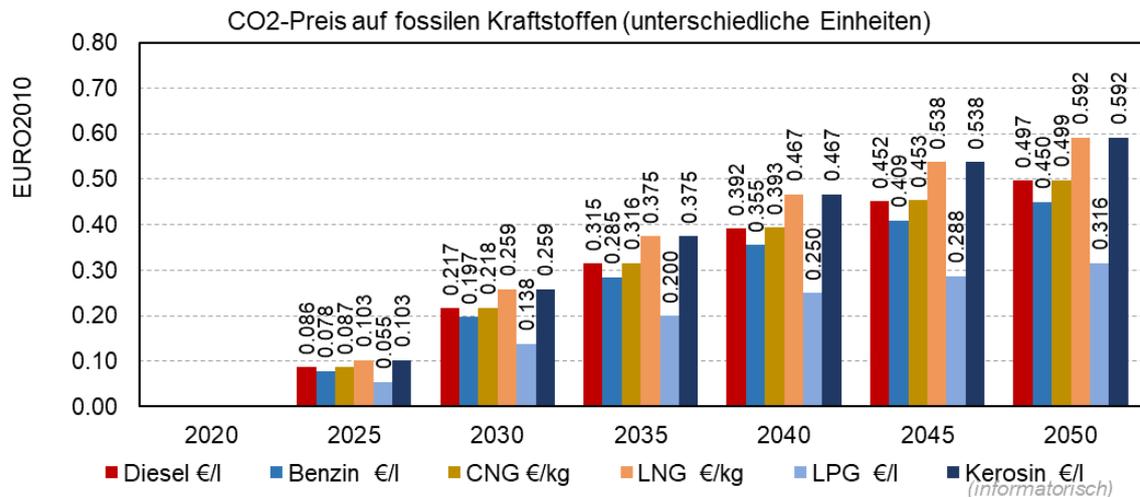


Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 27 Entwicklung des CO₂-Preisfades

Zwischen der (vollständigen) Verbrennung einer Einheit Kraftstoff und der dadurch entstehenden CO₂-Emission liegt ein festes Verhältnis vor. Beispielsweise werden bei der Verbrennung eines Liters Diesel 2,67 kg CO_{2äq.} freigesetzt (siehe DIN 16258). Dieser Wert beinhaltet nur die Emission während der Nutzung zur Fortbewegung und nicht die sogenannten Upstream-Emissionen, die bei der Förderung oder dem Transport des Diesel-Kraftstoffs entstehen. Für die sektorale Betrachtung, z.B. im Bundesklimaschutzgesetz (KSG), ist diese sogenannte Tank-to-Wheel Betrachtung vorgegeben. Abbildung 28 stellt die sich für den Preisfad aus Abbildung 27 ergebenden Preisaufläge für die verschiedenen fossilen Kraftstoffe, bezogen auf ihre üblichen Mengeneinheiten (Liter oder Kilogramm), dar. Für Kerosin ist ebenfalls ein informativer Wert angegeben, auch wenn der CO₂-Preis des BEHG nicht auf Kerosin erhoben wird. Bei einer Gleichbehandlung aller fossilen Kraftstoffe wäre dieser Betrag als Aufschlag auf Kerosin zu erheben.

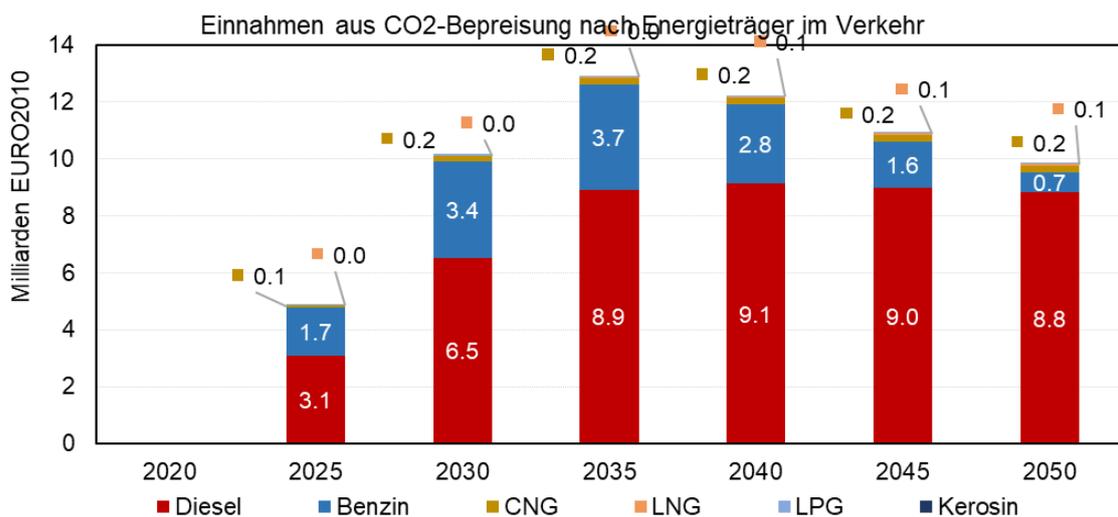
⁸ Als Teil des Green Deal plant die EU ebenfalls die Einführung eines CO₂-Preises für den Gebäude- und Verkehrssektor (der sogenannte ETS-II). Dieser könnte ab 2027 das BEHG ablösen. Zum 31.8.2022 war die Beschlusslage noch nicht eindeutig genug, um den ETS-II als Instrument zu berücksichtigen.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 28 Entwicklung des CO₂-Preisauflags für verschiedene Kraftstoffe

Die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung im Verkehr steigen mit einem steigenden CO₂-Preis, sie sinken aber auch mit einem sinkenden Verbrauch an fossilen Kraftstoffen. Nach 2035 übersteigt die jährliche prozentuale Verringerung der CO₂-Emissionen des Verkehrs den prozentualen Anstieg des CO₂-Preises. Abbildung 29 zeigt, dass sich der größte Einnahme-Beitrag aus der Nutzung von Diesel-Kraftstoffen ergibt. Eine Kompensation des CO₂-Preises für mautpflichtige Nutzfahrzeuge ist in REF-2050 nicht vorgesehen, da die CO₂-differenzierte Maut in diesem Szenario noch nicht greift.

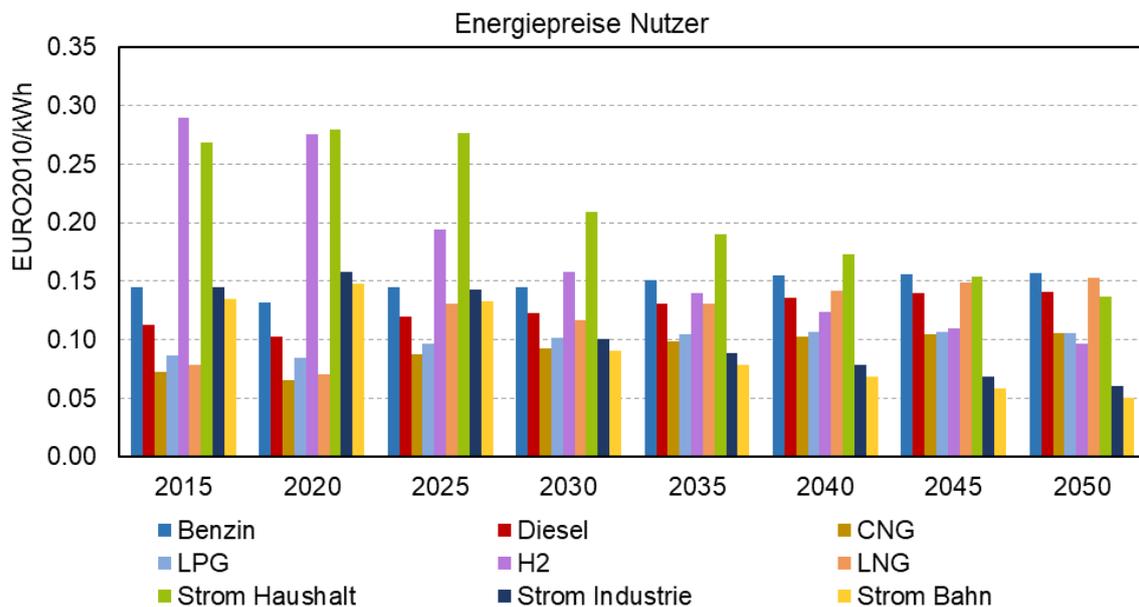


Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 29 Entwicklung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung

4.9 Energiepreise im Vergleich

Zur besseren Vergleichbarkeit aller Energiepreise aus Nutzersicht ist deren Entwicklung in realen Preisen ausgedrückt und bezogen auf 1 kWh in Abbildung 30 dargestellt. Es wird deutlich, dass Haushaltsstrom und H₂ die teuersten Energieformen darstellen, auch wenn deren Preise zukünftig sinken. Preise für alle fossilen Flüssig- (Diesel, Benzin, LPG) und Gas-Kraftstoffe (CNG, LNG) werden hingegen zukünftig steigen. Damit nähern sich die Preise zwischen fossilen und erneuerbaren Energieträgern an. Industriestrom und Strom im Schienenverkehr liegen ab 2035 im Vergleich der Energieträger sogar mit am niedrigsten. Der H₂-Preis verbessert sich im Zeitverlauf am deutlichsten.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 30 Entwicklung und Vergleich der Energiepreise aus Nutzersicht

4.10 Die Effekte der Corona-Pandemie

Die Covid-19-Pandemie hat sowohl das Verkehrsaufkommen an sich als auch seine Struktur deutlich verändert. Durch Kontaktbeschränkungen und insbesondere Lockdowns mit den dazu gehörigen Schließungen von Geschäften, Fabriken und Schulen wurde der Verkehr temporär deutlich reduziert und kam teilweise weitgehend zum Erliegen – insbesondere Pendelwege und (Dienst-)Reisen entfielen ganz. Neben dieser Schockwirkung und den kurzfristigen Veränderungen, die mittlerweile überwunden sind, hat die Pandemie einige langfristige Entwicklungen angestoßen. Fahrleistungen sind während der Pandemie sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr deutlich zurückgegangen. Im PKW-Verkehr wurde diese Entwicklung etwas abgeschwächt durch Umstiege von öffentlichen Verkehrsmitteln zum PKW und verstärkte inländische Reiseverkehre, die internationale Reisen ersetzt haben. Trotz des absoluten Rückgangs aller Verkehrsträger kam es zu höheren Modalanteilen von PKW, Fahrrad sowie Micro-Sharing (z.B. Elektro-Roller) (Scherf et al. 2021). Nach den Veränderungen der Modalwahl im Sinne des Infektionsschutzes in den Jahren 2020 und 2021 nähert sich, mit dem endemischen Verlauf

und dem Wegfall der Corona-Beschränkungen, das Mobilitätsverhalten wieder dem pre-pandemischen Zustand an (DLR 2022). Für den Anstieg der ÖPNV-Nachfrage im Jahr 2022 spielte neben der veränderten Gesundheitslage auch das 9-Euro-Ticket sowie die Zuwanderung aus der Ukraine eine Rolle. Während sich große Teile des Verkehrsaufkommens mittlerweile wieder normalisiert haben, bewegen sich insbesondere der ÖPNV und der nationale Luftverkehr nach wie vor unter dem Niveau von 2019. Die Verstetigung der Homeoffice-Effekte und die Beibehaltung von Onlinemeetings anstatt Dienstreisen werden als Ursachen für die schwächere Erholung dieser Verkehrsmittel betrachtet.

Zusammengefasst wurde der Schock durch die Pandemie und die verstetigten Effekte in ASTRA durch die folgenden Anpassungen modelliert:

1. Vorübergehender Rückgang des Aufkommens im Personen- und Güterverkehr.
2. Temporärer Einbruch des Konsums in mehreren kontaktbezogenen Sektoren (insb. Gastronomie, Kultur, Einzelhandel) und eine gewisse Zunahme einiger anderer Dienstleistungen, insbesondere IT- und Logistik-Dienstleistungen.
3. Rückgang des Außenhandels in den Jahren 2020 bis Mitte 2021 mit Effekten auf die Verkehrserzeugung im Güterverkehr.
4. Temporärer Rückgang der Neuzulassungen von PKW.
5. Mittelfristige Verschiebungen in der Modalwahl.
6. Deutlicher Rückgang des nationalen Luftverkehrs
7. Dauerhaft/langfristig mehr Homeoffice und weniger Dienstreisen.
8. Das BIP wurde exogen eingestellt, so dass es dem tatsächlichen Verlauf von 2020 entspricht und sich für die Zeit danach an Prognosen der Bundesregierung orientiert (siehe Abschnitt zum BIP, Kapitel 4.2).

PKW-Neuzulassungen sind in ASTRA-M im Jahr 2020 um etwa 700 000 zurückgegangen, 2021 und 2022 setzt sich dieser Trend fort, bevor sie sich im Jahr 2023 wieder weitgehend erholen. Spezifische Effekte auf den Gebrauchtwagenmarkt wurden nicht berücksichtigt. Umgesetzt wurden die in den Statistiken des RKI-Mobilitätsmonitors sowie des Google Global Mobility Monitors beobachteten Änderungen der Mobilität über eine Anpassung der Wegeraten innerhalb der Verkehrserzeugung während der Pandemie in den Jahren 2020 und 2021. Um die Effekte geänderter Präferenzen aufgrund der Corona-Pandemie zu simulieren, wurden die Nutzenfunktionen in den diskreten Wahlmodellen in ASTRA-M bei der Verkehrsmittelwahl für die Zeit der Covid-19 Pandemie angepasst. Dies konnte nur realisiert werden, in dem die Nutzenfunktion um die Komponente des "Gesundheitsnutzens" ergänzt wurde. Diese zusätzliche Komponente zu den generalisierten Kosten sowie der Logit-Konstante verschiebt dabei im ASTRA-M Modell den Nutzen während der Pandemie vom Öffentlichen Verkehr hin zum MIV, dem Rad- und Fußverkehr. Im Außenhandel und bei der inländischen Produktion von Gütern wurden für den Zeitraum des zweiten Quartals 2020 (Q2/2020) bis zum Ende von Q2/2021 Einbrüche zwischen -5% und -17% modelliert. Die inländische Produktion wurde in der gleichen Zeit

um -3% bis -13% verringert. Dadurch reduzierte sich das Verkehrsaufkommen im Güterverkehr in ähnlichen Größenordnungen und führte zu einer Reduktion der Transport- und Fahrleistung.

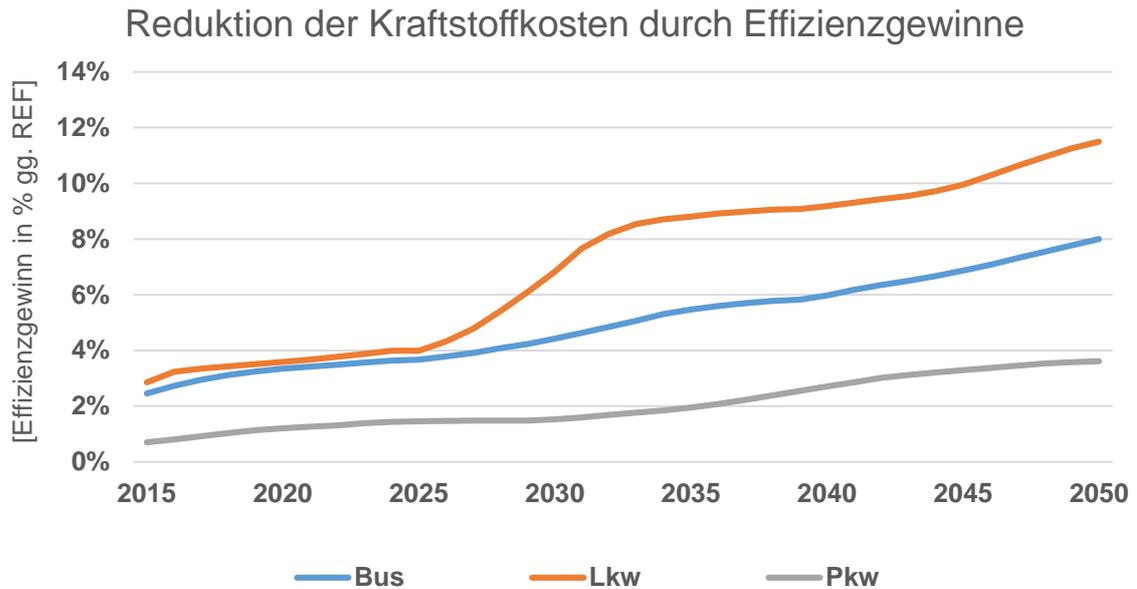
Der dauerhafte Umstieg von Präsenzarbeit hin zu Homeoffice und von Dienstreisen hin zu online-Meetings (die Dienstreisen ersetzen) ist in ASTRA-M differenziert nach Altersgruppen implementiert worden. Zunächst sind noch größere Effekte in den Jahren 2022 angelegt. 2022 liegt der Rückgang von Pendelwegen im Jahresmittel noch bei 6%. Virtuelle Meetings ersetzen 15% der Präsenztermine. Der Rückgang ist jeweils in den Alterskohorten zwischen 26 und 35 am stärksten. Durch vermehrte Nutzung von Homeoffice werden bis zu 3% weniger Pendelwege getätigt. Durch virtuelle Meetings können bis zu 9% der zuvor getätigten Geschäftsreisen vermieden werden. Die Verkehrsnachfragemodelle verteilen die auf der Stufe der Verkehrserzeugung implementierten Veränderungen der Wegeraten ohne spezielle Anpassungen nach 2023 auf die Ziel- und Modalwahl.

4.11 Die Effekte der Automatisierung im Verkehr

Die Einschätzung zu Potenzialen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr, die Verkehrsnachfrage und die THG-Emissionen zu verändern, basieren auf den Erkenntnissen der MKS-Studie "Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr" (Krail et al., 2018). Die Ursachen einer möglichen Änderung des Verkehrsverhaltens und damit des gesamten Verkehrssystems durch die Einführung des automatisierten und vernetzten Fahrens sind vielschichtig. Die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen basiert auf den Markthochlaufszszenarien aus der obengenannten MKS-Studie. Entsprechend der technischen Möglichkeiten und der Struktur des Modells fließen Änderungen der folgenden Einflussvariablen in die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen durch die Automatisierung und Vernetzung mit ein:

- Änderungen der Transport- bzw. Reisekosten,
- Änderungen der Transport- bzw. Reisezeiten,
- Änderungen der Bewertung der Zeit und
- Änderungen der Beladungsfaktoren bzw. der Besetzungsgrade.

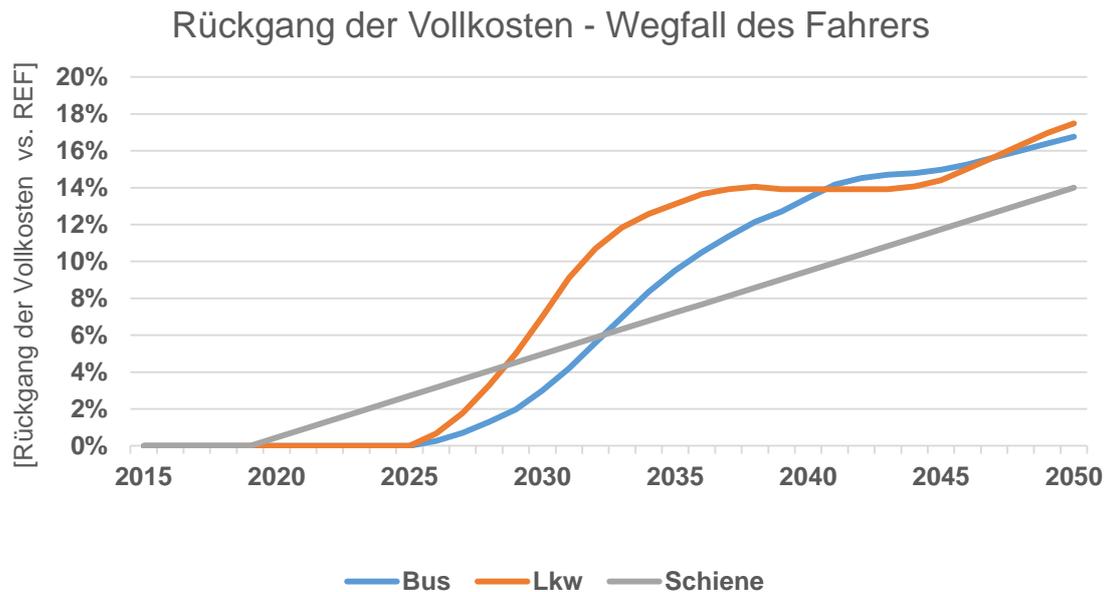
Die Transport- bzw. Reisekosten im Straßenverkehr ändern sich durch die Automatisierung und Vernetzung zum einen durch die Effizienzpotenziale des automatisierten und vernetzten Fahrens anhand des prognostizierten Markthochlaufs. Abbildung 31 zeigt die für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen verwendete Reduktion der Kraftstoffkosten für PKW, LKW und Busse. Für alle anderen Verkehrsträger (Schiene und Binnenschiff) neben der Straße wurden identische Effizienzpotenziale bis zum Jahr 2050 angenommen.



Quelle: Krail et al. (2018).

Abbildung 31 Reduktion der Kraftstoffkosten durch primäre Effekte im Automatisierungs-Szenario gegenüber der Referenz ohne Automatisierung

Durch den Rückgang der Fahrerkosten für Busse und LKW ab der Automatisierungsstufe 4 sinken die Vollkosten dieser beiden Verkehrsmittel zusätzlich. Die Markteinführung von Fahrzeugen in der Oberklasse sowie bei Nutzfahrzeugen mit Automatisierungsstufe 4 ist in der MKS-Studie ab dem Jahr 2025 angenommen. Die resultierende prozentuale Abnahme der Vollkosten bei Einführung der Automatisierungs-Technologie ist in Abbildung 32 dargestellt. Hier wird bei der Berechnung der verkehrlichen Wirkung durch Automatisierung ein Rückgang der Vollkosten auf der Schiene durch eine zunehmende Automatisierung angenommen.



Quelle: Krail et al. (2018).

Abbildung 32 Reduktion der Vollkosten durch Rückgang der Fahrerkosten

Die Änderung der Transport- bzw. Reisezeiten werden in Modellrechnungen berücksichtigt. Durch den Effekt des Mischverkehrs aus nicht-automatisierten und automatisierten PKW, LKW und Bussen resultiert in der betrachteten Literaturquelle eine leichte Steigerung der durchschnittlichen Transport- bzw. Reisezeiten bis maximal 4 % im Jahr 2050. Die Entwicklung der Transport- bzw. Reisezeiten kann dabei linear zunehmend zwischen 2020 und 2050 angenommen werden.

Der Bewertung des Zeitaufwands durch die aktive Fahrtätigkeit ändert sich mit zunehmender Automatisierung beim PKW. Hier wird eine Halbierung des Werts der Zeit für PKW ab Automatisierungsstufe 4 angenommen. Durch Multiplikation mit dem Anteil der PKW ab Stufe 4 am gesamten PKW-Bestand ergibt sich dadurch eine maximale Reduktion des Werts der Zeit um 16 %. Durch den abnehmenden Wert der Zeit wird automatisch auch die Wirkung der Steigerung der Transport- und Reisezeiten kompensiert.

Der Effekt zunehmender Automatisierung in Kombination mit den damit einhergehenden neuen Logistikkonzepten im Straßengüterverkehr auf die Beladungsfaktoren der schweren und leichten Nutzfahrzeuge kann bei der Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen ebenfalls berücksichtigt werden. Der Effekt neuer Logistikkonzepte zeigt sich durch die Optimierung und damit der Reduktion der Leerfahrten. Hierbei wird angenommen, dass die Leerfahrten um 10% bis zum Jahr 2050 reduziert werden können. Da Leerfahrten aber auch in der Logik der Verkehrsmodelle den durchschnittlichen Beladungsfaktor (negativ) beeinflussen und verkleinern, wird in der MKS-Studie (Krail et al., 2018) eine resultierende Steigerung des Beladungsfaktors bei SNF und LNF bis maximal 2,5% im Jahr 2050 berücksichtigt.

5 Berücksichtigung von Instrumenten in REF-2050

REF-2050 baut auf REF-2020 (und REF-2017) auf (Schade et al. 2018, Schade et al. 2022). D.h. viele Instrumente aus REF-2017 und REF-2020 sind auch in REF-2050 enthalten, es sei denn, sie wurden bis zum Stichtag 31.8.2022 wieder abgeschafft oder sind einfach ausgelaufen. Teilweise wurden die Instrumente seit 2020 auch modifiziert oder in ihrer Laufzeit verlängert.

Der Stichtag für das neue Referenzszenario ist der 31. August 2022. D.h. alle bis zu diesem Datum beschlossenen und nicht nur als flankierend eingestuft Instrumente wurden in der Modellierung mit ASTRA-M implementiert.

5.1 Liste der Instrumente im Referenzszenario (REF-2050)

Tabelle 8 listet alle Instrumente auf, die Bestandteil des Referenzszenarios sind. Grundsätzlich sind die genannten Instrumente explizit in ASTRA modelliert worden. Instrumente, für die dies nicht der Fall ist, werden als flankierend bzw. als ohne eigene Wirkung gekennzeichnet.

Tabelle 8 Maßnahmen des MKS-Referenzszenarios (REF-2050)

Maßnahme	Verkehrsträger/-mittel	Start	Ende	Erläuterung	Kapitel
BEHG – CO ₂ Preis	Allgemein	2021	2026-2050	Nationaler Zertifikate-Handel für Sektoren Wärme und Verkehr. Anpassung des Preispfads in 2023 in REF-2050 berücksichtigt.	5.2.1
THG-Quote (Umsetzung RED-II)	Allgemein	2022	2030 (2050)	THG-Minderungsquote für Inverkehrbringer von Kraftstoffen wird von 2022 bis 2030 schrittweise erhöht, bis Sie 2030 25% beträgt; inkl. Unterquoten wie z.B. für fortschrittliche Biokraftstoffe. Keine Änderung der Quoten nach 2030 (kein Beschluss). Die Modellierung erfolgt in Kombination mit einem Kraftstoffmodell, so dass die Quotenerfüllung konsistent mit der Fahrzeugflotte von REF-2050 geprüft wird und erfolgt.	5.2.2
Abschaffung EEG	Allgemein	2022	-	Entfall der EEG-Umlage zum 1. Juli 2022, ab Januar 2023 dauerhafte Abschaffung.	5.2.3
Erhöhung Entfernungspauschale	Allgemein	2022	2026	Erhöhung auf 35 ct/km bis 2023, dann 38 ct/km (ab 21.km) (modelliert); Einführung einer Mobilitätsprämie für Geringverdiener (flankierend).	5.2.4
Ausbau (Tank- und) Ladeinfrastruktur	Pkw, NFZ, Bus	2019	2030	versch. Förderprogramme, Koordination durch Masterplan Ladeinfrastruktur I: Aufbau Schnellladesäulennetz, Ladeinfrastruktur für Pkw, SNF + Busse. In Teilen explizit modelliert für kurzfristigen Aufbau Infrastruktur, sonst flankierend.	5.2.5
Steuerermäßigung von Erdgas (CNG, LNG)	Allgemein	2018	2026	Ermäßigung ohne Unterbrechung bis 2024, dann abschmelzen bis 2026, LPG ab 2023 regulärer Steuersatz.	5.2.6
MwSt-Senkung im SPFV	Schiene	2020	-	Seit 2020 gilt im Schienenpersonenfernverkehr der reduzierte Mehrwertsteuersatz von 7%.	5.2.7
Reduktion Trassenpreise	Schiene	2018	Jun 23	Die Trassenpreise im GV werden seit 2018 reduziert um die Wettbewerbsfähigkeit ggü. Straßengüterverkehr zu steigern. Im PV und GV wurden die Trassenpreise zudem temporär (03/2020-05/2021) im Rahmen der Coronapandemie (weiter) gesenkt. Dies wurde bis Ende 2022 verlängert.	5.2.8
Förderung KV (und SGV)	Schiene	(1998) 2017	2022	Förderung Neu- und Ausbau von KV-Umschlagsanlagen (bis Sep. 2022 verlängert, ab Nov 22 neue Förderrichtlinie), Anschlussgleisförderung hier ebenfalls enthalten.	5.2.9
Seehafenhinterlandverkehr	Schiene	2017	2021	Mit Sofortprogramm Seehafenhinterlandverkehr II werden 124 Mio. € in 17 SGV-Anlagen investiert.	Teil von 5.2.9

Maßnahme	Verkehrsträger/-mittel	Start	Ende	Erläuterung	Kapitel
(Rangier-)Diesel-Lokomotiven mit Bio-Kraftstoff	Schiene	2022	2025	2022 hat die DB rund 1 000 Fahrzeuge für die Betankung mit dem umweltfreundlichen Biokraftstoff HVO freigegeben. Die restlichen 2 000 Dieselfahrzeuge der DB-Flotte sollen in den nächsten fünf Jahren folgen (bisher nicht modelliert, da tatsächlich genutzte Biokraftstoffmengen unklar).	5.2.15
BVWP	Schiene	2015	2030+	BVWP-Schieneprojekte erst bis 2040 realisiert, Deutschlandtakt (verzögert 2040-2070), 740-Meter-Gleis (2030) und ETCS Starterkit (2050) hier ebenfalls inkludiert. Maßnahmen jeweils in ASTRA und Partialmodell über Zeit- und Kosteneffekte berücksichtigt.	5.2.13 5.2.11 5.2.14
Digitale Automatische Kupplung	Schiene	2030	2040	Flächendeckende Einführung von Digitalen Automatische Kupplungen (DAK), um Güterwagen effizienter aneinander zu koppeln. Maßnahmen jeweils in ASTRA und Partialmodell berücksichtigt.	5.2.12
Förderung EWW – Anlagenkosten	Schiene	2021	2026	Die Entgelte für die Nutzung der Serviceeinrichtungen (Anlagen) insbesondere im Einzelwagenverkehr (EWW) werden anteilig gefördert	5.2.10
Abschaffung der Kanalgebühren für die Binnenschifffahrt	Binnenschifffahrt	2019	-	Schiffahrtsabgaben (sowie Hafen- und Ufergelder) wurden zum 1. Januar 2019 abgeschafft (Ausnahme Mosel und Nord-Ostsee-Kanal).	5.2.17
Alternative Antriebe in der Binnenschifffahrt	Binnenschifffahrt	2021	2023	Förderung von Investitionen in emissionsärmere Antriebssysteme/ Nullemissionsantriebe, digitaler Informationstechnik und Assistenzsystemen, Umbaumaßnahmen für eine größere Einsatzfähigkeit bei Niedrigwasser (40-90%)	5.2.18
CO ₂ -Standards Pkw-Neuzulassungen	Pkw	2021	2030 / 2035 (2050)	Verschärfte Reduktions-Ziele (CO ₂ -Reduktionsziel auf -55% bis 2030 ggü. 2021. Ab 2035 Reduktionsziel 100%.	5.2.19
Umweltbonus / Innovationsprämie E-PKW	Pkw	2020	2024	2022 erhöht, 2023 und 2024 abgesenkt, ab 09/2023 Prämie nur noch für private Käufer (Beschluss vor 27.7.22).	5.2.20
KFZ-Steuer: Steuerbefreiung für E-PKW und CO ₂ -Differenzierung	Pkw	2011	2025 (2030)	BEV von Kfz-Steuer befreit um Hochlauf zu unterstützen. Gilt für neuzugelassene BEV zw. 2011 und 2025 für 10 Jahre (bis maximal 2030). Neuzugelassene Fahrzeuge (>95 g CO ₂) werden seit 2021 mit zusätzlicher Klimakomponente besteuert.	5.2.21
Absenkung Dienstwagenbesteuerung nach Listenpreis von i = 1% p.M.	Pkw	2020	2030	Vollelektrische Firmenwagen sind seit 2020 mit 0,25% (BEV, FCEV), PHEV mit i = 0,5% (<50g CO ₂ /km, Plug-In) des Bruttolistenpreises pro Monat zu versteuern.	5.2.22
Bevorrechtigung des Carsharing	Pkw	2020		Bevorrechtigung von Carsharing-Fahrzeugen beim Parken und bei der Gebührenerhebung (flankierend).	5.2.23
(Verlängerung) LKW-Maut-Befreiung für Nullemissions-LKW, sowie Gas-LKW	SNF	2019	2025	Nullemissionsfahrzeuge sind weiterhin (2025) von der Maut befreit, Gas-LKW offiziell befreit bis Ende 2023, danach reduzierter Mautsatz (Rabatt von 1,1 Ct/km) Entsprechend der Eurovignettenrichtlinie endet die Mautbefreiung für Nullemissionsfahrzeuge Ende 2025.	5.2.24
CO ₂ -Standards für LKW	SNF	2019	2030+ (2050)	EU VO 2019/1242, (30% Reduktion ggü. 2019 bis 2030). Diffusion effizienterer LKW auch nach 2030.	5.2.25
Weiterentwicklung/ Erprobung elektrischer Antriebe bei NFZs	SNF	2020	2025	Förderung von Forschungs- bzw. Demo-Vorhaben: z.B. ein Teil der Innovationscluster (40km OH-LKW Pendelstrecke).	5.2.27
Lang-LKW/Giga-Liner: Ausweitung des Positiv-Netzes	SNF	2017	-	Die 10. Änderungsverordnung Lang-Lkw wurde am 13.11.2020 im Bundesanzeiger veröffentlicht und ist am 14.11.2020 in Kraft getreten: Weitere 200 Strecken im positiv Netz. In mehreren Stufen, in Summe 1% Verbesserung Beladungsfaktor	5.2.28
CO ₂ -Standards leichte Nutzfahrzeuge	LNF	2021	2030/2035	Verschärfung des CO ₂ -Reduktionsziels auf -50% bis 2030 ggü. 2021. Ab 2035 Reduktionsziel -100%. Diffusion effizienterer LNF auch nach 2030.	5.2.29
Nutzfahrzeug-Förderung: 80% der Mehrkosten für leichte und schwere elektrische Nutzfahrzeuge	SNF / LNF	2022	2025	80% Förderquote der Investitionsmehrausgaben für NFZ mit Elektroantrieb im Vgl. zu Verbrenner: N1, N2, N3 mit E-Antrieb (auch Hybrid und Wasserstoff) sowie Sonder- und Umrüstfahrzeuge inkl. zugehöriger Ladeinfrastruktur (bis zu 80%) (KSNi, 02.08.2021 in Kraft getreten, ehemals „EEN“).	5.2.26

Maßnahme	Verkehrsträger/-mittel	Start	Ende	Erläuterung	Kapitel
Förderprogramm für fortschrittliche /strombasierte Kraftstoffe	Kraftstoffe	2021		Förderprogramme für die Produktion von fortschrittlichen Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen (auch Ausschreibungsmodelle). Abgesehen von PtL-Quote im Luftverkehr bisher kein Effekt d.h. flankierend.	5.2.30
Elektrifizierung der Linien-Busflotte	SNF/ÖPNV	2021	2025	Angepasste Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr (7. September 2021).	5.2.31
Clean Vehicles Directive/ SaubFahrzeugBesch hG	ÖPNV	Aug, 2021	2030	Verbindliche Quoten (bei Bussen mindestens 45% bis 2025, davon die Hälfte emissionsfrei) für die Neubeschaffung von als „sauber“ definierten Straßenfahrzeugen bestimmter Fahrzeugklassen, darunter auch Linienbusse.	5.2.32
Alternative Antriebe im Schienenverkehr	ÖPNV/Schiene	2021	2024	Verlängerung der Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr	5.2.16
Erhöhung Regionalisierungsmittel	Schiene, ÖPNV	1996	2030	Erhöhung der Regionalisierungsmittel wird fortlaufend abgebildet. - 2021 Erhöhung um 1 Mrd.€ - 2022 Erhöhung um 3,7 Mrd.€ (1,2 Mrd. Corona + 2,5 Mrd. 9-Euro-Ticket) In ASTRA und Partialmodell berücksichtigt.	5.2.33
Maßnahmenbündel ÖPNV	ÖPNV	2020	2031 (2050)	Attraktivitätssteigerung im ÖPNV - Verbesserungen der Fahrtzeiten und Kostenreduktion durch verschiedene Maßnahmen.	5.2.34
Radverkehrs- und Städtebauinstrumente	Rad, Fuß	2021	2025	Verlängerung/Beschluss verschiedener Maßnahmen und Förderprogramme zur Verbesserung des Rad- und Fußverkehrs sowie der Mikromobilität.	5.2.35

Quelle: M-Five, PTV, ISI, IUE.

5.2 Beschreibung, Erläuterung und Modellierung zu den einzelnen Instrumenten

In diesem Kapitel werden die rechtlichen Grundlagen der Instrumente und ihre Veränderungen gegenüber dem letzten Referenzszenario mit Abschneidezeitpunkt 31.8.2020 (REF-2020) benannt. Diese werden dann auch entsprechend in der Modellierung wirksam. Außerdem wird die Vorgehensweise zur Modellierung eines Instruments kurz erläutert oder für das Instrument eingeordnet, weshalb keine Modellierung vorgenommen wurde und es damit als flankierend eingestuft wird.

5.2.1 BEHG – CO₂ Preis

Das bereits im Dezember 2019 beschlossene, und damit im REF-2020 enthaltene Instrument Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) definiert die Grundlage für einen nationalen Zertifikate-Handel von Brennstoffemissionen der Sektoren Wärme und Verkehr. Im Jahr 2021 wurde der sogenannte CO₂-Preis mit 25 Euro pro Tonne eingeführt, stieg im Jahr 2022 auf 30 Euro, und sollte 2023 auf 35€, 2024 auf 45€ und bis zum Jahr 2025 auf 55 €/t ansteigen. Der CO₂-Preis gilt für alle fossilen Brennstoffe, also neben Benzin und Diesel auch für Heizöl, Gas oder Kohle.

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasster Preispfad

Vor dem Hintergrund der Energiekrise wurde mit dem Kabinettsbeschluss vom 13.07.2022 der ursprüngliche Preispfad angepasst, indem die für 2023 geplante Erhöhung ausgesetzt wurde. Ab 2024 wird nun der Preis für eine Tonne CO₂ auf 35 € erhöht, 2026 soll der CO₂-Preis bei 65 €/t, 2030 bei 125 €/t, 2040 bei 180 €/t und 2050 schließlich bei 225 €/t liegen.

Somit liegt der CO₂-Preis in den Jahren 2024 und 2025 jeweils 10 Euro niedriger als in REF-2020. Außerdem wird die Abfallverbrennung erst ab 2024 Teil des Brennstoffemissionshandels. Geplante Änderungen auf europäischer Ebene aus dem Fit-for-55 Paket (Einführung ETS-II) wurden mangels eindeutiger Beschlusslage zum Stichtag noch nicht berücksichtigt.

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Der BEHG- bzw. CO₂-Preis ist im Modell als Eingangsvariable hinterlegt und wird entsprechend dem jeweils in einem Szenario vorgegebenen Preispfad nominal angegeben und automatisch unter Berücksichtigung des hinterlegten Inflationsverlaufs (siehe Kapitel 4.3) in reale Werte umgewandelt. Die vom CO₂-Preis beeinflussten Modellvariablen (z.B. Kraftstoffpreise) sind direkt verknüpft mit dem CO₂-Preis.

5.2.2 THG-Quote (Umsetzung RED-II)

Mit der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED-II, EU RL 2018/2001) vom 11. Dezember 2018 soll die Förderung und Nutzung von erneuerbarer Energie gefördert werden⁹. Die Vorgaben der RED-II ohne nationale Umsetzung waren Bestandteil von REF-2020. Danach sollte der Anteil an Erneuerbaren Energien im Verkehr mindestens 14% des Endenergieverbrauch im Straßen- und Schienenverkehr eines Mitgliedsstaates betragen.

Veränderung gegenüber REF-2020: nationale Umsetzung der RED-II

Die RED-II wird durch Vorgaben der Reduktion von CO₂-Emissionen in der Kraftstoffnutzung umgesetzt (sogenannte THG-Minderungsquote, kurz THG-Quote). Das deutsche Gesetzgebungsverfahren zur Umsetzung der RED-II wurde mit Gesetzesentwurfsbeschluss des Deutschen Bundestags am 20.05.2021 begonnen. Abgeschlossen wurde das Verfahren mit der Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und der 37.¹⁰ und 38.¹¹ Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV). Da die Umsetzung bereits zum Abschneidezeitpunkt begonnen und der Beschluss plausibel erwartbar war, wurden die Anpassungen der THG-Quote wegen ihrer Wichtigkeit in REF-2050 bereits berücksichtigt.

Der Pfad der THG-Quote wird von 2022 bis 2030 schrittweise erhöht, bis diese 2030 25% beträgt: 2022: 7%, 2023: 8%, 2024: 9,25%, 2025: 10,5%, 2026: 12%, 2027: 14,5%, 2028: 17,5%, 2029: 21%, 2030: 25%. Im Jahr 2030 müssen danach die Inverkehrbringer von

⁹ RICHTLINIE (EU) 2018/2001 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.

¹⁰ 37. BImSchV: Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote.

¹¹ 38. BImSchV: Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen.

Kraftstoffen in Deutschland 25 % ihrer THG-Emissionen im Vergleich mit fossilen Kraftstoffen einsparen. Die THG-Quote kann auf unterschiedliche Weise erfüllt werden¹²

- Gemäß der 37. BImSchV können strombasierte Kraftstoffe (Wasserstoff, synthetisches Methan) unter bestimmten Voraussetzungen auf die THG-Quote angerechnet werden. Die 38. BImSchV erlaubt die Anrechnung von Strom (3-fach, §§ 5ff. 38. BImSchV), welcher für die Elektromobilität verwendet wird, ebenso wie die Anrechnung von Wasserstoff und fortschrittlichem Biokraftstoff (§§12, 12 a 38. BImSchV). Der Verkauf von Biokraftstoffen der zweiten Generation kann gemäß § 37a Abs.5 BImSchG doppelt angerechnet werden.
- Seit 2022 gibt es auch eine Obergrenze für die Anrechenbarkeit von konventionellen Biokraftstoffen sowie von Rohstoffen mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderung: 4,4%; eine Obergrenze für tierische Fette und Altspeiseöl: 1,9%; ab 2023 kann kein Palmöl mehr angerechnet werden (Phase-out).
- Der Mindestanteil von strombasiertem Kerosin (PtL-Kerosin) am Flugverkehr beträgt 2026: 0,5%; 2028: 1%; 2030: 2%. Weitere Änderungen nach dem Abschneidezeitpunkt werden nicht berücksichtigt.
- Der Mindestanteil fortschrittlicher Biokraftstoffe (z.B. Bioabfälle aus Haushalten/ Industrie, Stroh, Algen u.a.) soll sich schrittweise von 2021 bis 2030 erhöhen: 2021: 0,1%; 2023: 0,3 %; 2024: 0,4%; 2025: 0,7%; 2026: 1,0%; 2028: 1,7; 2030: 2,6% (§ 14 Abs.1 38. BImSchV).
- Der Zukauf von THG-Minderungsquoten mittels Quotenhandelsvertrag ist zur Erfüllung der Verpflichtung (§ 37a Abs.6 und 7 BImSchG) möglich, ebenso wie Upstream Emissionsminderungen gemäß der Upstream-Emissionsminderungsverordnung (UERV) seit 2020 und bis 2026. Die Anrechnung von fossilen Kraftstoffen ist seit 2022 nicht mehr möglich.

Wird die THG-Quote durch den Inverkehrbringer nicht erfüllt, werden Strafzahlungen i.H.v. 600 €/t CO_{2äq.} fällig¹³ Eine Übererfüllung kann auf Antrag auf das nächste Kalenderjahr übertragen werden (§ 37a Abs. 8 BImSchG).

Berücksichtigung in der Modellierung: iterativ modelliert

Die Erfüllung der THG-Quote wird in einem iterativen Prozess modelliert und überprüft. ASTRA-M errechnet die Endenergienachfrage des Verkehrs in Abhängigkeit von Flottenstruktur und Verkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln und eingesetzten Energieträgern. Dies beinhaltet auch eine erste Näherung für die Menge an eingesetzten synthetischen Kraftstoffen (z.B. aus einem vorhergehenden Szenario oder aus einer vorhergehenden Iteration). Diese Mengen werden an das Kraftstoffmodell übergeben. Das

¹² Eine kompakte Zusammenfassung der Anpassungen in BImSchG und BImSchV mit Verkehrsbezug findet sich in Heinen (2023).

¹³ Siehe auch die Informationen des Zoll zur (Nicht-) Erfüllung der THG-Quote: https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Treibhausgasquote-THG-Quote/Quotenverpflichtung/Erfuellung-Quotenverpflichtung/Erfuellung-Nichterfuellung-Uebertragung-Quotenverpflichtung/erfuellung-nichterfuellung-uebertragung-quotenverpflichtung_node.html

Kraftstoffmodell teilt die Kraftstoffmengen auf und setzt dabei die eingesetzten Mindestmengen synthetischer Kraftstoffe ein. Gleichzeitig berücksichtigt es die Maximalquoten, den Beitrag der Stromnutzung im Verkehr sowie mögliche Potenzialgrenzen bei der Erzeugung der erneuerbaren Kraftstoffe (zu den Ergebnissen der differenzierten Mengen an synthetischen Kraftstoffen in REF-2050 siehe Kapitel 4.7). Die Ergebnisse des Kraftstoffmodells werden nach ASTRA-M zurückgespielt, erhöhen bei steigenden Einsatzmengen synthetischer Kraftstoffe die Investitionen in Anlagen. Erhöhte Investitionen führen zu steigenden Preisen für synthetische Kraftstoff. Diese höheren Preise werden unter Berücksichtigung der Mengen auf die jeweils aufgrund der Beimischung zugehörigen Kraftstoffpreise (z.B. wird Bioethanol bei Benzin beigemischt aber nicht bei Diesel) umgelegt. Erhöhte Kraftstoffpreise ändern in der Folge die Struktur der Energienachfrage im Verkehr. Dies führt zu einer weiteren Übergabe der Endenergienachfrage an das Kraftstoffmodell und löst eine weitere Iteration der beiden Modelle aus. Dies erfolgt wiederholt bis keine oder nur noch marginale Änderungen der Kraftstoffnachfrage zwischen zwei Iterationen vorliegen. Die finale differenzierte Kraftstoffnachfrage mit Erfüllung der THG-Quote ist in Kapitel 4.7 dargestellt. Der Endenergieverbrauch (EEV) nach Art des synthetischen Kraftstoffs (z.B. Biodiesel, Bioethanol), wie er sich konsistent in ASTRA-M ergibt, findet sich in Kapitel 14.

5.2.3 Abschaffung der EEG-Umlage

Das seit 2000 bestehende Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sollte ursprünglich den Ausbau sowie die Einspeisung von Erneuerbarer Energie sichern. Bereits in den vorangegangenen Szenarien waren das EEG und die zugehörige Umlage als Instrument enthalten, und wurden in diesen Szenarien mehrfach verändert. In der Vergangenheit gingen verschiedene Studien von einer sukzessiven Absenkung der EEG-Umlage, bis hin zu deren Entfall bis 2030 aus. Im Jahr 2020 lag sie bei 6,76 ct/kWh für private Haushalte und gewerbliche bzw. industrielle Kleinverbraucher. Im Jahr 2021 wäre sie aufgrund der Corona-bedingten niedrigen Strompreise um über 40% auf 9,65 ct/kWh gestiegen.¹⁴ Im Klimaschutzprogramm (KSP) hatte die Bundesregierung aber eine Deckelung für 2021 auf 6,5 ct/kWh und für 2022 auf 6 ct/kWh beschlossen.

Veränderung ggü. REF-2020: Abschaffung EEG-Umlage

Entgegen der Erwartungen (z.B. AGORA-EEG-Umlagenrechner) wurde die EEG-Umlage mit dem „Gesetz zur Absenkung der Kostenbelastung durch die EEG-Umlage und zur Weitergabe dieser Absenkung an die Letztverbraucher“ ab dem 1. Juli 2022 ausgesetzt und schließlich ab 2023 formell und dauerhaft abgeschafft. Anlass für die vorzeitige Abschaffung waren die gestiegenen Energiepreise und die als Gegenmaßnahme beschlossenen Entlastungspakete.

¹⁴ Die Höhe der EEG-Umlage wird sehr stark durch die Differenz zwischen dem Strommarktpreis (Börse Leipzig) und den garantierten Vergütungssätzen für EE-Anlagen bestimmt. Ein niedriger Strommarktpreis bedeutet eine hohe EEG-Umlage, ein hoher Strommarktpreis führt zu einer niedrigen EEG-Umlage. 2020 und 2021 sind zwei sehr konträre Jahre: 2020 mit dem Pandemie-bedingten sehr niedrigen Marktpreis, während im Jahr 2021 durch hohe Rohstoffpreise (insb. Gas) ein hoher Marktpreis für Strom zu zahlen war.

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Der Strompreis ist in der Modellierung explizit aus seinen separat modellierten Komponenten erzeugt und zu einem Gesamtpreis (netto für gewerbliche Nutzer, brutto für private Nutzer) aggregiert. Die EEG-Umlage ist eine der separat modellierten Komponenten. Ab dem 3.Quartal 2022 wird diese Komponente bei der Strompreisberechnung in ASTRA-M auf null gesetzt. Über die modellseitig dann automatisch reduzierte Mehrwertsteuer (MwSt.) liegt die Absenkung des Strompreises für private Nutzer über der Höhe der entfallenen EEG-Umlage. Bei einem Teil der gewerblichen Nutzer (z.B. Schiene) wirkt sich der Entfall der EEG-Umlage schwächer aus, da diese bereits vor dem Entfall einen reduzierten Umlagesatz entrichtet haben.

5.2.4 Erhöhung der Entfernungspauschale

Durch die Entfernungspauschale können Erwerbstätige die zu versteuernden Einkünfte um einen Pauschalbetrag je Kilometer mindern. Der Pauschalbetrag wird für die Wege zwischen Wohnung und erster Tätigkeitsstätte (Arbeitsplatz) berechnet und unabhängig vom Verkehrsmittel (Pkw, ÖPNV, Fuß oder Rad) angerechnet. Die tatsächliche Einsparung eines Erwerbstätigen hängt vom persönlichen Steuersatz ab. Menschen mit niedrigen Einkommen erhalten daher eine geringere Unterstützung durch die Erhöhung der Entfernungspauschale als Menschen mit mittleren und höheren Einkommen. Die Höhe der absetzbaren Pauschale ist für alle Verkehrsmittel bei 4 500 € gedeckelt, außer für PKW.

Veränderung ggü. REF-2020: Erhöhung der Pauschale ab 2022

Bereits im REF-2020 war eine Erhöhung der Entfernungspauschale ab dem 21. Kilometer auf 35 ct/km 2021-2023, und ab 2024 auf 38 ct/km berücksichtigt. Mit dem Steuerentlastungsgesetz 2022 wurde am 23. Mai 2022 beschlossen, dass die Erhöhung auf 38 ct/km (ab 21. km) bereits ab 2022 eingeführt wird und weiter bis 2026 befristet läuft. Zusätzlich wurde ab 2023 eine Mobilitätsprämie für Geringverdiener mit einem zu versteuernden jährlichen Einkommen unter 10 908 € eingeführt.¹⁵

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Im Personenverkehrsmodell von ASTRA werden die Fahrtkosten für vier Fahrtzwecke und vier Wegedistanzen unterschieden. Zur Berücksichtigung der erhöhten Entfernungspauschale wird für den Fahrtzweck „Pendeln“ in den Distanzen von 10 bis 50 km in einer Zone (Mittelstrecke) sowie über Zonengrenzen hinweg (von den jeweiligen Zonen abhängig weitere Distanzen über der Grenze von 20 km, Langstrecke) eine Reduktion der Kosten vorgenommen. Die Kostenreduktion bei einem angenommenen Grenzsteuersatz von 24% beträgt bei der Entfernungspauschale von 38 ct/km auf der Mittelstrecke knapp 0,5 ct/km und auf der Langstrecke etwa 1,3 ct/km. Diese Veränderung kann direkt in der Kostenvariable für die Distanzen, Fahrtzwecke und Verkehrsmittel in ASTRA-M hinterlegt werden. In REF-2050 wird diese Kostenreduktion ab 2022 gewährt.

¹⁵ Bundesgesetzblatt Steuerentlastungsgesetz 2022: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl122s0749.pdf

Für das Jahr 2021 wurden niedrigere Reduktionen hinterlegt (bereits aus REF-2020). Die Kostenänderung beeinflusst somit entsprechend die Modalwahl im Pendelverkehr.

5.2.5 Ausbau (Tank- und) Ladeinfrastruktur für PKW und LKW

Der Ausbau und die Verbesserung der Ladeinfrastruktur in Deutschland werden bereits seit einiger Zeit mit verschiedenen Maßnahmen vorangetrieben. Um die Ziele (Aufbau von 50 000 öffentlichen Ladepunkten bis 2022 sowie nicht öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Pkw und Nutzfahrzeuge) des in 2019 beschlossenen Klimaschutzprogramms 2030 (BReg 2019b) zu erreichen, wurde im Rahmen des Masterplan Ladeinfrastruktur-I (BReg 2019a) ein entsprechendes Maßnahmenbündel geschnürt. Neben finanzieller Förderung (zwischen 2020 und 2022 wurde die private Ladeinfrastruktur mit bis zu 30% gefördert, seit 2017 wurde der Aufbau von 15 000 öffentlichen Ladesäulen mit 300 Millionen Euro unterstützt) sind Koordinationsfunktionen (Einrichtung *Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur*, NLL) und die Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen Kerninhalte des Masterplans.

Veränderung ggü. REF-2020: Ergänzende Maßnahmen

Nach August 2020 wurde der Ausbau der Ladeinfrastruktur mit weiteren Maßnahmen vorangetrieben:

- Schnellladegesetz: Das am 01.07.2021¹⁶ in Kraft getretene Gesetz zur Bereitstellung flächendeckender Schnellladeinfrastruktur für reine Batterieelektrofahrzeuge (SchnellLG) forciert den bedarfsgerechten und flächendeckenden Ausbau von Schnellladepunkten in ganz Deutschland. Insgesamt sollten 1 000 Schnellladestandorte mit High Power Charging (HPC), also mit mindestens 150 Kilowatt Ladeleistung (pro Ladepunkt), ausgeschrieben und bis 2023 errichtet werden. Für die Errichtung und den Betrieb wurden ca. 2 Mrd. Euro zur Verfügung gestellt.¹⁷
- Förderprogramme:¹⁸
 - Nicht öffentlich zugängliche Ladestationen für Elektrofahrzeuge – Unternehmen und Kommunen
 - Ladeinfrastruktur vor Ort (24.03.2021 - 31.12.2021)
 - Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland
 - Hochleistungsladen im Lkw-Fernverkehr (HoLa-Projekt 2021 - 2024).¹⁹
 - Förderung von öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstellen im Straßenverkehr mit Schwerpunkt NFZ (2021)²⁰

¹⁶ <https://www.gesetze-im-internet.de/schnelllg/BJNR214100021.html>

¹⁷ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/049-scheuer-schnellladegesetz.html>

¹⁸ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderrichtlinie-ladeinfrastruktur-elektrofahrzeuge.html>

¹⁹ <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/innovationscluster-projekt-hochleistungsladen-im-lkw-fernverkehr-hola-startet/>

²⁰ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderung-oeffentliche-wasserstofftankstellen-nutzfahrzeuge.html>

Im Rahmen des am 19. Oktober 2022 beschlossenen *Masterplans Ladeinfrastruktur II* wird mit weiteren Maßnahmen das Ziel verfolgt, die Ladeinfrastruktur für BEV bedarfsgerecht auszubauen (BReg 2022). Dieser sieht mit 68 Instrumenten die Förderung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur vor, wovon 10 Instrumente allein für den Aufbau der Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge vorgesehen sind, die eine spezifische Ausgestaltung mit besonders hohen Ladeleistungen benötigt und einen größeren Flächenverbrauch aufweist. Bis Ende 2022 sollte dabei der Bedarf im Rahmen der Maßnahmen 59 und 60 ermittelt werden. Dabei sind die Use Cases und User Journeys festzulegen. Die Bedarfsanalyse ist allerdings nur für Parkplätze abgeschlossen. Des Weiteren soll bei Nutzfahrzeugen insbesondere auf Standardisierung, Ladeinfrastruktur an Knotenpunkten und privaten Betriebsflächen, die Ausschreibung eines initialen Netzes unter Berücksichtigung der europäischen Regulierung (AFIR) sowie die Finanzierung und Förderung des Netzausbaus hingewirkt werden.

Die weitere 58 Maßnahmen des *Masterplans Ladeinfrastruktur II* gliedern sich in 9 Bereiche: Kooperation und Koordination, Erweiterung um eine Datenbasis, Finanzierung durch den Bund, Einbindung von Kommunen, Flächenverfügbarkeit, Digitalisierung, Integration, Rechtliche Herausforderungen (Bau- und Immissionsschutzrecht) sowie Erweiterung um Ladeinfrastruktur in Gebäuden. Für die Umsetzung werden zudem verschiedene Gremien eingesetzt wie die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NLL), die Interministerielle Steuerungsgruppe Ladeinfrastruktur (ISLa), ebenso Clean-Room-Gespräche u.a.; ferner werden aber auch verschiedene Zuständigkeiten begründet wie BMDV, BMWK, NLL, Autobahn GmbH, BImA, BMVg, BMI, BMF, BMUV, BASt, ISLa, Bundeskartellamt, Länder, Kommunen, BMWSB, BMJ, HDE, kommunale Spitzenverbände, BNetzA, Immobilienwirtschaft, Normungsinstanzen, Ladeinfrastrukturbranche, Automobil-, Mineralöl- und Energiewirtschaft.

Umgesetzt wurden zum Stand Mai 2023 bereits Maßnahmen zur Barrierefreiheit, die Berücksichtigung der Elektromobilität in der Netzplanung, verschiedene Tools (z.B. zur Verortung der Stationen), Flächenprüfung, Nutzung der Mautdaten, Meldung nichtöffentlicher zugänglicher Ladepunkte u.a.²¹.

Die Wirkung des *Masterplans Ladeinfrastruktur II* ist aufgrund des Datums seines Beschlusses nach dem Abschneidezeitpunkt nicht in REF-2050 zu berücksichtigen. Gleiches gilt für die Einigung zur europäischen Verordnung zum Aufbau alternativer Energieinfrastrukturen (AFIR).

Berücksichtigung in der Modellierung: flankierend, Einzelfälle modelliert

Grundsätzlich ist der Aufbau der Tank- und Ladeinfrastruktur Voraussetzung für die Nutzung alternativer Antriebsarten und daher ohne eigenständige Wirkung und als flankierend angenommen worden. Eine hemmende Wirkung unzureichend ausgebauter Infrastrukturen auf den jeweiligen Fahrzeugkauf wurde nicht modelliert.

²¹ Antworten zum Fragenkatalog der Bundestagsabgeordneten: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/069/2006994.pdf>

Im Bereich der Förderung für Lade- und Tankinfrastrukturen von alternativen SNF sind die Förderbeiträge mitmodelliert und führen zu reduzierten Kaufpreisen für E-LKW, für die ansonsten eine Ladestation für den Betriebshof im Fahrzeugpreis mitkalkuliert würde.

5.2.6 Steuerermäßigung von Erdgas

Mit dem, am 01. Januar 2018 in Kraft getretenen, Zweiten Gesetz zur Änderung des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) wurde die ursprünglich bis 2018 befristete Steuerermäßigung für CNG und LNG bis Ende 2026 verlängert. Während CNG (Compressed Natural Gas, Druckerdgas) häufig als Kraftstoff für LNF, Nahverkehrsbusse sowie Pkw genutzt wird, ist LNG (Liquified Natural Gas, verflüssigtes Erdgas) in der Regel für SNF sowie in der Schifffahrt relevant. Der Regelsatz von 31,80 Euro/MWh ist bis Ende 2023 auf 13,90 Euro/MWh reduziert, steigt im Jahr 2024 auf 18,38 Euro/MWh, 2025 auf 22,85 Euro/MWh und in 2026 auf 27,33 Euro/MWh. Ab 2027 gilt wieder der Regelsteuersatz von 31,80 Euro/MWh. Die Steuervergünstigung für LPG (Liquified Petroleum Gas, Autogas) lief Ende 2022 aus. Ab 2023 steigt der Steuersatz von 19,65 Eurocent/Liter auf den regulären Steuersatz von 22,09 Eurocent/Liter. Die Steuerermäßigungen für CNG, LPG und LNG wurden eingeführt, da ihre Verbrennung im Vergleich zu Benzin weniger CO₂- und NO₂-Emissionen zur Folge hat.

Veränderung ggü. REF-2020: Keine

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Kraftstoffpreise sind in ASTRA aus ihren einzelnen Komponenten aggregiert aufgebaut. Dabei bilden die Steuersätze eine der Preis-Komponenten (z.B. Energiesteuer, MwSt.). Diese Komponenten werden mit ihren nominalen Werten im Modell hinterlegt. Dabei gelten von 1995 bis 2022 die historischen Werte sowie der oben beschriebene Pfad bis 2027. Ab 2027 wird der nominale Wert als konstant angenommen.

Da die modellierten Abhängigkeiten in ASTRA alle in realen Preisen abgebildet sind, werden die nominalen Steuersätze und Kraftstoffpreise alle mit den im Modell hinterlegten Inflationsraten (siehe Kapitel 4.3) in reale Werte von 2010 umgewandelt.

5.2.7 MwSt-Senkung im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV)

Im Rahmen des Klimaschutzprogramms gilt seit dem 01. Januar 2020 der reduzierte Mehrwertsteuersatz für Tickets des Schienenpersonenfernverkehrs in Deutschland. Die Änderung im Steuerrecht vom 21. Dezember 2019 hat zur Folge, dass seit 2020 nur noch 7% anstatt 19% Mehrwertsteuer (MwSt.) anfallen.²² Die in Folge der Steuersenkung reduzierten SPFV-Preise sollen einen Anreiz zur Nutzung der gegenüber dem Pkw umweltfreundlicheren Bahn schaffen.

²² BMF-Schreiben an Finanzbehörden der Länder: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/BMF_Schreiben/Steuerarten/Umsatzsteuer/2020-01-21-absenkung-des-steuersatzes-fuer-die-befoerderung-von-personen-im-schienebahnfernverkehr.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Veränderung ggü. REF-2020: Keine

Berücksichtigung in der Modellierung: abgeleitet modelliert

Die Senkung der MwSt. von 19% auf 7% entspricht einer Senkung der Fahrkartenpreise im Schienenfernverkehr um 10%. In der Modellierung in ASTRA werden ab 1.1.2021 die Preise im Schienenfernverkehr, d.h. auf den inter-zonalen Verbindungen mit dem Zug, um 10% reduziert. Diese Absenkung wird fortgeführt bis 2050.

5.2.8 Schienenverkehr – Trassenpreise

5.2.8.1 Reduktion der Trassenpreise im Güterverkehr

Mit Hilfe der Richtlinie zur Förderung des Schienengüterverkehrs über eine anteilige Finanzierung der genehmigten Trassenentgelte (Af-TP) werden die Trassenpreise seit Juni 2018 reduziert, um die Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs gegenüber dem Gütertransport auf der Straße zu verbessern, und somit den Modal-Shift hin zur klimafreundlichen Schiene zu unterstützen. Die Förderrichtlinie ist bis zum 30. Juli 2023 gültig.²³ Ab 2019 waren Fördermittel in Höhe von 350 Millionen Euro vorgesehen.²⁴

Veränderung gegenüber REF-2020: Anpassung und Auslaufen Förderrichtlinie

Um die pandemiebedingten Auswirkungen auf die Eisenbahnverkehrsunternehmen abzuschwächen, wurde im Juli 2021 die Förderrichtlinie rückwirkend temporär angepasst. Vom 01.03.2020 bis 31.05.2021 wurde die Förderung ergänzt.²⁵ Mit der ergänzenden Förderung, für die 627 Millionen Euro bereitgestellt wurden, konnten die Trassenpreise um bis zu 99% reduziert werden, wobei sich die Tarife für die Kunden um etwa 40% reduzierten. Für das Jahr 2023 stehen Fördermittel i.H.v. 377 Millionen Euro bereit²⁶.

In REF-2020 wurde von einer unbefristeten Verlängerung der Senkung der Trassenpreise ausgegangen. Diese Erwartung wurde für REF-2050 geändert, so dass nur noch für den bewilligten Zeitraum die Ermäßigung wirksam wird, d.h. bis Ende 2023.

Berücksichtigung in der Modellierung: anteilig modelliert

Trassenpreise bilden einen Bestandteil der Kosten des Schienengüterverkehrs in der Modellierung in ASTRA. Die Förderung von 350 Mio. Euro kann in etwa umgerechnet werden in eine 40%ige-Senkung der Trassenpreise. Für die Dauer der bewilligten Förderung von 2019 bis Ende 2023 werden daher die Trassenpreise im Schienengüterverkehr um 40% gesenkt. Ab 2024 erreichen sie wieder das alte Niveau.

²³ Eisenbahnbundesamt: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Finanzierung/Foerderung_anteiliger_Trassenentgelte/41_Foerderrichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=8

²⁴ DB Netz: <https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/leistungen/trassen/trafoeg-9765506>

²⁵ Eisenbahnbundesamt: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/Foerderung_anteiliger_Trassenentgelte/foerderung_anteiliger_trassenentgelte_node.html

²⁶ DB Netz: <https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/leistungen/trassen/trafoeg-9765506>

5.2.8.2 Reduktion der Trassenpreise im Personenverkehr

Neben dem Schienengüterverkehr wurde während der Covid-19-Pandemie auch der Schienenpersonenfernverkehr unterstützt, um die pandemiebedingten Auswirkungen auf die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) abzuschwächen und der Verpflichtung zur weiteren Erbringung der Beförderungsdienstleistung während der Pandemie Rechnung zu tragen. Durch die rückwirkende, einmalige und temporäre Anpassung der Richtlinie zur Förderung des Schienenpersonenverkehrs über eine anteilige Finanzierung der genehmigten Trassenentgelte zur Bewältigung der COVID-19-Pandemie (af-TP-SPFV-COVID 19; BAnz AT 17.08.2021 B6)) im Juli 2021 wurden auch die Trassenpreise im Schienenpersonenfernverkehr vom 01.03.2020 bis 31.05.2022 in Abhängigkeit der Betriebsleistung bezuschusst.²⁷ Zum 01.08.2022 wurde die Richtlinie bis zum 31.12.2022 verlängert.

Veränderung gegenüber REF-2020: Einführung und Verlängerung

Aufgrund der rückwirkenden Gewährung lag die Trassenpreissenkung im Schienenpersonenfernverkehr außerhalb des Abschneidezeitpunkts von REF-2020. Daher war sie nicht enthalten in REF-2020. In REF-2050 sind sowohl die Einführung zum 1.3.2020 als auch die Verlängerung bis 31.12.2022 Teil des Szenarios.

Berücksichtigung in der Modellierung: anteilig modelliert

Die Kostensenkung bei den Trassenpreisen wird in eine Veränderung der Fahrkartenpreise überführt. Dabei sind die längeren Strecken intrazonal (10-50 km) und interzonal (>50km) betroffen. Für diese wurden die Fahrkartenpreise für die Dauer der Trassenpreissenkung um 10% gesenkt. ASTRA bildet keine differenzierte Tarifstruktur ab (z.B. mit Sparpreisen). In der Praxis dürfte nicht der Fahrkartenpreis der Flex-Tickets reduziert, sondern die Anteile vergünstigter Tickets erhöht worden sein.

5.2.9 Förderung Kombiniertes Verkehr, Gleisanschlüsse und Seehafen-Hinterland-Verkehr

Kombiniertes Verkehr

Seit 1998 wird der Neu- und Ausbau von KV-Umschlaganlagen des intermodalen Verkehrs im Rahmen der Förderrichtlinie „Kombiniertes Verkehr“ gefördert. Mit der Förderrichtlinie, die von 2017 bis Ende 2021 gültig war, wurden bis zu 80% der Kosten von entsprechenden investiven Maßnahmen gefördert.²⁸ Neben der Förderung von KV-Umschlagterminals sind

²⁷ Eisenbahnbundesamt: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/Foerderung_anteilige_Trassenentgelte_Fernverkehr/foerderung_anteilige_trassenentgelte_fernverkehr_no_de.html

²⁸ Eisenbahnbundesamt: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Finanzierung/KV/44_FRL_%20KV.pdf;jsessionid=5AE05213E44889A19338F5DAFC7F493C.live21301?_blob=publicationFile&v=4

seit 2004 auch der Aus- und Neubau sowie die Reaktivierung bestehender Gleisanschlüsse förderfähig. Die bis Ende 2021 gültige Richtlinie wurde bis 3. September 2022 verlängert.²⁹

Förderung von Gleisanschlüssen

Mit der überarbeiteten Förderrichtlinie „Richtlinie zur Förderung des Neu- und Ausbaus, der Reaktivierung und des Ersatzes von Gleisanschlüssen sowie weiteren Anlagen des Schienengüterverkehrs“ werden seit dem 1. März 2021 auch „Zuführungs- und Industriestammgleise sowie multifunktionale Anlagen (z.B. Railports)“³⁰ und der Ersatz abgenutzter Anschlussgleise gefördert, um den Güterverkehr auf die Schiene zu verlagern.

Förderung von Verbesserungen für den Seehafen-Hinterland-Verkehr

Das Sofortprogramm Seehafen-Hinterland-Verkehr II wurde 2015 beschlossen und folgte damit auf vorangegangene Maßnahmenpakete, welche die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Seehafen-Hinterland-Verkehr zum Ziel hatten. Nach einer ersten Tranche von 130 Mio. Euro wurden in der zweiten Tranche 124 Millionen Euro in 17 SGV-Anlagen investiert. Durch Maßnahmen, wie beispielsweise Gleisverlängerungen, Elektrifizierungen, Ertüchtigungen oder Neubau von Anlagen wird die Kapazität und Leistungsfähigkeit wichtiger Hinterland-Korridore ausgeweitet.³¹

Veränderung gegenüber REF-2020: zusätzliche Verbesserung Zugbeladung

Die Förderprogramme verbessern die Zugbeladung, durch Schaffung verbesserter Möglichkeiten zur Umladung und Zugbildung sowie in der Folge über die Senkung der Kosten. Die Instrumente stehen in Wechselwirkung mit dem Ausbau der 740m Gleise, die ebenfalls längere Züge und damit höhere Beladungen ermöglichen.

In REF-2020 dominierte der Effekt durch den Aufbau der 740m Gleise. In REF-2050 wurden durch die Förderung in den Jahren 2022 bis 2025 Terminals verbessert oder erweitert sowie zusätzliche Gleisanschlüsse geschaffen. Damit wird die Zugbeladung verbessert und in der Folge werden auch die Kosten gesenkt.

Berücksichtigung in der Modellierung: gesamthaft modelliert

In ASTRA werden die Investitionen in Verbesserungen von Terminals und Gleisanschlüsse gesamthaft als Einfluss auf Beladungsfaktoren sowie als Kostensenkung im Bereich der Stückgüter und der Container implementiert (nicht für Massengüter). In den Jahren 2022 bis 2025 erhöhen sich die Beladungsfaktoren um weitere 3% zusätzlich zur Verbesserung durch 740m Gleise. Auf der Kostenseite führt diese zu einer zusätzlichen Reduktion um etwa 2% in der Modellierung.

²⁹ Mit der Richtlinie zur Förderung von Investitionen in Umschlaganlagen des Kombinierten Verkehrs vom 23. November 2022 werden entsprechende Maßnahmen auch zukünftig (bis Ende 2026) gefördert, wobei der Beschluss nach dem Abschneidezeitraum liegt und damit nicht Bestandteil des REF-2050 ist.

³⁰ BMDV: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-schienengueterverkehr/gleisanschlussfoerderrichtlinie.html>

³¹ Forschungsinformationssystem: Netzinfrastrukturaspekte des "Masterplan Schiene Seehafen-hinterlandverkehr I+II" <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/349548/>

5.2.10 Förderung E WV - Anlagenkosten

Mit der „Richtlinie über eine anteilige Finanzierung der Entgelte in Serviceeinrichtungen des Schienengüterverkehrs mit dem Schwerpunkt Einzelwagenverkehr“ vom 13. November 2020 werden „Entgelte für die Nutzung der Serviceeinrichtungen (Anlagen) insbesondere im E WV“ anteilig gefördert. Als Serviceeinrichtungen versteht die Richtlinie Rangierbahnhöfe und Zugbildungseinrichtungen einschließlich Rangiereinrichtungen. Die Förderrichtlinie gilt bis einschließlich 30. November 2025.³² Der Bundeshaushalt sah für 2021 etwa 80 Mio. Euro Fördermittel vor.³³

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasster Preisfad

Für 2022 und 2023 sollen jeweils etwa 40 Mio. Euro bereitgestellt werden. Für 2024 und 2025 sinken die Fördermittel auf ca. 20 Mio. Euro pro Jahr.³⁴ Der Haushaltsentwurf 2023 sowie der Finanzplan bis 2026 wurden am 1. Juli 2022 vom Kabinett beschlossen.³⁵

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Die Fördermittel werden kombiniert mit Zuschüssen zum Vor- und Nachlauf im kombinierten Verkehr. In Summe ergibt sich eine Reduktion der angebotenen Tarife bei Stückgütern von 4% und bei Container von 5% für den Zeitraum 2022 bis 2025. Die Veränderungen wirken direkt mindernd auf die Kostenvariablen im Schienengüterverkehr in ASTRA.

5.2.11 Ausbau 740-Meter-Netz

Durch das sogenannte 740-Meter-Netz sollen zukünftig auf allen Deutschen Hauptverkehrskorridoren bis zu 740 Meter lange Güterzüge (europäische Standard-Zuglänge) verkehren können. Hierfür wurde im BVWP 2030 der Ausbau von 70 Überholungsbahnhöfen sowie zwei Güterverkehrsanlagen mit einer Länge von mindestens 740 m als Maßnahme in den Vordringlichen Bedarf aufgenommen und die Baukosten auf 421,2 Mio. Euro beziffert (2018).³⁶ Weitere Überholmöglichkeiten sollen im Rahmen von aktuellen Ausbauprojekten geschaffen werden. Mögliche Kapazitäten der Schieneninfrastruktur werden am ineffizientesten genutzt, wenn sich verschiedene Zuggattungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungsverhalten einen Streckenabschnitt teilen. Dies ist in Deutschland aber sehr häufig bei paralleler Nutzung durch langsame Güterzüge und schnelle Personenzüge im Fernverkehr der Fall.

³² Bundesministerium der Finanzen: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finzen/Bundeshaushalt/2023/regierungsentwurf-bundeshaushalt-2023.html

³³ Ebenda

³⁴ BMDV: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-schienengueterverkehr/anlagenpreisfoerderung-im-schienenverkehr.html>

³⁵ BMF: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finzen/Bundeshaushalt/2023/regierungsentwurf-bundeshaushalt-2023.html

³⁶ Projektinformationssystem (PRINS) zum BVWP: https://www.bvwp-projekte.de/schiene_2018/2-050-V01/2-050-V01.html

Güterzüge müssen dabei in den allermeisten Fällen dem Personenverkehr Vorrang lassen. Zu diesem Zweck werden sie auf ein Überhol- oder Abstellgleis geleitet, um den Personenzug passieren zu lassen. Dabei weisen viele Überholgleise geringere Längen als die europäische Zielgröße von 740 m auf, teils nur in der Größenordnung von 300 bis 500 m Gleislänge. Dies führt zu einer Beschränkung der Länge der Güterzüge und damit zur möglichen Beladung eines Zuges.

Es wird davon ausgegangen, dass das BVWP-Sammelprojekt, welches ca. 80 740m-Überholgleisen für den Güterverkehr umfasst, bis 2030 realisiert ist.

Veränderung in REF-2050: marginale Erweiterung

Die EU hat im Mai 2022 eine CEF-Finanzierungsrunde (CEF, Connecting Europe Facility) zur Ertüchtigung der TEN-V Infrastruktur für militärische und zivile Zwecke gestartet sowie im November den zweiten Aktionsplan zur Militärischen Mobilität vorgelegt. In diesem Zuge sollen auch einzelne 740m-Gleise in Deutschland beschleunigt umgesetzt werden, ggf. auch weitere Umschlaganlagen.

Dies führt mutmaßlich zu kleineren Erweiterungen der Ausbauplanungen gegenüber REF-2020.

Teilweise ergeben sich durch die Vorgaben der TEN-V auch Verbesserungen bei der Zusammenstellung von Zügen in Terminals, weil auch dort die Gleislänge von 740 m bereitgestellt werden soll (nicht jedes Gleis), was zu Einsparungen im Umlade- und Rangierbetrieb führt.

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Der Ausbau der 740m-Gleise war bereits in REF-2020 berücksichtigt. Die Modellierung erfolgte über eine Anpassung der Beladungsfaktoren, da die primäre Wirkung der 740 m-Gleise eine Erhöhung der Zug-Beladung durch Anhängen weiterer Wagen ist. Dabei werden für die drei in ASTRA differenzierten Gutarten unterschiedliche Verbesserungspotenziale erwartet. Für Massen- und Stückgüter wird bis 2030 von einem Anstieg der Beladung von 8% ausgegangen, für Containerzüge von 10%. Einige der Investitionen erstrecken sich bis 2035 bzw. entfalten erst dann ihre volle Wirkung. Daher wird durch die 740 m-Gleise ein weiterer Anstieg um etwa 2% bis 2050 erwartet.

Die sekundäre Wirkung ist eine Senkung der Kosten eines Güterzuges, da zahlreiche Kosten unabhängig von der Länge des Zuges sind (z.B. Lokführer, Systemsteuerung). Bis 2030 ergeben sich in der Modellierung Kosteneinsparungen von etwa 4% für den Schienengüterverkehr ab 2022.

5.2.12 Digitale automatische Kupplung (DAK)

Mit Hilfe von Digitalen Automatischen Kupplungen (DAK) können Güterwagen automatisch und damit schneller und effizienter als in der heutigen manuellen Vorgehensweise aneinander gekuppelt werden. Außerdem können einzelne Prüfvorgängen (z.B. Bremsprobe) automatisiert durchgeführt werden. Beides führt zu Zeit und Kosteneinsparungen im Schienengüterverkehr. Diese können aber erst vollständig realisiert werden, wenn alle Güterwagen mit DAK ausgestattet sind. In einer Einführungs-

bzw. Mischphase mit manueller und automatischer Kupplung können sogar Mehraufwendungen entstehen.

Veränderung gegenüber REF-2020: bisher nicht enthalten

Zur Erstellung von REF-2020 war eine mögliche Umsetzung der DAK im Schienengüterverkehr (SGV) noch nicht absehbar. Daher wurde diese nicht berücksichtigt, sondern nur als Teil eines Klimaschutzprogramms. Aktuell befindet sich die Ausstattung von Güterwagen mit DAK in der Testphase. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass bis 2030 ein Teil des Wagenparks von etwa 450 000 Güterwagen mit DAK ausgestattet ist. Ohne größere Anstrengungen bzw. weitere Instrumente wird bis 2045 aber keine vollständige Ausstattung erwartet.

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Die DAK senkt die Kosten im SGV. Für REF-2050 gehen wir davon aus, dass ohne weitere Instrumente bis 2050 noch nicht der gesamte Güterwagenpark umgestellt sein wird und daher die Vorteile auch nicht vollständig realisiert werden können. Aber auf einzelnen Korridoren (angelehnt an die sechs TEN-V Korridore) werden die dort verkehrenden Wagen zunehmend damit ausgestattet sein. Nach einer Testphase erwarten wir die ersten Effekte der DAK ab 2027 bis 2030 mit einer Kostenreduktion von 1% für Stückgut und Container-Transporte, sowie jeweils weitere 1%-Reduktionen bis 2040 und bis 2050.

5.2.13 Umsetzung Deutschlandtakt

Im BVWP 2030 wurden Schieneninfrastrukturprojekte mit großem Potenzial zur Fahrtzeitreduktion und Kapazitätserweiterung im SPFV unter Vordringlichem Bedarf eingruppiert. Mit dem sogenannten Zielnetz und Zielfahrplan 2030 werden im BVWP 2030 Maßnahmen realisiert, die zur Umsetzung des Deutschlandtakts vorbereitend beitragen.³⁷ Mit dem Deutschlandtakt soll ein Taktfahrplansystem eingeführt werden, das eine bessere Integration der Verkehrsmittel des Öffentlichen Verkehrs durch bessere Taktung im SPFV realisieren soll. Zwischen den Großstädten sollen zukünftig im 30-Minuten-Takt Züge verkehren, wodurch neben den Reise- auch die Umsteigezeiten deutlich verkürzt werden können und das Angebot insgesamt attraktiver wird. Auch der Schienengüterverkehr soll von der gesteigerten Kapazität und Zuverlässigkeit der Infrastruktur profitieren.³⁸

Veränderung gegenüber REF-2020: Anpassung des Zeitpfades zur Implementierung

Die Steigerung der Kapazität und Zuverlässigkeit durch den Deutschlandtakt führt auch zu Zeiteinsparungen im SPFV (z.B. auch wegen Abnahme der Zahl verpasster Anschlüsse). In REF-2020 wurde unterstellt, dass bis 2030 etwa die Hälfte der Verbesserungen durch den Deutschlandtakt realisiert werden können. Aufgrund von Verzögerungen und den zusätzlich geplanten intensiven Instandsetzungsmaßnahmen zwischen 2024 und 2030

³⁷ BMDV zur Bundesverkehrswegeplanung: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/BVWP/bundesverkehrswegeplan-2030-deutschlandtakt.html>

³⁸ Allianz pro Schiene zur Vision des Deutschlandtakts: <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/deutschlandtakt/>

erscheint dies nicht mehr möglich. Es wird stattdessen angenommen, dass der Deutschlandtakt bis 2030 zu 25% umgesetzt werden kann und die vollständige Umsetzung bis 2045 erfolgt.

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Die Wirkung des Deutschlandtakts wird durch eine wachsende Zeiteinsparung im Schienenpersonenverkehr modelliert. Als maximales Potenzial wird eine Zeiteinsparung von 10% der heutigen normalen Fahrzeit erwartet. Entsprechend der Annahme des Implementierungsfortschritts wird die Wirkung des Deutschlandtakts bis 2030 zu 2,5% Zeiteinsparung in ASTRA führen und bis 2045 zu 10%.

5.2.14 Starterkit ETCS

Das europäische Zugbeeinflussungssystem ETCS (European Train Control System) soll den europäischen Schienenverkehr harmonisieren und durch ein einheitliches System die Sicherheit erhöhen. Bei ETCS-Level 1 wird das Fahrzeug infrastrukturseitig über sogenannte Balisen mit Informationen über die Fahrterlaubnis versorgt, während die Geschwindigkeit vom Fahrzeug aus überprüft wird. Das System erlaubt Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 160 km/h. ETCS-Level 2 zeichnet sich durch eine kontinuierliche Kommunikation via Zugfunk (GSM-R) zwischen Infrastruktur und Fahrzeug aus. Durch Level 2 kann auf herkömmliche Signale zur Zugbeeinflussung verzichtet werden, Fahrterlaubnis und Geschwindigkeiten werden über das System reguliert und Geschwindigkeiten von über 160 km/h sind möglich.³⁹ Kapazitätserweiterungen der Schieneninfrastruktur lassen sich ebenfalls durch die Einführung von ETCS 2 erreichen. Dabei ist zu beachten, dass neben der Verkürzung der Blockabstände auf Strecken die ETCS-Steuerung der Durchfahrten im Knoten und die Fahrstraßenbildung mit Digitalen Stellwerken (DSTW) höchste Relevanz haben. Ein reiner ETCS 2-Betrieb auf Korridoren bringt deutlich höhere Kapazitätswachse als ein Mischbetrieb mit konventioneller Signalisierung. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 der Großknoten Stuttgart (Durchmesser ca. 50-60 km), die Neubaustrecke Köln-Rhein/Main und der TEN-T-Korridor Scan-Med mit ETCS 2 ausgestattet sind. Die Verkehrsunternehmen erwarten aufgrund europäischer Vorgaben eine Ausstattung mit ETCS auf einer Länge von 3 250 km bis 2030 und auf 16 000 km bis 2050 (VDV 2018).

Veränderung gegenüber REF-2020: Anpassung des Zeitpfades zur Implementierung

In REF-2020 wurde von einer schnelleren Implementierung von ETCS als in REF-2050 ausgegangen. Bis 2030 sollte ein Großteil des TEN-V Netzes abgedeckt sein und bis 2040 eine vollständige Ausstattung erfolgen. Für REF-2050 wird nur die Ausstattung der beiden Korridore und des Knoten Stuttgarts erwartet. Auch bis 2040 wird das volle Potenzial noch nicht realisiert.

³⁹ <https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/etcs/Grundlagen-ETCS/ETCS-Level-9741812#>

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

ETCS soll im Ausbau bis 2050 eine Kostensenkung von 1,6% ermöglichen. Diese Kostensenkung wird für alle Gutarten über eine Veränderung der Transportkosten modelliert. Bis 2030 werden in REF-2050 0,5% Kostenreduktion erzielt, bis 2040 1,2% und bis 2050 wird das Ziel von 1,6% erreicht.

Außerdem soll eine Reduktion der Fahrzeiten insbesondere im SGV möglich werden. Für die Zeitreduktion wurden ebenfalls geringere Werte angesetzt als in REF-2020. Diese betragen 1% geringere Fahrzeit bis 2030 und 2% bis 2040.

5.2.15 (Rangier-)Diesel-Lokomotiven mit Bio-Kraftstoff

Im Jahr 2022 hat die DB rund 1 000 Fahrzeuge für die Betankung mit dem dieselähnlichen Biokraftstoff HVO (hydrotreated vegetable oil) freigegeben. Die Güterverkehrstochter DB Cargo hat mit 800 Fahrzeugen bereits die gesamte Flotte für diese Biokraftstoffe freigegeben. Die restlichen 2 000 Dieselfahrzeuge der DB-Flotte sollen in den nächsten fünf Jahren folgen. Die Bahn investiert in die Umrüstung der Loks und den Aufbau der HVO-Tankstellen bis 2027 1,5 Mrd. Euro.⁴⁰ HVO wird nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelindustrie hergestellt, sondern aus Rest- und Abfallstoffen. Die verfügbaren Mengen an HVO sind aber begrenzt und unterliegen Nutzungskonkurrenzen.

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasster Mengenpfad Biokraftstoff

Der Anteil an Biokraftstoffen wird für jeden Energieträger (z.B. Biodiesel für Diesel) separat abgeschätzt, so dass die Vorgaben aus der THG-Quote und die Ergebnisse des EEV berücksichtigt und konsistent sind. Dabei wird keine spezifische Biokraftstoff-Quote für den Schienenverkehr unterstellt. Zwischen REF-2020 und REF-2050 änderte sich die Ausgestaltung der THG-Quote und daher waren auch die Biokraftstoffanteile für die einzelnen Kraftstoffe (siehe Kapitel 4.7, 5.2.2 und 14.1) anzupassen bzw. neu zu ermitteln.

Berücksichtigung in der Modellierung: gesamthaft modelliert

Die Anteile von Biodiesel (HVO und andere) an Diesel werden insgesamt für den Verkehrssektor ermittelt und dann auch auf die Schiene angewendet. Eine spezifische Modellierung der Anteile an HVO oder von anderem Biodiesel im Dieserverbrauch der Schiene ist nicht vorgenommen worden. Voraussichtlich wird Biodiesel (1) noch länger teurer sein als Diesel und (2) zunehmend von einer Nutzungskonkurrenz um Biomasse betroffen sein (z.B. für Herstellung von Biokerosin oder in Kraftwerken). Daher dürfte der weitere Umstieg auf Biodiesel, insbesondere HVO, nicht automatisch erfolgen, sondern regulierungsgetrieben und damit durch die (ggf. weiterentwickelte) THG-Quote.

⁴⁰ DB Erfahrungsbericht HVO-Nutzung: <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/logistik-news/auf-dem-gruenen-weg-db-cargo-testet-hvo-7327204>

5.2.16 Alternative Antriebe im Schienenverkehr

BMVI bzw. BMDV haben in den vergangenen Jahren bereits Förderungsprogramme aufgelegt, um im Schienenbereich eine technologieoffene Lösung für alternative Antriebe voranzutreiben.

Mit dem NIP (Nationales Innovationsprogramm für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie) und der Förderrichtlinie Elektromobilität (Förderrichtlinie EM) wurde die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben sowie hybriden Antriebstechnologien aus Batterie und Oberleitung bzw. Diesel und Batterie auch im Schienenverkehr gefördert.⁴¹

Veränderung gegenüber REF-2020: Neue Förderrichtlinie

Seit 17. Februar 2021 werden mit der *Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe im Schienenverkehr* Investitionsmehrkosten reduziert und so der Markthochlauf von klimafreundlichen Antriebstechnologien im Schienenverkehr unterstützt. Die Förderrichtlinie ist bis Juni 2024 gültig. Förderfähig sind batterieelektrische und brennstoffzellenbasierte Triebzüge im SPNV, hybride Antriebe im SGV sowie der Bau von Lade- und Betankungsinfrastruktur sowie Elektrolyseanlagen. Außerdem werden Studien zu Einsatzmöglichkeiten im jeweiligen Streckennetz gefördert. Das Fördervolumen betrug im Jahr 2022 141 Millionen Euro.

Berücksichtigung in der Modellierung: flankierend

Die Förderung führt zum Test von hybriden, batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Lokomotiven oder Triebzügen. Die Einführung betrifft aktuell nur eine sehr kleine Anzahl an Linien. Daher wurde auf eine Modellierung in ASTRA verzichtet und das Instrument als flankierend eingestuft.⁴²

5.2.17 Abschaffung der Kanalgebühren für die Binnenschifffahrt

Schiffahrtsabgaben (sowie Hafen- und Ufergelder), die von der gewerblichen Güter- und Fahrgastschifffahrt auf abgabepflichtigen Bundeswasserstraßen zu entrichten waren, wurden zum 1. Januar 2019 abgeschafft. Damit verzichtet der Bund auf Einnahmen von ca. 45 Millionen Euro pro Jahr. Ausgenommen hiervon sind die Mosel und der Nord-Ostsee-Kanal.⁴³ Um die Folgen der Corona-Pandemie abzufedern, wurde die Erhebung der Befahrensabgabe auf dem Nord-Ostsee-Kanal für den Zeitraum Juli bis Dezember 2020 ebenfalls ausgesetzt.

⁴¹ BMDV Förderung: <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Elektromobilitaet/Elektromobilitaet-im-schieneverkehr/elektromobilitaet-im-schieneverkehr.html>, im Bundesanzeiger veröffentlicht am 17.2.2021.

⁴² Im Partialmodell für den Schienenverkehr wurden die THG-Minderungen möglicher Diffusionspfade alternativer Antriebe und von Elektrifizierungsinself quantifiziert.

⁴³ Binnenschifffahrt Online: Schiffahrtsabgaben nur noch auf Mosel und Nord-Ostsee-Kanal. <https://binnenschifffahrt-online.de/2019/01/haefen-wasserstrassen/5734/schiffahrtsabgaben-nur-noch-auf-mosel-und-nord-ostsee-kanal/>

Veränderung gegenüber REF-2020: Keine

Die Abschaffung der Kanalgebühren ist bereits Bestandteil von REF-2020. Die Aussetzung der Befahrensabgabe auf dem Nord-Ostsee-Kanal wurde im November 2020 bis Ende 2021 verlängert, ist aber nicht Teil der Modellabbildung in ASTRA.⁴⁴

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Die Kostenreduzierung durch die Aussetzung der Befahrensabgabe wird im Modell durch eine Absenkung der Kosten pro tkm in der Binnenschifffahrt berücksichtigt. Die Absenkung beträgt 5% seit 2019.

Durch häufigere Niedrig- und Hochwasserereignisse werden allerdings auch ein Kostenanstieg und längere Transportdauern für die Binnenschifffahrt angenommen. Modellseitig werden daher sowohl Kostensteigerungen (+20% bis 2030) als auch Zeitverluste (+8% bis 2030) für die Binnenschifffahrt hinterlegt, jeweils im Vergleich zu 2020.

5.2.18 Alternative Antriebe in der Binnenschifffahrt

Mit der neuen „Richtlinie zur Förderung der nachhaltigen Modernisierung von Binnenschiffen“ vom 24. Juni 2021 werden - je nach Unternehmen und Maßnahme – 40% bis 90% der Modernisierungskosten bezuschusst. Gegenstand der Förderung sind Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit sowie Maßnahmen zur Reduzierung der Luftschadstoffemissionen. Durch die Richtlinie sollen Anreize für Investitionen in neue emissionsärmere Antriebssysteme oder sogar Nullemissionsantriebe, die Ausstattung an Bord mit digitaler Informationstechnik und Assistenzsystemen sowie in Umbaumaßnahmen für eine größere Einsatzfähigkeit bei Niedrigwasser geschaffen werden. Die Geltungsdauer der Richtlinie läuft vom 1. Juli 2021 bis zum 31. Dezember 2023.⁴⁵

Berücksichtigung in der Modellierung: flankierend

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Alternativen in der Laufzeit der Förderrichtlinie (im wesentlichen Umrüstung auf LNG) ist keine explizite Modellierung vorgenommen und das Instrument als flankierend eingeordnet worden.

5.2.19 CO₂-Standards Pkw-Flotten

Im Rahmen der EU-Abgas-Gesetzgebung wurde mit den CO₂-Standards auch ein Instrument zur Begrenzung der CO₂-Emission von Straßenfahrzeugen eingeführt. Dabei wird ein gewichtsbezogener Flottenzielwert für CO₂-Emissionen (zunächst von Pkw sowie LNF) festgelegt, der die gemittelten Emissionen von Neufahrzeugen eines Herstellers in der EU abbildet. Dabei galt für die Emissionsermittlung der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ). Seit 2018 wird der Zielwert auch auf Basis des WLTP (Worldwide Harmonized

⁴⁴ DVZ-Bericht: <https://www.dvz.de/rubriken/see/detail/news/nok-bleibt-auch-2021-von-befahrungsabgaben-befreit.html>

⁴⁵ BMDV Förderrichtlinie vom 24.6.2021: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/WS/foederrichtlinie-nachhaltige-modernisierung-binnenschiffe.pdf?__blob=publicationFile

Light-vehicles Test Procedure) ermittelt. Für eine Übergangszeit werden beide Werte berechnet und angegeben. Seit 2021 müssen Verbrauchsangaben auf Basis des WLTP gemacht werden.

Die seit 2015 geltenden Flottengrenzwerte für Pkw schreiben vor, dass neue Fahrzeuge (im gewichtsbezogenen Mittel) nicht mehr als 130g CO₂/km ausstoßen (nach NEFZ). Ab 2020 wurde der Flottenzielwert auf 95g CO₂/km für 95% der Flotte verschärft und ab 2021 auf 100% der Flotte ausgeweitet (jeweils NEFZ). Durch die EU-Verordnung (2019/631) vom 17. April 2019 wurden die Reduktionsziele noch einmal verschärft. Gegenüber dem WLTP-Durchschnittswert 2021 müssen die neu zugelassenen Flotten 2025 15% und 2030 37,5% weniger CO₂ emittieren, damit die Hersteller Strafzahlungen für die Nichteinhaltung entgehen.⁴⁶ Das Ziel von 37,5% Reduktion war Bestandteil von REF-2020.

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasster CO₂-Effizienzpfad

Im Rahmen des Europäischen Green Deal stellt eine weitere Verschärfung der CO₂-Effizienzziele für neue PKW und LNF ein wichtiges Instrument dar. Der EU-Trilog-Beschluss am 27.10.2022, angenommen im März 2023 und veröffentlicht als VO (EU) 2023/851 im EU-Amtsblatt mit Inkrafttreten zum 15.05.2023, erhöhte das CO₂-Reduktionsziel für PKW auf -55% im Jahr 2030 ggü. 2021 (für LNF 50%). Ab 2035 soll ein Reduktionsziel von 100% erreicht werden. Auch wenn die finale Entscheidung nach dem Abschneidezeitpunkt von REF-2050 liegt, wird diese Änderung aufgrund des längeren Vorlaufs und damit der Absehbarkeit, ihrer großen Wirksamkeit und in Konsistenz mit dem PjB-2023 im REF-2050 berücksichtigt.

Berücksichtigung in der Modellierung: geprüft und modelliert

Die Flottenzielwerte sind ein Einflussfaktor im PKW-Modell. Die Höhe der Zielwerte beeinflusst das Ambitionsniveau der Effizienzverbesserung von Verbrennern. In REF-2020 stagnierte die Effizienz von 2020 bis 2030. In REF-2050 wurde basierend auf einer abgeschwächten Fortschreibung der Verbesserung der letzten Zulassungsjahrgänge hinterlegt, dass die Effizienz der neuen Verbrenner sich bis 2030 im Mittel um 5% bis 10% verbessert (weitere Details siehe Kapitel 6.3).

Neben den Flottenzielwerten beeinflussen weitere Faktoren die Kaufentscheidung und damit die Erreichung der Flottenzielwerte, wie z.B. das Modellangebot, die Entwicklung von Technologie und Fahrzeugpreisen, Steuersätze, Kraftstoffpreise. Diese Faktoren werden in die Modellierung einbezogen, es wird ein Marktverlauf abgeschätzt und jährlich das CO₂-Flottenmittel der Neuzulassungen abgeschätzt. Die Überprüfung zeigt, dass im Jahr 2030 die Zielwerte der CO₂-Standards in Deutschland übertroffen werden (siehe Kapitel 6.4.3). Da die Zielwerte europäisch einzuhalten sind, wird im Anhang auch eine Einordnung der deutschen Marktergebnisse in den europäischen Kontext vorgenommen (siehe Kapitel 17.2).

⁴⁶ Umweltbundesamt: PKW und leichte Nutzfahrzeuge – die europäische Abgas-Gesetzgebung.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge>

Das CO₂-Reduktionsziel von 100% im Jahr 2035 wird in der Modellierung durch einen prohibitiv hohen Preisanstieg der Verbrenner-PKW simuliert, so dass deren Nachfrage auf null sinkt und der Markt sich auf BEV und FCEV einengt.

5.2.20 Umweltbonus PKW und LNF - Förderung E-Mobilität

Die Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen - der sogenannte Umweltbonus - wurde im Mai 2016 als Teil des Maßnahmenpakets Elektromobilität eingeführt. Mit der Richtlinie wurden der Kauf bzw. das Leasing von BEV und FCEV sowie PHEV gefördert, um den Markthochlauf von elektrifizierten PKW und LNF zu unterstützen und somit zunächst das Ziel von einer Million elektrischen PKW im Jahr 2020 und später das Ziel von 15 Millionen vollelektrischen Pkw bis 2030 zu erreichen.

Die Fördersumme setzt sich dabei aus einem staatlichen und einem Herstelleranteil zusammen. Am 3. Juni 2020 wurde der staatliche Zuschuss mit der Einführung der bis 31. Dezember 2021 befristeten Innovationsprämie noch einmal erhöht.⁴⁷

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasste Förderrichtlinie

Im November 2020 wurde die erhöhte Innovationsprämie bis Ende 2022 verlängert. Die Förderung von PHEVs ist dem Beschluss nach ab 2022 an eine elektrische Mindestreichweite geknüpft. Zunächst sollte die verlängerte Innovationsprämie bis Ende 2025 gelten.⁴⁸ Mit der am 27. Juli 2022 beschlossenen und am 17. November 2022 in Kraft getretenen Änderung der Richtlinie zur Förderung des Absatzes von elektrisch betriebenen Fahrzeugen sinken aber ab dem 1. Januar 2023 die Zuschüsse für BEV und FCEV, während Plug-in-Hybridfahrzeuge nicht mehr gefördert werden. Ab dem 1. September 2023 gilt die Förderrichtlinie außerdem nur noch für Privatpersonen. Ab 2024 sind dann nur noch BEV bzw. FCEV unter 45 000 Euro Nettolistenpreis förderfähig.⁴⁹

Stand 1. Februar 2023 wurden bisher insgesamt knapp 1,9 Millionen Fahrzeuge gefördert, darunter knapp 1,1 Millionen BEV.⁵⁰ Für 2023 und 2024 stehen Fördermittel in Höhe von 3,4 Mrd. Euro bereit.

In REF-2020 wurde der Umweltbonus (nicht die Innovationsprämie) für BEV und FCEV bis Ende 2026 und für PHEV bis Ende 2024 hinterlegt. Die Revision der Förderrichtlinie in REF-2050 führt damit zu einer Verkürzung der Förderung. Für REF-2050 gilt der Stand der Förderrichtlinie vom 27.7.2022, d.h. Auslaufen der PHEV-Förderung Ende 2022, Auslaufen der gewerblichen Förderung Ende August 2023 und Abschmelzen der Förderung für vollelektrische PKW in den Jahren 2023 und 2024. Ende der Förderung mit Ende 2024.

⁴⁷ BMWK Förderrichtlinie: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-der-richtlinie-zur-foerderung-absatzes-von-elektrisch-betriebenen-fahrzeugen-umweltbonus.pdf?__blob=publicationFile&v=6

⁴⁸ Bundesregierung und Konzertierte Aktion Mobilität: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/4-spitzengespraech-der-konzertierten-aktion-mobilitaet-transformation-unterstuetzen-wertschoepfungsketten-staerken-1815818>

⁴⁹ BAFA Förderbedingungen 2023 und 2024: https://www.bafa.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/Energie/2022_15_emo_neue_foerderbedingungen.html

⁵⁰ BAFA aktuelle Förderbilanz: https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_zwischenbilanz.html

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Die Kaufprämie für BEV und FCEV ist als nominale Größe direkt im Modell abgebildet. Die nominalen Förderbeträge werden in reale Werte umgerechnet und gehen als eine Komponente in die Bildung des gesamten Kaufpreises der privaten oder gewerblichen PKW ein. Die Begrenzung des Förderbudgets auf 3,4 Mrd. € für die Jahre 2023 und 2024 wird ebenfalls berücksichtigt. In realen Werten beträgt diese 2,8 Mrd. €₂₀₁₀. Sobald diese Summe ausgeschöpft ist, erhalten im Modell im Folgequartal keine weiteren E-PKW mehr den Umweltbonus. Die Förderung von PHEV endet in der Modellierung Ende 2022 und gewerblich beschaffte E-PKW erhalten ab dem 4. Quartal 2023 keinen Umweltbonus mehr.

Die Nettolistenpreisgrenzen werden in ASTRA über die Zuordnung der Segmente zu Förderhöhen abgebildet. Solange PKW bis Nettolistenpreisgrenze 60 000 € gefördert werden, erhalten PKW im Segment Gelände & SUV ebenfalls den (abgesenkten) Umweltbonus. Mit Absenkung der Nettolistenpreisgrenze auf 45 000 € ab Anfang 2024 wird in ASTRA-M für dieses Segment kein Umweltbonus mehr gewährt.

5.2.21 KFZ-Steuerbefreiung für E-PKW und CO₂-Differenzierung

Im Rahmen des Konjunkturprogramms im Juni 2020 wurde auch die KFz-Besteuerung angepasst, um stärkere Anreize zur Beschaffung von E-PKW oder CO₂-effizienten PKW zu setzen. Mit der Umsetzung durch das „Siebte Gesetz zur Änderung des Kraftfahrzeugsteuergesetzes“ (KraftStG) vom 16. Oktober 2020 wird die Steuerbefreiung von Elektrofahrzeugen (BEV und FCEV) für zehn Jahre ab dem Tag der erstmaligen Zulassung gewährt, jedoch maximal bis 2030. Der CO₂-Austoß wird bei der Festlegung der Steuer ebenfalls etwas stärker berücksichtigt.⁵¹

Mit der Einführung der Klimakomponente bei der Besteuerung von CO₂-Emissionen schlägt sich der CO₂-Austoß für nach dem 1. Januar 2021 erstmals zugelassene Fahrzeuge über der Freigrenze von 95 g CO₂/km in sechs Stufen mit 2 bis 4 Euro pro g CO₂/km über den jeweiligen Schwellenwerten in der Kfz-Steuer nieder. Des Weiteren wurde ein bis 31. Dezember 2024 befristeter Steuerfreibetrag von 30 Euro für emissionsarme Pkw (<95 g CO₂/km) eingeführt.⁵²

Es wird angenommen, dass BEV & FCEV ab 2031 entsprechend der gewichtsbezogenen Steuertabelle besteuert werden (bis 2 000kg Fahrzeuggewicht 11,25 € je 200kg).

Veränderung gegenüber REF-2020: keine

Die Regelungen für die KFz-Steuer wurden bis zum Abschneidezeitpunkt nicht verändert. Daher ist die Ausgestaltung der KFz-Steuer in REF-2020 und REF-2050 identisch.

⁵¹ Bundesgesetzblatt: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetze_Gesetzesvorhaben/Abteilungen/Abteilung_III/19_Legislaturperiode/2020-10-22-7-Aenderung-Kraftfahrzeugsteuergesetz/1-Gesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=2

⁵² Bundesregierung: Klimafreundliche, bezahlbare Mobilität. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/kfz-steuer-1759368>

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Die KFz-Steuer kann mit ihren Komponenten direkt in ASTRA modelliert werden, da alle Bestimmungsgrößen der Steuer im Modell hinterlegt sind. Dazu gehört:

- Der Hubraum von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist spezifisch für jedes Segment und jede Antriebsart (z.B. Diesel, Benzin, Hybride, etc.) hinterlegt.
- Das Fahrzeuggewicht von BEV und FCEV ist ebenfalls segmentspezifisch hinterlegt.
- Die CO₂-Emission gemäß WLTP ist über die Energieeffizienz und deren Umwandlung in einen CO₂-Wert ebenfalls im Modell hinterlegt. Anhand der CO₂-Emission wird die Höhe der CO₂-Komponente der KFz-Steuer eines PKW berechnet. Dabei wird der Grenzwert von 95 gCO₂/km berücksichtigt, die sechs Kostenklassen und die Veränderlichkeit der Effizienz der Neuzulassungen über die Zeit. Dadurch, dass die Grenzen der Kostenklassen im Zeitverlauf fix sind, kann ein Verbrenner über die Zeitachse in eine niedrigere Kostenklasse wechseln.

Alle monetären Werte werden zunächst nominal im ASTRA-Modell hinterlegt und für die Modellierung anhand des Inflationsindex (siehe Kapitel 4.3) in reale Werte umgerechnet. Aufgrund der nominalen Konstanz der Kostengrößen gehört auch die KFz-Steuer zu den Kostenelementen, die im Zeitverlauf günstiger werden.

5.2.22 Absenkung Dienstwagenbesteuerung für E-PKW

Werden Firmenwagen (überwiegend) privat und damit als Dienstwagen genutzt, entsteht ein geldwerter Vorteil, der durch die sogenannte Dienstwagensteuer ausgeglichen wird. Dabei ist nach Einkommenssteuergesetz (EStG) im Allgemeinen pauschal 1% des Bruttolistenpreises monatlich als geldwerter Vorteil des Dienstwagennutzers zu versteuern, zuzüglich 0,03% des Bruttolistenpreises je Entfernungskilometer zwischen Wohnung und Tätigkeitsstätte.⁵³

Im Jahr 2019 wurde für BEV und FCEV mit einem Bruttolistenpreis unter 40 000 € der pauschale Steuersatz auf 0,5% abgesenkt. Für Plug-In Hybride (PHE) galt dies auch, wenn diese weniger als 50g CO₂/km ausstoßen oder eine elektrische Mindestreichweite von 40 Kilometern erzielen. Die Anforderung an die Mindestreichweite von PHEV steigt ab 2022 auf 60 Kilometer und ab 2025 auf 80 Kilometer. Die Regelung gilt für Fahrzeuge, die zwischen dem 1. Januar 2019 und dem 31. Dezember 2030 angeschafft werden.

Mit der Änderung von § 6 Einkommenssteuergesetz (EStG) vom 12.12.2019⁵⁴ sind für BEV und FCEV jetzt bis 60 000 Euro Bruttolistenpreis, die ab dem Jahr 2020 angeschafft werden, lediglich noch 0,25% des Bruttolistenpreises pro Monat pauschal als geldwerter Vorteil zu versteuern.

⁵³ Alternativ kann auch mit der sogenannten Fahrtenbuchmethode fahrtgenau versteuert werden.

⁵⁴ BMJ EStG: <https://www.gesetze-im-internet.de/estg/index.html>

Veränderung gegenüber REF-2020: keine

Die Regelungen zur Besteuerung von Dienstwagen waren bereits Bestandteil von REF-2020 und wurden in REF-2050 nicht verändert.

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Die Höhe der Dienstwagensteuer hängt von zwei Aspekten ab:

- Den Fahrzeugeigenschaften wie Preis und Antriebsart
- Den individuellen Parametern des Dienstwagennutzers wie Einkommenssteuersatz und Pendeldistanz.

Die Fahrzeugeigenschaften sind direkt im ASTRA-Modell hinterlegt. Hier kann für die Kaufentscheidung auf die entsprechenden Modellvariablen (wie Kaufpreis für gewerbliche Käufer, Segmente, Antriebsart) zurückgegriffen werden.

Die individuellen Parameter werden den Segmenten zugeordnet. Steuersätze sind am niedrigsten in den Segmenten Mini und Klein und am höchsten im Oberklassensegment. Durchschnittliche Pendeldistanzen sind am höchsten in den Segmenten Mittel, Gelände&SUV und Vans, d.h. in den Segmenten mit den höheren Anteilen an Familien-PKW.

Aus der Kombination der Fahrzeugparameter mit den persönlichen Parametern ergibt sich für jede Segment-Antriebskombination ein Wert, der für die Dienstwagensteuer in die Kaufentscheidung eingeht. Dieser Wert ist aber nur relevant in zwei der fünf Marktsegmente des PKW-Kauf-Modells, d.h. bei den TCO-basierten Entscheidern im Dienstwagensegment und bei dem allgemein gewerblichen Segment, welches auch einen Anteil an Dienstwagen aufweist.

5.2.23 Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharings

Mit in Kraft treten des Carsharinggesetzes (CsgG) am 1. September 2019 wird das Carsharing definiert und eine Bevorrechtigung stationsloser sowie stationsbasierter Carsharing-Fahrzeuge beim Parken und bei der Gebührenerhebung ermöglicht. Mit der Novelle der Straßenverkehrsordnung im April 2020 wurde die Grundlage dafür geschaffen, dass eben jene Bevorrechtigungen auch in der Praxis umgesetzt werden konnten, indem ein Emblem für die Kennzeichnung von Carsharing-Parkplätzen sowie für die Kennzeichnung von Carsharing-Fahrzeugen eingeführt wurden.

Veränderung gegenüber REF-2020: keine

Berücksichtigung in der Modellierung: flankierend

Aufgrund der noch geringen Flotte und des daher begrenzten Einflusses auf die Gesamtemission trotz hoher Jahresfahrleistung ist das Instrument nicht modelliert worden. Aufgrund der Abgrenzung von Carsharing in der Modellierung der Verkehrsnachfrage

bestünde im Prinzip die Möglichkeit, sinkende Kosten für Carsharing-Nutzung in ASTRA zu modellieren und damit einen Anstieg der Nutzung abzubilden.

5.2.24 Mauttarife und Befreiung für Gas- und Null-Emissions-LKW

Die LKW-Maut wird seit 2005 erhoben und basiert auf der sogenannten Eurovignetten Richtlinie (1999/62/EC zuletzt geändert durch EU 2022/362). Die Tarife sollten ursprünglich nur die Infrastrukturfinanzierung absichern und werden aufgrund regelmäßig erstellter Wegekostengutachten abgeschätzt und nachjustiert. In ASTRA ist die Entwicklung der Wegekosten seit 2005 abgebildet, einschließlich ihrer Ausweitung auf zusätzliche LKW-Gewichtsklassen und eine wachsende Zahl an Bundesstraßen. In REF-2020 wurden die Mauttarife der Wegekosten-Reform (siehe Alfen et al. 2018) aus dem Jahr 2019 von 2019 bis 2035 nominal konstant gehalten.

Die LKW-Mautsätze setzen sich aus drei Teilen zusammen: Infrastruktur-, Luftverschmutzungs- und Lärmbelastungskosten. Die Höhe des Teils Infrastrukturkosten richtet sich nach der Gewichtsklasse (ab 18 Tonnen zusätzlich nach Achsenanzahl). Für die Luftverschmutzungskosten ist die Schadstoffklasse des LKW relevant. Die Lärmbelastungskosten werden pauschal berechnet und betragen einheitlich für mautpflichtige Fahrzeuge 0,2 ct pro Kilometer (in Anlehnung an das Wegekostengutachten, Alfen et al. 2018).

Eine Mautbefreiung für alternative Antriebe (BEV, FCEV, Oberleitungs- und Gas-LKW) wurde in REF-2020 von 2019 bis Ende 2022 implementiert. Für Erdgas-SNF (CNG und LNG) wurde diese Befreiung bisher zunächst für die Zeit bis einschließlich 2022 angenommen. Für schwere Elektro-LKW galt in REF-2020 ab 2023 nur der Infrastruktur-Tarif von 17,4 ct/km für Sattelzugmaschinen. Gas-LKW trugen zusätzlich die Luftschadstoff- und Lärmkomponenten. Seit 2016 wurde die Maut auf Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 7,5 bis 12 Tonnen ausgeweitet.

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasster Preispfad

Für REF-2050 wurden grundsätzlich die Mauttarife aus dem Wegekostengutachten (Alfen/Aviso 2022) und der zugehörigen Tarifreform im Jahr 2022 mit Wirkung ab 1.1.2023 im Modell hinterlegt und bis 2050 nominal konstant gehalten.

Für Gas-LKW wurde die Befreiung von der Lkw-Maut bis Ende 2023 in REF-2050 verlängert. Ab dem 1. Januar 2024 werden für Fahrzeuge, die überwiegend mit Erdgas betrieben werden, Infrastrukturkosten und Lärmbelastungskosten erhoben. Gegenüber einem vergleichbaren, mit Diesel betriebenen Fahrzeug soll so der Mautsatz um etwa 1,1 ct/km reduziert sein.

Für Nullemissionsfahrzeuge (d.h. BEV, FCEV und Oberleitungs-LKW) wird die Mautbefreiung bis Ende 2025 verlängert.

Mit dem Fünften Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßenmautgesetzes vom 8. Dezember 2022 wurde die Anpassung der Mautsätze beschlossen. Demnach betragen die

Infrastrukturkosten bei Fahrzeugen mit 7,5 – 12 Tonnen Gesamtgewicht 0,067€ und bei 12 - 18 Tonnen Gesamtgewicht 0,109 Euro pro Kilometer. Bei einem Gesamtgewicht von über 18 Tonnen liegen die Kosten bei 0,143 bis 0,155 €/km, je nach Achsenanzahl. Die Luftverschmutzungskosten liegen je nach Fahrzeugklasse bei 0,015 bis 0,187 Euro pro Kilometer. Der Mautteilsatz für Lärmkosten beträgt 0,012 bzw. 0,016 Euro pro Kilometer.⁵⁵

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Die Mauttarife sind in ASTRA für die fünf modellierten Gewichtsklassen (3,5-7,5t, 7,5-12t, 12-20t, über 20t und Sattelzugmaschinen (SZM)) direkt hinterlegt, so wie sie durch das jeweils geltende Wegekostengutachten und den Bundestagsbeschluss festgelegt sind. Dabei sind die leichteren Gewichtsklassen deckungsgleich mit den Klassen der Mautdefinition (3,5-7,5t und 7,5-12t zulässiges Gesamtgewicht), während die oberen Klassen teilweise überlappen. Für die Modellierung wurde der ASTRA-Klasse 12-20t die Mautklasse 12-18t zugeordnet, der ASTRA-Klasse über 20t die Mautklasse über 18t und 3-Achser, sowie der ASTRA-Klasse SZM die Mautklasse über 18t und mindestens 4 Achsen.

Der Zeitpfad der Mautsätze wird in ASTRA jeweils direkt nominal hinterlegt und mit dem Inflationsindex (siehe Kapitel 4.3) in reale Werte umgerechnet. Für die Kaufentscheidung eines neuen LKW gingen in früheren Jahren die Mautsätze der jeweils zu einem Zeitpunkt aktuell geltenden Emissionsnorm ein, da es z.B. 2010 noch keine Euro-VI LKW gab. Seit 2015 sind dies die Mautsätze von Euro-VI LKW.

Die Mautsätze beeinflussen auch die Güterverkehrsnachfrage. Die Modalwahlentscheidung ist aber nur nach zwei Klassen für schwere Nutzfahrzeuge differenziert: 3,5 bis 12t (d.h. 2 Fahrzeuggewichtsklassen in der Flotte) und über 12t (d.h. 3 Fahrzeuggewichtsklassen in der Flotte). Die bei der Modalwahl zu berücksichtigenden Mautsätze ergeben sich aus der Zusammensetzung der LKW-Flotte, den Fahr-Anteilen auf bemauteuten Strecken und den jeweils gültigen Mauttarifen für die 5 Gewichtsklassen.

5.2.25 CO₂-Standards für LKW

Mit der EU-Verordnung (VO 2019/1242) vom 20. Juni 2019 werden CO₂-Standards für neue schwere Nutzfahrzeuge festgelegt. Zukünftig müssen die CO₂-Emissionen der neu zugelassenen Flotten ab 2025 um 15% und ab 2030 um 30% niedriger liegen gegenüber einer Referenz, die im Zeitraum 2019 bis 2020 ermittelt wurde. Dabei unterliegt nur ein Teil der schweren LKW mit zulässigem Gesamtgewicht über 16t Tonnen, definiert durch die sogenannten VECTO-Klassen,⁵⁶ der Verpflichtung durch die CO₂-Standards.

⁵⁵ Siehe TollCollect Tarife: https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/p1745_mauttarife_2023.html

⁵⁶ VECTO (Vehicle Energy Consumption calculation Tool) ist das EU Simulations-Tool zur Überprüfung der CO₂-Standards für SNF: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/vehicle-energy-consumption-calculation-tool-vecto_en

Für die Zeit nach 2030 sind keine weiteren Verbesserungen durch die CO₂-Standards vorgeschrieben. Allerdings konnte in den letzten beiden Dekaden im Mittel eine jährliche Effizienzverbesserung von etwa 1% erzielt werden.

Veränderung gegenüber REF-2020: gleiche CO₂-Standards bei veränderten Rahmenbedingungen

Die Vorschriften der CO₂-Regulierung (VO 2019/1242) sind zwischen REF-2020 und REF-2050 unverändert. D.h. eine 30%-ige CO₂-Minderung muss im Jahr 2030 gegenüber 2019/2020 erreicht werden. Aber die Rahmenbedingungen haben sich signifikant geändert:

- Batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge (BEV) sind vom Prototypenstadium in die ersten Nutzungen eingeführt worden. Dadurch konnten erste Kostensenkungen realisiert werden. Das Angebot an schweren BEV wird aktuell ausgebaut und bis 2030 werden die Kosten von BEV in REF-2050 gegenüber REF-2020 nochmals deutlich sinken.
- Die technische Entwicklung und Normung für Ladeinfrastruktur mit Leistungen von 750 kW bis 1 MW schreitet voran und wird in REF-2050 den Aufbau erster Anlagen ermöglichen. REF-2020 erwartete, da keine spezielle Förderung für Megawattladen verfügbar war, auch keine Entwicklung und Installation dieser Anlagen.
- Förderprogramme ermöglichen sowohl die Finanzierung von 80% der Mehrkosten eines Null-Emissions-LKW gegenüber einem Diesel-Pendant als auch des Aufbaus von Ladeinfrastruktur.
- Die Mautbefreiung für Null-Emissions-LKW wurde bis Ende 2025 verlängert. Anschließend tragen diese LKW nur die Infrastruktur-Maut und sind von der Luftverschmutzungs-Komponente befreit.

Diese veränderten Rahmenbedingungen sorgen dafür, dass auch in den höheren Gewichtsklassen bis 2030 BEV-LKW in begrenzter Stückzahl in den Markt kommen und so einen Beitrag zur Erreichung der Ziele der CO₂-Standards leisten. Gleichzeitig müssen die Effizienzsteigerung von Diesel- und Gas-LKW ebenfalls zur Zielerreichung beitragen.⁵⁷

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Das Kauf-Modell für schwere Nutzfahrzeuge berücksichtigt die entscheidungsrelevanten Komponenten der Anschaffungs- und Betriebskosten für die verschiedenen Antriebsarten (Details siehe Kapitel 8). Eine der Komponenten ist die Effizienzentwicklung, die aus verschiedenen Studien (z.B. Wietschel et al. 2017, Matt/Flämig 2018) abgeleitet ist und eine Rückkopplung auf die Fahrzeugpreise aufweist.

Durch den moderaten Hochlauf an vollelektrischen SNF und eine leicht gesteigerte Effizienzentwicklung von Verbrennern mit begrenzten Anteilen an Gas-LKW werden die Vorgaben der CO₂-Standards in Deutschland erreicht. Dies wird für die jeweilige Simulation

⁵⁷ Es sei hier nochmal betont, dass in REF-2050 noch keine CO₂-differenzierte LKW-Maut eingeführt wurde, da die Entscheidungen zur Einführung erst in 2023 deutlich nach dem Abschneidezeitpunkt getroffen wurden.

von REF-2050 überprüft. Sollten die Ziele nicht eingehalten werden in einer Simulation, dann müsste die Effizienzentwicklung der Verbrenner verbessert und eine korrespondierende Kostenerhöhung der Verbrenner-SNF hinterlegt werden. Damit würden wiederum auch mehr BEV in die neu zugelassen Flotte gelangen.

5.2.26 Nutzfahrzeug-Förderung: 80% der Mehrkosten für leichte sowie schwere elektrische Nutzfahrzeuge

Mit einer Förderrichtlinie wurde am 02.08.2021 das Förderprogramm „Energieeffiziente und/oder CO₂-arme schwere Nutzfahrzeuge“ (EEN) abgelöst, mit dem bis März 2021 bis zu **40% der Investitionsmehrkosten** bei der Anschaffung von „nachhaltigen“ Nutzfahrzeugen gefördert wurden. Neben elektrischen (Batterie, Brennstoffzelle, Hybrid) fielen bis 2021 auch CNG sowie LNG-betriebene Fahrzeuge unter die Förderrichtlinie.⁵⁸

Veränderung gegenüber REF-2020: Anpassung bzw. Neuauflage der Förderrichtlinie

Mit der „Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge“ (kurz KsNI Richtlinie) werden bis zu **80% der Investitionsmehrkosten** bei der Anschaffung von elektrischen Nutzfahrzeugen - im Vergleich zu Nutzfahrzeugen mit Verbrennungsmotor - gefördert. Förderfähig sind Nutzfahrzeuge der Fahrzeugklassen N1, N2 sowie N3 mit elektrischem Antrieb (neben batterieelektrisch auch Hybrid- sowie wasserstoffbasierte Antriebe) sowie Sonder- und Umrüstfahrzeuge inkl. zugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur (ebenfalls bis zu 80% Förderung).⁵⁹

Mit der Neuauflage der Förderung von nachhaltigen Nutzfahrzeugen werden nur noch emissionsarme Fahrzeuge gefördert und keine Gas-Antriebe, wobei die Förderquote 80% anstatt 40% beträgt. Die Fördersumme wurde ebenfalls erhöht, von ehemals 1,6 Mrd. Euro für das Förderprogramm EEN auf schätzungsweise bis zu 5,6 Mrd. Euro für KsNI. Die neue Förderrichtlinie gilt bis zum 31. Dezember 2025.

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Der Anstieg von 40% auf 80% der Förderung des Mehrpreises gegenüber einem Diesel-LKW bei der Förderung von E-Lkws wird im Modell ab dem 4.Quartal 2021 abgebildet durch spezifische Variablen, die bei der Beschaffung eines elektrifizierten LKWs die Kosten entsprechend reduzieren. Die Budgetbegrenzung für das KsNI-Förderprogramm wurde auf 5,6 Mrd. Euro festgelegt.

Auch die Förderung des Aufbaus von betriebseigener Ladeinfrastruktur für elektrische Nutzfahrzeuge im Rahmen des EEN (=40%) bzw. ab 2022 des KsNI (=80%) ist im Modell

⁵⁸ BMVI bzw. Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM), EEN-Förderrichtlinie <https://www.hwk-oberfranken.de/downloads/richtlinie-een-72.2717.pdf>

⁵⁹ BMDV bzw. Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM), KsNI-Förderrichtlinie https://www.balm.bund.de/DE/Foerderprogramme/KlimaschutzundMobilitaet/KsNI/Ksni_node.html

für die Laufzeit bis Ende 2025 entsprechend aktualisiert worden, so dass die zusammen mit einem E-LKW mitbeschaffte Ladestation entsprechend vergünstigt wird. Dabei werden in der Modellierung keine separaten Förderaufrufe differenziert, d.h. mögliche Übergangsphasen mit Förderlücken sind nicht berücksichtigt.

5.2.27 Weiterentwicklung und Erprobung elektrischer Antriebe bei SNF

Das *Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge* des BMVI (2020) sieht für die drei elektrifizierten Antriebe batterieelektrisch, mit Wasserstoff-Brennstoffzelle und Oberleitungs-LKW jeweils einen Fahrplan vor, mit dem zu unterschiedlichen Zeitpunkten und für alle drei Technologien ein Markthochlauf bei SNF vor 2030 erfolgen kann.

Ein zentrales Element des Gesamtkonzeptes im Zeitraum 2021 bis 2024 sind die Förderung und Durchführung von Demonstrationsvorhaben. Diese sollten als Innovationscluster umgesetzt werden, von denen im Jahr 2021 drei Cluster benannt wurden. Den Betrieb aufgenommen hat bisher aber nur das eine Cluster-Projekt HOLA zum Testen der batterieelektrischen SNF im Fernverkehr mit Ladesäulen mit über 750 kW Ladeleistung. Die ebenfalls geplanten Projekte zum Aufbau von 300 km Oberleitungsstrecke für Pendelverkehre sind nicht in die Gänge gekommen. Beim Test von H₂-SNF werden begrenzte Fortschritte erzielt, z.B. mit dem Aufbau von LKW-fähigen H₂-Tankstellen und der Förderung einzelner Demofahrzeuge.

Veränderung gegenüber REF-2020: angepasste Demophase

In REF-2020 wurde von der vollständigen Implementierung der Demophase des *Gesamtkonzeptes klimafreundliche Nutzfahrzeuge* ausgegangen. Für REF-2050 wurde dies nur für BEV-SNF unterstellt, während der Aufbau der 300 km Oberleitungs-Pendelstrecke nach 40 km stoppt. Damit wird auch der Lernkurven-Pfad zur Kostensenkung der Oberleitungstechnologie nicht erreicht und angestoßen. Für H₂-LKW wird auch nur eine begrenzte Zahl von 18 H₂-Tankstellen für LKW aufgebaut. Diese erhöht sich erst mit der beginnenden Marktdurchdringung von H₂-SNF ab 2027 weiter und liegt im Jahr 2030 bei 80 solcher Tankstellen.

Berücksichtigung in der Modellierung: direkt modelliert

Die Innovationscluster wurden als exogene Entwicklungen in der Modellierung von LKW-Kauf und Infrastrukturaufbau von 2021 bis 2024 eingeführt. Der in den Clustern erfolgte Aufbau würde aber die Erzielung von Skaleneffekten und Kostensenkungen erleichtern. Diese Erleichterung der Kostensenkung fällt für Oberleitungs-SNF in REF-2050 weg.

5.2.28 Lang-LKW: Ausweitung des Positiv-Netzes

Lang-LKW existieren in einem Typ mit 17,88 m Gesamt-Länge und mehreren Typen mit Längen deutlich über 20 m Länge (bis 25,25 m). Die Nutzung von Lang-LKW ist auf ein definiertes Positiv-Netz der deutschen Autobahnen und Bundesstraßen beschränkt. Mit der 9. Änderungsverordnung Lang-Lkw wurde im Jahr 2019 das sogenannte Positiv-Netz zur

Befahrung mit Lang-LKW um 450 Strecken erweitert. Die 10. Änderungsverordnung Lang-Lkw wurde im Juli 2020 diskutiert und am 13.11.2020 im Bundesanzeiger veröffentlicht. Mit ihrem Inkrafttreten am 14.11.2020 sind weitere 200 Strecken dem Positiv-Netz hinzugefügt worden.⁶⁰ Neben dem Positiv-Netz regeln die Änderungsverordnungen auch die Zulassung der verschiedenen Typen von Lang-LKW.

Veränderung gegenüber REF-2020: keine

Aufgrund des bereits vorliegenden Entwurfs für die 10. Änderungsverordnung wurde diese bereits in REF-2020 aufgenommen, so dass für REF-2050 keine Änderung bzgl. der Nutzung von Lang-LKW implementiert wurde.

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Lang-LKW ermöglichen eine Erhöhung der Beladung eines LKW, wobei die Gewichtsgrenzen für Lang-LKW identisch mit denen schwerer LKW sind (40t im Allgemeinen). Der Effizienz-Vorteil der Lang-LKW zeigt sich, wenn nicht das Gewicht, sondern das mögliche Ladevolumen der begrenzende Faktor für eine höhere Beladung ist. Dies ist bei heutigen Stückgütern häufig der Fall. Durch die Nutzung von Lang-LKW mit ihren größeren Ladevolumina lassen sich also auch die Beladungsfaktoren in Tonnen steigern. In ASTRA-M werden die letzten Änderungen zur Regulierung von Lang-LKW mit einer Verbesserung von 1% bei der Beladung, und ebenfalls 1% bei Effizienz und Kosten in den beiden schweren LKW-Gewichtsklassen über 20t zGG und Sattelzugmaschine hinterlegt.

5.2.29 CO₂-Standards für leichte Nutzfahrzeuge (LNF)

Mit der EU-Verordnung 510/2011 werden zum ersten Mal die CO₂-Standards für neuzugelassene leichte Nutzfahrzeuge (LNF) mit bis zu 3,5t zGG definiert für die Zeithorizonte 2015 und 2020/2021. Diese CO₂-Standards wurden mit der Fassung von 2019 (EU 2019/631) verschärft und für die Jahre bis 2030 vorgegeben. Demnach sollten im Jahr 2025 15% und für 2030 31% weniger Emissionen von neu zugelassenen LNF ausgehen. Die Hersteller unterliegen dabei spezifischen Zielen. Eine Überschreitung des Emissionsziels in einem bestimmten Jahr führt zu einer Strafzahlung von 95 € pro Gramm CO₂/km über dem Zielwert für jedes zugelassene Fahrzeug.

In der Fassung von 2019 können Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auch nach 2030 weiterhin verkauft werden.

Veränderung gegenüber REF-2020: Anpassung CO₂-Effizienzpfad

Im Rahmen des Europäischen Green Deal stellt eine weitere Verschärfung der CO₂-Effizienzziele für neue LNF ein wichtiges Instrument dar. Der EU-Trilog-Beschluss am 27.10.2022, angenommen im März 2023 und veröffentlicht als VO (EU) 2023/851 im EU-Amtsblatt mit Inkrafttreten zum 15.05.2023, erhöhte das CO₂-Reduktionsziel für LNF auf -

⁶⁰ BMDV Definition von Lang-LKW und Positivnetz: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lang-lkw-aenderungsverordnung.html>

50% in 2030 ggü. 2021. Ab 2035 soll ein Reduktionsziel von 100% erreicht werden. Auch wenn die finale Entscheidung nach dem Abschneidezeitpunkt von REF-2050 liegt, wird diese Änderung aufgrund des längeren Vorlaufs und damit der Absehbarkeit ihrer großen Wirksamkeit und in Konsistenz mit dem PjB-2023 in REF-2050 berücksichtigt.

Berücksichtigung in der Modellierung: indirekt modelliert

Die Modellierung der Kaufentscheidung bei LNF erfolgt mit einer Kombination aus Logit- und TCO-Modell. Dabei gehen Fahrzeugpreise, Energiekosten, Betriebskosten und Förderzuschüsse in die Modellierung ein. Für REF-2050 wurden die Fahrzeugpreise angepasst und entsprechend die Diffusion der verschiedenen Antriebstechnologien in die Flotte und der Hochlauf der E-Mobilität überprüft. Das Reduktionsziel von 50% im Jahr 2030 wurde mit der Modellierung ohne spezielle zusätzliche Einflüsse der CO₂-Standards erreicht.

Zur Erreichung des CO₂-Reduktionsziels von 100% im Jahr 2035 werden die Preise der Verbrenner-LNF hochgesetzt, so dass ein Kauf inattraktiv wird und ausschließlich BEV und FCEV neu zugelassen werden.

5.2.30 Förderprogramme für fortschrittliche und strombasierte synthetische Kraftstoffe

Das BMDV erwartet große Potenziale bei der Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen sowohl aus Biomasse als auch aus erneuerbarem Strom (Power-to-Liquid (PtL), Power-to-Gas (PtG)). Deshalb wurde im Jahr 2021 eine Förderstrategie, ausgestattet mit 1,54 Mrd. € für den Zeitraum 2021 bis 2024, aufgesetzt.⁶¹

Diese Mittel teilen sich auf in 640 Mio. € für anwendungsorientierte Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte, einschließlich Innovationsclustern zu erneuerbaren Kraftstoffen, sowie die Errichtung einer Entwicklungsplattform für PtL. Bei den Förderprogrammen sollen auch Ausschreibungsmodelle genutzt werden.

Der zweite Teil in Höhe von 900 Mio. € dient der Förderung des Aufbaus von Produktionsanlagen für fortschrittliche Biokraftstoffe sowie fürstrombasierte Kraftstoffe einschließlich strombasiertem Kerosin.

Daneben existieren auch weitere Förderprogramme von BMBF und BMWK, insbesondere im Bereich des Aufbaus von H₂-Produktionsanlagen.

Veränderung gegenüber REF-2020: erhöhte Fördermittel

In den Jahren 2021 bis 2023 wurden die Fördermittel für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen (Bio, strombasiert) wie oben dargestellt erhöht.

⁶¹ BMDV Förderstrategie synthetische Kraftstoffe: <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/Klimaschutz-im-Verkehr/neues-foerderkonzept-erneuerbare-kraftstoffe.html>

Berücksichtigung in der Modellierung: flankierend

Der Treiber der Entwicklung zu Aufbau und Nutzung synthetischer Kraftstoffe liegt in der Ausgestaltung der THG-Quote. Sofern diese entsprechend ambitioniert ausgestaltet (einschließlich Unter- und Mindestquoten) und mit Sanktionen versehen ist, wird der Aufbau und die Inverkehrbringung der alternativen Kraftstoffe erfolgen. Die Fördermittel stimulieren den Aufbau der Anlagen und der Kompetenz in Deutschland, erhöhen aber nicht die zu erwartenden Mengen. Deswegen werden die Fördermittel als flankierend betrachtet und nicht mit einer eigenen Modellierung versehen. Die Modellierung erfolgt in der Iteration des Kraftstoff-Modells mit der ASTRA-Energienachfrage und dem ASTRA-Investitionsmodell (siehe Kapitel 5.2.2).

5.2.31 Förderung zur Elektrifizierung der Linien-Busflotte

Das BMU förderte seit 2018 die Anschaffung „von Linienbussen mit diesel-elektrischem- und batterie-elektrischem Antrieb“ mit 620 Mio. Euro (Sofortprogramm „Saubere Luft“) (BReg 2018). Bei Anschaffungen (Kauf oder Leasing) von mehr als fünf Elektrobussen wurden bis zu 80 Prozent der Investitionsmehrkosten gefördert. Neben Batterie-elektrischen Bussen wurden auch Plug-In-Hybridbusse gefördert.⁶² Das Sofortprogramm wurde mit der „Richtlinie zur Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“ umgesetzt. Diese war vom 05. März 2018 bis zum 31. Dezember 2021 gültig.

Veränderung gegenüber REF-2020: Neue/angepasste Förderrichtlinie

Mit der anschließenden *Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr* vom 7. September 2021 fördert das BMVI die Beschaffung von Bussen mit alternativen Antrieben auf Basis von Batterie- und Brennstoffzellentechnologie sowie von Bussen, die zu 100 % mit aus Biomasse erzeugtem Methan betrieben werden (inkl. Betankungs- und Wartungsinfrastruktur, Machbarkeitsstudien). Die Investitionsmehrkosten für umweltfreundliche Busse ergeben sich aus dem Vergleich der Anschaffungskosten mit einem konventionellen „Referenzbus“ (z.B. mit Dieselantrieb) gleicher Größe.⁶³

Bei der Anschaffung oder Umrüstung von bzw. auf batterieelektrische oder Brennstoffzellen-Busse beträgt die maximale Fördersumme bis zu 80% der Mehrkosten, bei der Anschaffung oder Umrüstung auf Gas (Bio-Methan) sowie bei Investitionen in Lade-, Betankungs- und Wartungsinfrastruktur bis zu 40%. Für Machbarkeitsstudien beträgt die maximale Förderung 200 000 €.

Die Förderrichtlinie ist vom 07. September 2021 bis zum 31. Dezember 2025 gültig.

⁶² BMUV Förderrichtlinie E-Busse: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Verkehr/elektrobusse_foerderrichtlinie_bf.pdf

⁶³ BMDV Förderrichtlinie alternativ angetriebene Busse: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/foerderrichtlinie-alternative-antriebe-busse-personalverkehr.pdf?__blob=publicationFile

Berücksichtigung in der Modellierung: flankierend

Die Anzahl an Neuanschaffungen von Fahrzeugen, die zur Erfüllung der Clean Vehicles Directive (CVD) erforderlich sind, wird mit den angenommenen Fahrzeugpreisen und Fördersummen kumuliert bis 2025 berechnet. Daraus wird abgeleitet, dass die Förderung keine zusätzlichen, über die Erfüllung der CVD hinausgehenden, Fahrzeuge mit alternativen Antrieben in den Markt bringt und somit als flankierendes Instrument zur CVD-Richtlinie gilt (siehe das folgende Kapitel 5.2.32).

5.2.32 Clean Vehicles Directive / SaubFahrzeugBeschG

Die überarbeitete Richtlinie „Clean Vehicles Directive“, die im Juni 2019 von der EU beschlossen wurde, musste bis zum 2. August 2021 in nationales Recht umgesetzt werden, was mit dem „Saubere-Straßenfahrzeuge-Beschaffungsgesetz“ am 9. Juni 2021 geschah. Das Gesetz gibt Mindestziele bei der Beschaffung oder Beauftragung von emissionsarmen bzw. emissionsfreien Pkw, LNF und SNF durch öffentliche Auftraggeber hinsichtlich der Antriebsart bzw. den Emissionen vor. Berücksichtigt werden auch ÖPNV-Busse, sowie teilweise privatwirtschaftliche Unternehmen wie KEP-Dienstleister. Die Quoten müssen sowohl von den Administrationen des Bundes als auch der Länder eingehalten werden.

Bei Pkw und LNF müssen zwischen dem 2. August 2021 und dem 31. Dezember 2025 38,5% der Fahrzeuge „sauber“ sein (also weniger als 50g CO₂/km sowie 80% Luftschadstoffemissionen nach RDE emittieren). Ab 2026 bis 31. Dezember 2030 müssen mindestens 38,5% der Fahrzeuge emissionsfrei sein (= weniger als 1g CO₂/km). Im 1. Referenzzeitraum (bis Ende 2025) müssen 10%, im 2. Referenzzeitraum (bis Ende 2030) 15% der SNF mit alternativen Kraftstoffen (Strom, Wasserstoff, Gas, etc.) betrieben werden. Bei Bussen (inkl. Linienbussen) sind es im ersten Zeitraum 45% und im zweiten 65%, wobei die Hälfte der Busse emissionsfrei, also batterieelektrisch oder mit Brennstoffzelle betrieben sein muss.⁶⁴

Berücksichtigung in der Modellierung: modelliert

Aus den Vorgaben der Richtlinie leitet sich der Hochlauf an Linienbussen mit alternativen Antrieben ab. Die Erfüllung der Richtlinie, unterstützt durch die oben genannte Förderrichtlinie, wird angenommen. Aufgrund des bisher geringen Bestands an Gas-Bussen wird auch unter der CVD keine starke Zunahme der Gasflotte erwartet. Allenfalls Verbünde, die bereits Gasbusse einsetzen, erweitern noch ihren Fuhrpark. Stattdessen wird von einer starken Erfüllung durch batterieelektrische Antriebe, in geringen Mengen auch durch FCEV, ausgegangen.

5.2.33 Erhöhung Regionalisierungsmittel (RegG)

Das Regionalisierungsgesetz (RegG) regelt seit 1996, wie viele Regionalisierungsmittel der Bund den Ländern zur Finanzierung des SPNV (oder ÖPNV) bereitstellt. Im Jahr 2016

⁶⁴ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html>

betragen die Mittel 8,2 Mrd. Euro. Anschließend stiegen die Mittel um 1,8% pro Jahr. Mit dem 5. Gesetz zur Änderung des Regionalisierungsgesetzes vom 14.02.2020 (Beschluss des Bundesrates) wurden für den Zeitraum von 2020 bis 2031 zusätzlich 5,25 Mrd. Euro bereitgestellt.

Veränderung gegenüber REF-2020: Gesetzesänderung

Weitere Erhöhungen kamen durch das 6. und 7. Gesetz zur Änderung des RegG. 2021 wurden die Mittel um 1 Mrd. Euro erhöht. Zum Ausgleich der Mindereinnahmen durch die Coronapandemie und für die drei Monate der Gültigkeit des Neun-Euro-Tickets wurden, mit dem Beschluss im Mai 2022 die Regionalisierungsmittel im Jahr 2022 um insgesamt 3,7 Mrd. Euro erhöht.

Berücksichtigung in der Modellierung: modelliert

Die Erhöhung der Mittel ermöglicht eine Attraktivitätssteigerung im ÖPNV durch Verbesserungen der Fahrtzeiten um 3% bis 2030 für Bus und SPNV gegenüber 2019. Dies ist bereits in REF-2020 umgesetzt und wird beibehalten. Der Rettungsschirm in Höhe von 3,7 Mrd. € bleibt in der Modellierung ohne Effekt, da hier nur für eine Kostendeckung der Unterdeckung gesorgt wurde. Das von Juni bis August geltende 9-Euro-Ticket, welches ebenfalls durch die Erhöhung finanziert wurde, ist durch eine 3-monatige Kostenreduktion differenziert nach Fahrtweiten explizit modelliert.

Änderungen nach Abschneidezeitpunkt von REF-2050

Mit dem 8. Gesetz zur Änderung des RegG (Beschluss 16.12.2022) wurden die Mittel für das Jahr 2022 einmalig um 1 Mrd.€ erhöht und eine jährliche Dynamisierungsrate ab 2023 von 1,8 auf 3% beschlossen (zusätzliche Mittel im Zeitraum 2022 bis 2031 von rd. 17,3 Mrd. Euro). Mit der 9. Änderung des RegG werden zusätzlich 1,5 Mrd. Euro vom Bund (+ 1,5 Mrd. von den Ländern) für die Finanzierung des Deutschlandtickets ab 2023 bereitgestellt.

Für das Jahr 2022 standen somit insgesamt 14,1 Mrd. Euro zur Verfügung. Im Jahr 2023 betragen die Regionalisierungsmittel gemäß obigen Erläuterungen 12,4 Mrd., in 2024 12,7 Mrd., in 2025 13,1 Mrd. und in 2026 11,9 Mrd. Euro.

5.2.34 Maßnahmenbündel ÖPNV

Attraktivitätssteigerungen im ÖPNV führen zu Verbesserungen der Fahrtzeiten durch:

- Reduzierte Zugangszeit und vereinfachter Zugang zu Reiseauskunft, Buchung und Bezahlung verschiedener Verkehrsmittel durch digitale Mobilitätsplattformen, die verschiedene Mobilitätsangebote wie ÖPNV, Mikro-Sharing oder On-Demand Verkehre bündeln
- GVFG: Im Rahmen des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes unterstützt der Bund die Länder mit anteiliger Finanzierung bei der Umsetzung von größeren Infrastrukturprojekten im SPNV, insbesondere beim Bau von Straßen- oder U-Bahnen sowie bei der Elektrifizierung oder Reaktivierung von

Schienenstrecken oder Modernisierungsprojekten. Während die Mittel 2020 insgesamt 665 Mio. Euro betragen, wird für die Jahre 2021-2024 1 Mrd. Euro pro Jahr für entsprechende Großprojekte bereitgestellt. Im Jahr 2025 sollen die Finanzierungsmittel auf 2 Mrd. Euro steigen, und ab 2026 mit 1,8% Dynamisierung pro Jahr weiter ansteigen (3. Änderung GVFG, Juni 2020).

- Autonomes Fahren auch im öffentlichen Nahverkehr (beschrieben in Kapitel 4.11).

Veränderung gegenüber REF-2020: Angepasster Preispfad

Förderrichtlinie "Modellprojekte zur Stärkung des ÖPNV (Januar 2021): im Rahmen des KSPR: bis 2024 stehen 250 Millionen Euro zur Verfügung

Berücksichtigung in der Modellierung: modelliert

Attraktivitätssteigerung im ÖPNV durch Verbesserungen der Fahrzeiten (Fahrzeitverbesserung um -3% bis 2030 für Bus und SPNV gegenüber 2019). Bereits in REF2020 umgesetzt, wird beibehalten. Der Rettungsschirm in Höhe von 3,7 Mrd. € bleibt in der Modellierung ohne Effekt, da hier nur für eine Kostendeckung gesorgt wurde. Das von Juni bis August geltende 9-Euro-Ticket, welches ebenfalls durch die Erhöhung finanziert wurde, ist durch eine Kostenreduktion berücksichtigt.

Zusätzlich zu den 3% Fahrzeitreduktionen durch die RegM werden weitere Effekte erreicht, so dass die Fahrzeiten sich zusätzlich um 1% für Bus und SPNV verbessern.

Die Umsetzung von digitalen Plattformen ermöglicht die Reduktion der Zugangszeiten zu Bussen, Zügen und Sharing-Verkehrsmitteln um 2-5 Minuten, abhängig von der Distanz. Diese Maßnahme hat das Potenzial, die Kosten für Shared Modes bis zum Jahr 2050 um 50% zu reduzieren.

Autonomes Fahren (basierend auf dem moderaten Szenario aus der MKS Automatisierungs-Studie, beschrieben in Kapitel 4.11) wird voraussichtlich zwischen 2025 und 2030 erste Auswirkungen auf den Betrieb des ÖPNV haben und dann bis 2050 anwachsen. Änderungen umfassen verbesserte Effizienz durch konstante Fahrweise und geringfügige Reduktion der Geschwindigkeiten und Verbräuche.

5.2.35 Radverkehrs- und Städtebauinstrumente

Im Bereich des Radverkehrs lässt sich ein Trend hin zu Pedelecs beobachten. Bis 2025 steigt bereits ohne Instrumente die Verbreitung von Pedelecs aufgrund der Nachfrage nach umweltfreundlichen und komfortablen Fahrrädern mit elektrischer Tretunterstützung deutlich an. Dies wird durch Technologiefortschritte und eine breitere Modellvielfalt unterstützt. Im Radverkehr ergibt sich bereits dadurch eine Reisezeit-Reduktion bis 2030 um 16%. Langfristig, bis 2050, sinkt die Reisezeit um 22%. Die prozentuale Veränderung ergibt sich jeweils gegenüber 2019.

Die Beschleunigung des Radverkehrs wird unterstützt durch die aktuelle Radverkehrsförderung, welche bereits zu großen Teilen in REF-2020 bestand. Zu den länger bestehenden Förderprogrammen gehören:

- Haushaltsmittel zur Förderung und Finanzierung von Radverkehrsinfrastruktur: 2018: 166,3 Mio. Euro, 2019: 196,7 Mio. Euro, 2020: 225,3 Mio.€
- Förderung von nicht-investiven Modellvorhaben
- Förderung Radschnellwege (RSW): Der Bund fördert seit 2017 die Planung und den Bau von RSW in der Baulast der Länder und Kommunen (bis 2030 mit insgesamt rd. 390 Mio. €). Im Klimaschutzprogramm von 2019 (KSP-2019) war eine Verdoppelung der Mittel 2021-2023 vorgesehen.
- Richtlinie zur Förderung innovativer Projekte zur Verbesserung des Radverkehrs in Deutschland: Jun 2019-2020 (Jun 2019), bis 2023 125 Mio.€ Fördervolumen
- Förderprogramm Radnetz Deutschland: bis 2023 (Haushalt 2020, Dez 2019): bis Ende 2022 wurden mit 49 Mio.€ 91 Projekte gefördert.
- Sonderprogramm „Stadt und Land“: 657 Mio.€ 2020-2023.

Veränderung gegenüber REF-2020: erhöhte Förderung

Zur Erhöhung und Verlängerung der Investitionsmittel des Bundes in den Radverkehr bzw. die Fahrradinfrastruktur wurden beschlossen:

- Erhöhung Haushaltsmittel zur Förderung und Finanzierung Radverkehrsinfrastruktur: 2021: 434,2 Mio.€; 2022: 755 Mio.€ + Aufstockung um 300 Mio. € (einmalig aus KSSP 22); 2023: 561 Mio.€
 - Erhöhung und Verlängerung Sonderprogramm „Stadt und Land“ im Haushalt 2022: einmalige Aufstockung (81,5 Mio.€) + 301,5 Mio.€ aus KSSP 2022. Insgesamt sind 1,04 Mrd.€ zwischen 2021-2024 bereitgestellt bzw. geplant
 - Erhöhung der Förderung von innovativen Modellprojekten im Radverkehr:
 - (Beschluss Dez 2020) 2020-2026: 155 Mio.€ Fördervolumen 2020-2026
 - (Beschluss Jun 2021) 2022: 15,5 Mio. €; 2023: 25 Mio. €; 2024: 6 Mio. €; >2025: 4 Mio. €
- ➔ Insgesamt sind ca. 900 Mio. € der Radverkehrsförderung umgesetzt, jedoch sind die Mittel noch nicht gänzlich abgerufen worden.

Mithilfe verschiedener Förderprogramme, Verordnungen, Pilotprojekten und direkten Fördermitteln wird neben dem Radverkehr auch der Fußverkehr sowie die Mikromobilität unterstützt:

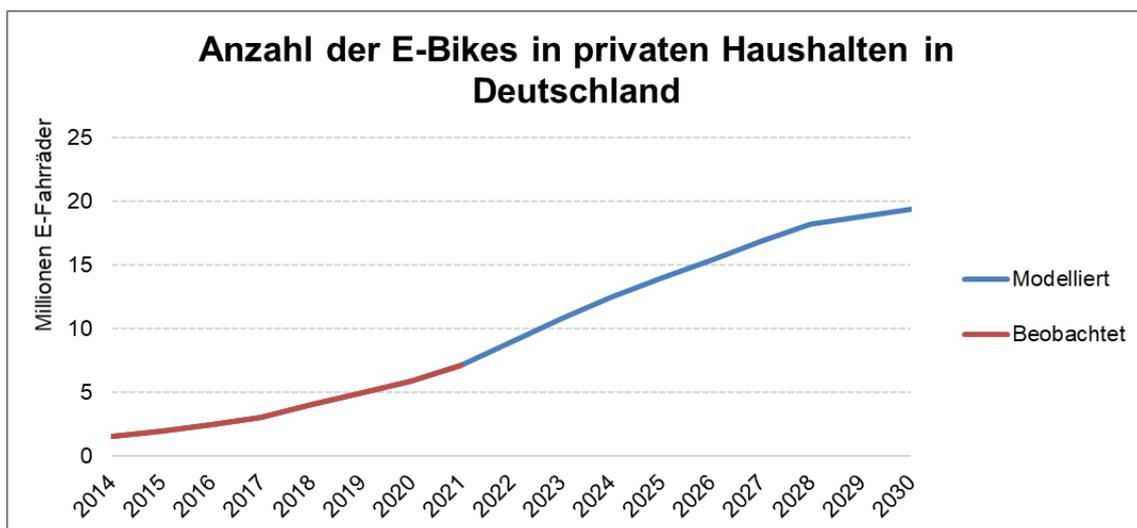
- Bundeshaushalt 2022 insgesamt 1 Mio. Euro für die investive Fußverkehrsförderung (Unterstützung fußgängerfreundlicher Modellprojekte wie beispielsweise Straßenumgestaltungen und modellhafte Querungsanlagen)
- Verkehrssicherheitsprogramm (VSP): 2021-2030
- Innovationsprogramm mFUND: 7 Projekte zum Fußverkehr
- „Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme“: 4 Projekte zum Fußverkehr

- Unterstützung von 28 Projekten (investiven Modellvorhaben), wie der Bau von Fuß- und Radwegebrücken, Tunnel, Kreuzungsanlagen
- Nationaler Radverkehrsplan – NRVP 3.0: Förderung von Fuß- und Radverkehrsprojekten mit 2,8 Mio.€
- Elektrokleinstfahrzeuge-Verordnung (eKFV) und StVO-Novelle 2019.

Berücksichtigung in der Modellierung: modelliert

Im Modell sind die Investitionen in die Rad- und Fußinfrastruktur durch Zeitverbesserungen umgesetzt. Sowohl im Fahrrad- als auch im Fuß-Verkehr werden gewählte Wege nicht immer die kürzesten Wege sein. Einen entscheidenden Faktor können andere Umstände wie die gefühlte Sicherheit und die landschaftliche Schönheit darstellen, welche zum allgemeinen Komfort auf einer Strecke beitragen. Vor allem die (gefühlte) Sicherheit kann durch Investitionen erhöht werden. Das kann zum Beispiel durch eine bauliche Trennung zum motorisierten Verkehr erreicht werden oder durch eine bessere Ausleuchtung von Wegen. Im Fußverkehr kann so durch das Schaffen neuer Routen eine Zeitverbesserung erreicht werden. Im Radverkehr können zusätzlich zu den neuen Routen auch bestehende Wege durch Infrastrukturverbesserungen eine höhere Durchschnitts-Geschwindigkeit ermöglichen. Auch eine bessere Routenführung durch das Leiten vorbei an Lichtsignalanlagen oder die Bevorrechtigung an eben diesen sorgen für eine Verbesserung im Rad- und Fußverkehr.

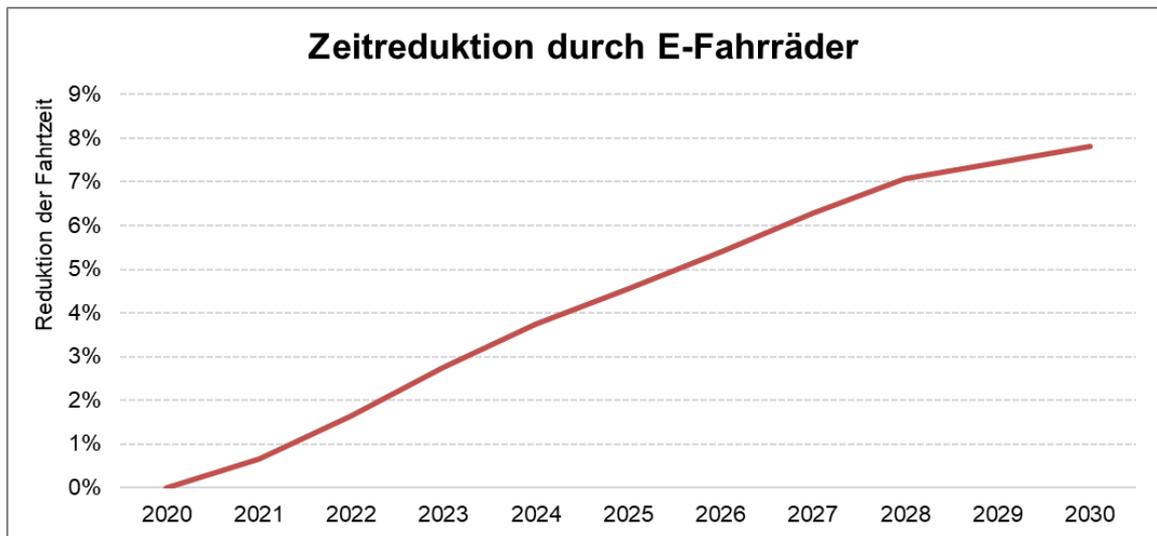
Im Fußverkehr wurde eine zeitliche Verbesserung von bis zu 5% im Jahr 2050 modelliert. Im konventionellen Radverkehr hingegen sind es bis 2050 7%. Zusätzlich ergeben sich durch den Trend der Verbreitung von elektrischen Antrieben im Radverkehr weitere Zeiteinsparungen. Abbildung 33 zeigt, wie sich der E-Bike und Pedelecbesitz in Deutschland bis 2030 entwickelt. Werte bis 2021 sind beobachtete Werte, die Werte 2022 bis 2030 wurden anhand der Absatzzahlen von Fahrrädern über die Jahre berechnet.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung. Statistisches Bundesamt.

Abbildung 33 Anzahl der E-Bikes/Pedelecs in privaten Haushalten in Deutschland

Aufgrund der Elektrifizierung können höhere durchschnittliche Geschwindigkeiten erreicht werden. Die Reduktion der Fahrtzeit durch Pedelecs beträgt bis 2030 etwa 8%. Bis 2050 wird mit nochmals zusätzlich 4% Zeiteinsparung gerechnet.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 34 Beschleunigung im Radverkehr durch Zunahme Pedelecs

Die Fahrzeiten im Radverkehr wurden für REF-2020 detailliert abgeschätzt und auch als Startgröße für REF-2050 übernommen (siehe Kapitel 5.3).

5.3 Reisezeitreduktion in ÖPNV und Fahrrad-Verkehr

Die Inputdaten zur Reduktion der ÖPNV-Reisezeiten basieren auf Herleitungen zur Wirkungsermittlung im Handlungsfeld Nahmobilität aus den Arbeiten der MKS und der NPM im Jahr 2018. Die bereits im KSPr-2019 ergriffenen Instrumente für den urbanen und regionalen Verkehr (z.B. Aufstockung GFVG auf 2 Mrd. € p.a., 900 Mio. € für Radinfrastruktur) führen zu einer verbesserten Infrastruktur sowie einem verbesserten Angebot und damit verkürzten Fahrzeiten. Für die einzelnen Instrumente wurden Reduktionen der Eingangsgrößen ermittelt und mit Hilfe von Nachfrageelastizitäten in entfernungsabhängige Reduktionen der PKW-Verkehrsnachfrage umgerechnet und im Netzmodell von PTV Validate umgelegt.

Die den einzelnen Instrumenten zugeordneten Auswirkungen auf nachfragebeeinflussende Faktoren (in erster Linie Zeit und Kosten) lassen sich deutschlandweit nur überschlägig abschätzen, da eine differenzierte Modellierung Informationen in einem nicht verfügbaren Detaillierungsgrad erfordern würden. Daher wurden die Annahmen auf Basis des Verkehrsmodells der Region Stuttgart verifiziert. Die Methode basierte auf der Vorgehensweise im Rahmen des Regionalverkehrsplans des Verbands Region Stuttgart, in dem Auswirkungen verschiedenster Ansätze aus Infrastruktur, organisatorischen sowie

ordnungs- und preispolitischen Maßnahmen betrachtet wurden⁶⁵. Die Reisezeitersparnis im ÖPNV setzte sich aus der Überlagerung verschiedener Maßnahmen zusammen, die aus den Instrumenten abgeleitet wurden und Angebotserweiterungen (neue Linien), betriebliche Maßnahmen (Taktverdichtungen), Beschleunigungen im Betrieb (u.a. durch Automatisierung und Bevorrechtigung) und verbesserte Anbindung (Zubringerverkehr, P+R) enthalten.

Die (empfundene) Reisezeiten des ÖPNV setzen sich in einem Verkehrsmodell aus verschiedenen Komponenten zusammen. Die Reisezeit im ÖV ist die Summe von

- Zugangszeit,
- Mittlere Startwartezeit
- Fahrtzeit
- Mittlere Umsteigewartezeit
- Abgangszeit.

Zudem gibt es Zu- und Abschläge durch das verwendete Verkehrssystem, da aus empirischen Untersuchungen bekannt ist, dass z.B. die Fahrzeit in Schienenverkehrssystemen positiver wahrgenommen wird („Schienenbonus“).

Die Abschätzung der durch die Instrumente ausgelösten mittleren Zeitersparnisse im ÖV lassen sich den einzelnen Reisezeitkomponenten zuordnen. So führt z.B. eine Taktverdichtung zu einer Reduktion von Startwartezeit und Umsteigewartezeit, eine Beschleunigung zu einer Reduktion der Fahrtzeit und der Ausbau des Netzes zu einer starken Fahrtzeitreduktion auf einzelnen Relationen sowie zu einem ergänzenden Effekt durch den Schienenbonus.

Im Verkehrsmodell der Region Stuttgart wurden verschiedene Testrechnungen mit verschiedenen Varianten von Anpassungen an die Reisezeit berechnet und durch die Überlagerung von städtischen und suburbanen Wegen zu Gesamtwirkungen zusammengefasst.

Für den Radverkehr lag zum Zeitpunkt der Erstellung kein lokales oder regionales Radnetzmodell zur detaillierten Berechnung von Anhaltswerten vor. Aus diesem Grund wurde eine pauschale Geschwindigkeitserhöhung durch den Infrastrukturausbau, die Verbesserung der Abstellanlagen und die Erhöhung der Flottengeschwindigkeit durch erhöhten Elektrifizierungsgrad angenommen. Außerdem wurde eine andere Wahrnehmung im Fahrradverkehr durch mehr Komfort durch den zunehmenden Einsatz von Pedelecs unterstellt. Zusammen mit der verbesserten Infrastruktur führt die „Pedelecisierung“ zu deutlich verringerten Fahrzeiten auf Distanzen bis 10 km Entfernung. Es ergeben sich Reisezeit-Reduktionen bis 2030 von 16%. Bis 2050, sinkt die Reisezeit um 22%. Die prozentuale Veränderung ergibt sich jeweils gegenüber 2019.

⁶⁵ Vgl. u.a. <https://www.region-stuttgart.org/aufgaben-und-projekte/verkehrsplanung/regionalverkehrsplan/?noMobile=1>

Neben der oben beschriebenen Modellierung im Netzmodell PTV Validate wurden die Daten in aggregierter Form für die Operationalisierung der Instrumente in ASTRA aufbereitet. Hier wurden die vorgenannten, als Maximalwerte anzusehenden Reisezeitreduktionen entsprechend der jeweiligen Betrachtungsfälle in geringerem Umfang angesetzt. Außerdem wurden zusätzliche empirische Daten genutzt, wie z.B. der Anteil an Pedelecs an neu gekauften Fahrrädern, und damit auf die Bestände an Pedelecs geschlossen.

5.4 Hinweis auf Maßnahmen in Ergänzung zum Referenzszenario

Seit dem Stichtag August 2022 sind bis heute einzelne ergänzende Maßnahmen beschlossen worden. Diese Maßnahmen sollten als ein erstes Instrumentenpaket oder ein Zwischenbündel (ZB) definiert und bewertet werden. Die Untersuchung von weiteren Klimaschutzmaßnahmen, die zur Zielerreichung im Jahr 2030 und danach beitragen, könnte dann auf dem Referenzszenario REF-2050 zuzüglich der Ergänzungen aus dem Zwischenbündel aufbauen.

Beispiele für solche Maßnahmen sind die Einführung des Deutschlandtickets im Jahr 2023 sowie die Verschärfung des CO₂-Standards für schwere Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 und die Einführung zusätzlicher Zielwerte für 2035 und 2040.

Außerdem sollte jeweils die Aufstellung der jährlichen Bundeshaushalte Beachtung finden. Dort können sich durch Kürzungen von Investitions- und Fördermitteln auch einzelne der obengenannten Instrumente in ihrer Wirkung reduzieren.

6 Referenzszenario der PKW-Flotte

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung inklusive Änderungen relevanter Eingangsgrößen (Kapitel 6.3) und die Entwicklung der PKW-Flotte nach Segmenten und Antriebsarten (Kapitel 6.4). Die PKW unterliegen den in REF-2050 berücksichtigten Instrumenten, die dem vorherigen Kapitel zu entnehmen sind. Dabei sind insbesondere die CO₂-Standards für PKW-Neuwagen für die Zieljahre 2030 (-55% ggü. 2021) und 2035 (-100% ggü. 2021), die Kaufprämie für elektrifizierte PKW und die Anpassungen bei der Dienstwagensteuer Treiber in der Elektrifizierung des PKW-Bestandes. Weiterhin sind die Verfügbarkeit eines vielfältigen Modellangebots rein batterieelektrischer PKW (BEV) und hybrider PKW mit externer Stromzuführung (PHEV) in den verschiedenen Segmenten sowie die Entwicklung der Batteriekosten und -technologie (Kapitel 6.1) relevant für den Hochlauf der Elektromobilität. Als weiterer Einflussfaktor kommt der Aufbau der Ladeinfrastruktur hinzu (Kapitel 6.2).

6.1 Modellhochlauf von E-PKW und Entwicklung der Batteriekosten und -technologie

Eine Ursache für die steigende Attraktivität von E-PKW ist die **Ausweitung des Modellangebots**. In allen Segmenten ist mittlerweile ein Angebot an E-PKW vorhanden. Das Segment der Kleinwagen ist eigentlich für einen Antrieb mit Batterie geeignet, weist jedoch eine geringe Zahlungsbereitschaft möglicher Käufer, zumindest bei preisgünstigen Modellen, auf. Die Kompakt- und Mittelklasse ist das wichtigste Segment für die Elektrifizierung der PKW, sowohl aufgrund der vorhandenen Zahlungsbereitschaft in diesem Segment als auch aufgrund der Mindest-Fahrzeuggröße bei begrenztem Fahrzeuggewicht. In den Segmenten der Oberklasse, Sport- und Geländewagen sowie SUVs ist ein großes Modellangebot zu beobachten, der Produktionshochlauf von E-PKW war aber zunächst verzögert (NPM AG1, 2021).

Die Attraktivität der E-PKW wird neben dem Anschaffungspreis, der PKW-Reichweite und den Betriebskosten ebenfalls durch Zeitgeist, Umweltbewusstsein und Informationsstand der Käufer beeinflusst. Außerdem spielt der Aufbau einer flächendeckenden und nutzerfreundlichen Ladeinfrastruktur eine entscheidende Rolle. Diese wird als hinreichend vorhanden angenommen (vgl. Kapitel 6.2).

Die **Kostenentwicklung** von elektrifizierten PKW ist abhängig von der technologischen Entwicklung wichtiger Komponenten und der Möglichkeit, Skaleneffekte nutzbar zu machen. Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM AG1, 2021) hat vier Bauteile von E-PKW identifiziert, die Potentiale zur Kostensenkung aufweisen (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9 Potentiale zur Kostensenkung von E-PKW nach NPM (2021)

Bauteil	Kostenziel 2030 gegenüber 2021
E-Antriebsstrang	< 80 %
Integration der (E-Antriebs-) Komponenten und Betriebssystem	< 70 %
E-kompatible Anpassung der Fahrzeugkonzepte und -produktion	< 80 %
Batteriekosten (Fokus Zelle)	ca. 50 %

Quelle: NPM (2021).

Insgesamt wird geschätzt, dass die Kostensenkungspotenziale von E-PKW in Kombination mit Skalierungseffekten zu realen Kosteneinsparungen von 20% bis 50 % bis 2030 im Vergleich zum heutigen Stand führen können. Als eine zentrale Komponente werden Fahrzeugkonzepte aufgrund des hohen Kostenanteils gesehen. Darüber hinaus besitzt die Batterieproduktion ein enormes Kostensenkungspotenzial (NPM, 2021).

Die **Batterietechnologie** unterlag und unterliegt kontinuierlicher Forschung. Im Vergleich zu früheren (Batterie-)Generationen befinden sich heutige Batterien im Entwicklungsprozess hin zu einem höheren Zellvolumen und -gewicht pro Batteriepack⁶⁶, einer erhöhten Energiedichte⁶⁷ und geringerem Stromverbrauch, höherer kontinuierlicher spezifischer Leistung und Spitzenleistungsdichte⁶⁸, niedrigerem Wartungsbedarf sowie verbesserten chemischen Inhaltsstoffen und Design (eucar, 2019). Jüngste Leistungssteigerungen kommerzieller Zellen wurden beispielsweise durch die Erforschung neuer Materialien für Anoden und Kathoden erlangt. Der verstärkte Einsatz von Silizium erhöhte die Kapazität von Graphitanoden. Alternative Kathodenmaterialien mit höherer Kapazität wie Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) und Lithium Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) werden immer verbreiteter. Zylindrische Zellen mit NCA-Kathoden und Silizium/Grafit-Verbundanoden, wie sie in den neuesten Tesla-Akkus verwendet werden, erreichen eine Energiedichte von ca. 270 Wh/kg bzw. 650 Wh/l. Die höchste spezifische Energie (Stand 2020), die für eine nahezu kommerzielle Lithium-Ionen-Zelle des

⁶⁶ Ein Batteriepack wird als geschlossenes Hartschalengehäuse betrachtet, welches mehrere Zellen, die in Reihe und/oder parallelgeschaltet sind, sowie alle notwendigen Anschlüsse und elektronischen Komponenten integriert, die zum Verwalten des Batteriesystems erforderlich sind. Je höher das Zellvolumen pro Akkupackvolumen, desto höher ist die Energiedichte des Akkusystems. Je höher das Zellgewicht pro Akkupackgewicht, desto höher ist die spezifische Energie des Akkus. Innovationen in Leichtbau und Funktionsintegration können diesen Wert verbessern.

⁶⁷ „Die Energiedichte ist eine relative Energiemenge, die die gespeicherte Energiemenge auf das Volumen oder die Masse des Energiespeichers bezieht. Sie wird als volumetrische Energiedichte in [Wh/m³] bzw. [Wh/l] oder als gravimetrische Energiedichte in [Wh/kg] angegeben.“ (S.4 des Sachstandes „Energiespeicher der Elektromobilität“ vom Deutschen Bundestag im Dezember 2020 mit Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 090/20). Je höher die Energiedichte der Zelle, desto kompakter kann ein Akkupack ausgelegt, Gewicht und damit Stromverbrauch reduziert werden.

⁶⁸ Kontinuierliche spezifische Leistung bezieht sich auf eine Dauerfahrtsituation eines Elektrofahrzeugs, während die Spitzenleistungsdichte repräsentativ für Beschleunigungs- oder Bremsvorgänge ist. Der Hauptunterschied besteht in der Dauer des Leistungsbedarfs und der erforderlichen Leistungsabgabe. Beide Werte beziehen sich entweder auf das Gewicht oder das Volumen der Batterie.

chinesischen Unternehmens Contemporary Amperex Technology Ltd (CATL) gemeldet wurde, beträgt 304 Wh/kg. Dieser Akku besitzt ein flaches prismatisches Design, im Gegensatz zu den von Tesla verwendeten zylindrischen Modellen (Faraday Institution, 2020).

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht über Batterie- und Fahrzeugparameter zum Zeitpunkt der Entwicklung von REF-2020 sowie deren anvisierte Entwicklung bis 2030. Für die Modellierung von REF-2050 werden zusätzlich die sich seit dem 2. Quartal 2022 abzeichnenden Rohstoffknappheiten bei Batterierohstoffen in den dargestellten Kostenentwicklungen und den Fahrzeugpreisen berücksichtigt.

Tabelle 10 Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugcharakteristika von BEV

Zellebene	Einheit	Durchschnittswert 2019	Zielwert 2030 (400km Reichweite)	Zielwert 2030 (>600km Reichweite)	Quelle			
Energiedichte	Wh/kg	250	450	450	eucar (2019), Tabelle 1			
Energiedichte	Wh/l	500	1 000	1 000				
Kontinuierliche spezifische Leistungsdichte	W/kg	750	1000	1 000				
	W/l	1 500	2 200	2 200				
Spitzenleistungsdichte	W/kg	500 1 500 (-25°C +25°C)	600 1 800 (-25°C +25°C)	600 1 800 (-25°C +25°C)				
	W/l	1 000 3 000 (-25°C +25°C)	1 300 4 000 (-25°C +25°C)	1 300 4 000 (-25°C +25°C)				
Kosten	€/kWh	220	70	70				
Batteriepaket	Einheit	Durchschnittswert 2019	Zielwert 2030 (400km Reichweite)	Zielwert 2030 (>600km Reichweite)	Quelle			
Zellvolumen pro Pack	%	60	75	75	eucar (2019), Tabelle 1			
Zellgewicht pro Pack	%	70	80	80				
Lebenserwartung	Jahre & km	70 Jahre, 150 000 km	80 Jahre, 150 000 km	80 Jahre, 150 000 km				
Kosten	€/kWh	+30% der Zellkosten	+20% der Zellkosten	+15% der Zellkosten				
Fahrzeug Segment	Einheit	B	C	D	SUV-B	SUV-C	SUV-D	
Gewicht	kg	1 200	1 600	2 000	1 450	1 750	2 200	Bloomber gNEF (2021)
Leistung	kW	70	109	164	79	118	172	
Reichweite	km	300	400	500	300	400	500	
Batteriekapazität in 2020	kWh	57	84	113	61	87	116	
Batteriekapazität in 2030	kWh	Abnahme um 25-35%						
Verbrauch ⁶⁹ in 2020	Wh/km	171	188	203	182	195	208	
Verbrauch in 2030	Wh/km	121	131	142	128	135	146	

Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five.

Anmerkung: Reichweite unterliegt bis 2030 nach BNEF (2021) keiner Veränderung.

Lithium-Ionen-Batterien mit flüssigen Elektrolyten (LiB) werden bis 2030 die führende Technologie am Markt sein. Voraussichtlich werden nach 2025 weitere Technologien (z.B. Lithium-Feststoff-Batterien) verfügbar sein. Die Technologieentwicklung im Bereich Batterie steht in den kommenden Jahren vor einer Reihe an Herausforderungen: die Zell-Produktion

für Lithium-Ionen-Batterien (LiB) mit flüssigen Elektrolyten zu verbessern, die Rohstoffbasis durch Entwicklung und Markteinführung von Recyclingverfahren zu sichern und zu erweitern sowie nationale Quellen (u.a. Erzgebirge, Oberrheingraben) zu erschließen und Technologiekompetenz aufzubauen, um eine eigene Produktion in Deutschland realisieren zu können. Ab 2023 soll in die großskalige LiB-Zellproduktion eingestiegen und diese bis 2030 mindestens verdoppelt werden (Haug et al., 2022; NPM, 2021). Hinzu kommt eine Aufspaltung des Marktes in die teureren und mit spezifischen Eigenschaften ausgestatteten NMC-Zellen und die an Bedeutung gewinnenden günstigeren und robusten Lithium-Eisen-Phosphat Batterien (LFP).

Schade et al. (2018) haben drei Komponenten identifiziert, denen sich die **Batteriekosten** zuordnen lassen:

- Batteriezelle, die für drei Viertel der Batteriekosten verantwortlich ist
- Batteriemodul, bestehend aus mehreren zusammengeschalteten Zellen
- Batteriepack aus mehreren Modulen mit Steuerung und ggf. Kühlung

Eine Zusammenstellung über die mögliche Entwicklung von Batteriepack-Kosten verschiedener Studien ist Tabelle 11 zu entnehmen. Der Break-Even Point eines Lithium-Ionen-Akkus ist etwa ab 100 \$/kWh bzw. knapp 80 €₂₀₁₀ /kWh erreicht (ICCT, 2019).

Tabelle 11 Kostenentwicklung von Batteriepacks in der Literatur (Schätzungen) in €₂₀₁₀/kWh

Jahr	BNEF (2020)	ICCT (2019)	IHS Markit (2020)	UBA (2019)
2020	106		129	159
2023	78			
2025		82 bis 70		95
2030	45	57 bis 44	92	63
2035				60

Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five.

Weitere wichtige Faktoren, die den Batteriepreis und damit den PKW-Preis beeinflussen, sind die Marge des Batterieherstellers und des OEM, die Batteriegröße und damit PKW-Reichweite sowie die Frage des Produktionsstandortes der Batteriezelle. Auch das Batteriedesign unterliegt kontinuierlichen Verbesserungsprozessen. Sinkende Kosten und der Bedarf einer höheren Reichweite führen zu steigender Batteriegröße. Der Trend, auch SUVs als BEV anzubieten, führt ebenfalls dazu, dass größere Batterien benötigt werden. Tesla (Model S) und andere Oberklasse PKW bieten heute Batterien mit 100 kWh oder

⁶⁹ Der Verbrauch wird laut dem US-amerikanischen EPA-Zyklus der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) angegeben. Ein Vergleich der EPA-Werte mit den WLTP-Werten von InsideEVs (2020, abrufbar unter <https://insideevs.com/news/414786/comparison-epa-wltp-range-ratings/>) zeigt, dass die beiden Prüfwerte sich z.T. stark unterscheiden. Ein Vergleich einiger PKW-Modelle ergibt ein WLTP/EPA-Verhältnis von 1,14 im Durchschnitt mit einem Höchstwert von 1,42 (Min: 0,90). Es zeigt sich, dass das Verhältnis zwischen WLTP und EPA nicht konstant ist. WLTP-Werte liegen häufig, aber nicht immer höher als die EPA-Werte.

mehr an. Wir sehen eine typische Batterie bis 2030 bei einer durchschnittlichen Kapazität von 75 kWh.

Die für das Referenzszenario unterstellten Batterie- und PKW-Kosten sind an die jüngsten Entwicklungen und Studien angepasst und werden für ihre Anwendung in der Modellierung in Kapitel 6.3.4 noch ausführlicher beschrieben.

Elektrofahrzeuge sind heute noch deutlich teurer als Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb. Doch die oben beschriebenen Kostensenkungspotentiale von BEV führen zu einer Kostenparität mit ICE in REF-2050 etwa im Jahr 2025. Diese Einschätzung wird von verschiedenen Studien geteilt (BloombergNEF, 2021; ICCT, 2019; McKinsey, 2019).

6.2 Rolle und Aufbau der Ladeinfrastruktur

Für die Akzeptanz und den Hochlauf der Elektromobilität in Deutschland ist der Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur von großer Bedeutung. Je nach Entwicklung schätzt eine vom BMDV über die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NLL) unter dem Dach der NOW beim Reiner Lemoine Institut (RLI) in Auftrag gegebene Studie, dass im Jahr 2030 zwischen 440 000 und 843 000 öffentlich zugängliche Ladepunkte benötigt werden. Damit sollen im Jahr 2030 14 Millionen E-PKW versorgt werden können (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 2020). In Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 arbeitet die Bundesregierung daran, die notwendige Ladeinfrastruktur zu gewährleisten. Vor allem der „Masterplan Ladeinfrastruktur“ hat wichtige Maßnahmen für den Hochlauf der Ladeinfrastruktur definiert (Bundesregierung, 2019). Maßnahmen wie der Aufbau eines Schnellladenetzes an Fernstraßen mit Unterstützung des Bundes befinden sich in der Umsetzung. Der Aufbau der Ladeinfrastruktur erfolgt gemeinsam mit Industrie sowie Ländern und Kommunen mit Hilfe von gesetzgeberischen Maßnahmen zur Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen, finanziellen Maßnahmen zur Förderung von Ladeinfrastruktur sowie strategischen und koordinierenden Maßnahmen für einen flächendeckenden Aufbau. Auf europäischer Ebene bildet die Richtlinie „Alternative Fuels Infrastructure Directive“ (AFID, EU-Richtlinie 2014/94) bzw. ihre Nachfolgerin AFIR (EU 2021/223 COD) den Rechtsrahmen für den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe.

Sowohl die öffentliche Ladeinfrastruktur als auch nicht-öffentliche Lademöglichkeiten am Wohnort und am Arbeitsplatz sind für ein funktionierendes Gesamtsystem notwendig und ergänzen sich gegenseitig. Die Möglichkeit, im privaten Raum zu laden, ist ein Alleinstellungsmerkmal der E-PKW gegenüber den konventionell angetriebenen PKW. Der zukünftige Ausbau von privater Ladeinfrastruktur wird maßgeblich von dem Zustand der elektrischen Anlagen und dementsprechenden Kosten der Nachrüstung, von der technologischen Entwicklung der Ladepunkte sowie von regulatorischen Bedingungen beeinflusst. Die daraus resultierende Bereitschaft zur nachträglichen Installation eines Ladepunkts kann durch einen Mangel an Fachkräften zur Installation gebremst werden. Am Arbeitsplatz kann zusätzlich die notwendige Mitbestimmung von internen Akteuren (z.B.

Betriebsrat, Arbeitsschutz) und mögliche Rechtsunsicherheit (Eichrecht, Ladesäulenverordnung etc.) zu Verzögerungen führen. In welchem Verhältnis in Zukunft Ladevorgänge an öffentlicher und nicht-öffentlicher Ladeinfrastruktur stattfinden, hängt von der Entwicklung des jeweiligen Aufbaus, vom Mobilitäts- und Ladeverhalten der Nutzer sowie den technischen Eigenschaften zukünftig verfügbarer E-PKW und Ladepunkte ab. Der Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung (BReg 2019a) nimmt je nach Entwicklung ein Verhältnis von privater zu öffentlicher Ladeinfrastruktur von 60:40 bis 85:15 an. Neben einem Förderprogramm für private Ladeinfrastruktur haben das Wohnungseigentumsmodernisierungs-Gesetz und das Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz Barrieren beseitigt und erleichtern erheblich den Aufbau von Ladepunkten. Weitere zentrale Bausteine für einen erfolgreichen Hochlauf der Ladeinfrastruktur sind die Erhöhung der Flächenverfügbarkeit, die Beschleunigung von Förderungs- und Genehmigungsverfahren bei Kommunen und Anmeldeprozessen bei Netzbetreibern – unter Berücksichtigung der Problemlage in Innenstädten mit mehrgeschossiger Bebauung – sowie eine erfolgreiche Integration von Elektrofahrzeugen in die Energiewirtschaft.

Die Überlegungen zur Modellierung des E-PKW-Hochlaufs berücksichtigen ein begrenztes Wechselspiel von Angebot an Ladeinfrastruktur und Nachfrage nach E-Fahrzeugen. Eine ausreichend vorhandene Ladeinfrastruktur ist wichtig, aber nicht zentral bei Kaufentscheidungen der PKW-Nutzer und mithin für den Hochlauf der Elektromobilität. Der Hochlauf der Ladeinfrastruktur kann in ASTRA-M parametrisiert werden. Dabei wird die Ladeinfrastrukturdichte in ein monetäres Äquivalent übersetzt, welches in die Kaufentscheidung eingeht. Bis 2030 ist die relative Kosten-Position von Verbrennern in REF-2050 beim Energie Nachladen bzw. Tanken noch besser als bei E-PKW.

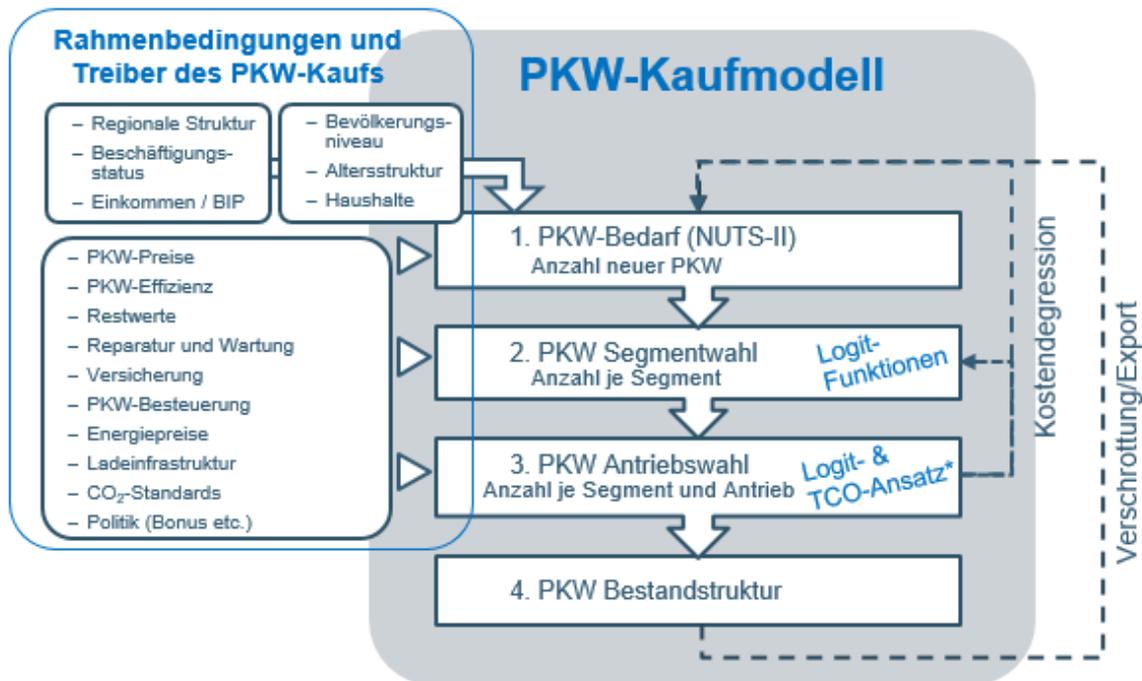
Wir erwarten für REF-2050, durch politische Beschlüsse und monetäre Mittel abgesichert, einen dynamischen Hochlauf der Ladeinfrastruktur. Durch die Attraktivität des Ladens zu Hause oder am Arbeitsplatz wird das Gesamtsystem wenig von öffentlichen Ladepunkten abhängig sein. Ist die Wirtschaftlichkeit der Ladeinfrastruktur durch signifikante Bestände an E-PKW gewährleistet, finanziert die Industrie ihren Anteil am Aufbau der Ladepunkte überwiegend selbst. Anbieter können einen größeren Gewinn erzielen, je mehr Nachfrage nach Ladepunkten und mithin E-PKW vorhanden ist. Diese wird wiederum positiv durch das Angebot an Ladeinfrastruktur beeinflusst. Außerdem lassen sich zusätzliche Einnahmen durch den Verkauf von CO₂-Zertifikaten im Rahmen der Erfüllung der THG-Quoten bei fossilen Kraftstoffen erzielen (Co-Benefit). Aus diesen Gründen setzt REF-2050 für den Flottenhochlauf der E-PKW voraus, dass eine im zeitlichen Vorauslauf installierte, bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur auf den künftigen Bedarf der E-PKW (Anzahl, Ladeleistung) ausgerichtet sein wird. Ladeinfrastruktur ist bei der PKW-Kaufentscheidung in ASTRA-M kein limitierender Faktor, sondern ein nur moderat dämpfender Einfluss auf Kaufentscheidungen.

6.3 Übersicht über die Modellierung der PKW-Flotte

6.3.1 Modellierung des PKW-Kaufs und der PKW-Flotte im Kohortenmodell

Die Zusammensetzung der PKW-Flotte wird auf der Grundlage eines technologiedifferenzierten Kohortenmodells berechnet, das sowohl die Altersstruktur als auch die Diffusion neuer Antriebs-Technologien in die Fahrzeugflotten detailliert abbilden kann. Das Fahrzeugmodell betrachtet insgesamt 25 Alterskohorten. Es unterscheidet sieben Fahrzeugsegmente (Mini, Klein, Kompakt-, Mittel-, Oberklasse, Offroad/SUV, Van) und acht Antriebsarten: Benzin, Diesel, komprimiertes Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG), Hybride (HEV: PKW mit Benzin- oder Dieselantrieb, die in der Lage sind, elektrisch anzufahren bzw. zu unterstützen, aber über keinen Stecker zur externen Nachladung verfügen; z.T. Mild-/Voll-Hybrid genannt), batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybride mit der Kombination aus Verbrennungsmotor und E-Antrieb mit externer Aufladung (PHEV) und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV). Das PKW-Flottenmodul gliedert sich in die Modellierung der Neuzulassungen (siehe Abbildung 35) und die Bestandsmodellierung (siehe Abbildung 36).

Die Nachfrage nach Neuwagen (Abbildung 35) hängt von der Struktur der Fahrzeugflotte ab, von der demografischen Entwicklung sowie insbesondere von der ökonomischen Entwicklung. Beim PKW-Kauf stehen gewerbliche und private Käufer vor der Entscheidung, ein Segment und eine Antriebsart zu wählen. Diese Wahlentscheidung wird in der Modellierung mittels eines Logit-Ansatzes getroffen (siehe Kapitel 6.3.2). Als wichtigster Input in die Entscheidung zur Antriebsart gehen die in Kapitel 6.3.6 beschriebenen Gesamtbetriebskosten (TCO) ein. Für die Antriebswahl gewerblicher PKW-Käufer gilt zudem ein TCO-Ansatz, der die Gesamtmenge an gewerblich jährlich zugelassen PKW zu einem Anteil von 50% (neben dem Logit-Ansatz) bildet. Auf diese Weise werden die Käufer berücksichtigt, die rein ökonomischen Interessen folgen. Darüber hinaus bestimmen die Verfügbarkeit von Tank- und Ladestationsinfrastruktur und die weitere Förderung die Attraktivität einzelner Antriebe. Dadurch ergeben sich im Zeitverlauf Diffusions- bzw. aus Sicht der Elektromobilität Markthochlaufszszenarien für die verschiedenen Technologien.



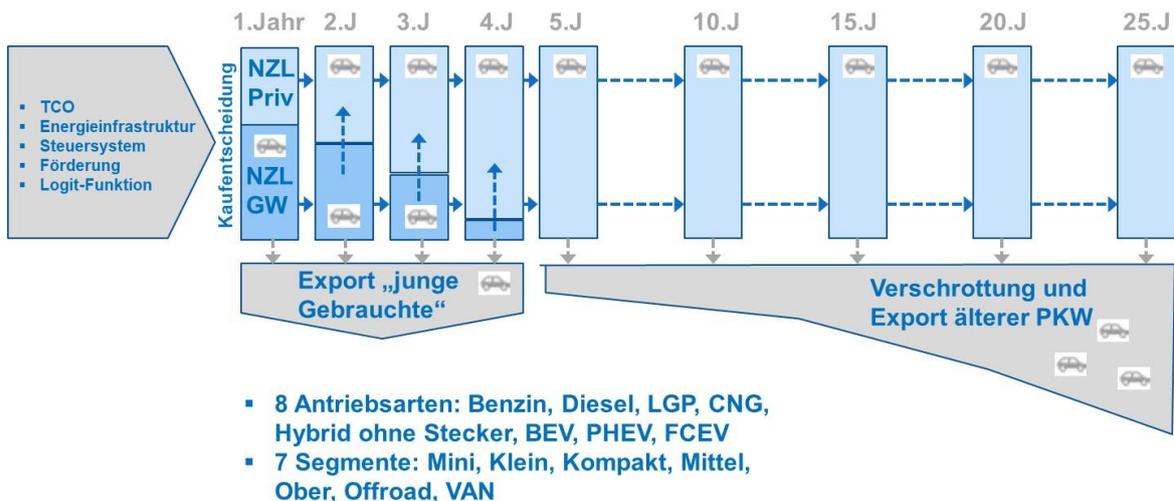
* TCO-Ansatz nur bei gewerblichen Nutzern

Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Darstellung.

Abbildung 35 Treiber, Modellstufen und Entscheidungsfunktionen des PKW-Kaufmodells

Die Entwicklung der PKW-Flotte wird neben der jährlichen Alterung der Alterskohorten durch drei Faktoren beeinflusst (siehe Abbildung 36): (1) durch den Verkauf von gewerblichen PKW im Alter von 1 bis 4 Jahren an private Halter, (2) durch den Export von PKW und (3) durch die Verschrottungsrate in den verschiedenen Alterskohorten, welche für 15-jährige und ältere PKW deutlich steigt.

Eigene Berechnungen auf Basis von KBA-Daten quantifizieren den Anteil exportierter oder verschrotteter E-PKW, indem sie die Differenz zwischen kumulierten Neuzulassungen und dem für das entsprechende Jahr ausgewiesenen Bestand betrachten. Diese Analyse wird in Kapitel 6.3.3 erläutert.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Darstellung.

Abbildung 36 Aufbau des PKW-Kohortenmodells in REF-2050

Die Technologie- und Altersdifferenzierung der PKW-Flotte ermöglicht die Verknüpfung mit dem Umweltmodul. Hier werden der Kraftstoffverbrauch und die durch den Verkehr verursachten Emissionen berechnet.

6.3.2 Entscheidungsfunktionen für den PKW-Kauf

Wahlentscheidungen im Verkehr werden häufig über Logit-Funktionen (Discrete Choice nach Daniel McFadden⁷⁰) abgebildet. Dies gilt in ASTRA auch für die Kaufentscheidung neuer PKW. Logit-Funktionen werden sowohl bei der Segment- als auch bei der Antriebswahl für private und gewerbliche Käufer genutzt.

Im Rahmen der REF-2050 vorangegangenen Entwicklung von REF-2020 wurde die Modellierung der Antriebsart für gewerbliche Käufer bereits um einen reinen TCO-Ansatz ergänzt. Die Verteilung der Neuzulassungen auf die Antriebsarten erfolgt bei gewerblich beschafften PKW demnach mittels eines zweiteiligen Kaufentscheidungsmodells, welches die Menge gewerblicher PKW-Käufe zu jeweils gleichem Anteil abbildet:

- Logit-Modell: Unter Verwendung einer Logit-Funktion wird die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Antriebstechnologie beim Kauf von PKW bestimmt. Die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten führen zu einer Verteilung der Neuwagenkäufe auf die verfügbaren Antriebsarten.
- Reines TCO-Modell (nur bei gewerblichen Käufern): Nur die zu einem Zeitpunkt kosten-günstigste Antriebsart wird nachgefragt.

⁷⁰ Daniel McFadden (2001) erhielt 2000 den Nobelpreis für Wirtschaft für seine Arbeiten zur Modellierung des Entscheidungsverhaltens mit Discrete Choice Funktionen nach dem Logit-Ansatz. In der Verkehrsmodellierung liegen zahlreiche Entscheidungssituationen vor (z.B. Modalwahl, Zielwahl, Kauf eines PKW, Wahl eines Wohnstandortes), die oft mit Logit-Funktionen bzw. Derivaten des Logits bearbeitet werden.

Durch die Kombination beider Ansätze ist es möglich, unterschiedliches Käuferverhalten abzubilden. TCO- und Logit-Modell nutzen weitgehend identische Eingangsgrößen, die im späteren Verlauf dieses Kapitels - und darüber hinaus im Detail in dem nachfolgenden Kapitel - erläutert werden. Der größte Unterschied zwischen beiden Ansätzen besteht darin, dass im Logit-Modell neben den Gesamtbetriebskosten Aspekte wie Reichweite, Akzeptanz und Verfügbarkeit von Tank- und Ladestationsinfrastruktur berücksichtigt werden. Das reine TCO-Modell zieht zur Wahl des Antriebs allein Anschaffungs-, Betriebs- und Kraftstoffkosten hinzu. Zu Grunde liegt die Annahme eines rationalen Entscheidungsprozesses bei einem Teil der gewerblichen PKW-Käufer, die ausschließlich monetäre Interessen verfolgen. Eine weitere Annahme bei der TCO-Modellierung beschränkt die Auswahlentscheidung auf die angebotsseitig verfügbaren Modelle, da sich bestimmte Antriebsstränge nicht für alle Segmente eignen.

Die Logit-Funktion gibt die Wahrscheinlichkeit P wieder, mit der ein PKW mit einer bestimmten Antriebsart beschafft wird. Die Logit-Funktion für die Wahrscheinlichkeit P , dass ein PKW vom Typ i zum Zeitpunkt t gekauft wird, lautet wie folgt:

$$P(t)_i = \frac{e^{-\beta_i \cdot U(t)_i + \varepsilon_i}}{\sum_{i=1}^n e^{-\beta_i \cdot U(t)_i + \varepsilon_i}}$$

$$U(t)_i = [Fzg(t)_i + WK(t)_i + EK(t)_i + ST(t)_i + VK(t)_i + DW(t)_i + BK(t)_i] \cdot \alpha_i$$

$$Fzg(t)_i = (FK(t)_i - RW(t)_i + MwSt(FK(t)_i)) / AZ$$

- Mit:
- β = Kalibrierter Logit-Entscheidungsparameter für Option i
 - U = Nutzenfunktion der Option i zum Zeitpunkt t
 - ε = Kalibrierter Logit-Parameter für nicht durch Nutzen erklärter Anteil
 - Fzg = Kalkulatorische PKW-Kosten differenziert in Segment und Antriebsart [in €₂₀₁₀]
 - WK = Wartungskosten des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - EK = Energiekosten des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - ST = KFZ-Steuer des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - VK = Versicherungskosten des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - DW = Private Dienstwagensteuer des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - BK = fiktive Betankungskosten des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - α = Faktor zur Verfügbarkeit der PKW vom Typ i
 - FK = Fahrzeugkosten des PKW-Typ i [in €₂₀₁₀]
 - RW = Restwert des PKW-Typ i am Ende des Amortisationszeitraumes [in €₂₀₁₀]
 - AZ = Amortisationszeitraum, Anzahl der Jahre, die für die Kalkulation beim Fahrzeugkauf genutzt werden [in Jahren]
 - $MwSt$ = Bei privaten Käufern fällige Mehrwertsteuer auf den Preis des PKW [in €₂₀₁₀]
 - i = Index für PKW-Typen, differenziert nach Matrix Segment und Antriebsart

Die Gesamtnutzungskosten $TCO(t)$ bestehen aus: (i) Kosten für die Fahrzeugbeschaffung des Fahrzeugs vom Typ i zum Zeitpunkt t , (ii) jährlichen Kosten (ohne Energiekosten) sowie (iii) Energiekosten. Neben den monetären Kosten sind auch nicht-monetäre Faktoren für die Wahl eines bestimmten PKW ausschlaggebend. Die Kaufentscheidung berücksichtigt wahrgenommene Betankungskosten sowie die Verfügbarkeit von PKW-Modellen.

Die Betankungskosten werden anhand der Tankstellen- und Ladestationsdichte monetarisiert. Die durchschnittliche Entfernung in Zeit- und Kilometerkosten pro Antriebsstrang sowie die durchschnittliche Dauer eines Tank- bzw. Ladevorgangs bestimmen die einmaligen Betankungskosten. Die Häufigkeit eines Betankungsvorgangs ist für jedes Segment und für jeden Antriebsstrang unterschiedlich. Die Reichweite, die sich aus dem Verbrauch und der Tankgröße bzw. Speicherkapazität zusammen mit der Jahreskilometerleistung ergibt, bestimmt die Anzahl der Betankungs-/Ladevorgänge und damit die Gesamtbetankungskosten pro Segment und Antriebsstrang (Schade et al., 2018).

Die Verfügbarkeit des Fahrzeugtyps i wird durch das Jahr des Markteintritts, durch den Anteil der Modelle, die mit bestimmten Antriebsarten angeboten werden – gemittelt über alle Hersteller – sowie durch eine begrenzte Verfügbarkeit einzelner Segment-Antriebsstrangkombinationen bestimmt.

Andere, ebenfalls in der Realität auftretende Einflussfaktoren wie Markentreue, Image, Design oder ein Sicherheitsgefühl sind nicht monetarisierbar. Die Wirkung dieser Faktoren wird durch die Parametrisierung des Parameters der Logit-Funktion (ϵ) abgebildet, der nicht als Nutzen quantifizierbar ist.

6.3.3 Dekompositionsanalyse der Treiber des Hochlaufs von E-PKW

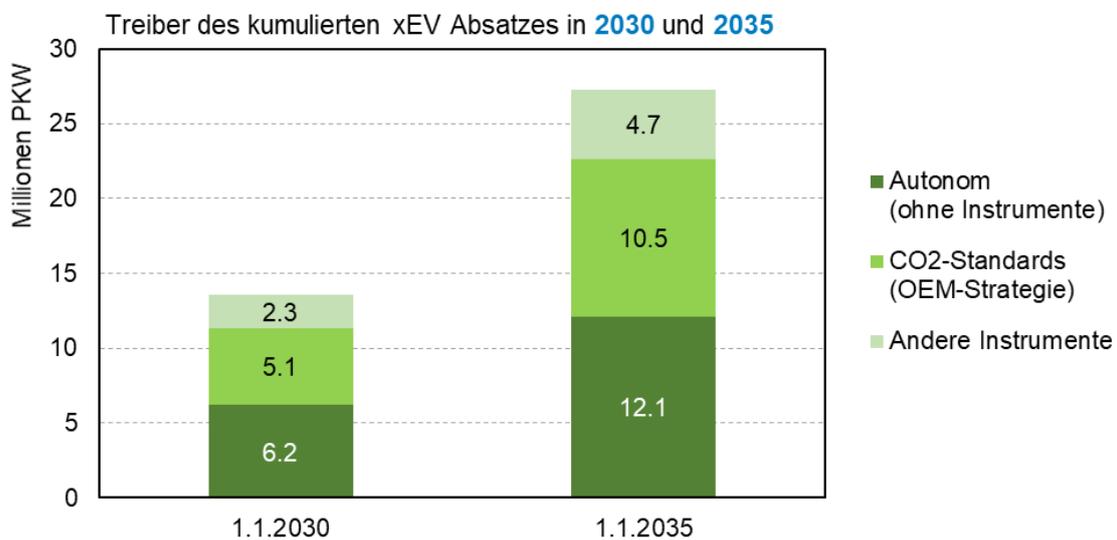
Durch eine Dekompositionsanalyse lässt sich der Absatz von elektrifizierten PKW (xEV⁷¹) bis 2030 sowie bis 2035 mit Hilfe der Modellierung sowie zum Teil gestützt auf expertenbasierte Heuristiken auf drei zentrale Treiber zurückführen:

- **Autonomer Absatz**, der auch in einem Referenzszenario ohne die Einführung von CO₂-Standards für 2030 bzw. 2035 stattgefunden hätte (d.h. wie in REF-2017 in Schade et al., 2018), aber unter Berücksichtigung der in den letzten Jahren beobachteten Technik- und Preisentwicklung.
- Der Absatz, der durch **Instrumente auf der Nachfrageseite** angereizt wird, wie etwa steuerliche Anreize (z.B. Absenkung Dienstwagensteuer), ökonomische Anreize (wie BEHG) oder Förderanreize (wie Kaufprämie oder Förderung des Aufbaus von Ladeinfrastruktur). Die Einflussfaktoren und Modellierung der Reaktionen auf der Nachfrageseite sind im vorhergehenden Kapitel 6.3.2 beschrieben.

⁷¹ xEV: Batterieelektrische PKW (BEV), Plug-In Hybride (PHEV) sowie Wasserstoff-Brennstoffzellen-PKW (FCEV bzw. H2-BZ).

- Der Absatz, der durch **Instrumente auf der Angebotsseite** (insbesondere CO₂-Standards für 2030 von -55% sowie für 2035 von -100%) angereizt wird und ebenso durch die **Strategien der OEM**, auf diese Instrumente zu reagieren. Diese angebotsseitige Reaktion lässt sich wiederum unterteilen in:
 - **Anpassung des Modellangebotes** mit steigender Abdeckung der Verfügbarkeit von elektrifizierten PKW in den verschiedenen Segmenten. Dabei kommt für die Erreichung der Klimaziele des KSG insbesondere der Abdeckung durch rein batterieelektrisch betriebene PKW (BEV) die größte Bedeutung zu. Die Anpassung des Modellangebotes spiegelt sich auch in den Planungen des Aufbaus der Produktionsanlagen der OEM (und Zulieferer z.B. von Lithium-Ionen-Batterien (LiB)) wieder.
 - **Anpassung der Marketing- und Rabattstrategien der OEM** zur Zielerreichung in den Stützjahren der Regulierung der CO₂-Standards.

Für die Dekompositionsanalyse werden in ASTRA-M die jeweiligen Instrumente ein- bzw. ausgeschaltet und die von 2022 bis 2030 bzw. 2035 kumulierte Differenz des Bestandes der E-PKW zwischen Mit- und Ohne-Fall gebildet. Es zeigt sich, dass bei einem Zielwert der CO₂-Standards von -55% die autonome Entwicklung aufgrund der sinkenden E-PKW-Preise und der moderaten Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur bis 2030 mit dem Absatz von 6,2 Millionen E-PKW den größten Beitrag leistet und sich bis 2035 mit 12,1 Millionen E-PKW fast verdoppelt (siehe Abbildung 37).⁷²



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnung.

Abbildung 37 Dekompositionsanalyse des E-PKW Absatzes von 2022 – 2035 in den Jahren 2030 und 2035

⁷² Für eine dem ab 2022 autonomen Hochlauf vergleichbare Politikgestaltung wurde im Jahr 2018 ein Bestand an E-PKW im Jahr 2030 von 3,4 Millionen abgeschätzt (Schade et al. 2018). Die Erhöhung lässt sich durch die seither erfolgte Absenkung der PKW-Preise aufgrund sinkender Batterie- und weiterer E-Fahrzeugkosten begründen (siehe Kapitel 6.1 sowie 6.3.4 und 6.3.6).

Auf die CO₂-Standards, welche die Angebotspolitik der OEM bestimmen, und - sollte der Modellhochlauf in allen Segmenten (siehe Haug/Schade, 2021; NPM, 2021) nicht ausreichen - ggf. auch auf spezifische Marketing- und Rabatt-Strategien der OEM zum Zeitpunkt der Zielerreichung im Jahr 2030, entfällt mit 5,1 Millionen E-PKW der zweitgrößte Beitrag bis 2030. Der Beitrag der Angebotsseite erhöht sich bis 2035 aufgrund erweiterter CO₂-Standards von -100% im Jahr 2030 auf mehr als das Doppelte mit 10,5 Millionen E-PKW. Dadurch wird bestätigt, dass bei ambitionierteren Zielwerten für die CO₂-Standards dem Beitrag der OEM zum E-PKW Hochlauf durch Anpassungen ihrer Modell- und Absatzstrategie eine steigende Bedeutung zukommt.

Die Wirkung des Instrumentenbündels zur Anreizung des Absatzes von E-PKW führt zu einem Hochlauf von 2,3 Millionen E-PKW bis 2030 bzw. 4,7 Millionen E-PKW im Jahr 2035. Damit lässt sich in REF-2050 der drittgrößte Anteil der Neuzulassungen von 2021 bis 2030 bzw. 2035 durch die ergriffenen Instrumente erklären. Die Instrumente beinhalten die CO₂-Bepreisung (BEHG), die Absenkung der Dienstwagenbesteuerung auf 0,25% des Listenpreises für BEV und FCEV sowie auf 0,5% für PHEV, die Befreiung von der Kfz-Steuer für bis 2025 zugelassene E-PKW bis 2030 sowie die gestaffelte Erhöhung der Kfz-Steuer für CO₂-emittierende PKW und die Kaufprämie für E-PKW bis Ende 2024⁷³ (siehe auch Kapitel 5).

Der Modellhochlauf, d.h. die Abdeckung der verschiedenen Modellreihen mit einem Angebot an E-PKW, ist von den Experten der Nationalen Plattform Mobilität der Zukunft (NPM) als zentraler Faktor für steigende Absatzzahlen elektrifizierter PKW identifiziert worden (NPM 2021). Solange während der 2010er Jahre in wichtigen Segmenten des deutschen PKW-Marktes kein Angebot an E-PKW verfügbar war, konnte ein substanzieller Markthochlauf nicht stattfinden. Im Jahr 2020 stieg der Absatz von E-PKW in Deutschland auf 394.940, was annähernd einer Vervierfachung von 108.837 in 2019 entspricht. Im Jahr 2021 erreichten die Neuzulassungen von E-PKW dann 681.874 hin zu 833.847 in 2022 (Zahlen nach KBA FZ28, 2022). Der Anstieg korrespondiert gut mit der von Haug/Schade (2021) aufgezeigten Hochlaufkurve des von den OEM bis 2024 geplanten Modellangebots in den sieben Segmenten des ASTRA-M Modells.

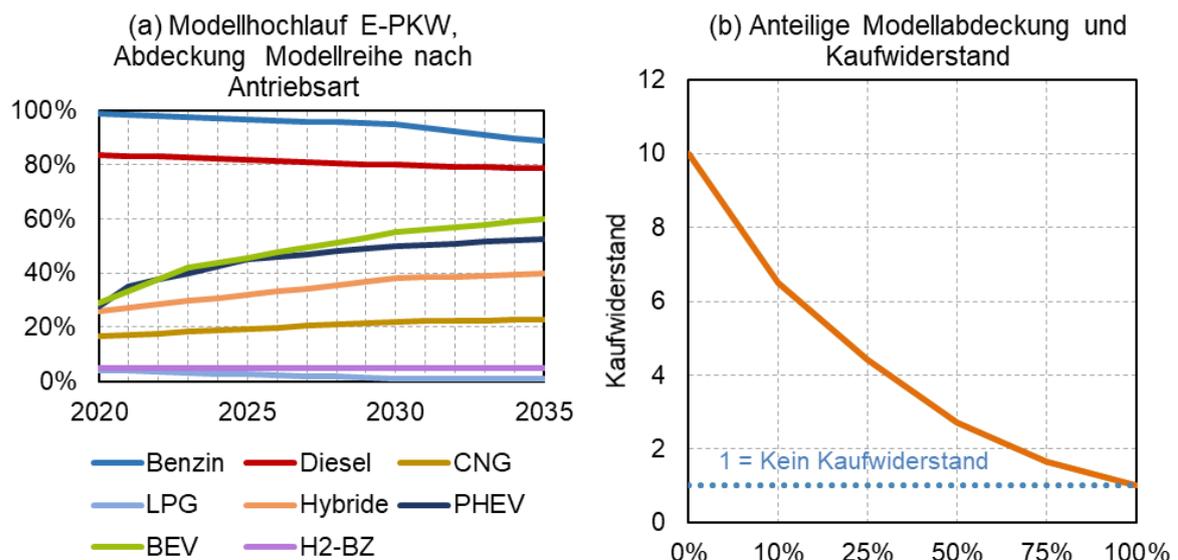
Abbildung 38 (a) zeigt die Heuristik der Verfügbarkeit nach Antriebsarten über alle Modellreihen und Segmente in ASTRA-M. PKW mit Benzinantrieb waren 2018 noch in allen Modellreihen vertreten und liegen daher bei 100%. Dieselantriebe wurden im Mini-Segment und in Sportwagen nicht eingesetzt und erreichen deshalb keine 100%. Ab 2019 treten Modellreihen auf, die nur noch mit E-Antrieben ausgestattet sind (z.B. VW ID-Reihen, auch

⁷³ Die Gestaltung der Kaufprämie wurde gemäß Klimaschutzprogramm 2019 (KSP-2019) festgelegt. Die Gestaltung der Kaufprämie wurde seither zwei Mal verändert, zum einen durch das Einziehen einer Obergrenze von 4,96 Mrd. €, welches im Prinzip zum Auslaufen der Prämie im Jahr 2021 geführt hätte, und zum anderen durch die Verlängerung der Innovationsprämie (d.h. der verdoppelten staatlichen Prämie) bis Ende 2022. In weiteren Szenarienrechnungen zur Politikgestaltung, aufbauend auf REF-2050, werden diese Anpassungen der Kauf- und Innovationsprämie berücksichtigt.

Folgen der steigenden Absatzzahlen von Tesla), so dass auch Benzin keine 100% Abdeckung aller Modellreihen mehr aufweist und auch hier die Abdeckung bis 2030 kontinuierlich, bis 2035 noch weiter verstärkt, abnimmt.

Im Gegenzug steigen die Abdeckungsanteile von BEV und PHEV im Zeitraum 2019 bis 2022 massiv an und wachsen auch weiter bis 2030 und 2035. In Politik-Szenarien mit höheren Zielwerten als -55% in REF-2050 ist davon auszugehen, dass die Abdeckungsanteile bis 2030 noch deutlich höher liegen werden und im Betrachtungszeitraum auch die 100% erreichen können. Gas-PKW Angebote inkl. Autogas stagnieren bzw. sind rückläufig, Hybride ohne Stecker können durch ihre Effizienz und damit ihren Beitrag zur Erreichung der CO₂-Standards einzelner Hersteller noch leichte Zuwächse verzeichnen, während Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) auf niedrigem Niveau verharren (aktuell existiert ein Angebot nur in zwei Segmenten bzw. zwei Modellreihen).

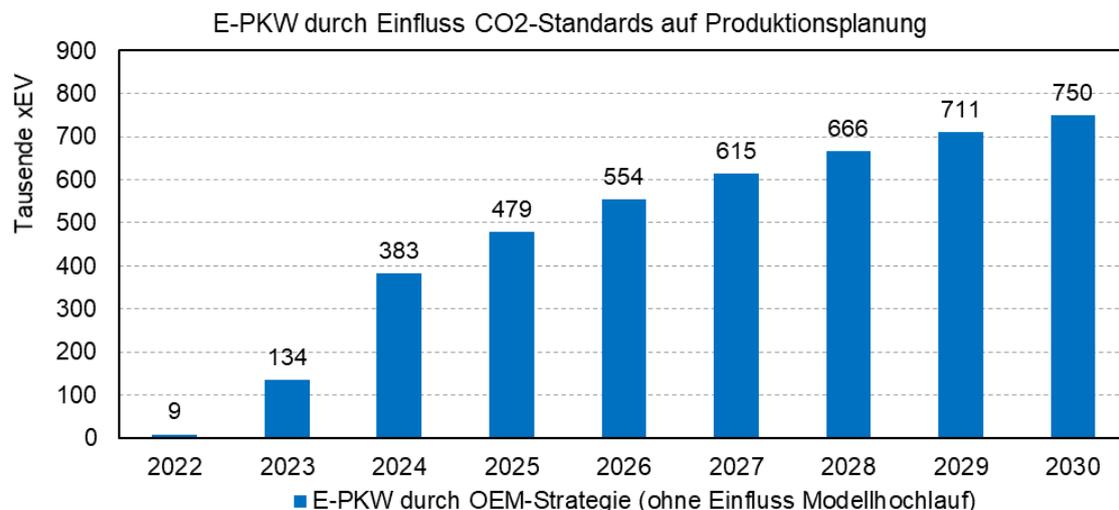
Auf der rechten Seite von Abbildung 38 (b) ist die Funktion für den Kaufwiderstand dargestellt, mit der die Verfügbarkeit einer Antriebsart im PKW-Angebot in die Kaufentscheidung einght. Der beste Wert (=1 in blau) steht für „kein dämpfender Einfluss auf die Kaufentscheidung“. Markt-Abdeckungen über 80% wirken sich ebenfalls nur noch marginal dämpfend aus. Zusammen mit segmentspezifischen Aufschlägen (z.B. kein Angebot von Dieselantrieben im Segment Mini) geht das Modellangebot über den Parameter α in die Kaufentscheidungsfunktion (siehe Kapitel 6.3.2) ein und bildet eine Brücke zwischen der Nachfrage- und Angebotsseite. Etwa die Hälfte des Beitrags der CO₂-Standards lässt sich auf die Anreizung der OEM, ein zusätzliches Modellangebot anzubieten, zurückführen.



Quelle: M-Five, ASTRA-M, eigene Analysen basierend auf (NPM 2021, Haug et al. 2021).

Abbildung 38 Modellpolitik, Modellhochlauf und Kaufwiderstand

Unter Berücksichtigung der Produktionsplanungen, der Expertendiskussionen in der NPM zu zukünftigen Bestandsgrößen und der Analyse einer größeren Zahl an Hochlaufkurven wurde eine weitere Heuristik für den Einfluss der Höhe der CO₂-Standards auf den Absatz an E-PKW in Deutschland in Verbindung mit E-PKW-Bestandszielen für 2030 abgeleitet. CO₂-Standards in der Höhe von -55% und E-PKW-Bestände im Jahr 2030 (zum 1.1.) von etwa 11,3 Millionen wie in REF-2050 lassen sich noch mit linearen Hochläufen aus dem Beitrag der OEM-Strategie erreichen. Darüberhinausgehende CO₂-Standards und Bestands-Ziele erfordern logarithmische Hochläufe mit frühzeitigem Aufwuchs der E-PKW Neuzulassungen. Abbildung 39 zeigt den mit der Heuristik ermittelten Beitrag des CO₂-Standards von -55% zum Hochlauf der E-PKW.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Analysen (Produktionsankündigungen und NPM 2021).

Abbildung 39 Einfluss CO₂-Standards auf Produktionsplanung und E-PKW-Absatz

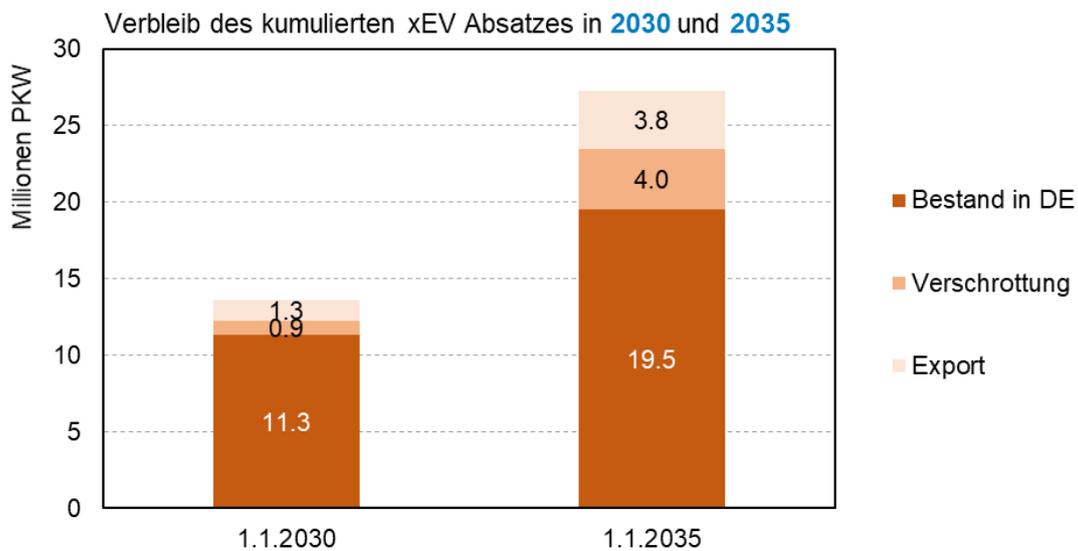
Die Dekompositionsanalyse zeigt die Bedeutung der einzelnen Komponenten (autonomer Absatz, Instrumente, Modellpolitik, CO₂-Standards) für den Bestand an E-PKW in Deutschland in den Jahren 2030 und 2035. Jede Komponente kann sich in weiteren Politik-Szenarien durch ambitioniertere Instrumente, schnellere Hochläufe mit zusätzlichen Skalen- und damit Kostensenkungseffekte, ein weiter verbessertes Modellangebot (oder auch weiter verschlechterte Modellangebote an Verbrennern) oder durch ambitioniertere Zielsetzungen der CO₂-Standards deutlich verändern.

Bis 2030 werden in Deutschland etwa 13,5 Mio. E-PKW abgesetzt (bis 2035 etwa 27,3 Mio.). Im Bestand im Jahr 2030 verbleiben aber nur knapp 11,3 Mio. E-PKW (2035 etwa 19,5 Mio.). Zur Beantwortung der Frage über den Verbleib der fehlenden 2,2 Mio. (etwa 16%) im Jahr 2030 bzw. 7,8 Mio. (ca. 29%) in 2035 soll eine weitere modellgestützte Dekompositionsanalyse Aufschluss geben. Diese unterscheidet drei Größen:

- Den Bestand an E-PKW in 2030 (knapp 11,3 Mio. E-PKW) sowie in 2035 (ca. 19,5 Mio. E-PKW).
- Den Export von E-PKW als junge Gebrauchte (d.h. bis zu 4 Jahre nach Neuzulassung) im Zeitraum 2022 bis 2030 bzw. 2022 bis 2035.
- Die Verschrottung von E-PKW im Zeitraum 2022 bis 2030 bzw. 2022 bis 2035.

Die Analyse der Neuzulassungen von E-PKW aus den Jahren 2011 bis 2019 ergibt eine kumulierte Zahl an Neuzulassungen von BEV und PHEV in Deutschland von 305 787 in diesem Zeitraum zugelassenen E-PKW (BEV & PHEV). Im Bestand am 1. Januar 2020 befanden sich aber nur 238 792 E-PKW (BEV & PHEV) (eigene Analyse basierend auf KBA-Daten, FZ 14, verschiedene Jahrgänge). D.h. 22% der elektrifizierten Neuzulassungen (fast 70 Tausend) sind entweder bis Ende 2019 wieder als junge Gebrauchte exportiert oder bereits verschrottet worden (maximal waren diese PKW 9 Jahre alt, dies betraf 19% aller BEV bzw. 26% aller PHEV). Der Export junger Gebrauchter war in dieser Phase besonders attraktiv, weil E-PKW in Deutschland zugelassen und in Länder mit höheren Prämienzahlungen oder Nachlässen (z.B. durch Entfall der Mehrwertsteuer) exportiert werden konnten. Das bedeutet: jede Modellierung von Beständen an E-PKW und Struktur der Antriebsarten muss die Faktoren *Export* und *Verschrottung* explizit berücksichtigen.

Wir gehen nicht davon aus, dass diese Sonderfaktoren in den nächsten Jahren ähnlich stark wirken werden, so dass die E-PKW für 2022 bis 2035 mit denselben Export- und Verschrottungsraten modelliert werden wie die vergleichbaren Verbrenner in den jeweiligen Segmenten. Damit werden bis 2030 gut 1,3 Mio. (bis 2035 etwa 4,7 Mio.) in Deutschland erstmalig neu zugelassene E-PKW wieder als junge Gebrauchte (1-4 Jahre alt) exportiert sowie 0,9 Mio. (bis 2035 etwa 4.0 Mio.) bereits verschrottet worden sein (siehe Abbildung 40). Trotz Neuzulassungen von fast 13,5 Mio. E-PKW von 2022 bis 2030 (bzw. 27,3 Mio. bis 2035) ergibt sich unter Berücksichtigung von Export und Verschrottungen dann ein Bestand von 11,3 Mio. E-PKW zum 1. Januar 2030 und von 19,5 Mio. E-PKW zum 1. Januar 2035.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Berechnungen.

Abbildung 40 Dekompositionsanalyse des Verbleibs des E-PKW Absatzes von 2022 – 2035 in den Jahren 2030 und 2035

6.3.4 Aktualisierung der Fahrzeugpreise von PKW

Die Fahrzeugpreise wurden zunächst auf der Grundlage von Schade et al. (2018, entspricht REF-2017) unter Berücksichtigung jüngster Entwicklungen, insbesondere Batteriepreisentwicklungen, aktualisiert. Schade et al. (2018) leiteten die Fahrzeugpreise ausgehend von den Technologiekostenkurven, die für die Abschätzungen der EU-Richtlinien zur CO₂-Gesetzgebung bei neuen PKW genutzt wurden (Ricardo-AEA, 2015), ab und passten sie auf die Verhältnisse des deutschen PKW-Marktes (z.B. Sonderausstattung) an. Daher wurden die Fahrzeugpreise für REF-2020 und jetzt erneut für REF-2050 angepasst.

Die Fahrzeugpreise entwickeln sich dynamisch im Zeitverlauf aufgrund von erwarteten Technologiekostenentwicklungen oder Fahrzeugperformance (z.B. elektrische Reichweite) sowie in Abhängigkeit von gewählten Maßnahmen (z.B. Effizienzanforderungen). Die für das Referenzszenario 2050 unterstellten Batterie- und PKW-Kosten sind an die jüngsten Entwicklungen und Studien (s.u.) angepasst. REF-2050 nimmt in Übereinstimmung mit anderen Studien an, dass durch erhöhte Anforderungen an die Effizienz und die Abgasreinigung die Kosten von PKW mit Verbrennungsantrieben in den nächsten Jahren steigen werden (siehe u.a. BloombergNEF, 2021; ICCT, 2019). Obwohl Elektrofahrzeuge heute noch deutlich teurer sind als Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb, werden die Preise von BEV in den kommenden Jahren deutlich sinken. Batteriepreise sollen um mindestens -30% (IHS Markit, 2020) bis zu -60% (BloombergNEF, 2021; UBA, 2019) bis 2030 fallen (vgl. Kapitel 6.1). In Kombination mit Skalierungseffekten sieht die NPM (2021) bis 2030 ein Potential zu Kosteneinsparungen bei batterieelektrisch angetriebenen PKW von mindestens 20% bis zu 50 % im Vergleich zum Stand der Produktion vor zwei Jahren.

In einer umfassenden Analyse wurden die Fahrzeugpreise von PKW (inkl. MwSt.) für REF-2050 anhand der tatsächlichen Käufe im Jahr 2022 mittels eines gewichteten, arithmetischen Mittelwertes für insgesamt 8 Antriebsarten x 7 Segmente neu bewertet. Die verwendeten Fahrzeugpreise je PKW beziehen sich dabei auf Angaben aus dem aktuellen Modellangebot aus ADAC (2023) zum Stichtag 1.3.2023. Die Anzahl der Verkäufe bzw. Neuzulassungen zur gewichteten Mittelwertbildung wurde je nach Verfügbarkeit von Zulassungszahlen differenzierbarer PKW-Modelle aus KBA (2023b) (v.a. Benzin, Diesel), in Teilen aus EEA (2023) (v.a. CNG, LPG, Hybride, PEHV, BEV, H₂-BZ) sowie EV-Database (2023) (v.a. BEV) abgeleitet. Tabelle 12 zeigt die ermittelten, realen Fahrzeugpreise nach Antriebsart und Segment.

Tabelle 12 Nach tatsächlichen Käufen gemittelte Listenpreise im Jahr 2022 nach ADAC (2023), KBA (2023a), EV-Database (2023), EEA (2022)

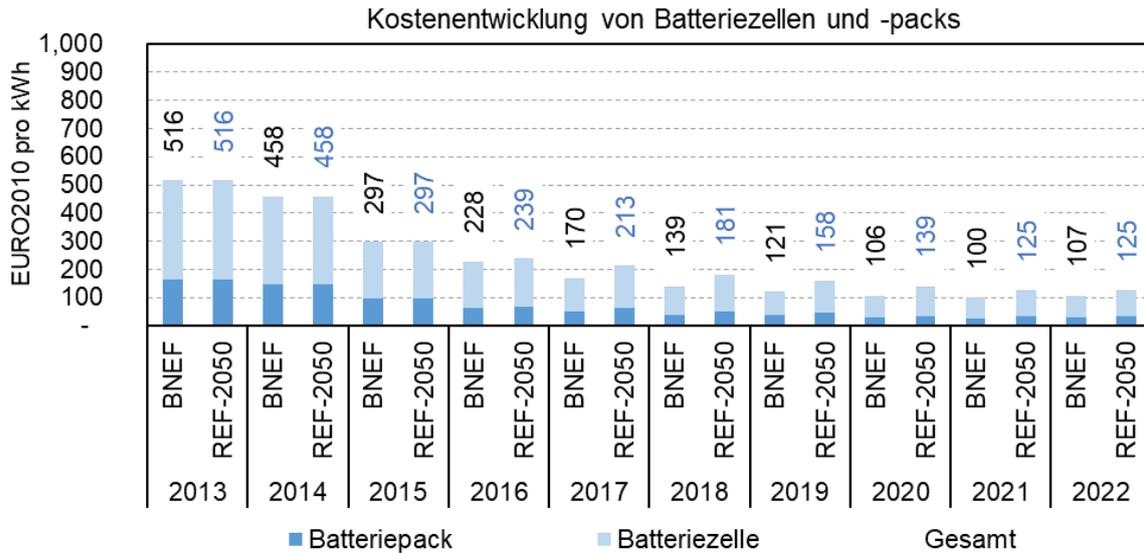
Fahrzeugpreis 2022 in EURO2010/PKW	Segment						
	Antriebsart	Mini	Klein	Kompakt	Mittelkl.	Oberkl.	Offroad
Benzin	16 900	20 700	24 900	39 700	78 800	30 400	26 600
Diesel	16 400	26 800	32 300	40 600	65 600	42 700	43 100
CNG	16 400	25 800	30 800	39 300	61 900	41 200	45 400
LPG	13 900	23 300	28 300	34 800	57 400	36 700	40 900
Hybride	14 700	18 000	27 000	44 500	58 200	46 100	39 800
PHEV	30 600	30 600	30 700	43 000	57 600	47 600	44 000
BEV	22 700	28 200	35 300	44 500	81 500	41 100	40 500
H2-BZ	-	-	-	57 200	-	63 800	-

Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five.

Anmerkung: in der Antriebsart H2-BZ gibt es aktuell nur zwei Modelle im Angebot, vgl. ADAC (2023).

Nachfolgend soll erläutert werden, wie die zuvor gezeigte Auswertung für das Jahr 2022 in eine Preisentwicklung zur Verwendung für REF-2050 überführt wurde. Im Fokus dieser Analyse stehen insbesondere BEV-PKW, bei deren Preisentwicklung von einer starken Abhängigkeit von den Kosten für Batteriezellen und –Packs ausgegangen werden kann, wie in Kapitel 6.1 bereits erläutert wurde. Gemäß ICCT (2019) haben sich die spezifischen Kosten pro kWh Batteriekapazität in den vergangenen Jahren stark reduziert, wie Abbildung 41 veranschaulicht.

Überschlägig gilt die Annahme, dass diese Kosten neben weiteren technologischen Entwicklungen wie Fahrerassistenzsystemen oder der Umstellung von Produktionsketten aktuell noch maßgeblich für den Aufschlag im Kaufpreis von batterieelektrischen PKW, zum Teil auch Plug-In Hybriden, gegenüber konventionellen Verbrennermodellen sind. Mit der starken Reduktion der Batterie-Gesamtkosten pro PKW ist auch von einer ebenso hohen Reduktion der Listenpreise für BEV-PKW auszugehen, jedoch gilt hier die Vermutung, dass die verringerten Batteriekosten von den PKW-Herstellern nur verzögert an die Käuferschaft weitergegeben werden, weshalb die reduzierten Aufschläge in REF-2050 erst leicht verspätet angezeigt werden.



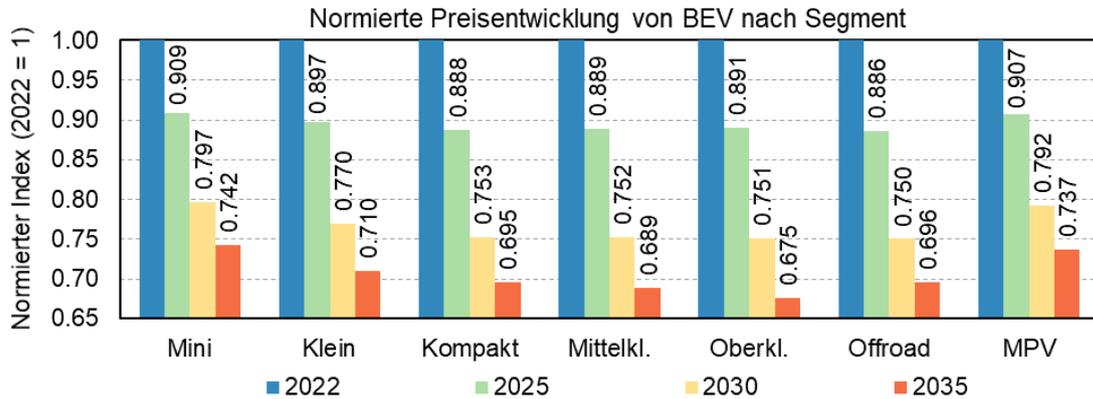
Quelle: BloombergNEF (2021); M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 41 Kostenentwicklung von Batteriezellen und -packs pro kWh nach BloombergNEF (2021) und modifiziert für REF-2050

In der BEV-Preisentwicklung bis 2022 werden die gezeigten spezifischen Batteriekosten je nach mittlerer Batteriegröße pro Segment auf die Grundpreise der BEV-PKW aufaddiert, die in etwa denjenigen der konventionellen PKW entsprechen. Im Zuge der Kaufpreis-Analyse wurden dafür die durchschnittlichen Batteriekapazitäten⁷⁴ ermittelt, die zum aktuellen Zeitpunkt in den betrachteten Fahrzeug-Segmenten verbaut sind und multipliziert mit den spezifischen Batteriekosten einen Preisaufschlag je nach Segment bilden.

Für die BEV-Preisentwicklung im Zeitraum 2022 – 2035 liefert ICCT (2019) belastbare Aussagen für PKW unterschiedlicher Reichweite, die mit Hilfe der zuvor genannten Analyse zu den mittleren Batteriekapazitäten in die in REF-2050 verwendeten Segmente übernommen wurde, in dem die Preisentwicklung auf das Jahr 2022 normiert mit den in Tabelle 12 ermittelten PKW-Listenpreisen verrechnet wurde. Abbildung 42 zeigt hierzu den normierten Preisindex für die Antriebsart BEV nach Segment.

⁷⁴ 23 kWh im Segment Mini, 46 kWh (Klein), 56 kWh (Kompaktklasse), 71 kWh (Mittelklasse), 92 kWh (Oberklasse), 80 kWh (Offroad), 69 kWh (MPV).

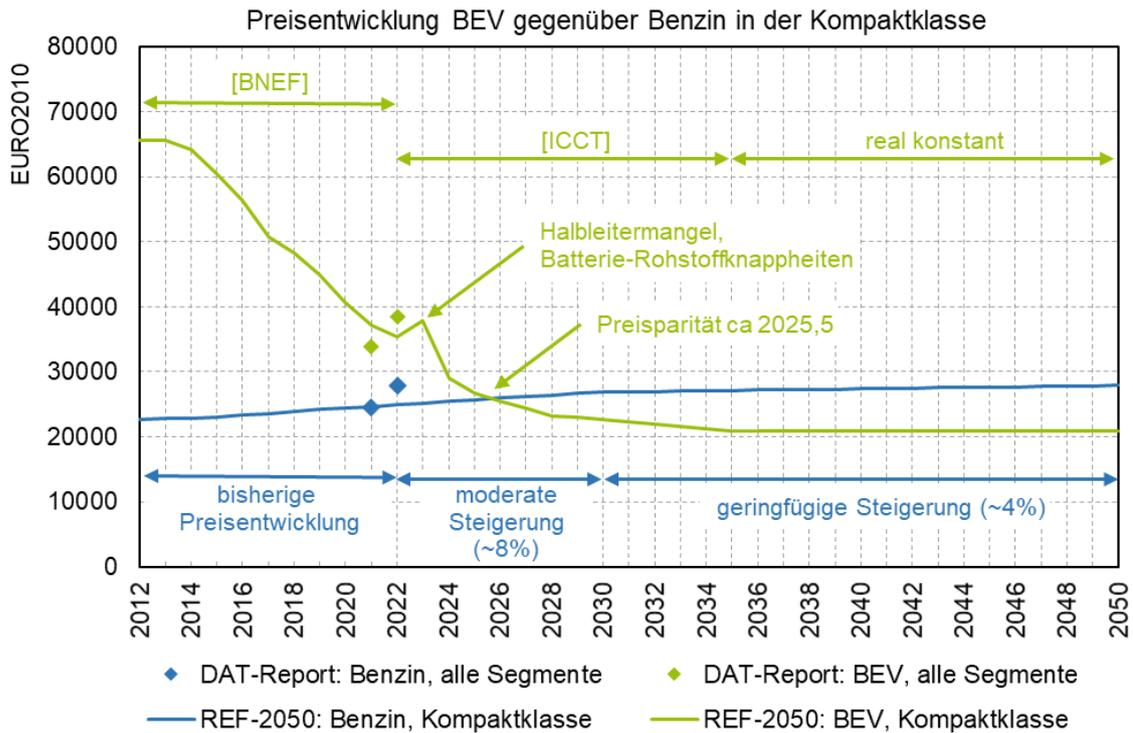


Quelle: ICCT (2019), eigene Darstellung.

Abbildung 42 Auf 2022 normierte Listenpreisentwicklung von BEV nach Segment nach ICCT (2019)

Zusammenfassend bewertet die vorgestellte Analyse die Preisentwicklung für batterieelektrische PKW im Zeitraum 2013 – 2022 nach BloombergNEF (2021) und im Zeitraum 2022 – 2035 nach ICCT (2019) mit Stützwerten in 2022 nach eigener Auswertung für alle genannten Antriebsarten und Segmente. Für die weitere Entwicklung nach 2035 wird für BEV ein real konstanter Preis angenommen. Abbildung 43 veranschaulicht die Vorgehensweise beispielhaft für die Preisentwicklung von Benzin-PKW gegenüber BEV-PKW in der Kompaktklasse. Zur Validierung sind einzelne Kennwerte aus DAT-Report (2022) eingefügt, die sich zwar auf einen gemittelten Wert aller Fahrzeugsegmente beziehen, mit der Kompaktklasse aber gut vergleichbar sind, da diese einen guten Durchschnitt abbildet. Für die Preisentwicklung von Benzin-PKW wurden vor 2022 statistische Daten verwendet. Im Zeitraum 2022 – 2030 wurde eine moderate Steigerung von +8% und von 2031 – 2050 eine geringfügige Steigerung der Listenpreise von +4% angenommen.

Die Herleitung der Preisentwicklungen der weiteren Antriebsarten und Segmente würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen, sie sind daher tabellarisch in Intervallen im Zeitraum 2020 – 2050 in Tabelle 19 und Tabelle 20 in Kapitel 6.3.6 vermerkt.



Quelle: DAT-Report (2022); M-Five, ASTRA-2023, eigene Analyse.

Abbildung 43 Listenpreisentwicklung BEV gegenüber Benzin in der Kompaktklasse

Abbildung 44 zeigt die resultierenden, relativen Preisunterschiede zwischen Benzin- und BEV-PKW in allen Segmenten. Eine Kostenparität zwischen BEV und konventionellen Verbrennern wird in REF-2050 näherungsweise im Jahr 2025 erreicht. Diese Einschätzung wird von verschiedenen Studien geteilt (BloombergNEF, 2021; ICCT, 2019; McKinsey, 2019).

Segment	2020	2023	2025	2030	2035	Preisparität
Mini	-36%	-29%	-6%	13%	23%	Q2 2026
Klein	-38%	-31%	-6%	14%	26%	Q2 2026
Kompaktklasse	-40%	-33%	-4%	19%	30%	Q3 2025
Mittelklasse	-22%	-14%	6%	30%	44%	Q3 2024
Oberklasse	-18%	-12%	9%	30%	40%	Q2 2024
Offroad	-37%	-30%	-5%	17%	27%	Q3 2025
MPV	-44%	-38%	-12%	11%	17%	Q2 2026

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 44 Relativer Preisunterschied und Erreichung der Preisparität von Benzin-PKW gegenüber BEV nach Segmenten im Zeitraum 2020 bis 2035

6.3.5 Aktualisierung des Energieverbrauchs von PKW

In einer umfangreichen Analyse wurden die Verbräuche bzw. Effizienzen von PKW für REF-2050 anhand der tatsächlichen Käufe im Jahr 2022 mittels eines gewichteten, arithmetischen Mittelwertes für insgesamt 8 Antriebsarten x 7 Segmente neu bewertet. Die verwendeten Verbrauchsangaben je PKW beziehen sich dabei auf Angaben diverser Quellen. Der Verbrauch konventioneller Verbrenner (Benzin, Diesel) mit großem Bestand lässt sich aus (KBA, 2023a) ableiten, liefert darüber hinaus allerdings nur wenige bis keine Informationen zu alternativen und neuartigen Kraftstoff- bzw. Antriebsarten. Diese erschließen sich insbesondere aus dem aktuellen Modellangebot aus ADAC (2023) zum Stichtag 1.3.2023, einer Auswertung der EEA-Datenbank *CO₂-Monitoring of passenger cars* (EEA, 2022) im Zeitraum 2010-2022 sowie ergänzend mittels Print- und Online-Literatur aus (Vision Mobility, 2022) sowie (EV-Database, 2023).

Tabelle 13 stellt die für verschiedene Antriebsarten genutzten Quellen zusammen und gibt einen Überblick über die verwendeten Berechnungsgrundlagen. Im Rückblick wurden die Verbräuche von PKW für den Zeitraum von 1971 bis 2021 bereits hinreichend präzise in den vorangegangenen Referenzszenarien in ASTRA modelliert, so dass dadurch eine robuste und belastbare Datengrundlage besteht. Erschwerend kommt jedoch hinzu, dass die Hersteller seit 2018 verpflichtet werden, Effizienzen nach dem realistischeren WLTP-Prüfverfahren zu erfassen, anstatt wie zuvor nach NEFZ-Prüfzyklus. In der Übergangszeit, die erst seit 2022 abgeschlossen scheint, vermischten sich die Angaben zu Verbräuchen der beiden Verfahren und müssen mit besonderer Vorsicht analysiert werden.

In der vorliegenden Auswertung wurde der Verbrauch von PKW daher rein nach WLTP-Prüfzyklus erfasst und, um eine Mischung beider Kennwerte zu vermeiden, auch rückwirkend auf die historischen Modelldaten angewendet. Dazu wurde ein Verbrauchsindex gebildet, auf das Jahr 2022 normiert und anschließend mit den neu ermittelten Verbrauchswerten für 2022 nach Antriebsart und Segment gewichtet.

Die Annahmen zur Effizienzsteigerung der einzelnen Antriebsarten in den Intervallen 2023-2030 sowie 2031-2050 sind durch heuristische Methoden sowie Experteneinschätzungen begründet, darüber hinaus aber nur schwer abschätz- und validierbar.

Tabelle 13 Quellen und Berechnungsgrundlage des PKW-Verbrauchs nach Antriebsart im Zeitraum 1971 bis 2050

Antriebsart	Zeitraum				
	1971-1994	1995-2021	2022 mit Quelle	2023-2030	2031-2050
Benzin	historische Daten, ASTRA REF-2020	historische Daten, ASTRA REF-2020	KBA (2023a)	10%	5%
Diesel			KBA (2023a)	8%	4%
CNG			ADAC (2023), EEA (2022)	12%	21%
LPG			ADAC (2023), EEA (2022)	10%	5%
Hybrid			ADAC (2023), EEA (2022)	14%	7%
PHEV			ADAC (2023), EEA (2022), Vision Mobility (2022)	10%	10%
BEV			ADAC (2023), EEA (2022), Vision Mobility (2022), EV-Database (2023)	15%	21%
H2-BZ			ADAC (2023)	12%	15%
Berechnungs- grundlage	Nach bisherigem ASTRA-Verbrauchsindex mit historischen KBA-Daten als Grundlage; Normierung auf aktuelle Daten aus 2022.			Lineare Interpolation zwischen Start- und Zieljahr.	

Quelle: M-Five, eigene Darstellung.

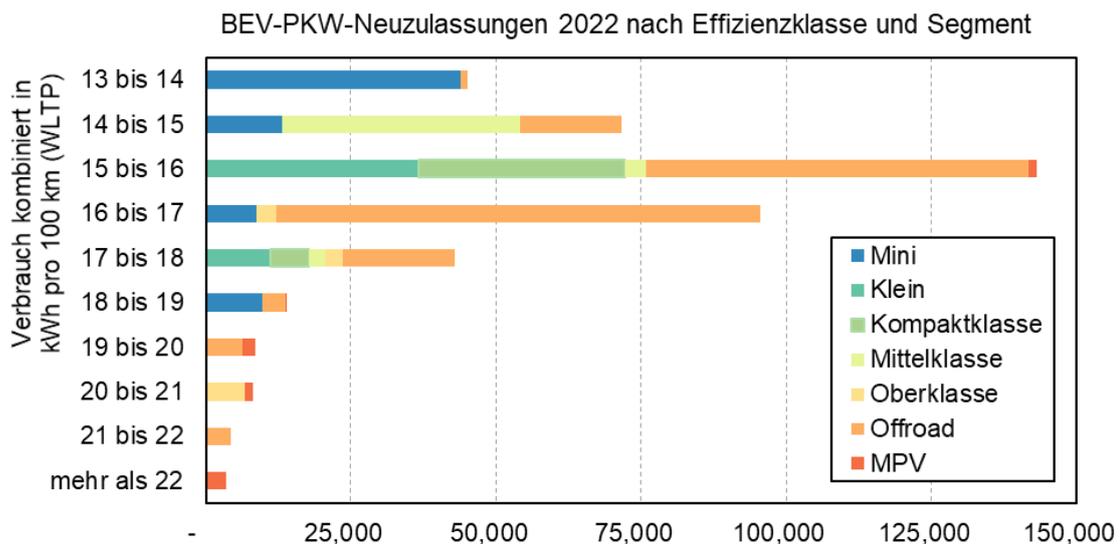
Tabelle 14 fasst die Ergebnisse der Analyse nach Segmenten und Antriebsarten für das Jahr 2022 zusammen.

Tabelle 14 Durchschnittlicher Verbrauch nach Antriebsart und Segment im Jahr 2022

Verbrauch	Segment						
	Mini	Klein	Kompaktkl.	Mittelkl.	Oberkl.	Offroad	MPV
Benzin (l/100km)	5.1	5.5	6.1	7.3	10.0	6.9	6.7
Diesel (l/100km)	5.0	4.5	4.7	5.3	6.1	6.2	6.9
CNG (kg/100km)	2.9	3.6	4.2	4.6	5.1	4.4	4.8
LPG (l/100km)	6.7	7.0	7.2	8.9	20.4	8.7	9.1
Hybride (l/100km)	4.3	4.4	5.2	6.0	6.7	7.2	6.4
PHEV (kWh/100km)	15.7	18.6	23.2	25.2	31.0	31.9	30.8
BEV (kWh/100km)	15.3	16.2	17.8	19.8	24.8	22.4	21.3
H2-BZ (kg/100km)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.0	0.9

Quelle: M-Five, ASTRA-2023, eigene Darstellung.

Abbildung 45 zeigt die Einteilung der tatsächlichen BEV-PKW-Käufe im Jahr 2022 nach Segment für verschiedene Effizienzklassen im Bereich 13 – 22 kWh pro 100 km und darüber hinaus. Zu beobachten ist, dass vor allem die kleineren Fahrzeugsegmente auch effizienter im Verbrauch sind und einen Hauptanteil in den Klassen zwischen 13 und 16 kWh pro 100 km ausmachen, wohingegen die größeren Fahrzeug-Segmente einen höheren Energieverbrauch besitzen. Der Anteil an PKW-Neuzulassungen in der Effizienzklasse über 20 kWh pro 100 km (nach Herstellerangaben) ist hingegen gering.

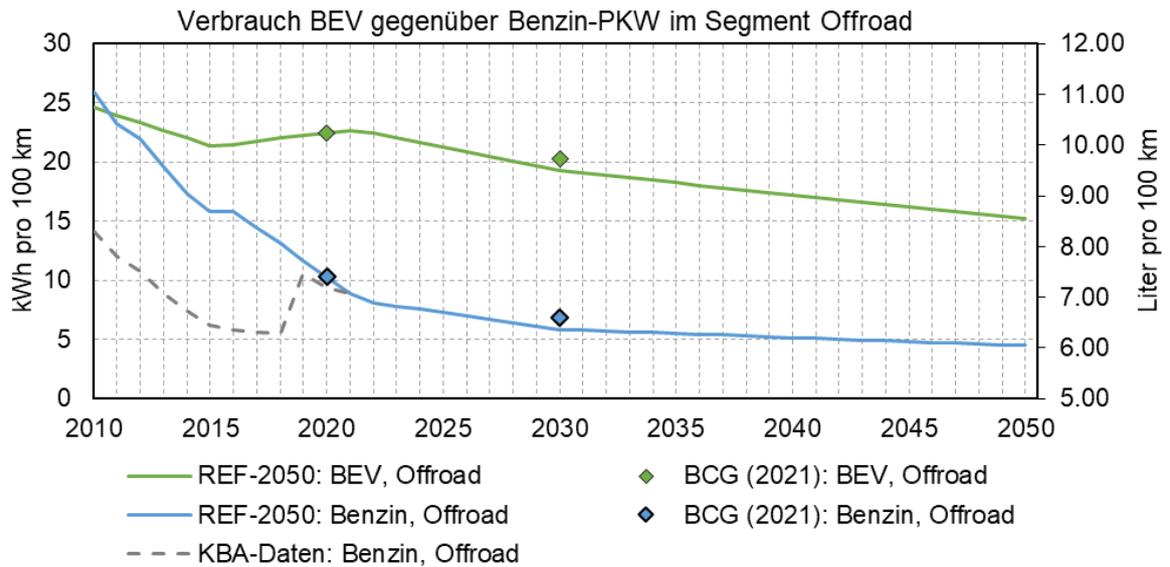


Quellen: EEA (2022), ADAC (2023), KBA (2023a); M-Five, M-Five, eigene Darstellung.

Abbildung 45 Effizienzklassen von BEV-PKW-Neuzulassungen nach Segment im Jahr 2022

Abbildung 46 zeigt die zeitliche Entwicklung im Verbrauch von Benzin- gegenüber BEV-PKW im Segment Offroad (Geländewagen, SUVs). Wie in Tabelle 13 erläutert, erfahren die Benzin-PKW im Zeitraum 2023 bis 2030 nur einen gemäßigten Effizienzgewinn von 10%, der sich im Intervall 2031 bis 2050 auf 5% verringert. Die BEV-PKW hingegen steigern ihre Effizienz im Verbrauch um 15% (2023-2030) bzw. 21% (2031-2050).

Zur Validierung der Analyse wurden in den Jahren 2020 und 2030 einzelne Datenpunkte gemäß (BCG, 2021) eingefügt, die das Ergebnis der Bewertung bestätigen können. Rein informativen Charakter hingegen hat der Benzin-Verbrauch gemäß KBA-Daten (KBA, 2023a), bei dem die Umstellung von NEFZ auf WLTP ab dem Jahr 2018 einen deutlichen Sprung verursacht. Die rückwirkende Abschätzung der Verbräuche spiegelt sich in dem Aufschlag gegenüber NEFZ wieder.



Quelle: BCG (2021); M-Five, ASTRA-2023, eigene Darstellung.

Abbildung 46 Verbrauch (WLTP) von BEV-PKW im Vergleich zu Benzin-PKW im Segment Offroad/SUV im Zeitraum 2010 – 2050

Im vorliegenden Kapitel soll die Betrachtung der Effizienzentwicklung von PKW vordergründig seitens der bestehenden Datenlage erfolgen. Eine ergänzende Analyse zur Effizienzentwicklung der PKW-Flotte findet in Kapitel 6.4.3 statt.

6.3.6 Modellierung der PKW-Kosten in ASTRA

Die TCO-Rechnung (Total Cost of Ownership) in ASTRA umfasst die folgenden Kosten für PKW-Halter:

- (1) **jährlich anfallende Kosten ohne Energiekosten**, bestehend aus Versicherungs-, Wartungs- und Reparaturkosten, KFz-Steuer und bei gewerblichen PKW auch aus der privat anzusetzenden Besteuerung des geldwerten Vorteiles eines Dienstwagens.
- (2) **Energiekosten** abhängig vom Kraftstoffpreis, dem Energieverbrauch (siehe Kapitel 6.3.5) und der Jahresfahrleistung.
- (3) **Beschaffungskosten**, d.h. den Fahrzeugpreisen (siehe Kapitel 6.3.4) inklusive finanzieller Anreize, Finanzierungskosten und der Mehrwertsteuer im Falle privater PKW und unter Berücksichtigung des Restwerts des Fahrzeugs und des zugrundeliegenden Kalkulationszeitraums.

Tabelle 15 bzw. Tabelle 16 zeigen die jährlich anfallenden Kosten neuer PKW zu verschiedenen Zeitpunkten sowohl für gewerbliche als auch für private Fahrzeughalter. Diese beiden Nutzergruppen unterscheiden sich sowohl in der Dienstwagenbesteuerung als auch in Größe und Motorisierung der PKW, welche zu unterschiedlichen Steuer-, Versicherungs- und Wartungskosten führen.

Die Energiekosten in Tabelle 17 und in Tabelle 18 werden durch den Energieverbrauch und die Energiepreise (siehe aktualisierte Rahmendaten) bestimmt. Der spezifische Energieverbrauch stammt aus der in Kapitel 6.3.5 vorgestellten Auswertung.

Die Beschaffungskosten in Tabelle 19 und Tabelle 20 werden durch die Fahrzeugpreise (siehe auch Kapitel 6.3.4 für eine erweiterte Beschreibung) inklusive der Mehrwertsteuer für private PKW und der erwarteten Restwerte bei gewerblich beschafften PKW bestimmt.

In Tabelle 19 fällt der Preisunterschied zwischen gewerblich und privat beschafften PKW auf. Gewerbliche Fahrzeugpreise liegen ein bis zwei Fünftel unter privaten Beschaffungen, da für gewerbliche Beschaffungen die Mehrwertsteuer (MwSt., 19%) einen durchlaufenden Posten bildet und daher nicht anzusetzen ist. Weiter können gewerbliche Käufer wie Flottenkunden höhere Rabatte aushandeln, weil sie jeweils eine größere Anzahl an PKW abnehmen. Damit entfaltet auch die Kaufprämie für E-PKW bei gewerblichen Haltern eine größere Wirkung, da sie anteilmäßig zu einer größeren Reduktion des Kaufpreises führt.

Tabelle 15 Entwicklung der jährlich anfallenden Kosten (ohne Energie) von neuen PKW (gewerblich)

In EURO2010 pro Fz-km		Gewerbliche Nutzung						
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MINI	Benzin	0,059	0,059	0,061	0,060	0,060	0,060	0,059
MINI	Diesel	0,056	0,054	0,055	0,054	0,054	0,054	0,053
MINI	CNG	0,050	0,049	0,049	0,048	0,047	0,046	0,045
MINI	LPG	0,035	0,034	0,034	0,033	0,032	0,032	0,031
MINI	Hybrid	0,044	0,042	0,042	0,041	0,040	0,039	0,039
MINI	PHEV	0,053	0,053	0,049	0,049	0,048	0,047	0,046
MINI	BEV	0,076	0,060	0,056	0,059	0,059	0,059	0,059
MINI	H2-BZ	0,070	0,057	0,049	0,050	0,048	0,047	0,045
KLEIN	Benzin	0,079	0,079	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
KLEIN	Diesel	0,062	0,062	0,064	0,064	0,064	0,064	0,065
KLEIN	CNG	0,138	0,136	0,135	0,133	0,131	0,128	0,126
KLEIN	LPG	0,047	0,046	0,046	0,045	0,044	0,043	0,042
KLEIN	Hybrid	0,043	0,041	0,041	0,040	0,039	0,039	0,038
KLEIN	PHEV	0,114	0,114	0,106	0,105	0,103	0,101	0,099
KLEIN	BEV	0,088	0,068	0,061	0,064	0,064	0,064	0,064
KLEIN	H2-BZ	0,058	0,049	0,040	0,041	0,039	0,038	0,037
KOMPAKT	Benzin	0,127	0,130	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135
KOMPAKT	Diesel	0,086	0,088	0,092	0,092	0,093	0,093	0,094
KOMPAKT	CNG	0,229	0,225	0,224	0,221	0,218	0,214	0,211
KOMPAKT	LPG	0,077	0,077	0,077	0,076	0,075	0,074	0,073
KOMPAKT	Hybrid	0,121	0,119	0,117	0,115	0,113	0,112	0,111
KOMPAKT	PHEV	0,057	0,058	0,054	0,053	0,052	0,051	0,050
KOMPAKT	BEV	0,168	0,098	0,080	0,086	0,092	0,099	0,105
KOMPAKT	H2-BZ	0,089	0,074	0,064	0,063	0,061	0,059	0,057
MITTELKLASSE	Benzin	0,221	0,230	0,240	0,240	0,240	0,240	0,240
MITTELKLASSE	Diesel	0,124	0,127	0,133	0,134	0,135	0,135	0,136
MITTELKLASSE	CNG	0,132	0,129	0,128	0,127	0,125	0,123	0,122
MITTELKLASSE	LPG	0,103	0,104	0,106	0,104	0,103	0,101	0,100
MITTELKLASSE	Hybrid	0,196	0,193	0,189	0,186	0,184	0,181	0,179
MITTELKLASSE	PHEV	0,096	0,098	0,091	0,090	0,088	0,086	0,085
MITTELKLASSE	BEV	0,084	0,061	0,050	0,050	0,053	0,055	0,058
MITTELKLASSE	H2-BZ	0,115	0,097	0,082	0,081	0,078	0,076	0,074
OBERKLASSE	Benzin	0,389	0,410	0,427	0,426	0,426	0,426	0,426
OBERKLASSE	Diesel	0,165	0,170	0,178	0,178	0,179	0,180	0,181
OBERKLASSE	CNG	0,092	0,091	0,090	0,089	0,088	0,086	0,085
OBERKLASSE	LPG	0,364	0,382	0,383	0,375	0,366	0,359	0,352
OBERKLASSE	Hybrid	0,297	0,292	0,286	0,282	0,278	0,274	0,270
OBERKLASSE	PHEV	0,099	0,101	0,094	0,093	0,091	0,090	0,088
OBERKLASSE	BEV	0,113	0,088	0,079	0,080	0,083	0,086	0,089
OBERKLASSE	H2-BZ	0,202	0,184	0,166	0,167	0,162	0,156	0,151
OFFROAD	Benzin	0,180	0,185	0,192	0,192	0,191	0,191	0,190
OFFROAD	Diesel	0,159	0,162	0,169	0,169	0,170	0,170	0,171
OFFROAD	CNG	0,229	0,228	0,225	0,222	0,219	0,215	0,212
OFFROAD	LPG	0,216	0,219	0,224	0,220	0,217	0,214	0,210
OFFROAD	Hybrid	0,245	0,238	0,230	0,226	0,222	0,219	0,216
OFFROAD	PHEV	0,125	0,122	0,110	0,109	0,107	0,105	0,103
OFFROAD	BEV	0,058	0,034	0,029	0,033	0,037	0,041	0,045
OFFROAD	H2-BZ	0,235	0,214	0,187	0,187	0,180	0,175	0,169
MPV	Benzin	0,168	0,172	0,177	0,176	0,175	0,174	0,173
MPV	Diesel	0,140	0,142	0,147	0,147	0,148	0,148	0,148
MPV	CNG	0,143	0,141	0,139	0,137	0,135	0,133	0,131
MPV	LPG	0,167	0,170	0,173	0,170	0,167	0,165	0,162
MPV	Hybrid	0,059	0,057	0,054	0,053	0,053	0,052	0,051
MPV	PHEV	0,097	0,095	0,086	0,085	0,084	0,082	0,080
MPV	BEV	0,396	0,253	0,204	0,225	0,235	0,246	0,257
MPV	H2-BZ	0,157	0,135	0,120	0,119	0,115	0,112	0,108

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Tabelle 16 Entwicklung der jährlich anfallenden Kosten (ohne Energie) von neuen PKW (privat)

In EURO2010 pro Fz-km		Private Nutzung						
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MINI	Benzin	0,050	0,046	0,044	0,042	0,041	0,039	0,038
MINI	Diesel	0,051	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,037
MINI	CNG	0,024	0,023	0,023	0,022	0,022	0,021	0,020
MINI	LPG	0,020	0,019	0,018	0,017	0,017	0,016	0,015
MINI	Hybrid	0,036	0,034	0,033	0,032	0,031	0,030	0,029
MINI	PHEV	0,019	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017
MINI	BEV	0,023	0,023	0,022	0,025	0,025	0,024	0,023
MINI	H2-BZ	0,015	0,015	0,015	0,016	0,016	0,015	0,014
KLEIN	Benzin	0,055	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,041
KLEIN	Diesel	0,037	0,034	0,032	0,031	0,030	0,028	0,027
KLEIN	CNG	0,020	0,019	0,019	0,018	0,018	0,017	0,017
KLEIN	LPG	0,024	0,022	0,021	0,020	0,020	0,019	0,018
KLEIN	Hybrid	0,027	0,025	0,025	0,024	0,023	0,022	0,022
KLEIN	PHEV	0,015	0,015	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014
KLEIN	BEV	0,020	0,020	0,020	0,022	0,022	0,021	0,020
KLEIN	H2-BZ	0,016	0,016	0,016	0,018	0,017	0,017	0,016
KOMPAKT	Benzin	0,057	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042
KOMPAKT	Diesel	0,042	0,038	0,036	0,035	0,033	0,032	0,031
KOMPAKT	CNG	0,033	0,032	0,031	0,030	0,029	0,028	0,028
KOMPAKT	LPG	0,033	0,031	0,030	0,029	0,028	0,027	0,026
KOMPAKT	Hybrid	0,022	0,020	0,019	0,019	0,018	0,017	0,017
KOMPAKT	PHEV	0,022	0,022	0,022	0,022	0,021	0,021	0,020
KOMPAKT	BEV	0,028	0,028	0,027	0,031	0,030	0,029	0,028
KOMPAKT	H2-BZ	0,018	0,018	0,018	0,020	0,019	0,019	0,018
MITTELKLASSE	Benzin	0,077	0,072	0,068	0,065	0,062	0,060	0,057
MITTELKLASSE	Diesel	0,054	0,049	0,047	0,045	0,043	0,042	0,040
MITTELKLASSE	CNG	0,032	0,030	0,029	0,028	0,027	0,027	0,026
MITTELKLASSE	LPG	0,041	0,037	0,036	0,034	0,033	0,032	0,030
MITTELKLASSE	Hybrid	0,036	0,033	0,032	0,030	0,029	0,028	0,027
MITTELKLASSE	PHEV	0,030	0,029	0,029	0,029	0,028	0,027	0,026
MITTELKLASSE	BEV	0,019	0,019	0,018	0,021	0,020	0,019	0,019
MITTELKLASSE	H2-BZ	0,025	0,025	0,024	0,027	0,026	0,025	0,024
OBERKLASSE	Benzin	0,102	0,101	0,094	0,089	0,084	0,080	0,076
OBERKLASSE	Diesel	0,068	0,063	0,060	0,057	0,055	0,052	0,050
OBERKLASSE	CNG	0,042	0,040	0,039	0,038	0,036	0,035	0,034
OBERKLASSE	LPG	0,064	0,071	0,065	0,061	0,057	0,053	0,050
OBERKLASSE	Hybrid	0,086	0,080	0,077	0,074	0,071	0,068	0,066
OBERKLASSE	PHEV	0,038	0,038	0,037	0,038	0,037	0,035	0,034
OBERKLASSE	BEV	0,031	0,030	0,030	0,034	0,033	0,032	0,031
OBERKLASSE	H2-BZ	0,035	0,034	0,034	0,038	0,036	0,035	0,034
OFFROAD	Benzin	0,079	0,074	0,070	0,068	0,065	0,062	0,060
OFFROAD	Diesel	0,072	0,067	0,064	0,061	0,058	0,056	0,053
OFFROAD	CNG	0,152	0,147	0,144	0,140	0,135	0,131	0,127
OFFROAD	LPG	0,053	0,049	0,047	0,045	0,044	0,042	0,040
OFFROAD	Hybrid	0,077	0,071	0,067	0,065	0,062	0,060	0,057
OFFROAD	PHEV	0,035	0,034	0,034	0,034	0,033	0,032	0,031
OFFROAD	BEV	0,025	0,025	0,024	0,029	0,028	0,027	0,026
OFFROAD	H2-BZ	0,030	0,029	0,029	0,034	0,032	0,031	0,030
MPV	Benzin	0,080	0,075	0,071	0,068	0,066	0,063	0,061
MPV	Diesel	0,068	0,064	0,060	0,058	0,055	0,053	0,050
MPV	CNG	0,043	0,041	0,040	0,039	0,038	0,037	0,035
MPV	LPG	0,048	0,045	0,043	0,041	0,040	0,038	0,037
MPV	Hybrid	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020	0,020	0,019
MPV	PHEV	0,034	0,034	0,033	0,033	0,032	0,031	0,030
MPV	BEV	0,040	0,039	0,039	0,044	0,042	0,041	0,039
MPV	H2-BZ	0,029	0,028	0,028	0,031	0,030	0,029	0,028

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Tabelle 17 Entwicklung der Energiekosten von neuen PKW (gewerblich)

In EURO2010 pro Fz-km		Gewerbliche Nutzung						
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MINI	Benzin	0,055	0,054	0,053	0,053	0,054	0,054	0,054
MINI	Diesel	0,046	0,049	0,050	0,051	0,053	0,054	0,054
MINI	CNG	0,021	0,026	0,025	0,027	0,028	0,029	0,029
MINI	LPG	0,036	0,037	0,039	0,038	0,038	0,038	0,037
MINI	Hybrid	0,046	0,045	0,043	0,043	0,043	0,043	0,042
MINI	PHEV	0,039	0,035	0,025	0,022	0,020	0,017	0,015
MINI	BEV	0,038	0,034	0,023	0,020	0,017	0,014	0,012
MINI	H2-BZ	0,049	0,031	0,024	0,020	0,016	0,013	0,011
KLEIN	Benzin	0,059	0,059	0,057	0,057	0,058	0,058	0,058
KLEIN	Diesel	0,042	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048	0,049
KLEIN	CNG	0,026	0,032	0,031	0,032	0,034	0,034	0,034
KLEIN	LPG	0,037	0,039	0,041	0,039	0,040	0,039	0,039
KLEIN	Hybrid	0,047	0,046	0,043	0,043	0,044	0,044	0,043
KLEIN	PHEV	0,046	0,042	0,030	0,026	0,023	0,020	0,018
KLEIN	BEV	0,040	0,036	0,025	0,021	0,018	0,015	0,013
KLEIN	H2-BZ	0,057	0,037	0,028	0,023	0,019	0,016	0,013
KOMPAKT	Benzin	0,065	0,065	0,063	0,063	0,064	0,064	0,064
KOMPAKT	Diesel	0,044	0,046	0,047	0,048	0,050	0,050	0,051
KOMPAKT	CNG	0,031	0,038	0,036	0,037	0,037	0,037	0,038
KOMPAKT	LPG	0,039	0,040	0,042	0,041	0,041	0,041	0,040
KOMPAKT	Hybrid	0,055	0,054	0,051	0,051	0,052	0,051	0,051
KOMPAKT	PHEV	0,058	0,052	0,037	0,033	0,029	0,025	0,022
KOMPAKT	BEV	0,044	0,039	0,027	0,023	0,020	0,017	0,014
KOMPAKT	H2-BZ	0,065	0,042	0,032	0,026	0,022	0,018	0,014
MITTELKLASSE	Benzin	0,078	0,078	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077
MITTELKLASSE	Diesel	0,049	0,052	0,053	0,054	0,056	0,057	0,057
MITTELKLASSE	CNG	0,034	0,041	0,040	0,041	0,043	0,044	0,044
MITTELKLASSE	LPG	0,048	0,049	0,051	0,050	0,050	0,050	0,049
MITTELKLASSE	Hybrid	0,065	0,063	0,060	0,060	0,060	0,060	0,059
MITTELKLASSE	PHEV	0,063	0,057	0,040	0,036	0,032	0,027	0,024
MITTELKLASSE	BEV	0,049	0,044	0,030	0,026	0,022	0,019	0,015
MITTELKLASSE	H2-BZ	0,073	0,047	0,035	0,030	0,024	0,020	0,016
OBERKLASSE	Benzin	0,108	0,107	0,104	0,104	0,106	0,106	0,105
OBERKLASSE	Diesel	0,054	0,059	0,060	0,061	0,063	0,064	0,065
OBERKLASSE	CNG	0,037	0,046	0,048	0,051	0,053	0,054	0,054
OBERKLASSE	LPG	0,104	0,113	0,118	0,115	0,115	0,115	0,114
OBERKLASSE	Hybrid	0,072	0,070	0,066	0,066	0,067	0,067	0,066
OBERKLASSE	PHEV	0,077	0,070	0,050	0,044	0,039	0,034	0,029
OBERKLASSE	BEV	0,062	0,055	0,038	0,032	0,028	0,023	0,019
OBERKLASSE	H2-BZ	0,090	0,058	0,043	0,036	0,030	0,024	0,020
OFFROAD	Benzin	0,074	0,073	0,071	0,072	0,073	0,073	0,072
OFFROAD	Diesel	0,054	0,060	0,060	0,061	0,064	0,065	0,065
OFFROAD	CNG	0,033	0,045	0,047	0,050	0,052	0,053	0,053
OFFROAD	LPG	0,046	0,048	0,050	0,049	0,049	0,049	0,048
OFFROAD	Hybrid	0,078	0,076	0,071	0,071	0,072	0,072	0,071
OFFROAD	PHEV	0,078	0,072	0,051	0,045	0,040	0,035	0,030
OFFROAD	BEV	0,053	0,049	0,034	0,029	0,025	0,021	0,017
OFFROAD	H2-BZ	0,081	0,052	0,039	0,033	0,027	0,022	0,018
MPV	Benzin	0,072	0,071	0,069	0,070	0,071	0,071	0,070
MPV	Diesel	0,064	0,068	0,069	0,070	0,073	0,074	0,075
MPV	CNG	0,035	0,044	0,046	0,049	0,051	0,052	0,052
MPV	LPG	0,049	0,050	0,053	0,051	0,052	0,051	0,051
MPV	Hybrid	0,068	0,067	0,063	0,063	0,063	0,063	0,062
MPV	PHEV	0,077	0,069	0,049	0,044	0,039	0,034	0,029
MPV	BEV	0,053	0,047	0,032	0,028	0,024	0,020	0,017
MPV	H2-BZ	0,073	0,047	0,035	0,030	0,024	0,020	0,016

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Tabelle 18 Entwicklung der Energiekosten von neuen PKW (privat)

In EURO2010 pro Fz-km		Private Nutzung						
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MINI	Benzin	0,065	0,065	0,063	0,063	0,064	0,064	0,064
MINI	Diesel	0,055	0,058	0,059	0,061	0,063	0,064	0,064
MINI	CNG	0,025	0,031	0,030	0,032	0,034	0,034	0,034
MINI	LPG	0,043	0,044	0,046	0,045	0,045	0,045	0,044
MINI	Hybrid	0,055	0,054	0,051	0,051	0,051	0,051	0,050
MINI	PHEV	0,046	0,042	0,030	0,026	0,023	0,020	0,018
MINI	BEV	0,045	0,040	0,028	0,024	0,020	0,017	0,014
MINI	H2-BZ	0,058	0,037	0,028	0,023	0,019	0,016	0,013
KLEIN	Benzin	0,070	0,070	0,068	0,068	0,069	0,069	0,069
KLEIN	Diesel	0,050	0,052	0,053	0,055	0,056	0,057	0,058
KLEIN	CNG	0,031	0,038	0,037	0,038	0,040	0,041	0,041
KLEIN	LPG	0,045	0,046	0,048	0,047	0,047	0,047	0,046
KLEIN	Hybrid	0,056	0,055	0,052	0,052	0,052	0,052	0,051
KLEIN	PHEV	0,055	0,050	0,035	0,031	0,028	0,024	0,021
KLEIN	BEV	0,048	0,042	0,029	0,025	0,022	0,018	0,015
KLEIN	H2-BZ	0,068	0,044	0,033	0,027	0,023	0,019	0,015
KOMPAKT	Benzin	0,078	0,077	0,075	0,075	0,077	0,077	0,076
KOMPAKT	Diesel	0,052	0,055	0,056	0,057	0,059	0,060	0,060
KOMPAKT	CNG	0,037	0,045	0,043	0,044	0,044	0,045	0,045
KOMPAKT	LPG	0,046	0,048	0,050	0,049	0,049	0,049	0,048
KOMPAKT	Hybrid	0,066	0,064	0,061	0,061	0,061	0,061	0,060
KOMPAKT	PHEV	0,069	0,062	0,044	0,039	0,035	0,030	0,026
KOMPAKT	BEV	0,053	0,047	0,032	0,028	0,024	0,020	0,017
KOMPAKT	H2-BZ	0,078	0,050	0,038	0,031	0,026	0,021	0,017
MITTELKLASSE	Benzin	0,093	0,093	0,090	0,090	0,092	0,092	0,091
MITTELKLASSE	Diesel	0,058	0,062	0,063	0,064	0,066	0,068	0,068
MITTELKLASSE	CNG	0,040	0,049	0,047	0,049	0,052	0,052	0,053
MITTELKLASSE	LPG	0,057	0,058	0,061	0,060	0,060	0,060	0,059
MITTELKLASSE	Hybrid	0,077	0,075	0,071	0,071	0,072	0,071	0,071
MITTELKLASSE	PHEV	0,075	0,067	0,048	0,043	0,038	0,033	0,028
MITTELKLASSE	BEV	0,059	0,052	0,036	0,031	0,026	0,022	0,018
MITTELKLASSE	H2-BZ	0,087	0,056	0,042	0,035	0,029	0,024	0,019
OBERKLASSE	Benzin	0,128	0,127	0,124	0,124	0,126	0,126	0,125
OBERKLASSE	Diesel	0,064	0,071	0,071	0,073	0,075	0,077	0,077
OBERKLASSE	CNG	0,044	0,054	0,057	0,060	0,063	0,064	0,065
OBERKLASSE	LPG	0,123	0,134	0,141	0,137	0,137	0,137	0,135
OBERKLASSE	Hybrid	0,085	0,083	0,079	0,079	0,079	0,079	0,078
OBERKLASSE	PHEV	0,092	0,083	0,059	0,052	0,046	0,040	0,035
OBERKLASSE	BEV	0,073	0,065	0,045	0,038	0,033	0,028	0,023
OBERKLASSE	H2-BZ	0,107	0,069	0,052	0,043	0,035	0,029	0,024
OFFROAD	Benzin	0,088	0,087	0,085	0,085	0,086	0,087	0,086
OFFROAD	Diesel	0,065	0,071	0,071	0,073	0,076	0,077	0,077
OFFROAD	CNG	0,040	0,053	0,055	0,059	0,062	0,063	0,063
OFFROAD	LPG	0,055	0,057	0,060	0,058	0,059	0,058	0,058
OFFROAD	Hybrid	0,092	0,090	0,085	0,085	0,086	0,085	0,084
OFFROAD	PHEV	0,093	0,085	0,061	0,054	0,048	0,041	0,036
OFFROAD	BEV	0,063	0,059	0,040	0,035	0,030	0,025	0,021
OFFROAD	H2-BZ	0,097	0,062	0,047	0,039	0,032	0,026	0,021
MPV	Benzin	0,086	0,085	0,083	0,083	0,084	0,084	0,084
MPV	Diesel	0,076	0,080	0,082	0,084	0,087	0,088	0,089
MPV	CNG	0,042	0,052	0,054	0,058	0,061	0,062	0,062
MPV	LPG	0,058	0,060	0,063	0,061	0,061	0,061	0,060
MPV	Hybrid	0,081	0,079	0,075	0,075	0,075	0,075	0,074
MPV	PHEV	0,091	0,082	0,059	0,052	0,046	0,040	0,035
MPV	BEV	0,063	0,056	0,038	0,033	0,028	0,024	0,020
MPV	H2-BZ	0,087	0,056	0,042	0,035	0,029	0,024	0,019

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Tabelle 19 Entwicklung der Beschaffungskosten von neuen PKW (gewerblich)

In EURO2010		Gewerbliche Nutzung						
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MINI	Benzin	11 900	12 850	13 850	14 000	14 200	14 400	14 600
MINI	Diesel	11 550	12 350	13 200	13 500	13 850	14 150	14 500
MINI	CNG	11 350	11 150	11 150	11 100	10 950	10 800	10 650
MINI	LPG	10 000	10 200	10 350	10 200	10 100	10 000	9 850
MINI	Hybrid	10 400	10 500	10 400	10 300	10 200	10 100	10 050
MINI	PHEV	22 150	22 500	20 250	19 850	19 500	19 200	18 950
MINI	BEV	18 750	13 350	11 700	10 900	10 900	10 900	10 900
MINI	H2-BZ	46 900	36 400	30 050	29 050	28 100	27 200	26 450
KLEIN	Benzin	14 400	15 600	16 600	16 900	17 200	17 500	17 850
KLEIN	Diesel	18 600	19 950	21 350	21 900	22 450	23 050	23 600
KLEIN	CNG	17 900	17 600	17 600	17 450	17 250	17 000	16 800
KLEIN	LPG	16 600	16 950	17 300	17 100	16 900	16 700	16 550
KLEIN	Hybrid	12 700	12 750	12 650	12 550	12 450	12 350	12 250
KLEIN	PHEV	22 000	22 300	20 100	19 700	19 350	19 050	18 800
KLEIN	BEV	23 050	16 250	13 950	12 850	12 850	12 850	12 850
KLEIN	H2-BZ	45 550	36 600	28 700	27 700	26 800	26 000	25 250
KOMPAKT	Benzin	18 650	20 050	21 400	21 600	21 800	22 000	22 200
KOMPAKT	Diesel	24 250	25 750	27 650	28 100	28 600	29 050	29 550
KOMPAKT	CNG	23 100	22 850	22 750	22 600	22 350	22 050	21 800
KOMPAKT	LPG	21 600	22 200	22 750	22 500	22 250	22 000	21 800
KOMPAKT	Hybrid	20 550	20 600	20 450	20 300	20 150	20 000	19 850
KOMPAKT	PHEV	23 600	24 100	22 000	21 550	21 150	20 850	20 550
KOMPAKT	BEV	31 050	20 350	17 250	15 950	15 950	15 950	15 950
KOMPAKT	H2-BZ	48 500	39 650	33 150	32 000	30 950	30 000	29 150
MITTELKLASSE	Benzin	28 850	30 750	32 700	32 900	33 150	33 400	33 600
MITTELKLASSE	Diesel	29 450	31 100	33 200	33 650	34 150	34 650	35 150
MITTELKLASSE	CNG	28 650	28 350	28 300	28 050	27 750	27 400	27 100
MITTELKLASSE	LPG	25 600	26 400	27 200	26 900	26 600	26 350	26 050
MITTELKLASSE	Hybrid	32 700	32 750	32 200	31 850	31 550	31 200	30 900
MITTELKLASSE	PHEV	31 900	32 650	30 100	29 500	29 000	28 550	28 100
MITTELKLASSE	BEV	37 850	29 150	24 650	22 600	22 600	22 600	22 600
MITTELKLASSE	H2-BZ	46 750	38 800	32 050	30 950	29 950	29 050	28 200
OBERKLASSE	Benzin	59 250	63 200	67 200	67 650	68 100	68 600	69 050
OBERKLASSE	Diesel	49 250	52 000	55 500	56 300	57 150	57 950	58 800
OBERKLASSE	CNG	47 050	46 550	46 400	46 000	45 500	45 000	44 500
OBERKLASSE	LPG	43 800	45 100	46 600	46 100	45 650	45 150	44 700
OBERKLASSE	Hybrid	44 450	44 400	43 750	43 250	42 800	42 350	41 950
OBERKLASSE	PHEV	44 200	45 400	42 050	41 200	40 500	39 900	39 300
OBERKLASSE	BEV	71 800	56 600	49 600	46 250	46 250	46 250	46 250
OBERKLASSE	H2-BZ	47 050	41 850	36 850	35 600	34 450	33 400	32 400
OFFROAD	Benzin	25 650	27 350	29 100	29 300	29 500	29 700	29 900
OFFROAD	Diesel	36 050	38 050	40 600	41 200	41 800	42 400	43 000
OFFROAD	CNG	34 450	34 450	34 000	33 750	33 350	32 950	32 550
OFFROAD	LPG	31 300	32 500	33 650	33 300	32 900	32 550	32 200
OFFROAD	Hybrid	39 600	39 000	37 950	37 400	36 950	36 550	36 200
OFFROAD	PHEV	41 750	40 900	36 300	35 600	35 000	34 450	33 950
OFFROAD	BEV	40 700	28 100	23 800	22 100	22 100	22 100	22 100
OFFROAD	H2-BZ	58 200	52 400	45 300	43 750	42 300	41 000	39 850
MPV	Benzin	20 350	21 750	23 100	23 250	23 450	23 600	23 750
MPV	Diesel	32 950	34 800	37 150	37 750	38 300	38 900	39 500
MPV	CNG	34 800	34 750	34 300	34 000	33 650	33 250	32 850
MPV	LPG	31 650	32 850	34 100	33 750	33 350	33 000	32 650
MPV	Hybrid	31 250	30 300	29 050	28 750	28 450	28 150	27 850
MPV	PHEV	35 100	34 350	30 550	29 900	29 400	28 950	28 500
MPV	BEV	36 400	24 300	19 950	19 150	19 150	19 150	19 150
MPV	H2-BZ	54 450	45 850	39 900	38 550	37 250	36 150	35 100

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Tabelle 20 Entwicklung der Beschaffungskosten von neuen PKW (privat)

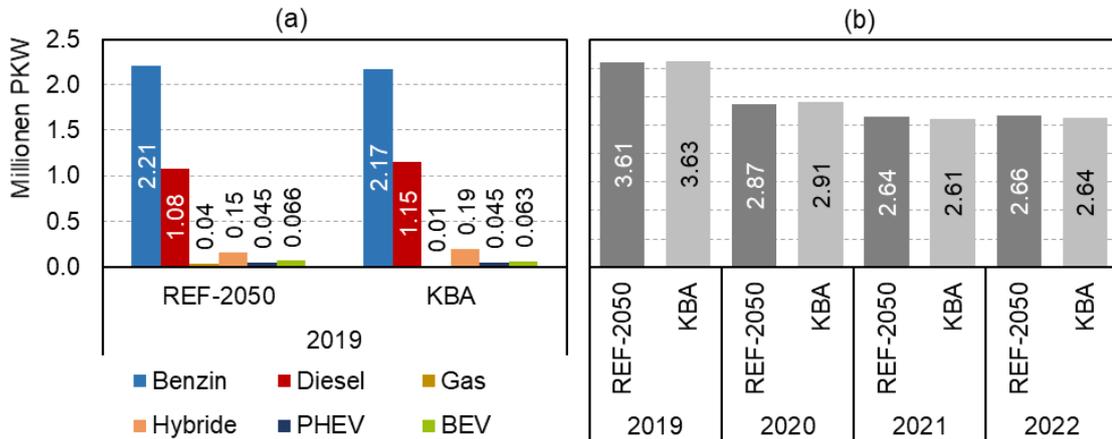
In EURO2010		Private Nutzung						
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
MINI	Benzin	16 550	17 900	19 250	19 500	19 800	20 050	20 300
MINI	Diesel	16 050	17 150	18 400	18 800	19 250	19 700	20 150
MINI	CNG	15 800	15 500	15 500	15 400	15 200	14 950	14 750
MINI	LPG	13 900	14 200	14 400	14 200	14 050	13 900	13 750
MINI	Hybrid	14 500	14 650	14 500	14 350	14 200	14 100	13 950
MINI	PHEV	30 850	31 300	28 200	27 650	27 150	26 750	26 350
MINI	BEV	26 100	18 600	16 300	15 200	15 200	15 200	15 200
MINI	H2-BZ	65 300	50 650	41 850	40 400	39 100	37 900	36 800
KLEIN	Benzin	20 200	21 900	23 300	23 750	24 150	24 600	25 050
KLEIN	Diesel	26 150	28 000	29 950	30 750	31 550	32 350	33 150
KLEIN	CNG	25 100	24 700	24 650	24 450	24 200	23 850	23 550
KLEIN	LPG	23 300	23 800	24 250	24 000	23 750	23 500	23 200
KLEIN	Hybrid	17 800	17 900	17 750	17 600	17 450	17 300	17 200
KLEIN	PHEV	30 850	31 300	28 200	27 650	27 150	26 750	26 350
KLEIN	BEV	32 400	22 800	19 550	18 050	18 050	18 050	18 050
KLEIN	H2-BZ	63 950	51 450	40 300	38 900	37 650	36 500	35 450
KOMPAKT	Benzin	24 450	26 200	28 050	28 300	28 550	28 800	29 100
KOMPAKT	Diesel	31 750	33 700	36 200	36 800	37 400	38 050	38 650
KOMPAKT	CNG	30 250	29 850	29 750	29 550	29 200	28 850	28 500
KOMPAKT	LPG	28 300	29 050	29 750	29 450	29 150	28 800	28 500
KOMPAKT	Hybrid	26 900	26 950	26 750	26 550	26 350	26 150	26 000
KOMPAKT	PHEV	30 900	31 500	28 750	28 150	27 700	27 250	26 850
KOMPAKT	BEV	40 650	26 650	22 600	20 850	20 850	20 850	20 850
KOMPAKT	H2-BZ	63 500	51 950	43 400	41 900	40 550	39 300	38 150
MITTELKLASSE	Benzin	39 100	41 700	44 350	44 650	44 950	45 300	45 600
MITTELKLASSE	Diesel	39 950	42 150	45 000	45 650	46 300	47 000	47 650
MITTELKLASSE	CNG	38 850	38 450	38 300	38 000	37 600	37 150	36 700
MITTELKLASSE	LPG	34 750	35 800	36 900	36 500	36 100	35 750	35 350
MITTELKLASSE	Hybrid	44 350	44 400	43 650	43 250	42 800	42 350	41 900
MITTELKLASSE	PHEV	43 250	44 250	40 800	40 000	39 300	38 700	38 100
MITTELKLASSE	BEV	51 300	39 550	33 450	30 650	30 650	30 650	30 650
MITTELKLASSE	H2-BZ	63 450	52 650	43 500	42 000	40 650	39 400	38 250
OBERKLASSE	Benzin	77 550	82 700	87 950	88 550	89 150	89 800	90 400
OBERKLASSE	Diesel	64 500	68 050	72 650	73 700	74 800	75 850	76 950
OBERKLASSE	CNG	61 550	60 900	60 700	60 150	59 550	58 850	58 250
OBERKLASSE	LPG	57 300	59 050	61 000	60 350	59 750	59 100	58 500
OBERKLASSE	Hybrid	58 150	58 100	57 300	56 600	56 000	55 450	54 900
OBERKLASSE	PHEV	57 850	59 450	55 050	53 950	53 000	52 200	51 400
OBERKLASSE	BEV	94 000	74 100	64 950	60 500	60 500	60 500	60 500
OBERKLASSE	H2-BZ	61 550	54 800	48 250	46 600	45 100	43 700	42 450
OFFROAD	Benzin	29 900	31 900	33 900	34 150	34 400	34 650	34 850
OFFROAD	Diesel	42 050	44 350	47 350	48 050	48 750	49 450	50 150
OFFROAD	CNG	40 150	40 150	39 650	39 350	38 900	38 400	37 950
OFFROAD	LPG	36 500	37 900	39 250	38 800	38 350	37 950	37 550
OFFROAD	Hybrid	46 150	45 450	44 250	43 600	43 100	42 650	42 200
OFFROAD	PHEV	48 700	47 700	42 350	41 500	40 800	40 150	39 600
OFFROAD	BEV	47 450	32 800	27 750	25 750	25 750	25 750	25 750
OFFROAD	H2-BZ	67 900	61 100	52 800	51 000	49 350	47 850	46 450
MPV	Benzin	26 200	27 950	29 700	29 900	30 100	30 300	30 550
MPV	Diesel	42 350	44 750	47 750	48 500	49 250	50 000	50 750
MPV	CNG	44 750	44 650	44 050	43 700	43 200	42 700	42 200
MPV	LPG	40 700	42 250	43 800	43 350	42 900	42 450	42 000
MPV	Hybrid	40 150	38 900	37 350	36 950	36 550	36 150	35 800
MPV	PHEV	45 100	44 100	39 250	38 400	37 750	37 150	36 650
MPV	BEV	46 800	31 250	25 600	24 600	24 600	24 600	24 600
MPV	H2-BZ	69 950	58 900	51 250	49 500	47 900	46 450	45 100

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

6.3.7 Kalibrierung der PKW-Flotte

Eine valide Prognose für die Zukunft setzt voraus, dass auch Gegenwart und Vergangenheit durch die Modellierung hinreichend genau abgebildet werden. Nach den umfangreichen Aktualisierungen relevanter Eingangsgrößen in den vorangehenden Kapiteln wurde die PKW-Flotte daher anhand der beiden Parameter β und ε der Logit-Entscheidungsfunktion für den PKW-Kauf (siehe Kapitel 6.3.2) neu kalibriert. Für den Zeitraum bis 2022 bzw. 1.1.2023 veröffentlicht das KBA offizielle PKW-Flotten- und Neuzulassungsstatistiken, die nach Antriebsart (insgesamt 8), Segment (insgesamt 7) und Halterart (privat, gewerblich) differenziert werden und als Zielwert zur Kalibrierung verwendet wurden. Im Fokus der Kalibrierung stand dabei der Zeitraum von 2019 bis 2022 für die Antriebsarten Benzin, Diesel, BEV und PHEV in allen Segmenten und Haltergruppen. Die Kalibrierung der weiteren Antriebsarten fand ebenfalls statt, jedoch ergibt sich durch die Mehrdimensionalität (8 Antriebsarten x 7 Segmente x 2 Haltergruppen = 112) eine Unschärferelation, welche eine hinreichend genaue Erreichung des Kalibrierziels in allen Dimensionen kaum zulässt.

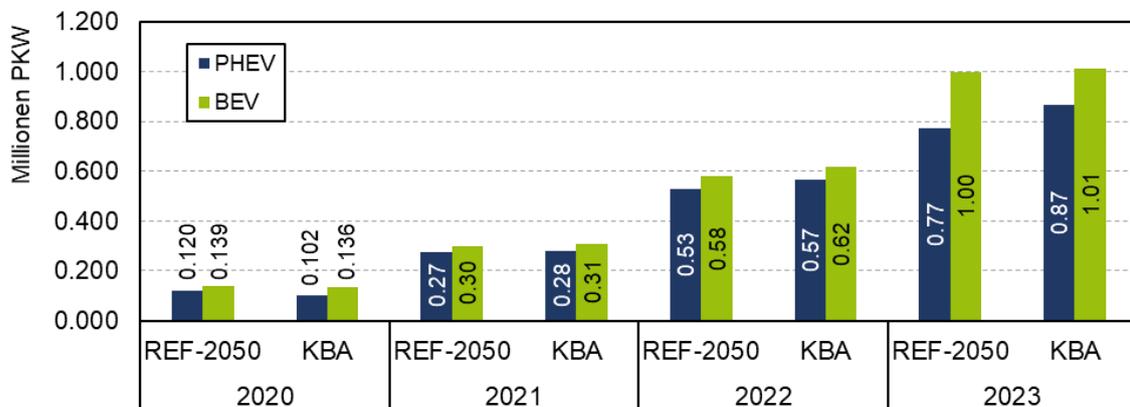
Abbildung 47 (a) zeigt das Ergebnis der Kalibration für das Zieljahr 2019 anhand der PKW-Käufe im Vergleich zu den Daten aus KBA (2023a). Die Anzahl der PKW-Käufe in der Antriebsart Benzin weicht um weniger als 2% von der KBA-Statistik ab, wohingegen die Verkäufe von Diesel-PKW immerhin eine Abweichung von über 6% besitzen, was der zuvor erwähnten Unschärferelation bei der Kalibrierung geschuldet ist. Für Gas-betriebene PKW fällt dieser Vergleich noch drastischer aus, jedoch haben sie einen vernachlässigbaren Marktanteil und waren nicht Fokus bei der Kalibration der gesamten PKW-Flotte. Für Plug-In Hybride und BEV ergibt sich hingegen eine sehr präzise Modellierung trotz noch geringer Verkaufszahlen im Vergleich zu der Gesamtzahl an PKW-Neuzulassungen, die in Abbildung 47 (b) für die Jahre 2019 bis 2022 im Vergleich zu den KBA-Statistiken dargestellt sind. Im betrachteten Zeitraum ergibt sich dabei für das Jahr 2020 die maximale Abweichung von etwa 1,4% und insgesamt für die betrachteten Jahre eine mittlere Abweichung von 0,96%.



Quellen: M-Five, ASTRA-2023; KBA (2023b).

Abbildung 47 Vergleich der PKW-Käufe für REF-2050 ggü. KBA-Daten: (a) im Jahr 2019 nach Antriebsarten sowie (b) insgesamt in den Jahren 2019-2022

Abbildung 48 zeigt die isolierten Bestände für batterieelektrische PKW (BEV) sowie Plug-in Hybride (PHEV) in den Jahren 2020 bis 2023 jeweils zum 1. Januar. Die Spannweite in den Abweichungen von mindestens 1,09% (PHEV in 2021) bis hin zu 17,6% (PHEV in 2020) bzw. 1,00% (BEV in 2023) hin zu 6,9% (BEV in 2022) wirkt auf den ersten Blick sehr deutlich, ist jedoch im Vergleich zur der Gesamtanzahl aller PKW von etwa 48 Millionen noch ausreichend genau.

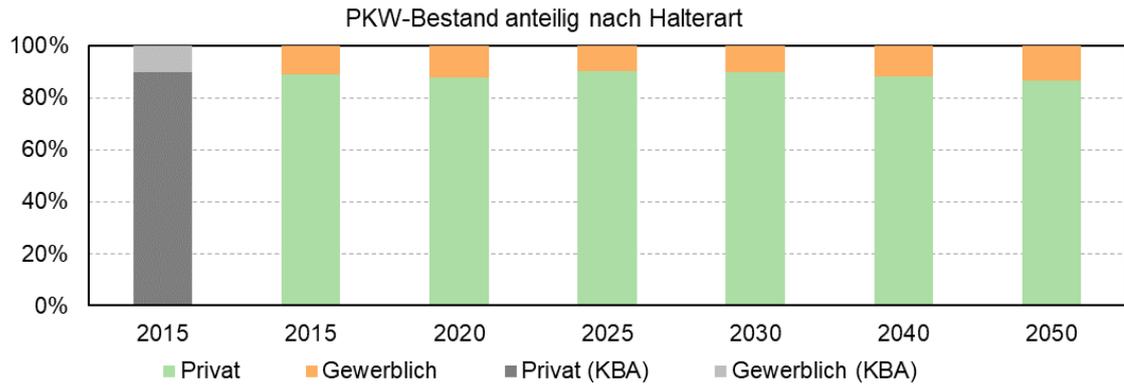


Quelle: M-Five, ASTRA-2023, KBA (2023a).

Abbildung 48 Vergleich des Bestandes an BEV, PHEV für REF-2050 ggü. KBA-Daten zum jeweils 1.1. der Jahre 2020-2023

6.4 Entwicklung der PKW-Flotte

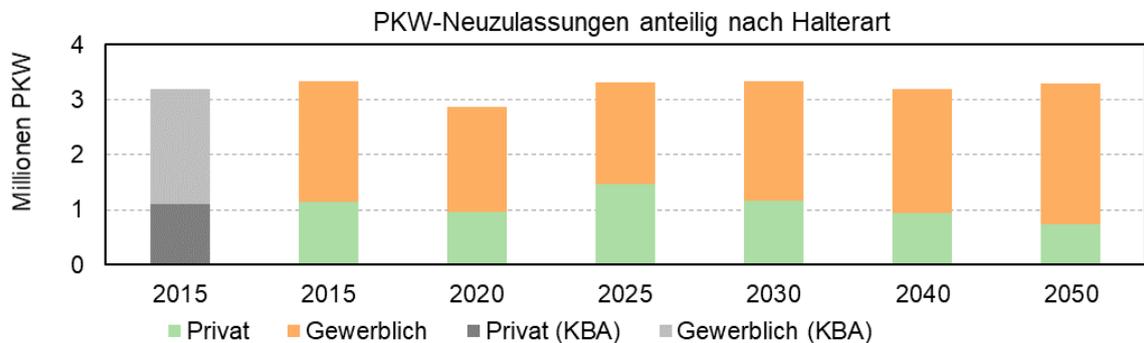
Die PKW-Flotte wird in ASTRA unter anderem nach Haltergruppen, Segmenten und Antriebsarten unterschieden. Der überwiegende Teil der PKW-Flotte ist privaten Haltern zuzuordnen, die zum 1.1.2020 etwa knapp 88% aller PKW verantworten und ihre Anteile bis zum 1.1.2050 nur geringfügig auf 87% ändern, wie Abbildung 49 zeigt.



Quelle: KBA (2023b), M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 49 Entwicklung des PKW-Bestandes nach Halterart bis 2050

Unter gewerbliche PKW fallen beispielsweise Firmenwagen, Dienstwagen, Fahrzeughandel und Autovermietungen. Wie Abbildung 50 wiedergibt, sind gewerbliche Halter für den Großteil der jährlich PKW-Neuzulassungen verantwortlich und können ihren Anteil von knapp zwei Dritteln im Jahr 2020 auf über drei Viertel im Jahr 2050 steigern. Die hohen Anteile jährlicher PKW-Neuzulassungen äußern sich jedoch auch daher nicht im Bestand, da modellseitig von einem Verkauf von gewerblichen PKW im Alter von 1 bis 4 Jahren an private Halter ausgegangen wird, wie in Abbildung 36 gezeigt wurde.



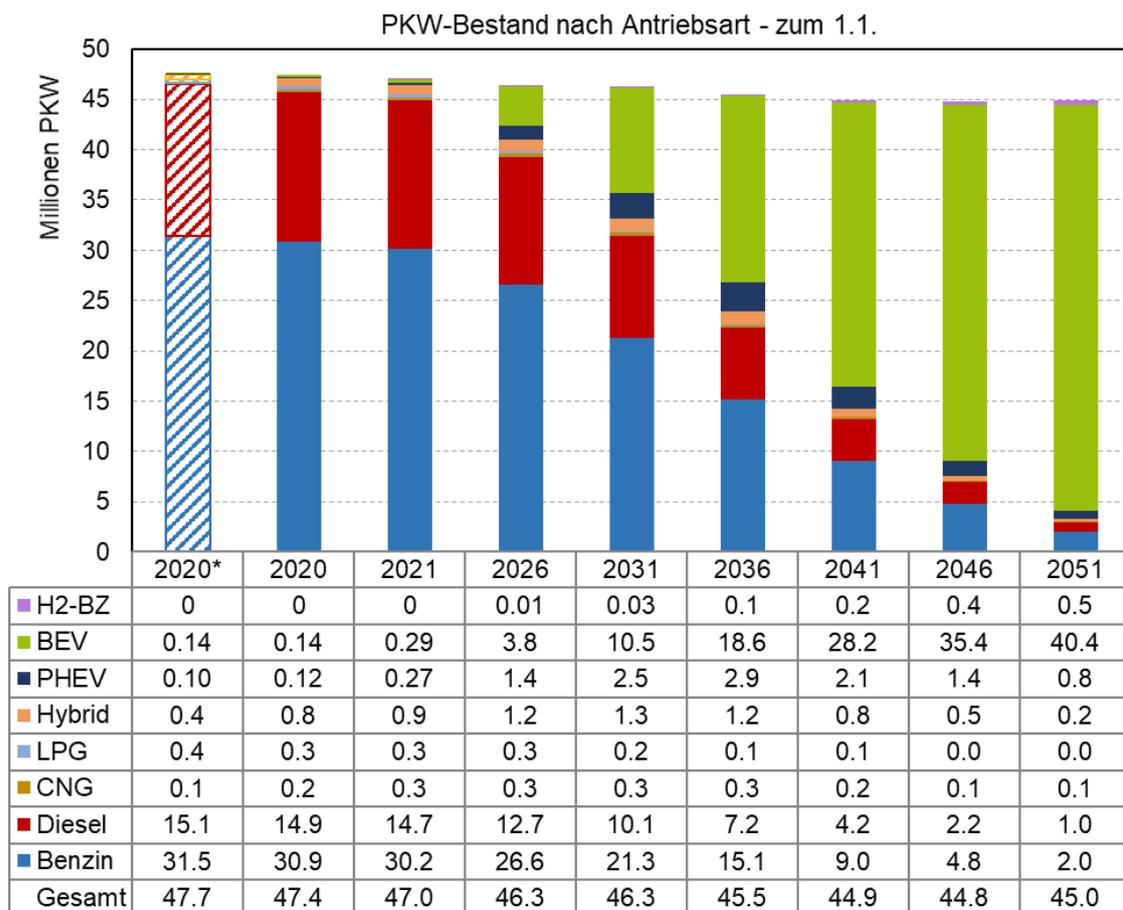
Quelle: KBA (2023a), M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 50 Entwicklung der PKW-Neuzulassungen nach Halterart bis 2050

6.4.1 Bestand und Kauf von PKW

Bestand der PKW

Der PKW-Bestand steigt seit 2010 stetig an und erreichte zum 1.1.2023 trotz verringerter PKW-Käufe während der Corona-Pandemie einen neuen Höchststand von 48,76 Millionen PKW. Für den Gesamtbestand an PKW weist REF-2050 zum 1.1.2020 eine Abweichung von <0,3% gegenüber KBA-Daten auf (KBA-Daten (2020) mit 47,7 Millionen PKW gegenüber REF-2050 (2020) mit 47,4 Millionen PKW im Bestand). In den kommenden Jahren bleibt der PKW-Bestand auf hohem Niveau, bevor er langsam, aber kontinuierlich sinkt. Dieser Rückgang ergibt sich in REF-2050 aus der Entwicklung von Bevölkerung, verfügbarem Einkommen, der rückläufigen Zahl der Erwerbspersonen und der Altersstruktur der Flotte. Durch das Ausphasen fossiler Verbrenner erreicht die gesamte PKW-Flotte um das Jahr 2045 herum einen Niedrigstand von 44.8 Millionen, bevor sie sich in Richtung 45 Millionen PKW zum 1.1.2051 stabilisiert. Abbildung 51 zeigt die PKW-Bestände in REF-2050 tabellarisch in Auszügen zum 1.1. des genannten Jahres.



* vgl. KBA-Statistik FZ 13

Quelle: KBA (2023b), M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 51 Entwicklung des PKW-Bestandes bis 1.1.2051 nach Antriebsart

Die Zahl der Diesel-PKW erreicht mit knapp 15 Millionen in den Jahren 2020 bis 2022 ein hohes Plateau und nimmt dann ab. Der Anteil an Diesel-PKW sinkt von 31% im Jahr 2020 auf 22% im Jahr 2030, 16% im Jahr 2035 auf nur noch 2,1% im Jahr 2050. Benziner verringern ihren Anteil von 65% im Jahr 2020 auf 46% in 2030, 33% in 2035 und auf nur noch 4,5% in 2050. Die zunehmende Attraktivität alternativer, insbesondere elektrifizierter Antriebe zeigt sich in den steigenden Anteilen dieser Antriebsarten ab 2020. Plug-in Hybride (PHEV) und Batterie-elektrische PKW (BEV) erreichen im Jahr 2030 zusammen einen Anteil von 28,2% mit 2,5 Millionen Plug-in Hybriden und 10,5 Millionen BEVs. Im Jahr 2035 machen diese beiden Antriebsarten mit 47,2% bereits fast die Hälfte der PKW-Flotte aus, exakt mit 2,9 Millionen Plug-in Hybriden und 18,6 Millionen BEVs. Hybride, die in der Lage sind, elektrisch anzufahren bzw. zu unterstützen (Mild-/Voll-Hybrid), aber über keinen Stecker zur externen Nachladung verfügen, machen in 2030 ebenfalls 2,8% (2035: 2,7%) aus (1,3 Millionen bzw. 1,2 Millionen).

Durch die 100%ige CO₂-Reduktion ab 2035 (ggü. 2021) und folglich keiner weiteren Neuzulassung von fossilen Verbrennern erhöht sich nach 2035 ausschließlich der Bestand batterieelektrischer PKW (in 2040 28,2 Mio., in 2045 35,4 Mio., in 2050 40,4 Mio. PKW) sowie wasserstoff-betriebener PKW. Für Letztere wird aufgrund des im Status quo sehr geringen Modellangebots⁷⁵, welches sich voraussichtlich nur geringfügig erweitern wird, auch von keinem relevanten Marktanteil ausgegangen. Deshalb erreichen sie bis 2050 nur einen Bestand von 0,5 Millionen PKW, was einem Anteil von knapp über 1% entspricht.

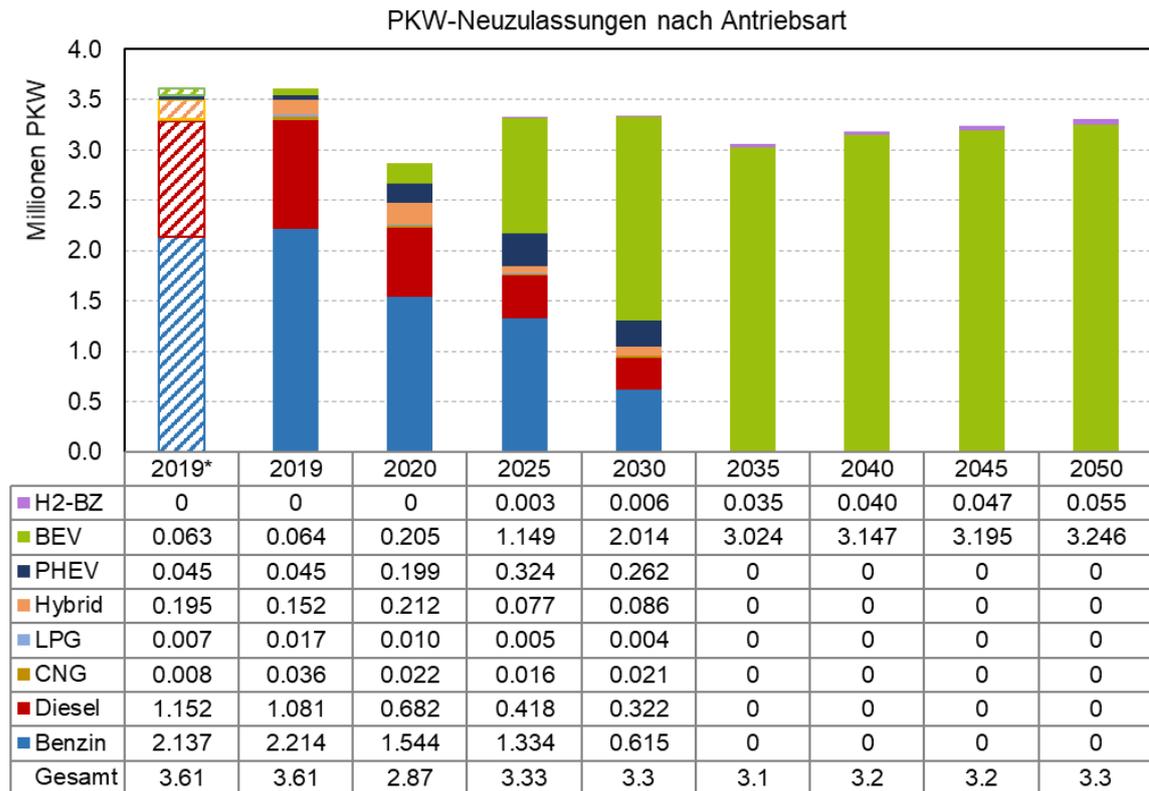
Kauf neuer PKW

Die Zahl der in Deutschland gekauften PKW pro Jahr hat ihren Höchststand von etwa 3,6 Millionen PKW-Neuzulassungen (NZL) im Jahr 2019 erreicht, ist jedoch aufgrund der Corona-Pandemie und ihren wirtschaftlichen Folgen⁷⁶ in den Folgejahren bis 2022 auf unter 3 Millionen eingebrochen.

In den Jahren 2020-2022 zeigt REF-2050 einen Einbruch bei den NZL auf 2,87 Millionen (2020), 2,64 Millionen (2021) bzw. 2,66 Millionen (2022). Dies entspricht einer Abweichung von ca. 1,7% (2020), 0,8% (2021) bzw. 0,4% (2022) im Vergleich zu den KBA-Daten (KBA, 2023b). Bis 2030 bleiben die PKW-Neuzulassungen in REF-2050 mit jährlich etwa 3,3 Millionen PKW stabil, nehmen bis 2035 durch das verminderte Modellangebot fossiler Verbrenner-PKW sowie den Wegfall der Kfz-Steuerbefreiung für BEV leicht ab (3,1 Mio.) und stabilisieren sich aufgrund sinkender Anschaffungs- und Betriebskosten anschließend wieder auf etwa 3,2 Mio. (um 2040) hin zu 3,3 Mio. im Jahr 2050. Insbesondere Diesel- und Benzin-PKW sind von einem Rückgang der Neuzulassungen betroffen (siehe Abbildung 52).

⁷⁵ Der ADAC-Autokatalog weist unter den aktuell im Handel befindlichen Modellen nur zwei Wasserstoffbetriebene PKW-Modelle in insgesamt sechs Varianten aus (insgesamt: 7.172 Modellvarianten). [Quelle: ADAC (2023), zuletzt aufgerufen am 29.09.2023]

⁷⁶ In den Jahren 2021 und 2022 erfolgte ein weiterer Rückgang der PKW-Neuzulassungen aufgrund angebots- bzw. produktionsseitiger Verknappung (z.B. Halbleiter, Kabelbäume).



* vgl. KBA-Statistik FZ 14

Quelle: KBA (2023a), M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 52 Entwicklung der jährlichen PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart bis 2050 (in Intervallen)

Sind im Jahr 2019 noch 61% bzw. 30% der neuzugelassenen PKW mit Benzin- bzw. Dieselmotor angetrieben, sinkt ihr Anteil im Jahr 2030 auf etwa 18,5% bzw. 9,7% der PKW-Neuzulassungen ab. Die Diesel-Zulassungen gehen von 2019 bis 2030 um gut 760 000 und die Benzin-Zulassungen um gut 1,6 Millionen jährlich neu zugelassene PKW zurück. Dieser Rückgang wird befördert durch die Verbesserung der Kostenseite von PKW mit alternativen Antrieben (z.B. sinkende Batteriekosten, vgl. Kapitel 6.1 und Kapitel 6.3.4) sowie durch die Installation eines Grundaufbaus an öffentlichen Lade- und Betankungsinfrastruktur für alternative Antriebe und die Unterstützung durch politische Instrumente. Der Anteil der Plug-in Hybrid-PKW (PHEV) an den Neuzulassungen (NZL) beträgt im Jahr 2030 etwa 8%; der Anteil der rein batterieelektrischen PKW (BEV) knapp 61% mit erstmals über 2 Millionen Neuzulassungen.

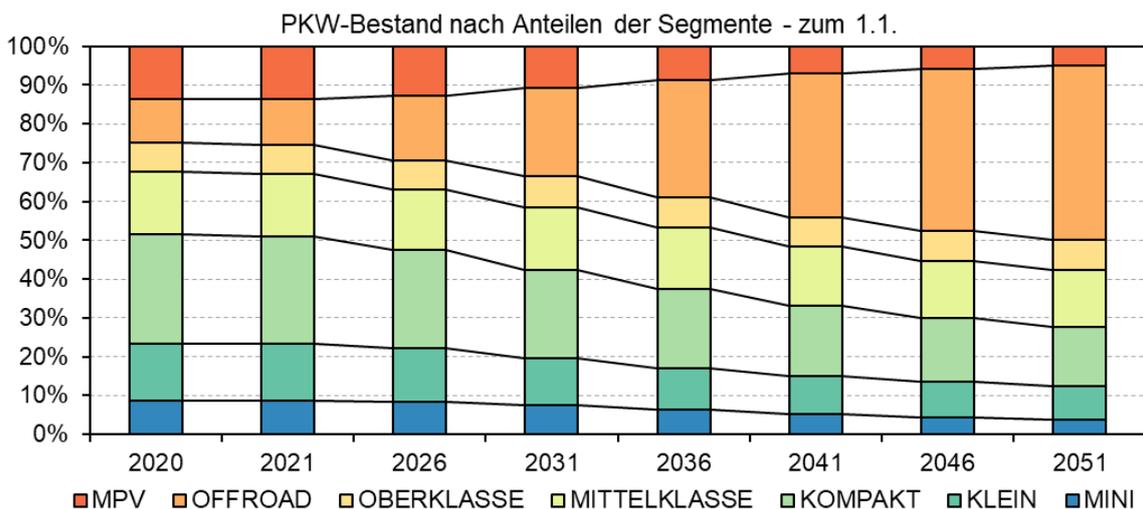
Nach 2030 setzt sich die beobachtete Entwicklung fort und mündet schließlich, bedingt durch die 100%-ige CO₂-Reduktion ab 2035, in dem Entfall weiterer Neuzulassungen fossiler Verbrenner-PKW.

Entwicklung der Anteile in den Fahrzeug-Segmenten

Im Bestand haben in den vergangenen Jahren Fahrzeuge aus den KBA-Segmenten SUV (Sports-Utility-Vehicle), Geländewagen, Van und Mini-Van deutlich zugenommen. In der Zuteilung von ASTRA fallen diese in die Segmente *MPV* (Multi-Purpose Vehicle: u.a. Van und Mini-Van) und *Offroad* (Geländewagen, SUVs).

Zukünftig (siehe Abbildung 53) wird erwartet, dass das Marktwachstum insbesondere des SUV-Marktes weiter anhält und z.T. die Marktanteile anderer Segmente übernimmt. Schon heute bilden sich im SUV-Segment verschiedene Unterklassen, die in KBA-Statistiken jedoch noch nicht weiter differenziert werden. Darunter fallen beispielsweise Kompakt-SUVs, Crossover-SUVs oder auch City-SUVs, die in Grundfläche und Anschaffungspreis vergleichbar sind mit Fahrzeugen aus den Segmenten Klein-, Kompakt- und Mittelklasse, teilweise auch Mini-Van und Van.⁷⁷ Sie weisen aufgrund ihrer meist höheren Bauform mehr Stauraum auf und werden dadurch häufig als praktisches „Stadttauto“ wahrgenommen. In den aktuellen Verkaufszahlen weisen solche Modelle hohe Stückzahlen aus.

Der Anteil des Segments *Offroad* steigt bis 2030 auf 23% und verdoppelt sich bis 2050 beinahe auf 45%, unter anderem bedingt durch die alternde Bevölkerung und das zuvor genannte steigende Angebot kompakter und günstiger Fahrzeuge in diesem Segment. Die Fahrzeugklassen, die durch diese PKW-Modellentwicklung hingegen verdrängt werden, verlieren zunehmend an Anteilen im Bestand. Einzig die PKW aus den Segmenten Mittel- und Oberklasse, zu denen beispielsweise auch Sportwagen zählen, bleiben aufgrund ihrer häufig passionierten Käufergruppe annähernd konstant.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 53 Entwicklung der Segmente im PKW-Bestand bis zum 1.1.2051

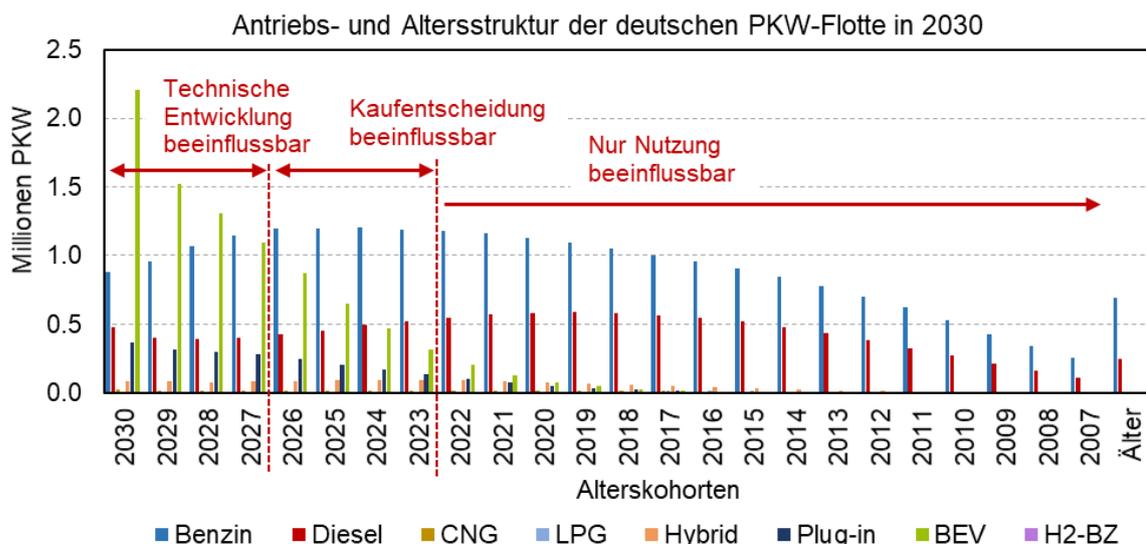
⁷⁷ Die Abgrenzung der KBA-Segmente erfolgt nicht nach objektiven Kriterien, sondern ist marketing-getrieben. Teilweise werden so ähnliche PKW unterschiedlichen Segmenten zugeordnet.

Der abnehmenden Bedeutung von Umweltverträglichkeit bei PKW-Konsumenten im SUV-Markt, in dem PKW aufgrund ihrer Form einen ohnehin erhöhten Energieverbrauch aufweisen (PE Institut für Politikevaluation GmbH et al., 2019), steht die allgemein positive Entwicklung hin zu elektrifizierten Fahrzeugen und Nachhaltigkeit gegenüber.

6.4.2 Alters- und Antriebsstruktur der PKW-Flotte

Abbildung 54 zeigt die Alters- und Antriebsstruktur der PKW-Flotte im Jahr 2030. Auf der x-Achse sind die Alterskohorten des Bestandes im Jahre 2030 als Jahr der Neuzulassung dargestellt. Ein signifikanter Anteil des Bestandes im Jahr 2030 besteht dabei noch aus Fahrzeugen der Kohorten von 2022 und früher. Diese machen im Jahr 2030 49% oder etwa 22,5 Millionen PKW aus. Ihre THG-Emissionen im Jahr 2030 lassen sich nur noch durch Maßnahmen beeinflussen, die die Nutzung (wie z.B. Energiesteuer, PKW-Maut, Entfernungspauschale) oder den fossilen C-Gehalt der Kraftstoffe adressieren. Die als zentrale Maßnahme zur Zielerreichung angesehenen CO₂-Flottenstandards für Neuwagen ab 2021 können also nur die THG-Effizienz von 51% der PKW-Flotte im Jahr 2030 verändern. Der Anteil der konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen und durch Standards ab 2021 beeinflussbaren PKW beträgt 29% der PKW-Flotte im Jahr 2030 (etwa 13,1 Millionen PKW). Die Effizienzentwicklung der PKW wird im nächsten Kapitel erläutert.

Die technische Konfiguration eines bis 2026 gekauften PKW liegt heute schon fest, weil die Konstruktion und die Produktionsplanung abgeschlossen sind. D.h. im Zeitraum 2023 bis 2026 lässt sich durch (Dis-)Incentives noch die Kaufentscheidung aber nicht die angebotene Technologie beeinflussen. Beeinflussungen der angebotenen Technologie (z.B. durch Setzung ambitionierterer CO₂-Standards) hätten frühestens ab 2027 eine Wirkung auf die angebotene PKW-Technologie und damit nur auf die neuesten 4 der 25 PKW-Jahrgänge im Bestand im Jahr 2030.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 54 PKW-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur im Jahr 2030

6.4.3 Effizienzentwicklung der PKW

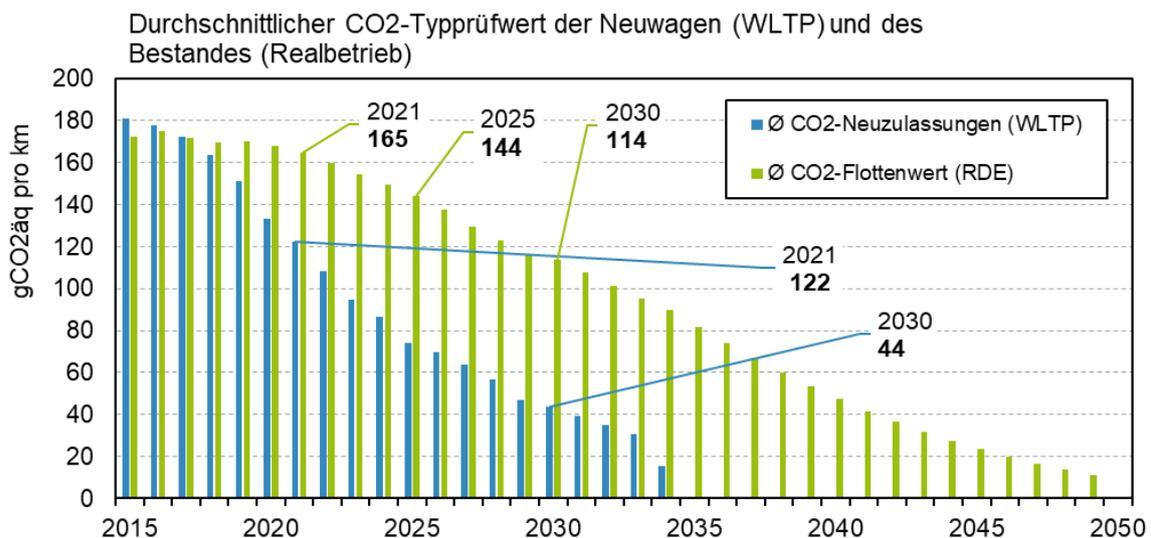
Die EU-Verordnung 2019/631 legt die CO₂-Flottengrenzwerte in gCO₂ pro km für PKW und LNF fest. Seit 2012 (vollumfänglich 2015) gilt ein Flottengrenzwert von 130 g CO₂/km (NEFZ) für PKW ((EG) Nr. 443/2009); seit 2020 (vollumfänglich 2021) gilt ein Flottengrenzwert von 95 g CO₂/km (NEFZ, entspricht ungefähr 115 g CO₂/km in WLTP). Der Flottengrenzwert bezieht sich auf den Durchschnitt aller in der EU in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge. Das Flottenziel ist herstellerspezifisch umgesetzt worden, so dass länderspezifische CO₂-Flottenwerte entstehen. Die EU-Verordnung 2019/631 verschärft in zwei Minderungsschritten die CO₂-Grenzwerte für neue PKW auf minus 15% für das Jahr 2025 und auf minus 37,5% für das Jahr 2030 gegenüber dem WLTP-Zielwert im Jahr 2021. Durch EU-Verordnung 2023/851 wurde der Zielwert für 2030 auf eine Reduktion von minus 55% verschärft. Zudem findet in REF-2050 die Minderung der CO₂-Grenzwerte für neue PKW auf minus 100% für das Jahr 2035 statt, was die Neuzulassung von mit konventionellen Kraftstoffen betankten Verbrennerfahrzeugen ausschließt. So soll ein Anreiz für den verstärkten Absatz von elektrisch angetriebenen PKW gesetzt werden. Ein unerwünschter Nebeneffekt ist, dass steigende Anteile von E-PKW die Effizienz-Anforderungen an konventionelle Verbrenner abschwächen.

Ab September 2018 werden neue Fahrzeuge anhand eines neuen global harmonisierten Fahrzyklus bewertet und auch nach diesen zugelassen (WLTP = Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure). Für ältere Fahrzeuge gelten weiterhin die Werte aus der Zulassung nach NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus). Das neue WLTP-Prüfverfahren ist notwendig geworden, da die alten Typprüfwerte nach NEFZ immer weiter von den realen Verbräuchen im Straßenverkehr abgewichen sind (2017 über 40% (ICCT, 2017)). Der tatsächliche Endenergieverbrauch der PKW liegt aber auch über dem WLTP-Wert. Er wird über die Emissionen im Realbetrieb (RDE = Real-Driving Emissions) bestimmt. Die realen Verbräuche auf der Straße sind abhängig von individuellen Faktoren wie Fahrstil, Verkehrsfluss, Topografie und Wetter.

Im REF-2050 beziehen sich weiterhin alle Angaben zu Typprüfwerten von Neuzulassungen auf WLTP, sofern nicht anders angegeben. Zu beachten ist, dass der Durchschnitt der CO₂-Emissionen pro km im Bestand aus den Werten und Anteilen der verschiedenen Entfernungsklassen der Fahrten (<2km, 2 bis 10km, 10 bis 50km, über 50km), der Alterskohorten und unter Berücksichtigung der Anteile an Biokraftstoffen gebildet wird, um die real relevanten Emissionen abzubilden, die so auch in die Berechnung der THG-Emissionen des Verkehrssektors eingehen. CO₂-Emissionswerte von Neuzulassungen werden nach WLTP angegeben, da diese für die Steuer und somit beim Kauf entscheidend sind. Allerdings weist das Effizienzlabel auch noch im Jahr 2023 die Effizienz nach NEFZ aus. Dagegen sind für den Bestand und die Bestimmung des realen EEV und die gesamten THG-Emissionen die Emissionswerte im Realbetrieb (RDE) entscheidend. BEV, mit Bioethanol betriebene PKW (E85, aktuell in Deutschland nicht relevant) und PKW mit Wasserstoff-Brennstoffzellen werden gemäß den Konventionen der Klimaberichterstattung und des Bundes-Klimaschutzgesetzes mit einer Emission von 0 g CO₂/km für die Berechnung der Durchschnittsemissionen angesetzt. Für Plug-in Hybride wird ein CO₂-

Emissionswert angesetzt, der die Anteile nichtelektrischer Fahrleistung und die Effizienz des jeweiligen Fahrzeugs im Verbrennerbetrieb widerspiegelt. Die mittleren Anteile elektrischer Fahrleistung von PHEV in REF-2050 liegen im Jahr 2020 segmentspezifisch zwischen 20 und 40% und steigen bis 2030 leicht an.

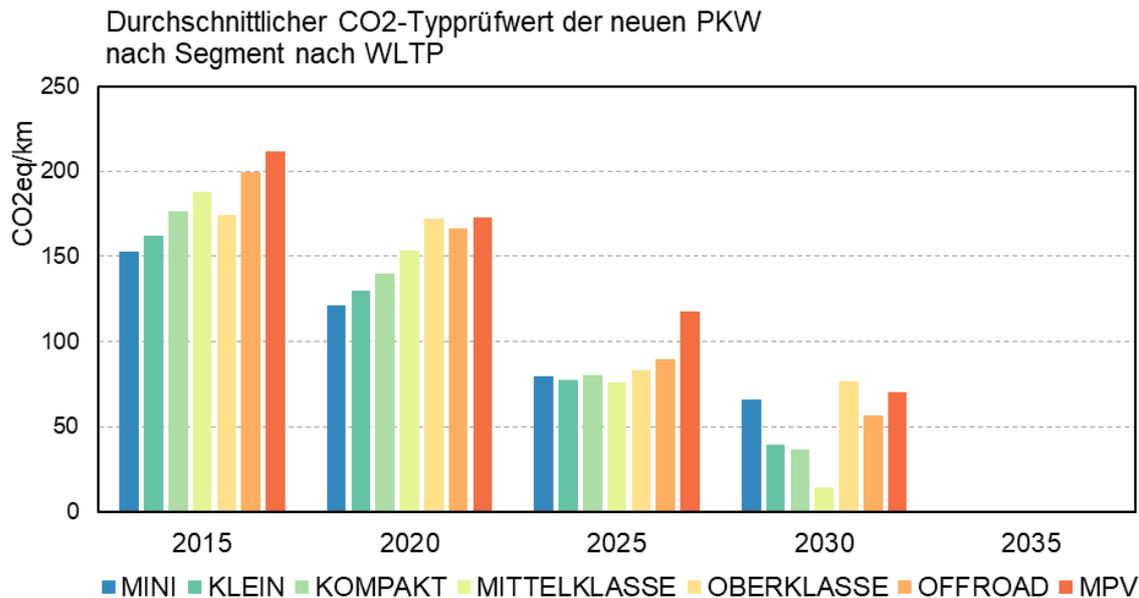
Abbildung 55 stellt die modellierten durchschnittlichen Emissionen der Neuzulassungen (blaue Balken), ausgedrückt als Typprüfwerte nach WLTP, und des Bestandes im Realbetrieb (grüne Balken) in Deutschland von 2015 bis 2050 dar. Der Durchschnittswert der PKW-Neuzulassungen liegt in der Modellierung im Jahr 2021 bei 133 g CO₂/km, in 2025 bei 87 g CO₂/km und sinkt bis 2030 auf 47 g CO₂/km deutlich ab. Der durchschnittliche Emissionswert der Neuwagen unterscheidet sich vom Durchschnitt der CO₂-Emissionen im Bestand im Realbetrieb und unter Berücksichtigung der Anteile an Biokraftstoffen deutlich. In Phasen stärkerer Effizienzverbesserungen der Neuwagen wird die Lücke der Emissionen zwischen Neuwagenflotte und Bestandsflotte größer. Im Jahr 2015 betrug diese Lücke 4,8%, in 2021 dann 25,1%, und im Jahr 2030 wird der Höchststand mit 146% erreicht (jeweils gemessen vom Wert der Neuzulassungen aus).



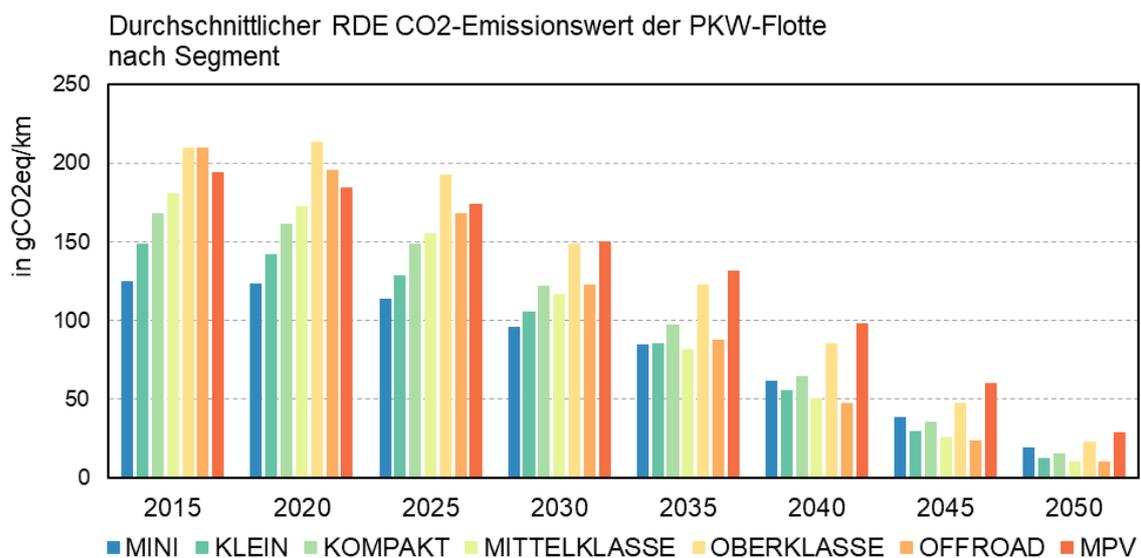
Quelle: Ausgangsdaten nach KBA (2023b); EEA (2022); M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 55 Entwicklung des CO₂-Flottenwertes der Neuzulassungen (nach WLTP) und des Bestandes an PKW (Realbetrieb, RDE)

Abbildung 56 zeigt die durchschnittlichen Typprüfwerte der Neuzulassungen nach PKW-Segmenten. Im Jahr 2015 liegen zwischen dem sparsamen Segmenten Mini und Klein und den Segmenten der weniger effizienten Fahrzeuge zwischen 35 und 59 g CO₂/km. Die Differenz verringert sich bis 2030 nur leicht auf 36 bis 60 g CO₂/km. Allerdings erreicht im Jahr 2030 aufgrund der höchsten Durchdringung mit BEV die Mittelklasse den niedrigsten Typ-Prüfwert bei den NZL. Alle Segmente profitieren vom technologischen Fortschritt und der Durchdringung mit elektrifizierten PKW.

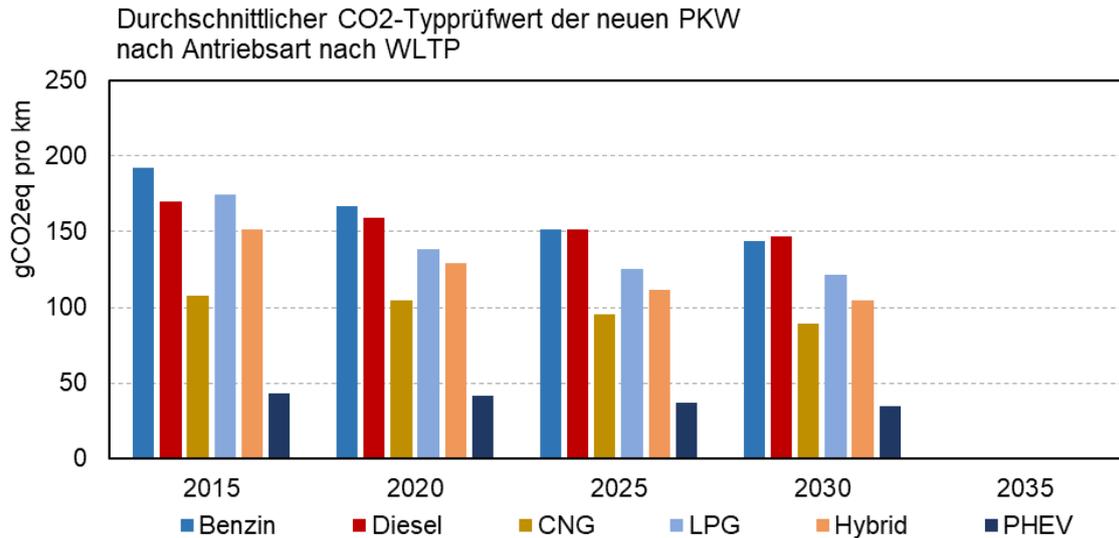
Abbildung 56 CO₂-Typprüfwerte nach Segmenten von PKW-Neuzulassungen (WLTP)

Die CO₂-Emissionswerte im Realbetrieb der Flotte liegen deutlich höher als die der Neuzulassungen, genauso wie die Spreizung zwischen den Segmenten. Im Jahr 2015 liegen teilweise fast 85 g CO₂/km Differenz zwischen den CO₂-effizientesten Segmenten und den hochemittierenden Segmenten (siehe Abbildung 57). Diese Differenz reduziert sich bis ins Jahr 2035 auf etwa 50 g CO₂/km, darüber hinaus bis 2050 auf nur noch knapp 10 g CO₂/km.

Abbildung 57 CO₂-Emissionswerte nach Segmenten der PKW-Flotte (RDE)

Für das Jahr 2015 zeigen sich je nach Antriebsart in den Daten von KBA und EEA sehr deutliche Unterschiede der CO₂-Emissionen nach den verfügbaren Antriebsarten. Hier

besaßen CNG-PKW die höchste THG-Effizienz der Verbrenner gefolgt von Hybriden und reinen Verbrennern mit LPG- und Dieselmotor. Benziner weisen die schlechteste THG-Effizienz auf. In den Daten des KBA und der Verteilung der Antriebe auf Segmente (analysiert in Schade et al., 2018) schließen die Hybride und LPG-Antriebe zu Erdgas-PKW auf. Diese Entwicklung bleibt auch in der für REF-2050 vorgenommenen Fortschreibung erhalten (siehe Abbildung 58).



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA (2023b); EEA (2022); M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 58 CO₂-Typprüfwerte nach Antriebsart von PKW-Neuzulassungen (WLTP)

Auch die Entwicklung der Energieeffizienz kann basierend auf den Daten des KBA und der Fortschreibung anhand der Zielwerte für 2021 zwischen den Segmenten verglichen werden.

Tabelle 21 stellt die Effizienzentwicklung für die Neuzulassungen gemessen nach WLTP dar und normiert den Endenergieverbrauch auf eine einheitliche Basis in kWh/km. Betrachtet man die ab 2015 folgenden 5-Jahresperioden, weist die erste Periode 2015 bis 2020 mit zumeist etwa 4% p.a. bereits eine deutliche Effizienzverbesserung zur Erreichung der Zielwerte im Jahr 2021 auf. In der Periode 2015 bis 2020 weisen die noch vorwiegend gekauften Verbrenner eine deutliche Effizienzsteigerung auf. Die beiden folgenden Perioden 2020 bis 2025 und 2025 bis 2030 zeigen noch eine weitere Steigerung der Effizienz. Die Entwicklungen ab 2021 werden vor allem durch den Wechsel der Antriebsarten getrieben, da die elektrifiziert angetriebenen PKW deutlich weniger Endenergie für den Antrieb benötigen und setzt sich bis 2035 fort. Mit dem Wegfall fossiler Verbrenner-PKW in den Neuzulassungen in der Periode nach 2035 stagniert die Effizienzverbesserung, da sie nicht mehr durch den Antriebswechsel getrieben wird, sondern nur noch durch die Effizienzverbesserungen der BEV. Über die Gesamtperiode werden im Trend des REF-2050 bis 2035 jährliche Verbesserungen von 2,2 bis 4,8% erfolgen.

Tabelle 21 Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Neuzulassung (WLTP)

Segment	Energieverbrauch in kWh/km				Durchschnittliche jährliche Verbesserung in %			
	2020	2030	2035	2050	25 vs 20	30 vs 25	35 vs 30	50 vs 35
Mini	0.46	0.30	0.12	0.10	-5.8%	-2.7%	-16.1%	-1.2%
Klein	0.49	0.24	0.13	0.11	-6.8%	-7.1%	-11.3%	-1.2%
Kompakt	0.53	0.25	0.15	0.12	-7.1%	-7.7%	-9.7%	-1.2%
Mittelklasse	0.59	0.21	0.16	0.14	-8.3%	-11.5%	-4.5%	-1.2%
Oberklasse	0.65	0.39	0.24	0.17	-8.5%	-1.5%	-9.2%	-2.4%
Offroad	0.63	0.33	0.18	0.15	-7.4%	-4.9%	-11.2%	-1.2%
MPV	0.65	0.36	0.17	0.15	-5.4%	-5.9%	-13.7%	-1.2%

Quelle: Ausgangsdaten nach KBA (2023b); EEA (2022); M-Five, ASTRA-2023.

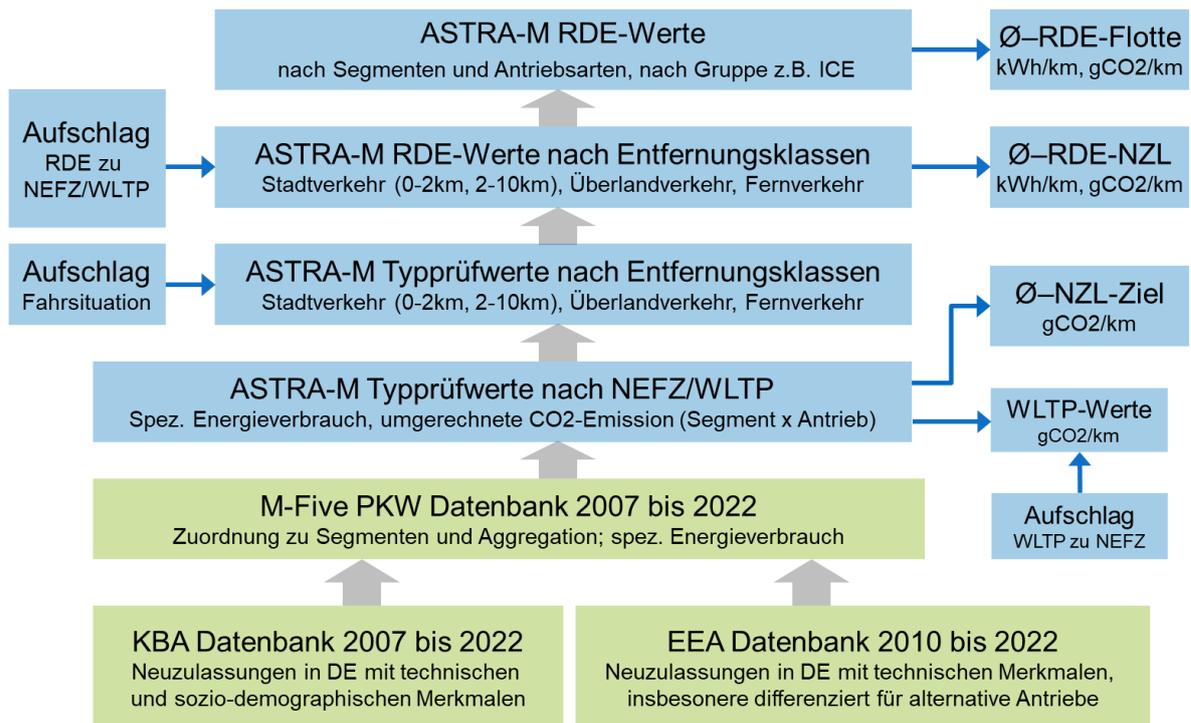
In der Flotte stellen sich die Verbesserungen zeitverzögert ein, wenn neue PKW die deutlich ineffizienteren älteren PKW ersetzen. Zusätzlich kommen verstärkt alternative Antriebe in die Flotte. Über die Gesamtperiode 2015 bis 2050 werden bei den Trends des REF-2050 1,0% bis 2,7% jährliche Verbesserungen erfolgen.

Tabelle 22 Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Bestandsflotte (RDE)

Segment	Energieverbrauch in kWh/km				Durchschnittliche jährliche Verbesserung in %			
	2020	2030	2035	2050	25 vs 20	30 vs 25	35 vs 30	50 vs 35
Mini	0.50	0.41	0.37	0.18	-1.9%	-1.9%	-2.3%	-4.7%
Klein	0.57	0.45	0.38	0.17	-2.2%	-2.4%	-3.3%	-5.4%
Kompakt	0.65	0.52	0.44	0.20	-1.9%	-2.4%	-3.3%	-5.2%
Mittelklasse	0.71	0.54	0.43	0.20	-1.9%	-3.5%	-4.4%	-4.9%
Oberklasse	0.86	0.67	0.57	0.27	-2.0%	-2.9%	-3.1%	-4.9%
Offroad	0.78	0.55	0.44	0.21	-3.3%	-3.6%	-4.6%	-4.7%
MPV	0.75	0.64	0.57	0.26	-1.5%	-1.7%	-2.3%	-5.0%

Quelle: Ausgangsdaten nach KBA (2023b); EEA (2022); M-Five, ASTRA-2023.

Die Datenbasis der zuvor beschriebenen Effizienzwerte und der Übergang von Typprüfwerten nach WLTP auf Energieverbrauch und Emissionen im Realbetrieb (RDE) ist in Abbildung 59 dargestellt. Ausgehend von Daten von KBA und EEA zu allen Neuzulassungen in Deutschland werden die Fahrzeuge den Segmenten des PKW-Modells zugeordnet und aggregiert für die Klassifikation *Segment X Antrieb* in ASTRA-M. Die entstehenden Typprüfwerte werden (1) genutzt zur Bewertung der durchschnittlichen CO₂-Emission aller NZL in Deutschland, (2) der Ermittlung der NEFZ/WLTP-Werte (z.B. relevant für die Kfz-Steuer), und (3) als Eingangsgröße für die Differenzierung in reale Verbräuche bei verschiedenen Fahrsituation (z.B. Stadtverkehr mit Lichtsignalanlagen), die in den vier Entfernungsbändern von ASTRA-M relevant sind. Ein weiterer Aufschlag zur Berücksichtigung der Abweichung von NEFZ bzw. WLTP und RDE wird so ermittelt, dass die verbliebene Lücke zwischen dem ermittelten Endenergieverbrauch auf der vorhergehenden Stufe und dem berichteten Energieverbrauch nach AG Energiebilanzen (AGEB) geschlossen wird. Durch die Berücksichtigung der RDE-(CO₂)-Effizienzwerte aller Fahrzeuge in der Flotte kann der durchschnittliche RDE-Wert für die Energieeffizienz und die CO₂-Emission bestimmt werden.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 59 Ableitung von spezifischen CO₂-Emissionen nach NEFZ-, RDE- und WLTP-Prüf- und RDE-Werten in ASTRA-M

7 Referenzszenario der Flotte leichter Nutzfahrzeuge (LNF)

In ASTRA werden unter leichten Nutzfahrzeugen (LNF) alle LKW bis einschließlich 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht (zGG) verstanden.

Anders als schwere Nutzfahrzeuge unterliegen LNF keiner Straßenbenutzungsgebühr (Maut), werden aber durch den BEHG-CO₂-Preis belastet (siehe Kapitel 5.2.1). Weitere zentrale Instrumente für einen forcierten Markthochlauf elektrifizierter LNF bilden eine Kaufprämie für LNF mit alternativen Antriebstechnologien, die CO₂-Standards für LNF, das Verbot von mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Verbrennungsmotoren im Jahr 2035 sowie die Förderung des Aufbaus der Energieinfrastruktur für NFz insgesamt (siehe Kapitel 5).

Im Rahmen der Entwicklung des REF-2050 wurden die Modellierung der LNF-Flotte (Kapitel 7.1) sowie die der Kaufentscheidung (Kapitel 7.2) angepasst. Dementsprechend sind relevante Inputfaktoren aktualisiert und das Modell neu kalibriert worden (Kapitel 7.3). Aus der endogenen Modellierung ergeben sich die Entwicklung der LNF-Flotte (Kapitel 7.4), der Neuzulassungen (Kapitel 7.5) und die Effizienzentwicklung von LNF (Kapitel 7.6).

7.1 Übersicht über die Modellierung der LNF-Flotte

Das Fahrzeugflottenmodul beschreibt die Zusammensetzung der LNF-Flotten durch ein technologiedifferenziertes Kohortenmodell. Das Kohortenmodell ermöglicht eine detaillierte Abbildung der Altersstruktur und der Diffusion neuer Technologien in die Flotte. Das LNF-Flottenmodul gliedert sich in die Modellierung von Neuzulassungen und Bestand sowie in die Modellierung der Antriebswahl (Kapitel 7.2). Alle LNF unterscheiden sich nach Alterskohorten, Emissionsnormen, Antriebstechnologie und Segment (Nutzung).

Der Kern des Modells ist ein Bestands- und Flussgrößen-Modell. Neuzulassungen an LNF pro Periode bilden den Zufluss in den Fahrzeugbestand. Der Abfluss aus dem Bestand repräsentiert Exporte außerhalb Deutschlands sowie die Verschrottung. Die Berechnung der Anzahl der benötigten LNF basiert auf der Verkehrsnachfrage für Fahrzeuge bis 3,5 t zGG aus dem Güterverkehrsmodell. Die Unterscheidung der Fahrzeugkilometer in die LKW-Gewichtsklassen basiert auf Aufteilungsfaktoren für jedes Entfernungsband. Die Nachfrage nach neuen LNF entspricht der Differenz zwischen der benötigten und der tatsächlichen Flotte unter Berücksichtigung der verschrotteten/exportierten LNF. Im Bestand unterliegen LNF einem Alterungsprozess. Der Anteil an verschrotteten/exportierten LNF ist für die LNF in den ersten Jahren kleiner und wächst mit steigendem Alter. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein neuer LKW einer bestimmten Abgasnorm zugeordnet wird, hängt vom Zeitpunkt der Neuzulassung ab. Ab dem Jahr 2014 geht das Modell davon aus, dass 100% aller neu zugelassenen LNF die Euro 6-Norm erfüllen.

Das Modell weist, basierend auf den technischen Merkmalen der heute und in Zukunft verfügbaren Kraftstoffoptionen, eine Technologie-Differenzierung in 8 Antriebsarten auf:

Benzin, Diesel, komprimiertes Erdgas (CNG), Autogas (LPG), Hybride (HEV, die in der Lage sind elektrisch anzufahren bzw. zu unterstützen, aber über keinen Stecker zur externen Nachladung verfügen), batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybride (PHEV) und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV).

Das Modell unterscheidet vier verschiedene LNF-Segmente. Die einzelnen Segmente beschreiben die Nutzung der Fahrzeuge und werden in (i) Kurier-, Express- und Paket-(KEP-)Dienste, (ii) sonstiges Gewerbe (Bsp. Handwerker), (iii) Flotten-Unternehmen (Bsp. Vermietungen) und in (iv) privat gehaltene LNF unterschieden. So wird berücksichtigt, dass die Art der Nutzung der LNF einen Einfluss auf diverse andere Fahrzeugeigenschaften und die Antriebswahl hat. Für LNF im KEP-Einsatz können laut Öko-Institut durch erhöhten Verschleiß beispielsweise 20% höhere Wartungskosten unterstellt werden (Hacker et al., 2015). Im Mittel weisen LNF im KEP-Dienst auch eine deutlich höhere Jahresfahrleistung (26 000 km nach BAST, 2018) als andere Branchen auf (21 000 km nach Hacker et al., 2015).

Das jeweilige Anforderungsprofil der Nutzung von LNF beeinflusst die Wahl und somit die Diffusion der Antriebstechnologien. Das Modell zur Kaufentscheidung von LNF wird im folgenden Kapitel 7.2 beschrieben.

7.2 Das Kaufentscheidungsmodell für LNF

Die Verteilung der Neuzulassungen auf die Antriebsarten erfolgt mittels eines zweiteiligen Kaufentscheidungsmodells auf der Basis von Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO). Folgende Kostenkomponenten werden berücksichtigt:

- Fahrzeuganschaffungskosten – umgewandelt in jährliche Abschreibungen
- Wartungs- und Reparaturkosten
- Versicherungskosten
- KFZ-Steuer
- Energiekosten

Ähnlich wie beim PKW-Modell werden bei LNF zwei verschiedene Kaufentscheidungsansätze parallel für die Antriebswahl genutzt und miteinander verknüpft:

- Reines TCO-Modell: Nur die zu einem Zeitpunkt günstigste Antriebsart wird von diesen Käufergruppen nachgefragt.
- Logit-Modell: Unter Verwendung einer Logit-Funktion, in welche unter anderen Parametern die TCO eingehen, wird die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Antriebstechnologie beim Kauf von LNF bestimmt.

Durch die Kombination beider Ansätze ist es möglich, unterschiedliches Käuferverhalten abzubilden.

Das reine TCO-Modell zieht zur Wahl des Antriebs alleinig Anschaffungs-, Betriebs- und Kraftstoffkosten hinzu. Zu Grunde liegt die Annahme eines rationalen

Entscheidungsprozesses bei diesen Nutzfahrzeugkäufern, der rein ökonomischen Interessen folgt.

Die folgende Gleichung beschreibt die jährliche TCO-Berechnung zum Zeitpunkt t:

$$TCO_i(t) = \alpha_i * (Fzg_i(t) + BK_i(t)) + EK_i(t)$$

- Mit: TCO = wahrgenommene Gesamtbetriebskosten des LNF Typ i [€₂₀₁₀/Fzg.-km]
 α = Gewichtungsfaktor (wahrgenommene Bedeutung der fixen Fahrzeugkosten)
 Fzg = Kalkulatorische Anschaffungskosten des LNF Typ i [€₂₀₁₀/Fzg.-km]
 BK = Betriebskosten des LNF Typ i [in €₂₀₁₀/Fzg.-km]
 EK = Energiekosten des LNF Typ i [€₂₀₁₀/Fzg.-km]
 i = Index für LNF-Typen differenziert aus Matrix „Segment X Antriebsart“ (4x9)

Dabei wird die Bedeutung der fixen Kosten durch eine subjektive Gewichtung berücksichtigt. Dies liegt beispielsweise darin begründet, dass Kraftstoffkosten im Gegensatz zu fixen Kosten dauerhaft wahrgenommen werden.

Die TCO-Berechnung erfolgt analog zum Vorgehen bei PKW. Etwaige Kosten für die Kraftstoffbeschaffung (Zeit- und Wegekosten) werden im reinen TCO-Modell für LNF allerdings nicht berücksichtigt. Kalkulatorische Fahrzeugkosten werden mittels Restwerten und Amortisationszeiträumen wie folgt ermittelt:

$$Fzg_i(t) = (FK_{DRT}(t) - RW_i(t) + MwSt_i(FK_i(t)))/AZ_{SEG}$$

- Mit: FK = Fahrzeugkosten des LNF-Typ i [in €₂₀₁₀]
 RW = Restwert des LNF-Typs i am Ende des Amortisationszeitraums [€₂₀₁₀]
 AZ = Amortisationszeitraum, Anzahl der Jahre, die für die Kalkulation beim Fahrzeugkauf genutzt werden [in Jahren]
 MwSt = bei privaten Käufern fällige Mehrwertsteuer auf den Preis des LNF [€₂₀₁₀]
 SEG = Index für LNF-Segment
 DRT = Index für LNF-Antriebsart

Die Kosten für den Betrieb eines LNF (ohne Anschaffungskosten) setzen sich aus Wartungs- und Reparaturkosten, KFz-Steuern und Versicherungskosten zusammen:

$$BK_i(t) = WK_i(t) + ST_i(t) + VK_i(t)$$

- Mit: WK = Wartungskosten des LNF-Typ i [€₂₀₁₀/Fzg.-km]
 ST = KFZ-Steuer des LNF-Typ i [€₂₀₁₀/Fzg.-km]
 VK = Versicherungskosten des LNF-Typ i [€₂₀₁₀/Fzg.-km]

TCO- und Logit-Modell nutzen weitgehend identische Eingangsgrößen. Der größte Unterschied besteht darin, dass im Logit-Modell neben den Gesamtbetriebskosten Aspekte wie Reichweite, Akzeptanz und Verfügbarkeit von Tank- und Ladestationsinfrastruktur berücksichtigt werden.

Mittels des Discrete-Choice-Ansatzes wird unter Verwendung von folgender Logit-Funktion die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Antriebstechnologie beim Kauf von LNF bestimmt.

$$P_i(t) = \frac{e^{(-\beta_i * TCO_i(t) - \delta_i * AV_i(t))}}{\sum_{DRT=1}^8 e^{(-\beta_i * TCO_i(t) - \delta_i * AV_i(t))}}$$

- Mit:
- P = Anteil der gewählten Antriebstechnologie innerhalb jedes LNF-Segments
 - β = Kalibrierter Logit-Parameter für LNF-Typ i
 - AV = Wahrgenommene Kosten durch mangelnde Akzeptanz und Verfügbarkeit von Tank- und Ladestationsinfrastruktur
 - δ = Kalibrierter Logit-Parameter für den nicht durch Kosten erklärten Anteil

Durch die Aufteilung des Marktes in zwei Käufergruppen und die Aggregation der Ergebnisse der Neuzulassungen beider Ansätze ergeben sich im Zeitverlauf Diffusions- oder aus Sicht der Elektromobilität Markthochlaufszszenarien für die verschiedenen Technologien.

Die Technologiedifferenzierung mittels des Kaufentscheidungsmodells ermöglicht die Verknüpfung mit dem Umweltmodul zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und der durch den Verkehr verursachten Emissionen unter Berücksichtigung der jeweiligen Fahrleistungen aus dem Verkehrsmodul.

7.3 Aktualisierung der Inputdaten und Kalibrierung

Die Inputfaktoren des nach Segmenten und Antriebstechnologien differenzierten Kaufentscheidungsmodells wurden aktualisiert und das Modell anhand von KBA-Daten rekaliert.

Annahmen zu Anschaffungskosten der Antriebsstrangtechnologien und ihrer Entwicklung stammen aus eigenen, aktuellen Analysen basierend auf Marktdaten (Stand 2020). Es wurden Modelle verschiedener Hersteller und Antriebe berücksichtigt, darunter Citroën, Fiat, Ford, IVECO, MAN, Mercedes, Renault und Volkswagen. Die durchschnittlichen in ASTRA hinterlegten Fahrzeugkosten je Antriebsart sind Tabelle 23 zu entnehmen. Die Entwicklung der Preise folgt einem moderaten Preispfad mit annähernder Preisparität zwischen konventionell angetriebenen und batterieelektrischen LNF im Jahr 2026. Diese Annahme stimmt mit anderen Studien überein (siehe Transport & Environment, 2021). Die Ausführungen zu Batteriekosten gelten für LNF genauso wie für PKW.

Tabelle 23 Fahrzeugkosten für LNF nach Antriebsart (in €₂₀₁₀)

Antriebsart	Jahr						Änderung	
							2020 bis 2050	
	2020	2025	2030	2035	2040	2050	% p.a.	% abs.
Benzin	27 000	28 500	29 900	30 400	30 900	31 950	0,6%	18,3%
Diesel	26 550	28 000	29 300	29 850	30 300	31 300	0,6%	17,9%
CNG	29 850	29 650	29 400	29 500	29 500	29 600	0,0%	-0,8%
LPG	26 550	27 700	28 750	29 350	29 900	31 050	0,5%	16,9%
Hybrid	30 400	30 350	30 200	30 200	30 200	30 250	0,0%	-0,5%
PHEV	31 000	29 550	29 100	29 100	29 050	29 050	-0,2%	-6,3%
BEV	36 000	28 200	23 600	23 500	23 350	23 100	-1,5%	-35,8%
H2-BZ	53 100	43 600	34 050	33 150	32 300	30 550	-1,8%	-42,5%

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

LNF werden nach dem Kraftfahrzeugsteuergesetz gewichtorientiert besteuert.⁷⁸ Der Steuersatz wird je angefangenen 200 Kilogramm Gesamtgewicht festgesetzt. Für reine Elektrofahrzeuge sieht das Kraftfahrzeugsteuergesetz eine befristete Steuerbefreiung bis zu 10 Jahre bei Erstzulassung zwischen 18.05.2011 und 31.12.2025 (§ 3d Abs. 1 KraftStG), längstens aber bis 31.12.2030, vor. Nach Ablauf des steuerbefreiten Zeitraums unterliegen reine Elektrofahrzeuge einer um 50 Prozent ermäßigten gewichtorientierten Besteuerung (§ 9 Abs. 2 KraftStG). Innerhalb dieser Rahmenbedingungen nutzt REF-2050 einen technologiedifferenzierten Steuersatz für LNF basierend auf Matt und Flämig (2018).

Annahmen zu Wartungs- und Reparaturkosten werden differenziert nach Antrieb und Segment basierend auf Matt und Flämig (2018) getroffen. Es wird eine Minderung der Wartungskosten bei batterieelektrischen Fahrzeugen um 25% gegenüber konventionellen LNF angenommen. Für LNF im KEP-Dienst erhöhen sich in Übereinstimmung mit anderen Studien die Wartungskosten für alle Antriebsarten durch erhöhten Verschleiß um 20% (Hacker et al., 2015).

Versicherungskosten werden in Anlehnung an Matt und Flämig (2018) anteilig zu den Investitionskosten in Höhe von 1,5% erhoben.

Die Art der Nutzung der LNF wird berücksichtigt und die erwartete Jahresfahrleistung nach LNF-Segmenten differenziert. Für gewerblich genutzte LNF wird mit einem Durchschnitt von 21 000 Fzg-km/ Jahr gerechnet (identisch zu Hacker et al., 2015). Laut Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt, 2018) ist die Streuung der durchschnittlichen Fahrleistungen verschiedener Wirtschaftssektoren gering. Die mittlere Jahresfahrleistung zeigt keine signifikante Abhängigkeit vom Wirtschaftszweig. LNF im KEP-Dienst allerdings weisen im Mittel eine deutlich höhere Jahresfahrleistung von rund 26 000 Fzg-km/Jahr auf. Für privat

⁷⁸ Die Sonderregelung § 18 Abs. 12 KraftStG, wonach LNF unter bestimmten Bedingungen wie PKW besteuert wurden, wird in ASTRA REF-2050 nicht berücksichtigt. Die Sonderregelung § 18 Abs. 12 KraftStG wird abgeschafft, nachdem der Deutsche Bundestag am 17. September 2020 den Entwurf der Bundesregierung für ein Siebtes Gesetz zur Änderung des KraftStG angenommen hat.

gehaltene Fahrzeuge wird eine deutlich niedrigere erwartete Jahresfahrleistung von 9 400 Fzg-km/Jahr basierend auf Angaben des Statistischen Bundesamts (2011) angenommen.

Tabelle 24 zeigt exemplarisch die Fahrzeug- (Anschaffung und Betrieb) und Energiekosten pro km für das LNF-Segment „Gewerbe“, wie sie in die Kaufentscheidung eingehen.

Tabelle 24 Kosten im LNF-Kaufentscheidungsmodell (Gewerbe, in €₂₀₁₀/km)

Kostenart	Antriebsart	Jahr					Änderung		Änderung	
		2020	2025	2030	2040	2050	2020 bis 2030		2020 bis 2050	
							% p.a.	% abs.	% p.a.	% abs.
Fahrzeugkosten	Benzin	0.209	0.216	0.222	0.227	0.232	0.6%	6.5%	0.4%	11.2%
	Diesel	0.206	0.213	0.219	0.224	0.229	0.6%	6.3%	0.3%	10.9%
	CNG	0.233	0.232	0.231	0.231	0.232	-0.1%	-0.8%	0.0%	-0.5%
	LPG	0.211	0.217	0.222	0.227	0.232	0.5%	4.9%	0.3%	10.1%
	Hybrid	0.235	0.235	0.234	0.235	0.235	0.0%	-0.5%	0.0%	-0.3%
	PHEV	0.238	0.224	0.229	0.229	0.229	-0.4%	-3.8%	-0.1%	-3.9%
	BEV	0.228	0.191	0.169	0.172	0.171	-2.9%	-25.8%	-0.9%	-24.8%
	H2-BZ	0.316	0.197	0.203	0.213	0.214	-4.3%	-35.7%	-1.3%	-32.4%
Energiekosten	Benzin	0.071	0.074	0.071	0.072	0.072	-0.1%	-0.6%	0.0%	1.2%
	Diesel	0.057	0.061	0.060	0.064	0.066	0.7%	6.7%	0.5%	15.9%
	CNG	0.046	0.059	0.058	0.063	0.063	2.3%	25.7%	1.0%	36.2%
	LPG	0.069	0.065	0.057	0.057	0.058	-1.9%	-17.3%	-0.6%	-15.9%
	Hybrid	0.061	0.066	0.065	0.069	0.070	0.6%	6.6%	0.4%	14.3%
	PHEV	0.171	0.164	0.122	0.095	0.072	-3.3%	-28.7%	-2.8%	-57.8%
	BEV	0.068	0.066	0.049	0.038	0.029	-3.3%	-28.7%	-2.8%	-57.8%
	H2-BZ	0.179	0.123	0.098	0.073	0.054	-5.9%	-45.3%	-3.9%	-69.8%

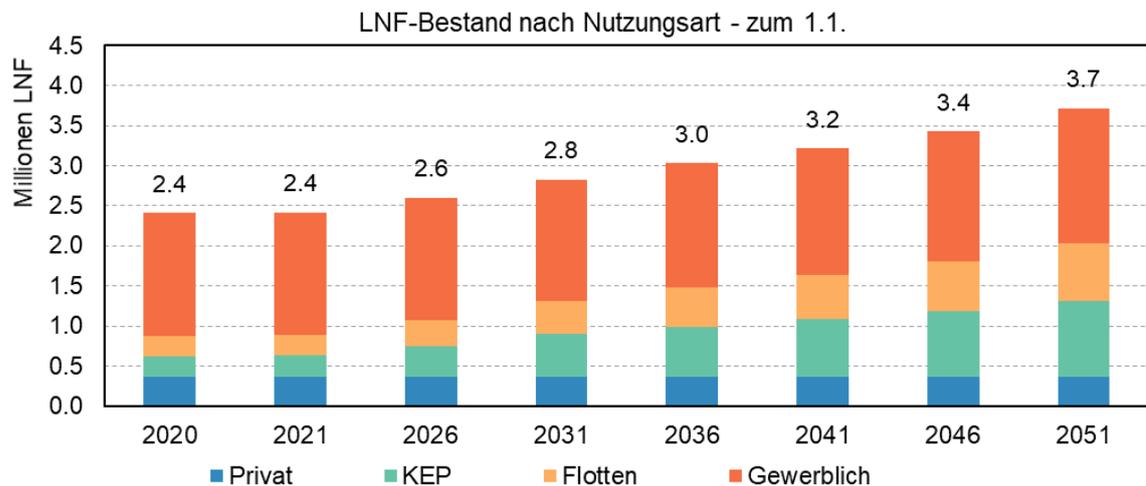
Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Zusätzlich zu den Inputdaten des Kaufentscheidungsmodells wurden die KBA-Datensätze für Flotte und Neuzulassungen von LNF differenziert nach verschiedenen Fahrzeugcharakteristika — u.a. zulässige Gesamtmasse, Jahr der Neuzulassung zur Einordnung in Alterskohorten und Emissionsnormen, Antriebstechnologien sowie Halter und Wirtschaftszweige zur Gruppierung in entsprechende LNF-Segmente (Nutzung) in ASTRA — aktualisiert (Stand 2020). Anhand dieser Daten wurde das LNF-Modell folgendermaßen kalibriert. Wenn das Angebot (Bestand) an LNF nicht der Nachfrage nach LNF entspricht, verändert sich die Flotte. Basierend auf diesem allgemeinen Gerüst können eine Mindestanzahl an Neuzulassungen, der Anteil der Verschrottungen sowie die jährliche Fahrleistung innerhalb statistischer Abweichungen kalibriert werden. Hierfür werden vorhandene Datensätze des Bestandes und der Neuzulassungen mit den in ASTRA-M endogen berechneten Zahlen verglichen. Um die Technologiedifferenzierung richtig

abzubilden, sind darüber hinaus die Parameter des Kaufentscheidungsmodells aus Kapitel 7.2 kalibriert worden.⁷⁹

7.4 Entwicklung der Flotte von LNF

Abbildung 60 stellt die modellierte Bestandsentwicklung nach Segmenten bis 2050 dar. Der Bestand an LNF hat in der Vergangenheit kontinuierlich zugenommen. Die wachsende Nachfrage im Straßengüterverkehr führt zu einer weiteren Vergrößerung der LNF-Flotte in Zukunft. Der Bestand an privaten LNF wird allerdings zurückgehen (dunkelblaue Balken). Im Gegensatz dazu wird der Bestand an LNF im KEP-Dienst weiterhin wachsen (grün Balken). Im Jahr 2020 machten sie 10 % des Gesamtbestands aus, und es wird erwartet, dass sie bis 2050 auf 25 % ansteigen werden. Dagegen wird der Anteil des Gewerbes voraussichtlich von 63 % im Jahr 2020 auf 45 % im Jahr 2050 sinken. Zwischen 2020 und 2050 wird der Anteil der Flotten-Unternehmen von 10 % auf 19 % steigen, während der Anteil der LNF in Privatbesitz von 15 % auf 9 % sinken wird.

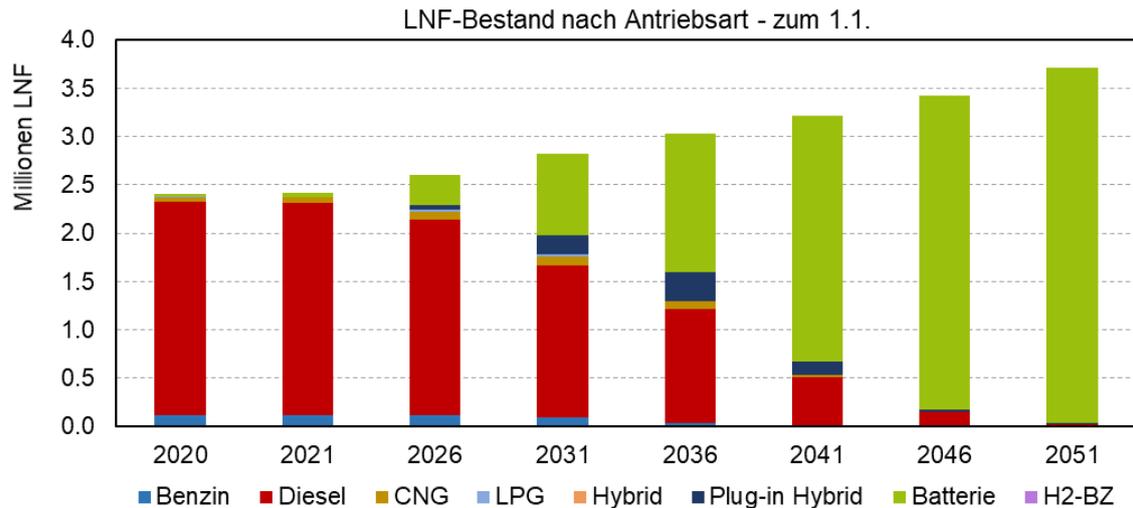


Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 60 Entwicklung des LNF-Bestandes bis 2050 nach Segmenten

Im heutigen Bestand dominieren Fahrzeuge mit Benzin- oder Dieselantrieb (siehe Abbildung 61, links). Im Jahr 2020 wurden fast alle LNF mit Diesel oder Benzin betrieben. Nur 1 % der LNF in der Flotte waren BEVs. In Zukunft wird der Anteil der elektrisch betriebenen LNF an der Flotte kontinuierlich steigen und im Jahr 2050 etwa 99 % erreichen.

⁷⁹ Einschränkung wirkt die Tatsache, dass nicht hinreichend viele LNF der verschiedenen Technologien am Markt verfügbar sind. Eine valide Kalibrierung und Modellierung werden dennoch durch die Nutzung verschiedener Datenquellen, Studienergebnisse und stetige Prüfung von Annahmen sichergestellt.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 61 Bestand an LNF nach Antriebsart bis 2050

7.5 Entwicklung der Neuzulassungen von LNF

Abbildung 62 stellt die modellierten Neuzulassungen nach Segmenten bis 2050 dar. Im Jahr 2020 betrug die Neuzulassung etwa 250 000 LNF. Der deutsche Markt für LNF hat im Coronajahr 2020 einen vergleichsweise moderaten Rückgang verzeichnet. Treiber dieser robusten Entwicklung war das dynamische Wachstum des Online- und Versandhandels. In den nächsten Jahren wird die Zahl an LNF-Käufen weiter zunehmen.

Die deutlichste Steigerung wird im KEP-Dienst zu verzeichnen sein. Der Anteil von KEP wird voraussichtlich von 8 % im Jahr 2019 auf 25 % im Jahr 2050 steigen. Im Gegensatz dazu wird der Anteil von Gewerbe im selben Zeitraum von 66 % auf 41 % sinken. Der Anteil von Flotten-Unternehmen wird zwischen 2019 und 2050 voraussichtlich von 17 % auf 28 % steigen, während der Anteil von privat gehaltenen LNF mehr oder weniger gleich bleiben wird.

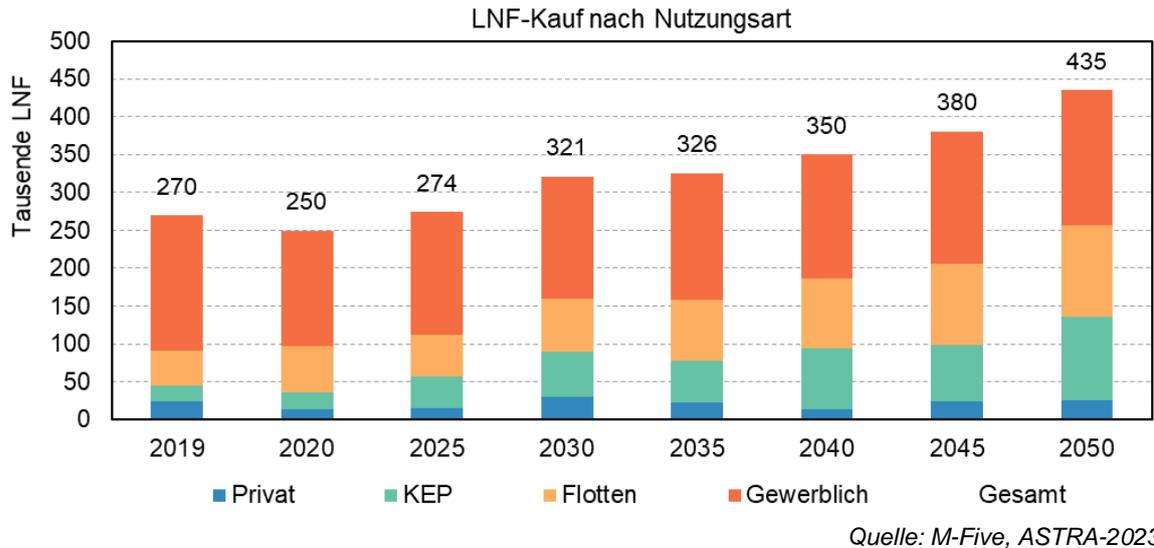


Abbildung 62 Entwicklung der LNF-Käufe bis 2050 nach Segmenten

Im Jahr 2020 machen Benzin- und Dieselfahrzeuge etwa 90 % der Neuzulassungen aus, während auf BEVs etwa 5 % entfielen. Dies wird sich jedoch in Zukunft deutlich ändern (siehe Abbildung 63). Bereits im Jahr 2030 wird etwa die Hälfte der Neuzulassungen vollelektrisch sein.

Infolge des ab 20235 geltenden Verbots fossil betriebene LNF neu zuzulassen im Jahr 2035 werden ab diesem Jahr alle neuen LNFs Elektrofahrzeuge sein.

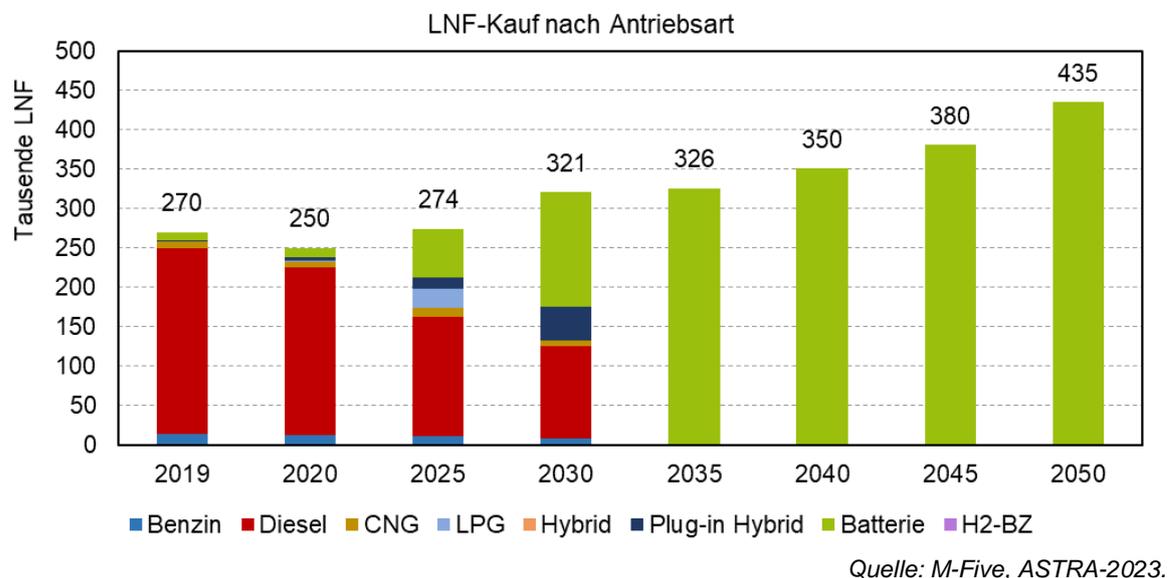


Abbildung 63 Kauf von LNF nach Antriebsart bis 2050

Dementsprechend führen die aktuellen Instrumente in Verbindung mit der Technologie- und Kostenentwicklung von BEVs zu einer starken Elektrifizierung. Das Verbot von fossil betriebenen neuen Verbrennungsmotoren im Jahr 2035 ist ein starkes Instrument, um die Elektrifizierung bereits vorgängig zu fördern.

Abbildung 64 zeigt die Alters- und Antriebsstruktur der LNF-Flotte im Jahr 2030. Auf der x-Achse sind die Alterskohorten des Bestandes im Jahre 2030 als Jahr der Neuzulassung dargestellt. Der Anteil des Bestandes aus Fahrzeugen der Kohorten von 2022 und früher beträgt im Jahr 2030 nur 22% (ca. 610 000 LNF). Ihre THG-Emissionen lassen sich nur noch durch Maßnahmen beeinflussen, die die Nutzung oder den fossilen C-Gehalt der Kraftstoffe adressieren. Die als zentrale Maßnahme zur Zielerreichung angesehenen CO₂-Flottenstandards für Neuwagen ab 2021 können die THG-Effizienz von 78% der LNF-Flotte im Jahr 2030 verändern (ca. 2,2 Millionen LNF). Die Effizienzentwicklung der LNF wird im nächsten Kapitel erläutert.

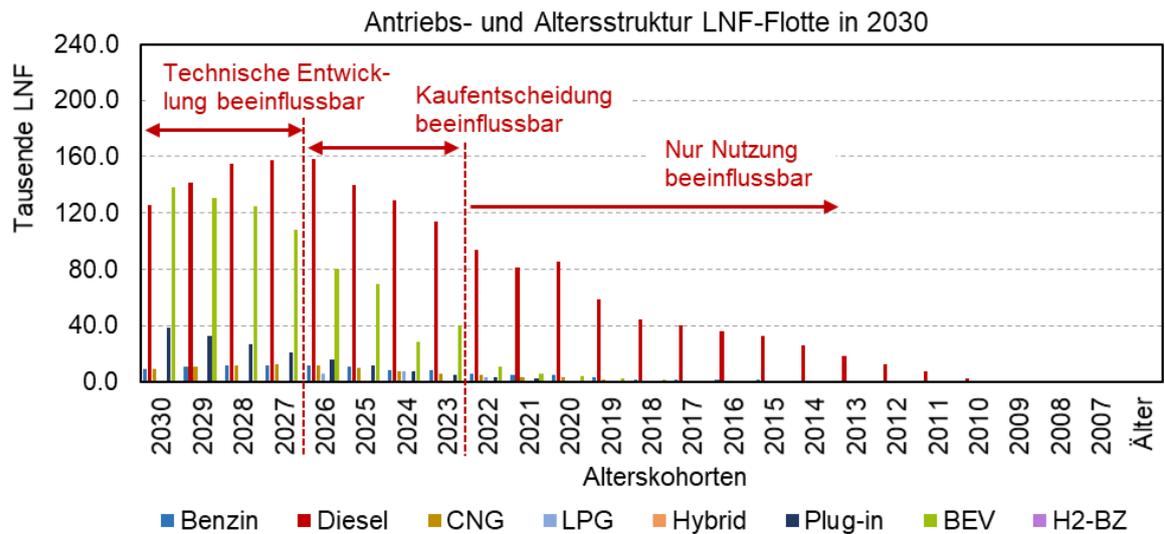


Abbildung 64 LNF-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur im Jahr 2030

7.6 Effizienzentwicklung LNF

Auch für die LNF hat die EU-Kommission, ähnlich wie bei PKW, CO₂-Zielwerte für die Neuwagenflotte festgesetzt. Diese und weitere Maßnahmen führen dazu, dass sich die Effizienz der LNF verbessern wird und alternative Antriebe an Bedeutung gewinnen werden.

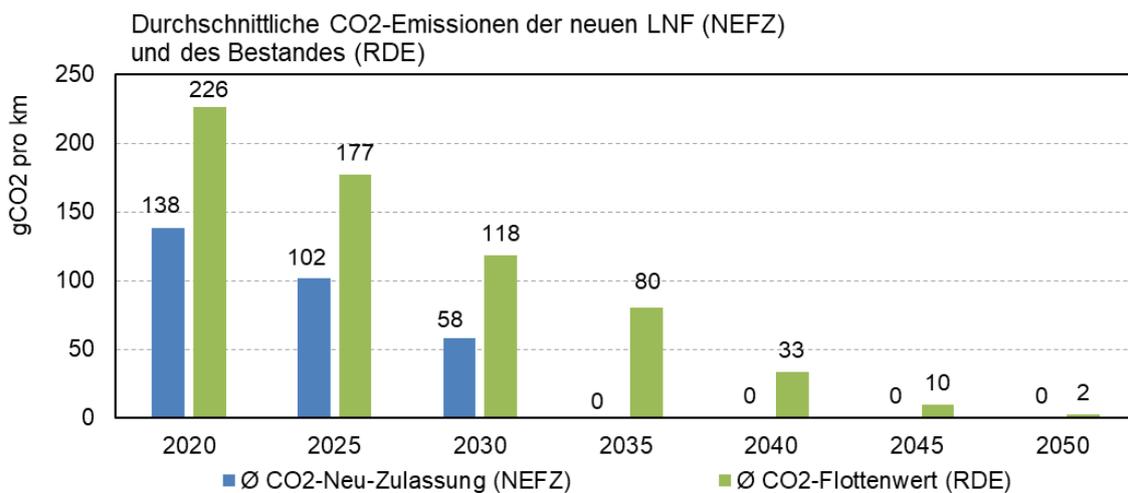
Laut EU-Verordnung 2019/631 ist von 2020 bis 2024 ein Flottenzielwert der Neuzulassungen von 147 gCO₂/km (gemessen in NEFZ)⁸⁰ für LNF zu erreichen. Ab dem Jahr 2025 legt die Verordnung ein strengeres flottenweites CO₂-Emissionsziel fest, das als 15% Reduzierung gegenüber 2021 definiert ist. Ab 2030 wird der Wert durch die EU-Verordnung 2023/851 auf -50% gegenüber 2021 verschärft. Ab 2035 sollen die Emissionen im Vergleich zu 2021 um 100 % gesenkt werden. Die jährlichen spezifischen Emissionsziele jedes Herstellers basieren auf diesen flottenweiten EU-Zielen unter Berücksichtigung der durchschnittlichen neu zugelassenen Fahrzeuge.

⁸⁰ Ab 2021 basieren die Emissionsziele für Hersteller auf dem neuen WLTP-Emissionsprüfverfahren.

Abbildung 65 zeigt den Effekt der Zielwerte in der Modellierung auf. Das Setzen von Standards führt bei den Neuzulassungen (blaue Balken) zu einer deutlichen Reduktion der durchschnittlichen CO₂-Emissionen von 2020 bis 2050. Dies bedeutet eine Verbesserung der Effizienz um rund 8% p.a. Mit einer Verzögerung wird dieser Effekt auch im Bestand sichtbar (grüner Balken). Die jährliche Effizienzverbesserung im Bestand steigt ab 2035 auf über 16%.

Es ergibt sich im Modell ein durchschnittlicher Wert der CO₂-Emissionen der neu registrierten LNF von 138 gCO₂/km im Jahr 2020, und von 0 gCO₂/km im Jahr 2035. Im Jahr 2020 beträgt die Differenz zwischen den Neuzulassungen und dem Durchschnittswert im Bestand etwa 88 gCO₂/km oder 64%; bis im Jahr 2045 verändert sich die Differenz auf knapp 10 gCO₂/km, also der verbleibende CO₂-Werte des Bestandes.

In 2030 liegt der Wert der neuzugelassenen LNF bei 58 gCO₂/km nach NEFZ bei Anteilen von 3% CNG-Antrieben, rund 13% Hybriden und 45% BEV. Der durchschnittliche Flottenwert liegt dann bei 118 gCO₂/km. Bis im Jahr 2035 sinkt der Wert der CO₂-Emission für NZL auf 0 gCO₂/km und der durchschnittliche Flottenwert auf 80 gCO₂/km.



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnung, M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 65 Entwicklung des CO₂-Flottenwertes der Neuzulassungen (nach NEFZ) und des Bestandes an LNF (Realbetrieb)

Tabelle 25 stellt die sich im Realbetrieb ergebenden spezifischen Endenergieverbräuche der LNF-Flotte dar. Für jede Antriebsart sind für jede Alterskohorte drei Verbrauchsfaktoren hinterlegt, jeweils für die drei Entfernungsklassen <50km, 50 bis 150km und über 150km. Aus den Anteilen der Alterskohorten und der Fahrleistung in den Entfernungsklassen ergeben sich die in der Tabelle enthaltenen Verbrauchsfaktoren. Betrachtet man die 5-Jahresperioden ab 2020, so ist die Effizienzverbesserung in den ersten Jahren für die Erreichung der Zielwerte am wichtigsten. Die, vor allem in den ersten Perioden noch vorwiegend gekauften Verbrenner, weisen die deutlichste Effizienzsteigerung auf. Elektrifiziert angetriebene LNF benötigen bereits heute deutlich weniger Endenergie für den Antrieb.

Tabelle 25 Entwicklung der Energieeffizienz im Realbetrieb der LNF-Flotte (in kWh/km)

Antriebsart	Energieverbrauch in kWh/km					Durchschnittliche jährliche Reduktion des Energieverbrauchs in %			
	2020	2025	2030	2035	2050	25 vs 20	30 vs 25	35 vs 30	50 vs 35
Benzin	0,863	0,731	0,640	0,601	0,600	-3,3%	-2,6%	-1,3%	0,0%
Diesel	0,856	0,739	0,644	0,581	0,545	-2,9%	-2,7%	-2,0%	-0,4%
CNG	0,874	0,741	0,663	0,622	0,589	-3,2%	-2,2%	-1,2%	-0,4%
LPG	1,170	0,921	0,844	0,803	0,749	-4,7%	-1,7%	-1,0%	-0,5%
Plug-in	0,648	0,610	0,582	0,559	0,538	-1,2%	-1,0%	-0,8%	-0,3%
BEV	0,260	0,244	0,233	0,224	0,202	-1,3%	-0,9%	-0,8%	-0,7%
H2-BZ	0,697	0,655	0,623	0,599	0,539	-1,2%	-1,0%	-0,8%	-0,7%

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf HB-EFA 4.1, ASTRA-2023.

8 Referenzszenario der Flotte schwerer Nutzfahrzeuge (SNF)

Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) sind Lastkraftwagen (LKW) mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von über 3,5 Tonnen (>3,5t zGG). SNF werden nach ihren Gewichtsklassen und Aufbauarten unterschieden. Diese richten sich nach ihren Einsatzzwecken (Use Cases, siehe auch Flämig et al. 2021). In der statistischen Klassifikation der EU und des KBA sind in diesem Kapitel die Klassen N2 (>3,5t bis 12t zGG) und N3 (>12t bis 44t zGG) gemeint. Im Szenario REF-2050 wird die SNF-Flotte in fünf Gewichtsklassen und sechs Antriebsarten unterschieden. Es erfolgt keine Differenzierung in Einsatzzwecke und Aufbauarten.

Ziel der Modellierung der SNF-Flotte ist eine realistische Abbildung des Kaufs von SNF und von verschiedenen Antriebsarten sowie der Alterungs- und Verschrottungsprozesse unter Berücksichtigung der beschriebenen Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 4) und der bereits beschriebenen Instrumente (siehe Kapitel 5), um den zukünftigen Bestand an SNF nach Gewichtsklassen und Antriebsarten abbilden zu können. In Summe werden zur Abschätzung der THG-Emissionen Aussagen zum elektrifizierten Anteil der SNF-Flotte benötigt sowie zur elektrischen Fahrleistung. Ebenfalls relevant ist die Kenntnis der verbleibenden Anzahl an verbrennungsmotorisch angetriebenen SNF.

8.1 Modellüberblick

Die SNF-Flotten werden in ASTRA über die Kombination eines Kaufs- mit einem Kohortenmodell der Altersjahrgänge abgebildet. Der Bedarf an Fahrzeugen hängt dabei von der Transportnachfrage im Straßengüterverkehr und der Alterung bzw. Ausflottung in Deutschland ab. Bei der Ausflottung wird nicht zwischen Verschrottung oder Export eines gebrauchten SNF ins Ausland unterschieden.

Neue Fahrzeuge kommen über das **Kaufentscheidungsmodell** in die Flotte, welches eine TCO- und eine Logit-Entscheidungsfunktion kombiniert, wobei Entscheidungen über Antriebsart, Gewichtsklasse und Schadstoffklasse simuliert werden. Die Ausflottung gebrauchter Fahrzeuge erfolgt über Verschrottungs-Anteile, die mit dem Fahrzeugalter ansteigen.

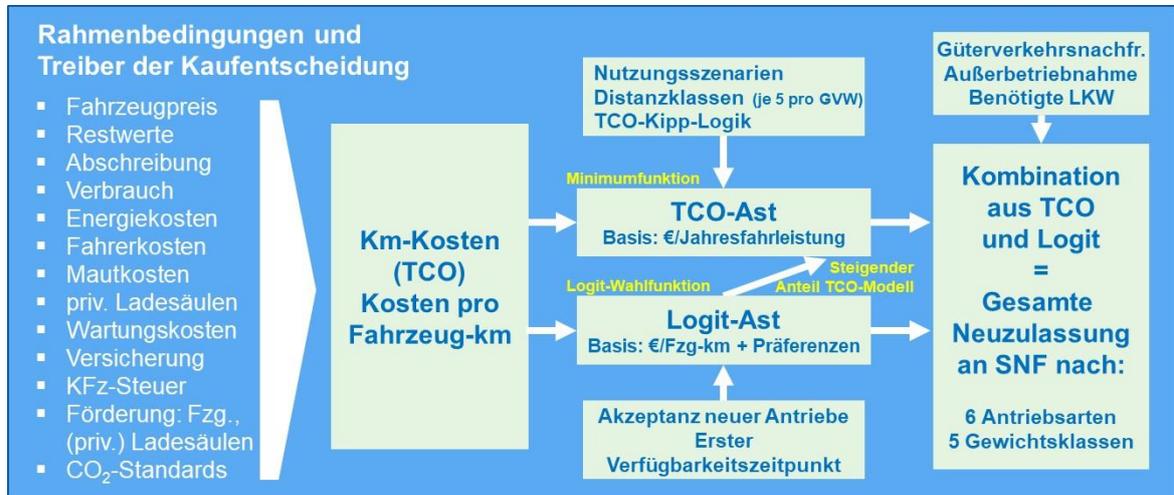
In beide Modelle gehen die **Gesamtbetriebskosten** (TCO, total cost of ownership) als zentrale Größe ein. Diese berücksichtigen Anschaffungskosten (z.B. Fahrzeugpreis), fixe (z.B. Kfz-Steuer) und variable Kosten (z.B. Energie- und Mautkosten).

Die Größenordnung der **Neuzulassungen** wird im Wesentlichen von der Nachfrage nach Straßengüterverkehr bestimmt, welche endogen in ASTRA berechnet wird (siehe Kapitel 12) und der Flottengröße, die benötigt wird, um diese zu bedienen, unter Berücksichtigung der SNF-Außerbetriebnahmen. Die Verkehrsnachfrage nutzt wiederum die Inlandsfahrleistung, die im Güterverkehrs-Sektor von ASTRA aus der Transportleistung (tkm) und den Beladungsfaktoren für drei verschiedene Gütergruppen (Massen-, Stück- und containerisierbares Gut) berechnet wird.

Für die Modellierung und Prognose der Neuzulassungen werden mit dem TCO-Modell und dem Logit-Modell zwei verschiedene Kaufentscheidungsansätze parallel genutzt. Die daraus berechneten Quantitäten werden zur gesamten Neuzulassung an SNF aggregiert (siehe auch Abbildung 66). Die Modellansätze unterscheiden sich grundsätzlich durch:

- **TCO-Modell:** Ausschließlich die zu einem Zeitpunkt nach Gesamtbetriebskosten günstigste Antriebsart für verschiedene Nutzungsszenarien, differenziert durch ihre spezifischen Jahresfahrleistungen, wird nachgefragt („the winner takes it all“).
- **Logit-Modell:** Unter Verwendung einer Logit-Funktion (Discrete Choice), in die neben der TCO auch andere Parameter, wie die Akzeptanz einer Antriebsart eingehen, wird die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Antriebstechnologie beim Kauf von SNF bestimmt. Durch die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten ergibt sich eine Verteilung der Antriebsarten bei den Neuzulassungen.

Im Zeitverlauf nimmt die Bedeutung des Logit-Ansatzes für die Kaufentscheidung nach Antriebsart ab, weil Akzeptanz- und Unsicherheitsbarrieren abgebaut werden und die Kostentransparenz zwischen den Antriebsarten wächst, während die Kostendifferenz schrumpft. Die Bedeutung der TCO-basierten Kaufentscheidung nimmt somit über die Zeit zu.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 66 Aufbau des Kaufentscheidungs-Modells für SNF

Durch die parallele Anwendung beider Ansätze und die Aufteilung des Marktes in zwei verschiedene disjunkte Käufergruppen ist es möglich, unterschiedliches Kaufverhalten abzubilden. Käufer, die rein TCO-basiert orientiert sind, entscheiden sich schneller für die ökonomischste Antriebsvariante(n)⁸¹, während der Logit-Ast eine langsamere Diffusion hin zu ökonomischeren Antriebsarten modelliert. Letzteres trägt zum einen der Tatsache Rechnung, dass sich die individuelle Wirtschaftlichkeitsrechnung zwischen Käufern

⁸¹ Nur bei sehr ähnlichen Kosten werden innerhalb einer Kombination aus zGG und Distanzklasse zwei oder mehrere Varianten anteilig gewählt.

unterscheidet und somit eine Bandbreite verschiedener Antriebsarten vorliegen kann, die für verschiedene Akteure jeweils am wirtschaftlichsten ist. Zum anderen entscheidet ein Teil der Käufer nicht nur ökonomisch rational, sondern auch auf Grund individueller Präferenzen.

Es wird ferner angenommen, dass die Nutzer größerer LKW tendenziell stärker ökonomisch entscheiden, so dass hier der TCO-basierten Kaufentscheidung gegenüber dem Logit-Ansatz ein stärkeres Gewicht zugesprochen wird. Die Verhaltensparameter in der Modellierung sind durch eine Anpassung des Modells an Vergangenheitsdaten kalibriert worden, wobei für elektrifizierte Antriebsarten nur eine sehr kurze Zeitreihe vorliegt und diese stark durch einzelne Instrumente sowie hohe Kaufpreisdifferenzen beeinflusst sind. Daher wurde für die Kalibrierung die Zeitreihe mit Rückgriff auf andere Studien und eigene Prognosen aus früheren Modellen experimentell verlängert und diese für die Kalibrierung genutzt.

Die TCO oder **Gesamtbetriebskosten** werden im Modell aus mehreren Bestandteilen zusammengesetzt:

- **Anschaffungskosten** eines SNF, die wiederum in einem Modell der SNF-Kostenkomponenten bestimmt werden,
- **jährlich berechnete Kosten**: Steuerbelastung, Versicherungskosten, Wartungs- und Reparaturkosten, Fahrerkosten sowie
- **pro Kilometer berechnete variable Kosten**: Energiekosten (Diesel, Strom, Wasserstoff, Gas-Kraftstoffe), LKW-Maut (pro km, verbunden mit einem Faktor, der den Anteil bemauteeter Strecken wiedergibt).

Mit einer solchen Kostenberechnung werden die verschiedenen Antriebsarten über Anschaffungskosten, Wartungs- und Reparaturkosten, Energiekosten und die LKW-Maut differenziert. Politische Instrumente setzen an einigen dieser Kostenkomponenten an, insbesondere durch Förderung der Mehrkosten bei den Anschaffungskosten, Besteuerung von Energiekosten sowie der LKW-Maut-Differenzierung nach CO₂-Emissionen und Antriebsarten.

Die Anschaffungskosten eines SNF werden in ASTRA mit einem **Komponentenmodell** bestimmt (siehe Kapitel 8.2.1). Hier werden Komponentenkosten sowie deren prognostizierte Entwicklung dargestellt und alle Komponenten addiert um die Herstellungskosten eines SNF abzuschätzen. Im letzten Schritt wird eine vom Fahrzeughersteller erwartete Marge addiert, um auf den Anschaffungspreis für die Nutzer überzugehen.

Die im Komponentenmodell erfassten Komponenten sind: Fahrgestell, Verbrennungsmotor, Elektro-Motor, Tank (Diesel, CNG, LNG, Wasserstoff), Batterie, Getriebe, Ladeelektronik (alle Bauteile zwischen Stromzufluss und Batterie), H₂-Brennstoffzelle und Pantograph (Stromabnehmer für Oberleitung). Gespräche über die Preisgestaltung der OEM haben gezeigt, dass für die alternativen Antriebsarten die Margen vor allem in den frühen Jahren der Marktreife (und davor) hohe Aufschläge für Forschungs- und

Entwicklungskosten enthalten (teilweise ein Vielfaches des Preises eines vergleichbaren Diesel-SNF).

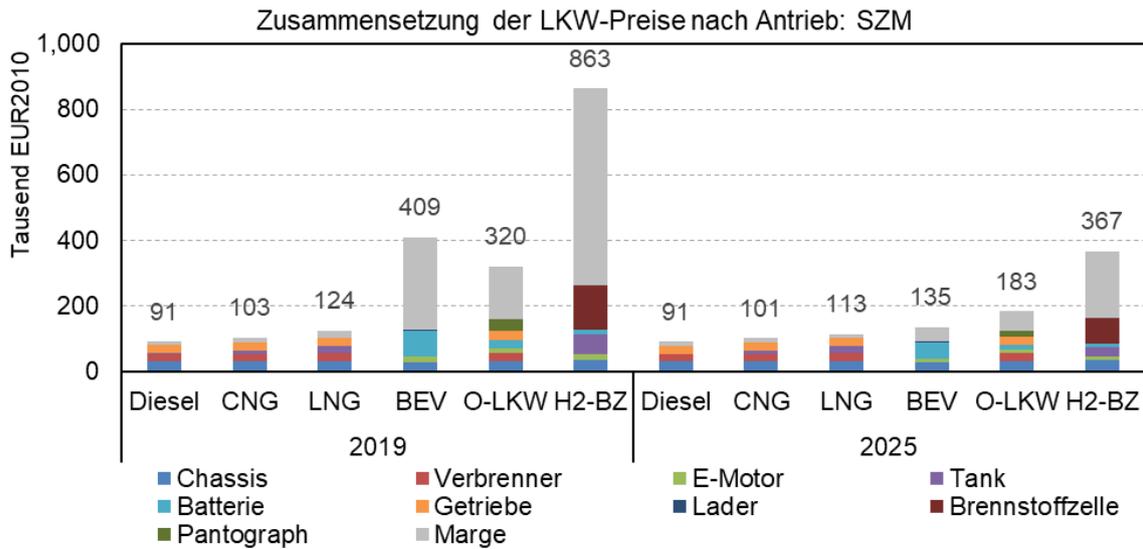
Bereits im Zeitraum 2020 bis 2025 nehmen die F&E-getriebenen Margen für emissionsfreie SNF deutlich ab, wie auch die Kosten für einige zentrale Komponenten wie Batterien und etwas verzögert auch für Brennstoffzellen, sodass diese Antriebsarten günstiger und konkurrenzfähiger relativ zur etablierten Diesel-Technologie werden. Diesel-LKW weisen dagegen aktuell schon niedrige Margen auf. Sie befinden sich bereits in einer Konkurrenzsituation mit ausgereizten Lern- und Skaleneffekten sowie teils bereits amortisierter Produktionsinfrastruktur. Komponentenkosten werden für Diesel-LKW im Zeitverlauf teilweise sogar leicht steigen, da sie zukünftig strengere Emissionsstandards einhalten werden müssen.

8.2 Parameter und Inputs

8.2.1 Komponenten und Fahrzeugpreise

Im Jahr 2019 ist der Wettbewerb zwischen den Antriebstechnologien im SNF-Bereich noch sehr beschränkt. Ein Wettbewerb kann allenfalls zwischen Diesel- und CNG-SNF stattfinden deren Anschaffungspreise nur 11 000 Euro (in €₂₀₁₀) auseinanderliegen (siehe Abbildung 67), wobei die Gas-SNF diesen Kostennachteil bei hohen Jahresfahrleistungen insbesondere über die Mautbefreiung ausgleichen können. Mit der Förderung für Gas-LKW in den Jahren 2019 bis 2021 konnte auch der Kostennachteil zwischen LNG- und Diesel-SNF überbrückt werden, zumal die LNG-LKW in den beiden folgenden Jahren in der Anschaffung günstiger wurden, da die die Margenerwartungen treibenden F&E-Kosten seit der Forcierung von LNG-LKW in der EU Mitte der 2010er Jahre eingespielt wurden.

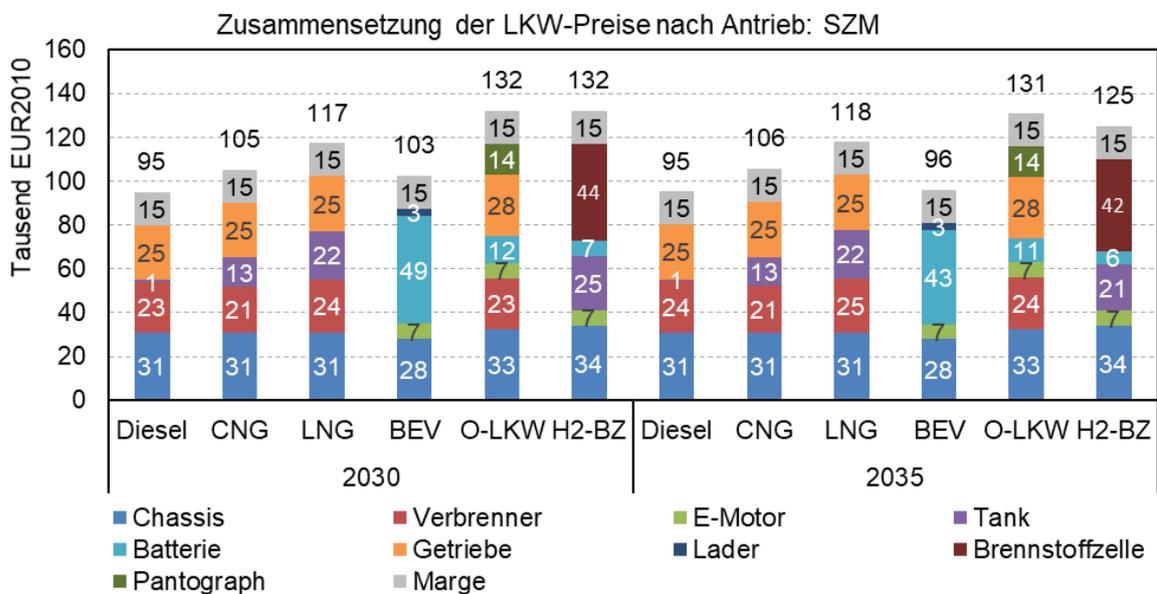
Bis 2025 nähern sich auch die Preise von BEV stark an Diesel-SNF an. Allerdings sinken die Batteriekosten und die durch kleine Stückzahlen hohen Margen-Erwartungen noch nicht ausreichend, um bereits bei den Anschaffungspreisen wirklich wettbewerbsfähig zu werden (siehe auch Abbildung 68).



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 67 Entwicklung der SNF-Kosten und -Preise der verschiedenen Antriebsarten am Beispiel Sattelzugmaschine (SZM), 2019 und 2025

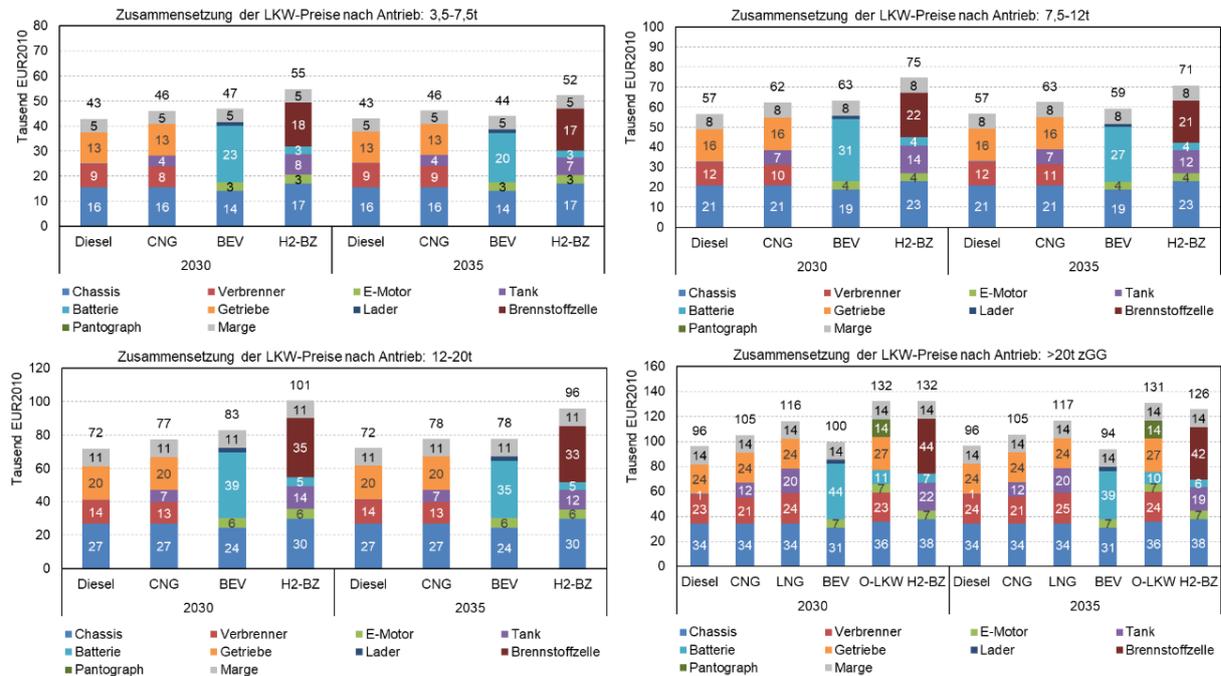
Bis 2030 ändert sich die Wettbewerbssituation bei den Anschaffungspreisen deutlich. BEV-LKW schließen bei den Sattelzugmaschinen (SZM) aufgrund sinkender Batteriepreise und sich angleichender Margen fast zu Diesel-LKW auf. Der Kostennachteil der Batterie wird durch den Kostennachteil für Verbrennungsmotor und Getriebe bei Diesel SNF nahezu ausgeglichen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 68 Entwicklung der zukünftigen SNF-Kosten und -Preise der verschiedenen Antriebsarten am Beispiel Sattelzugmaschine (SZM), 2030 und 2035

Für die übrigen Gewichtsklassen ergibt sich ein ähnliches Bild, hier dargestellt für die Jahre 2030 und 2035 in Abbildung 69. Unterschiede werden bei den jeweils in einer Gewichtsklasse verfügbaren Technologien sichtbar. LNG- und Oberleitungs-SNF werden nur für Sattelzugmaschinen und SNF über 20t zGG in Betracht gezogen. In den kleineren Gewichtsklassen verbleibt bei der Anschaffung ein begrenzter Kostenvorteil von Diesel-LKW der bei den Wartungs- und variablen Kosten noch auszugleichen wäre.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 69 Preise der verschiedenen Antriebsarten in den übrigen vier SNF-Gewichtsklassen für die Jahre 2030 und 2035

In der Modellierung ist eine jährliche Betrachtung der wettbewerbsrelevanten Kosten unabdingbar, um Aussagen über den Bestand der verschiedenen Antriebsarten treffen zu können (siehe Kapitel 8.4). Dies ist durch die sich dynamisch entwickelnden Kosten sowohl von Fahrzeugen als auch der Energiepreise oder der Mautsätze begründet. Dadurch können sich jährlich die Kostenverhältnisse verschieben und die SNF-Märkte von einem Diesel-dominierten Markt in einen BEV-Markt umkippen. Dies wird sukzessive für einzelne Marktsegmente bzw. Nutzungsszenarien erfolgen.

8.2.2 LKW-Maut

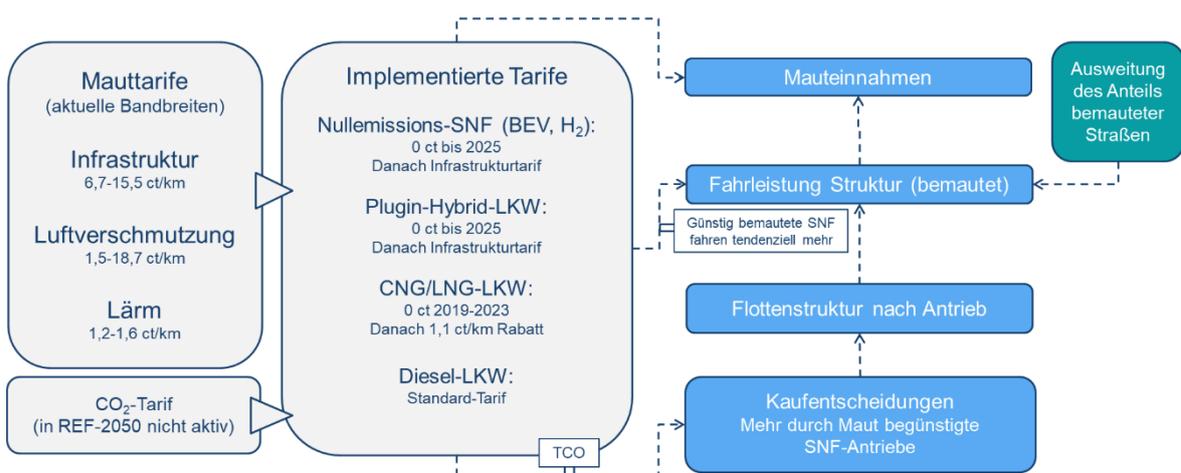
Für das Referenzszenario (REF-2050) wurden die Mauttarife der Reform aus dem Jahr 2023 implementiert und bis 2050 nominal konstant gehalten.⁸² Mautbefreiungen für alternative Antriebe wurden bis 2025 implementiert. Mautpflichtig sind Nutzfahrzeuge ab 7,5 t zGG. Eine Erweiterung der Maut auf Fahrzeuge ab 3,5 t sowie die CO₂-Maut sind im Modell angelegt, aber für REF-2050 nicht aktiv.

⁸² Die Tarife beruhen auf dem Wegekostengutachten für die Jahre 2023 bis 2027 (Alfen/Aviso 2022). Die tatsächlich zu entrichtenden Tarife veröffentlicht TollCollect: https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/p1745_mauttarife_2023.html

Die Tarife sind in Abbildung 70 links dargestellt, wobei der CO₂-Tarif im Referenzszenario nicht aktiv ist. Die Mauttarife werden differenziert nach Größenklasse (Infrastrukturtarif) und Schadstoffklasse (Luftverschmutzungstarif). Diesel- und Gas-SNF müssen zusätzlich für verursachten Lärm bezahlen. Für eine Sattelzugmaschine der neuesten Emissionsklasse (Euro 6) ergibt sich ein gesamter Mauttarif von 19 ct/km (15,5 ct/km + 2,3 ct/km + 1,2 ct/km).

Elektrische und Wasserstoff-LKW sind bis 2025 von der Maut befreit. Ab 2026 fällt für sie der Infrastrukturtarif in voller Höhe an. Ein Rabatt auf 25 % des Tarifs ist für das Referenzszenario nicht eingestellt. Die Befreiung gilt in Anlehnung an die Elektromobilitätsdefinition im Elektromobilitätsgesetz (EmoG) für alle Elektro- und Hybrid-LKW, deren Batterie von außen aufladbar ist. Da der Infrastrukturtarif den größten Teil der Maut ausmacht, liegen emissionsfreie SZM der neuesten Schadstoffklasse dann relativ nah bei Diesel-SNF – mit 15,5 ct/km verglichen mit 19 ct/km.

Erdgas-SNF (CNG und LNG) sind in REF-2050 bis Ende 2023 von der Maut befreit. Ab 2024 sind die Tarife für Erdgas-SNF 1,1 ct/km niedriger als die Standard-Tarife für Diesel-SNF.



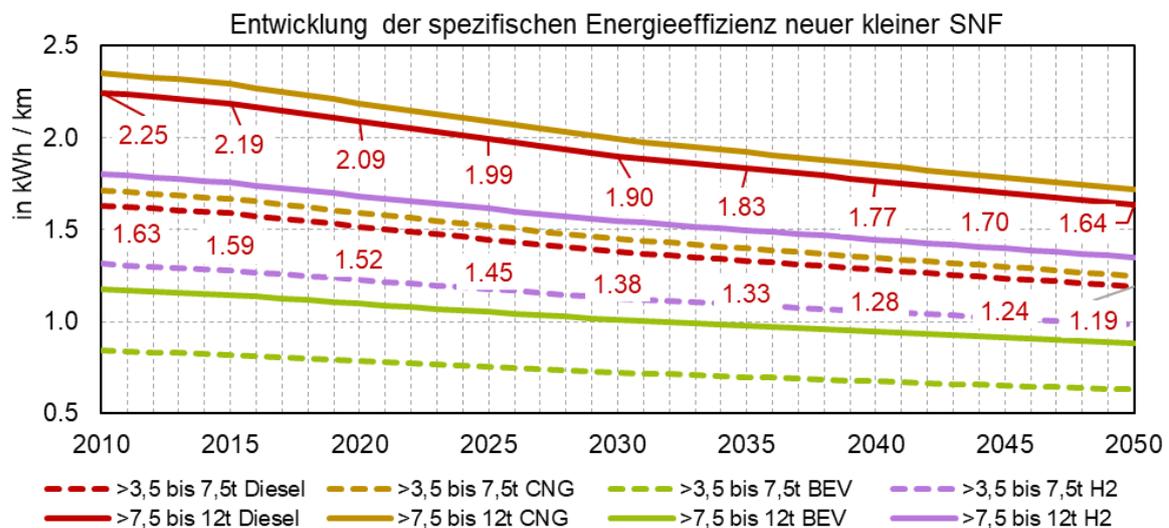
Quelle: eigene Darstellung, M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 70 Mauttarife und deren Wirkung auf Flotten, Fahrleistung und Mauteinnahmen

Die Wirkung der differenzierten Maut-Tarife in der Modelldynamik ist in Abbildung 70 in blau dargestellt. Die oben beschriebenen Begünstigungen für alternative Antriebe sowie die günstigeren Tarife für neue Schadstoffklassen (Euro 6 gegenüber Euro 5 und älter) führen zu niedrigeren TCO und damit mehr Neuzulassungen für diese LKW. Diese Kaufentscheidungen beeinflussen mit der Zeit auch die Strukturen der Flotte und der Fahrleistung. Der Anteil der Fahrleistung mit alternativen Antrieben steigt schneller an als der entsprechende Fahrzeuganteil in der Flotte, da insbesondere für Speditionen mit besonders hoher Fahrleistung ein Umstieg auf LKW mit günstigeren Maut-Tarifen entsprechend ökonomisch attraktiv ist.

8.2.3 Spezifische Effizienz von SNF

Ein ebenfalls zentrales Element für die Kaufentscheidung und Nutzung von SNF ist die spezifische Energieeffizienz der Fahrzeuge, da diese kombiniert mit den Energiepreisen die Energiekosten im Betrieb bestimmen. Die Effizienz wird ebenfalls zwischen den fünf Gewichtsklassen und den bis zu sechs relevanten Antriebsarten unterschieden. Dabei verbessert sich die Effizienz neuer SNF deutlich. In den beiden kleinen Gewichtsklassen liegt die Effizienzverbesserung bei etwa 9% von 2019 auf 2030 (siehe Abbildung 71). Beispielsweise weisen Diesel SNF in der Gewichtsklasse 7,5t bis 12t zGG einen Energiebedarf von 2,09 kWh/km in 2020 auf. Dieser sinkt um weitere 7% bis 2040, und nochmals um knapp 8% bis 2050 auf dann 1,64 kWh/km.⁸³



Quelle: M-Five, Anlehnung an Wietschel et al. (2017), eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 71 Entwicklung der Effizienz neuer SNF in kleinen Gewichtsklassen

Die Entwicklung der Energieeffizienz für SNF in den schweren Gewichtsklassen ist in Abbildung 72 dargestellt. Diese Gewichtsklassen fallen unter die Regulierung der CO₂-Standards für 2030. Daher wird zur Einhaltung der Standards von einer größeren Verbesserung der Energieeffizienz bei Diesel und Gas-LKW in diesen Gewichtsklassen ausgegangen. Diese erreicht bei Diesel SNF 18% von 2019 bis 2030 und bei Gas-SNF 20%, da die Technologie noch einen geringeren Reifegrad hat als der Dieselantrieb. Auch hier verbleiben mit dem Instrumenten-Set aus REF-2050 Neuzulassungen von Verbrennern bis 2050. Deren Energieeffizienz verbessert sich nochmals um jeweils 8% in den beiden Dekaden nach 2030. Der Energieverbrauch einer Diesel-SZM sinkt somit von 2,8 kWh/km im Jahr 2030 auf 2,36 kWh/km in 2050.

⁸³ In REF-2050 gelten noch die CO₂-Standards der Regulierung ohne Verschärfung nach 2030 (VO 2019/1242). Deswegen werden auch bis 2050 noch weiter Diesel-SNF zugelassen.

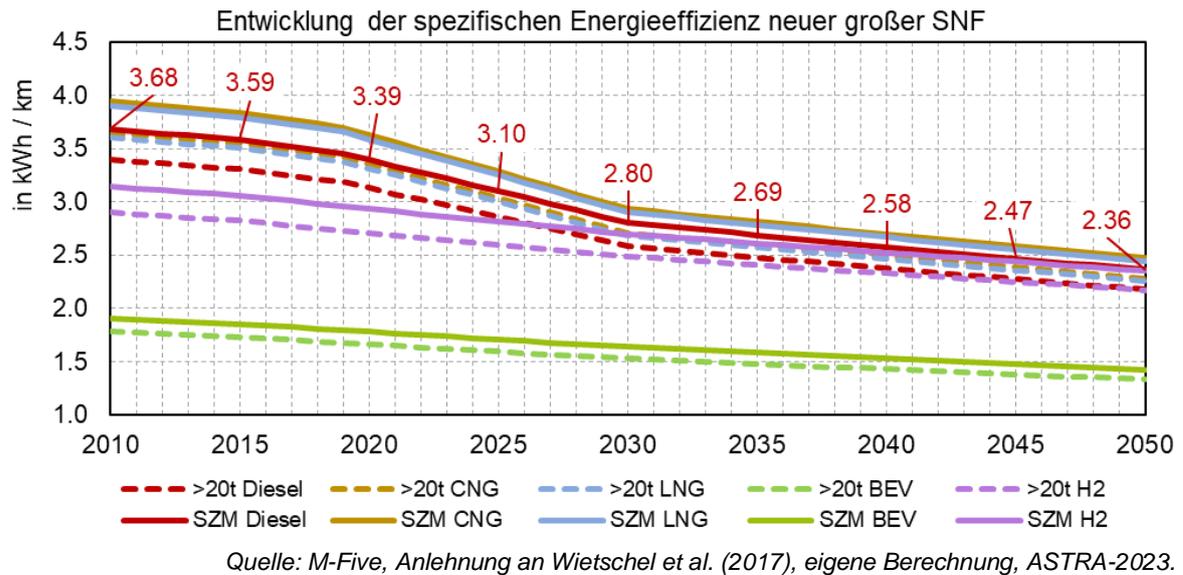
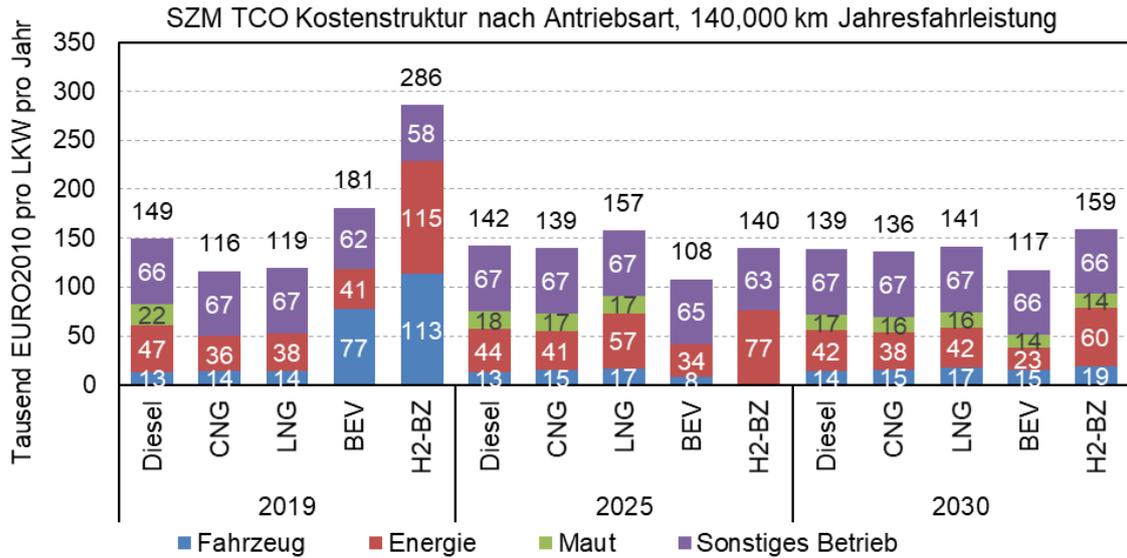


Abbildung 72 Entwicklung der Effizienz neuer SNF in großen Gewichtsklassen

8.2.4 Gesamtbetriebskosten von SNF (TCO)

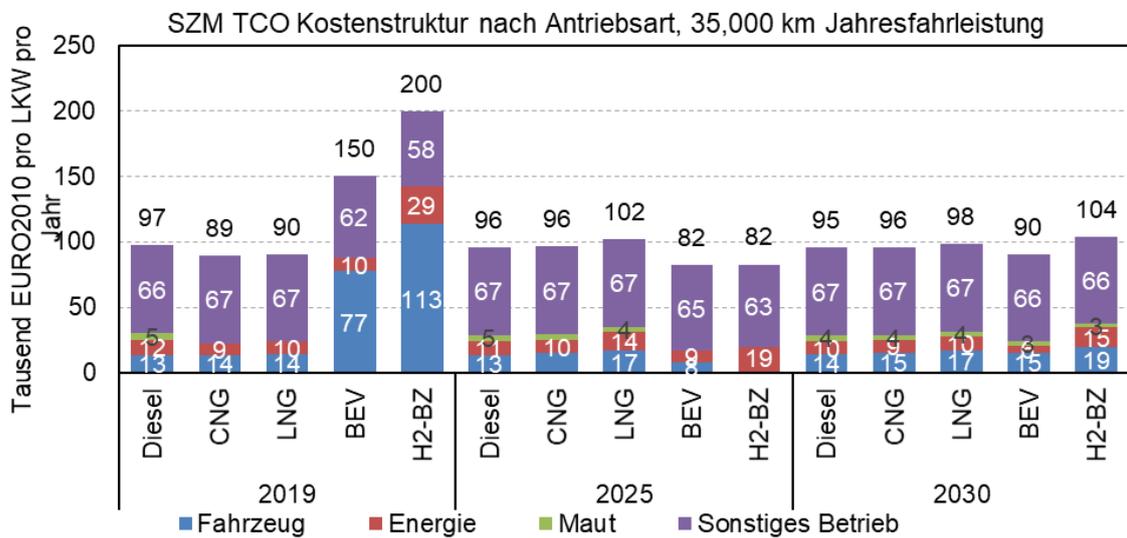
In die Gesamtbetriebskosten gehen neben den Anschaffungspreisen (siehe Kapitel 8.2.1) auch die Abschreibungs- oder Haltedauern, die Restwerte und die variablen Kosten, hier (insbesondere Energie- und Mautkosten) ein. Die übrigen Kosten sind für die Darstellung in Abbildung 73 als „sonstige Betriebskosten“ zusammengefasst. Deutlich wird, dass im Jahr 2019 die Gas-SZM durch Förderung und Mautbefreiung bei hohen Jahresfahrleistungen von 140 000 km einen Gesamtkostenvorteil gegenüber Diesel aufwiesen. Dadurch wurden starke Anreize gesetzt in die neue Technologie der gasbetriebenen SNF trotz geringer Abdeckung mit Tankstellen einzusteigen. Mit Wegfall der Mautbefreiung und dem Anstieg der Gaspreise gilt dies in 2025 nicht mehr. Zu diesem Zeitpunkt liegen in REF-2050 die in diesem Jahr noch mautbefreiten und mit 80% Förderung des Mehrpreises versehenen BEV-SZM am günstigsten. Im Jahr 2030 rücken Diesel und Gas-SZM noch näher zusammen. BEV-SZM bewahren bei hohen Jahresfahrleistungen ihren Kostenvorsprung auch ohne Förderung und vollständige Mautbefreiung.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 73 Gesamtbetriebskosten von Sattelzugmaschinen bei hohen Jahresfahrleistungen im Vergleich

Bei geringen Jahresfahrleistungen (in Abbildung 74 z.B. 35 000 km p.a.) wirkt sich der niedrigere Anschaffungspreis von Diesel-SNF wieder stärker aus und die TCO-Kosten der verschiedenen Antriebsarten rücken näher zusammen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 74 Gesamtbetriebskosten von Sattelzugmaschinen bei niedrigen Jahresfahrleistungen im Vergleich

Als Fahrzeugpreise gehen in die obigen TCO-Berechnungen die Kaufpreise abzüglich des Restwertes ein. Für geförderte SNF wird noch die Fördersumme vom Kaufpreis abgezogen. Die Preis-Differenz wird auf die Haltedauer des SNF umgelegt, die zwischen drei Jahren

bei SZM und sechs Jahren bei kleinen SNF liegt. Die Entwicklung der Restwerte orientiert sich an Angaben aus der Logistikbranche für eine Haltedauer von vier Jahren (Tabelle 26).

Tabelle 26 Prozentuale Restwerte nach 4 Jahren für SNF-Kostenkalkulationen

Gewichtsklasse	Anteil Restwert am Kaufpreis nach 4 Jahren
>3,5 bis 7,5 t zGG	41,6%
>7,5 bis 12 t zGG	41,6%
>12 bis 20 t zGG	46,7%
>20 t zGG	46,7%
Sattelzugmaschine	44,0%

Quelle: BGL (2015).

Restwerte orientieren sich normalerweise an den aufgerufenen Kaufpreisen, d.h. z.B. im Falle einer im Jahr 2023 gekauften 500 000 €₂₀₁₀ teuren Sattelzugmaschine mit Wasserstoffbrennstoffzellenantrieb (H₂-BZ-SZM) läge der Restwert nach vier Nutzungsjahren bei 220 000 €₂₀₁₀. Die 80%-Förderung des Mehrpreises gegenüber einer vergleichbaren Diesel-SZM von 90 000 €₂₀₁₀ führt zu einer Förderhöhe von 328 000 €₂₀₁₀ und einem vom Käufer zu tragenden Kaufpreis von 172 000 €₂₀₁₀. D.h. mit dem branchenüblichen kalkulatorischen Vorgehen liegt der Restwert über dem Kaufpreis nach Förderung. Für diesen Fall wurden die Fahrzeugkosten in der Modellierung auf null gesetzt. Deshalb ergeben sich in Abbildung 73 und Abbildung 74 die Fahrzeugkosten für H₂-BZ-SZM mit 0 €.

Tatsächlich ist der Restwert für neue Technologien schwierig zu kalkulieren. Geht man davon aus, dass auch die H₂-BZ-SZM zum Ende der Haltedauer noch einsatzbereit ist und damit einen positiven Restwert aufweist, wäre ein plausibles alternatives Vorgehen, den Restwert einer vergleichbaren Diesel-SZM (etwa 40 000 €₂₀₁₀) für die Kalkulation des Käufers anzusetzen. Mit dieser Annahme wurde das SNF-Modell in REF-2050 ebenfalls simuliert. Das Ergebnis zeigt eine geringfügig verringerte Elektrifizierung (etwa 600 Diesel SNF mehr in der Flotte). Die Verringerung der H₂-BZ-SZM bei dieser Sensitivitätsrechnung wird vor allem durch einen 4-stelligen Zuwachs bei Neuzulassungen von BEV-SZM ausgeglichen, so dass die Elektrifizierung der SNF auf vergleichbarem Niveau liegt. Deswegen wurde für REF-2050 mit der Modellierung der kalkulatorischen Restwerte einschließlich der entfallenden Fahrzeugkosten bei H₂-BZ-SNF fortgefahren. Damit erscheinen die Zahlen elektrifizierter SNF plausibel, aber der Anteil an H₂-BZ-SNF dürfte überschätzt werden, weil ein Teil der Käufer mit niedrigeren Restwerten als den sich kalkulatorisch ergebenden ihre Kaufentscheidung treffen wird.

Weitere Parameter zur TCO-Berechnung sind in Tabelle 27 und Tabelle 28 dargestellt. Für jede Gewichtsklasse werden die Neuzulassungen in fünf Nutzungsszenarien differenziert, die sich zunächst durch ihre geplante Jahresfahrleistung unterscheiden. Dabei steigen die geplanten Jahresfahrleistungen mit der Gewichtsklasse der SNF. Die Nutzungsszenarien

mit den höchsten Jahresfahrleistungen sind für die schwersten Klassen über 20t zGG und Sattelzugmaschine (SZM) hinterlegt (Tabelle 27).

Tabelle 27 Parameter für die TCO-Berechnung: Jahresfahrleistung nach Gewichtsklasse

Jahresfahrleistung [in km pro Jahr]	3,5 bis 7,5t zGG	7,5 bis 12t zGG	12 bis 20t zGG	über 20t zGG	Sattelzug- maschine
sehr kurz	10 000	12 000	25 000	25 000	35 000
kurz	15 000	17 000	35 000	40 000	55 000
mittel	20 000	25 000	45 000	60 000	80 000
lang	30 000	37 000	60 000	85 000	100 000
ganz lang	40 000	50 000	75 000	120 000	140 000

Quelle: M-Five, in Anlehnung an BAST (2017a), ASTRA-2023.

Die Verteilung der Nachfrage auf die verschiedenen Nutzungsszenarien ist in Tabelle 28 angegeben. In der Tendenz liegen bei kleineren Gewichtsklassen größere Anteile bei kurzen und mittleren Jahresfahrleistungen und bei schweren Gewichtsklassen in den Nutzungsszenarien mit größeren Jahresfahrleistungen.

Tabelle 28 Parameter für die TCO-Berechnung: Anteile der Nutzungsszenarien

Fahrzeugbesatz je Distanzklasse [%]	3,5 bis 7,5t zGG	7,5 bis 12t zGG	12 bis 20t zGG	über 20t zGG	Sattelzug- maschine
sehr kurz	19%	15%	15%	18%	13%
kurz	21%	20%	20%	16%	20%
mittel	22%	25%	25%	24%	22%
lang	20%	25%	25%	25%	28%
ganz lang	18%	15%	15%	17%	17%

Quelle: M-Five, in Anlehnung an BAST (2017a), ASTRA-2023.

8.3 Änderungen in der Modellierung zu REF-2020

In REF-2050 wird von einem vorausseilenden Hochlauf der Ladeinfrastruktur auch für BEV-SNF ausgegangen, wie er im Masterplan Ladeinfrastruktur II angelegt ist. Verzögerungen beim Aufbau der öffentlichen Hochleistungs-Ladeinfrastruktur führen direkt zu Verzögerungen des Hochlaufs der E-LKW. Diese Abhängigkeit des Hochlaufs elektrifizierter SNF vom bedarfsgerechten Aufbau von Lade- und Tankinfrastruktur aus REF-2020 wird in der Modellierung von REF-2050 aufgegeben.

Am Beispiel des Aufbaus der LNG-Tankstellen hat sich gezeigt, dass bei Erwartung eines Marktes der Aus- und Aufbau eines Netzes von Tankstellen zügig erfolgen kann. Dies erwarten wir auch für den Aufbau von BEV-SNF-tauglichen Ladeinfrastrukturen in Betrieben

und im öffentlichen Bereich, trotz diverser Hindernisse insbesondere bei der Netzanbindung und Flächenbereitstellung für große Ladeparks.

Außerdem wurden für REF-2050 die Fahrzeugkosten aktualisiert und das Wechselspiel zwischen dem Logit-Ast und dem TCO-Ast des Kaufentscheidungsmodells verfeinert, so dass zunächst bei größeren Unsicherheiten über die neue Technologie oder die Restwerte die Logit-Entscheidung größere Anteile der Kaufentscheidungen erfasst (bis zu 100%), und, je mehr die elektrifizierten Technologien sich etablieren und die Kosten sich dem Diesel nähern, die TCO-basierte Entscheidung an Gewicht im Kaufprozess gewinnt.

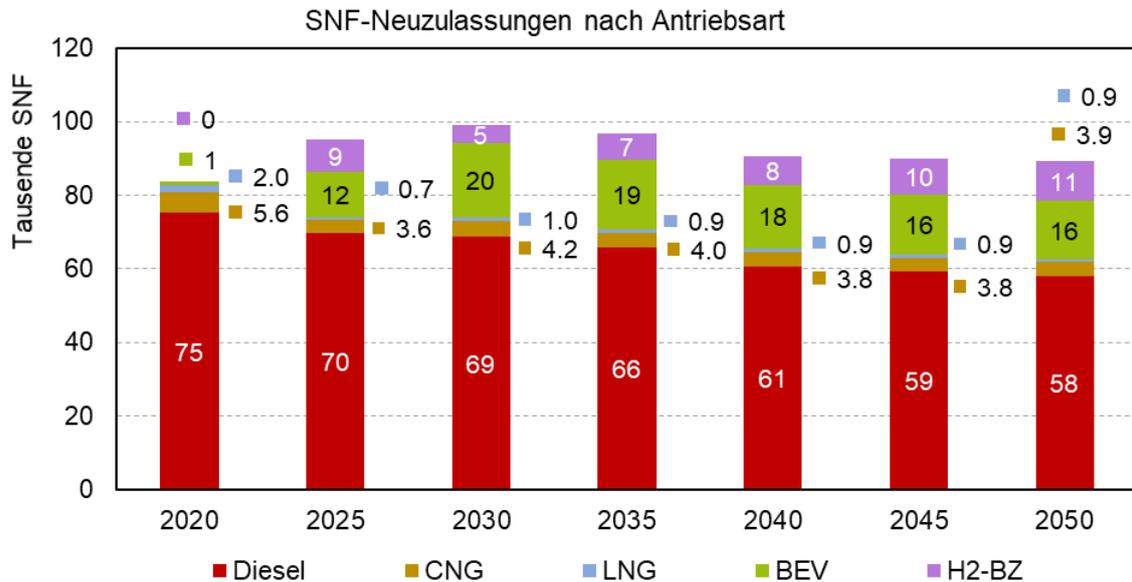
8.4 Entwicklung der SNF-Flotte

8.4.1 Neuzulassungen von SNF

Bis 2025 erholt sich der Markt der SNF wieder von der Corona-Krise und dem Einbruch durch den Russland-Ukraine-Krieg. Sind zu Beginn der 2020er Jahre noch fast alle Neuzulassungen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, einschließlich einer vierstelligen Zahl von gasbetriebenen Neuzulassungen, so weisen insbesondere die Jahre 2024 und 2025 durch Mautbefreiung und 80%-Förderung der Mehrkosten bereits substantielle Anteile an BEV- und auch H2-Brennstoffzellen SNF auf (siehe Abbildung 75). Letztere gehen in REF-2050 ab 2026 mit dem Auslaufen von Förderung und Mautbefreiung allerdings wieder zurück.

Das Jahr 2025 stellt eine singuläre Konstellation für elektrifizierte SNF in REF-2050 dar. Fahrzeugpreise und Verfügbarkeit sind spürbar verbessert. Gleichzeitig gilt noch die vollständige Mautbefreiung und die 80% Förderung der Mehrpreise wird gewährt. Dadurch liegen insbesondere die Zulassungen von H2-BZ-SNF deutlich höher als in Folgejahren.⁸⁴

⁸⁴ Dies liegt auch an der modellierten Restwert-Erwartung. Erläuterungen zur Bedeutung der Restwerte sind in Kapitel 8.2.4 aufgeführt.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 75 Neuzulassungen von SNF nach Antriebsart

Die in REF-2050 geltenden CO₂-Standards für SNF (EU VO 2019/1242) schreiben EU-weit einen Zielwert von -30% gegenüber 2019 vor. Der Wert ist für festgelegte LKW-Kategorien mit über 16t zGG zu erreichen.⁸⁵ In ASTRA-M werden diese Kategorien angenähert durch die drei höheren Gewichtsklassen (>12t bis 20t zGG, über 20t zGG, SZM). Die Neuzulassungen in Deutschland für diese drei Klassen erreichen eine Reduktion des Flottenmittelwertes von -32%. Auch der Zielwert von -15% im Jahr 2025 wird deutlich von den Zulassungen in Deutschland übertroffen. Das Ziel der CO₂-Standards für 2030 wird in Deutschland erreicht durch einen Anteil von über 13% elektrifizierten SNF bei den Neuzulassungen in den drei höheren Gewichtsklassen, sowie eine Effizienzverbesserung von knapp 19% bei Diesel-SNF, und über 20% bei den Gas-SNF. Der in REF-2050 gültige CO₂-Standard setzt keine ambitionierteren Zielwerte als -30% nach 2030 fest. Dadurch entstehen weitere Verschiebungen hin zu elektrifizierten Neuzulassungen nur marktgetrieben durch relativ gegenüber Verbrennern sinkende Fahrzeugpreise.

Etwa 26 000 elektrifizierte Neuzulassungen von SNF im Jahr 2030 wären vor wenigen Jahren noch als unglaublich erachtet worden. Mittlerweile gehen die Nutzfahrzeughersteller selbst von deutlich höheren Zulassungen an BEV- und H₂-BZ-SNF aus. Danach vereinigen diese beiden Antriebsarten im Jahr 2030 75% der Neuzulassungen über 12t zGG auf sich. Diesel-SNF gehen bis 2030 auf einen Anteil von 25% bei den Neuzulassungen zurück (siehe Abbildung 76). Dies geht aus sogenannten Cleanroom Gesprächen zu den Absatzerwartungen hervor, die die Hersteller einzeln mit dem BMDV bzw. dafür beauftragten Cleanroom-Gutachtern geführt haben (siehe dazu NOW, 2023).

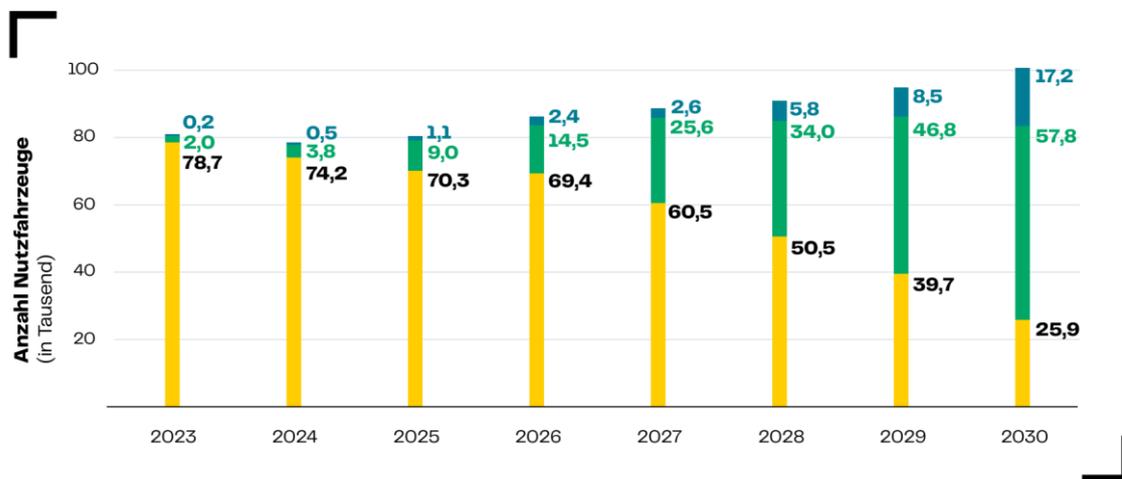
Diese Erwartungen der OEM sind nicht vor dem in REF-2050 gesetzten politischen Rahmen geäußert worden, sondern beziehen mutmaßlich das Ergreifen weiterer Instrumente in den

⁸⁵ Die betroffenen SNF-Kategorien sind festgelegt für die Modellierung des Energieverbrauchs mit dem VECTO-Modell als sogenannte VECTO-Klassen.

nächsten Jahren ein. Deswegen unterscheiden sich die Neuzulassungen in Abbildung 75 und Abbildung 76 deutlich. Als wichtigstes zukünftiges Instrument ist insbesondere die CO₂-differenzierte LKW-Maut zu nennen, die einen CO₂-Aufschlag für Verbrenner mit einem Abschlag bei der Infrastrukturmaut von Null-Emissions-SNF kombiniert. Weiter wird erwartet, dass die notwendige öffentliche und private Ladeinfrastruktur für BEV-SNF schnell genug aufgebaut wird bzw. werden kann und nicht zu einem Hemmnis für die Akzeptanz der BEV-SNF führt. Gleiches gilt für die Verfügbarkeit von H₂-Tankstellen für die Betankung von Wasserstoff-LKWs.

Prognostizierte Absatzzahlen schwerer Nutzfahrzeuge (N3/> 12 t)

In Deutschland laut Herstellerangaben



Hinweise zur Unsicherheit durch unvollständige Marktabdeckung:

- Angaben liegen nicht für alle Antriebsarten, Hersteller und Jahre vor.
- Für die zweite Hälfte des Jahrzehnts liegt die Rückmeldungsquote bezogen auf die aktuellen Marktanteile bei 95%.
- Für die fossilen Antriebe lag die Rückmeldungsquote bis 2025 zwischen 70% und 90%.

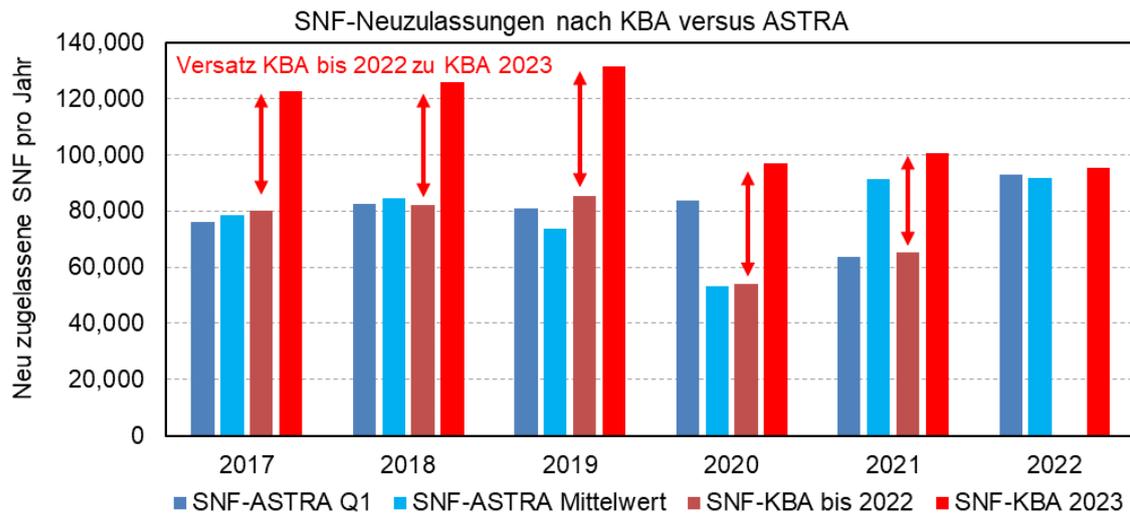
Zur besseren Lesbarkeit sind die niedrigen Absatzzahlen zu PHEV, H₂-Verbrennungsmotor und Erdgas (CNG/LNG) nicht aufgeführt.

■ H₂-Brennstoffzelle
■ Batterie
■ Diesel

Quelle: NOW (2023).

Abbildung 76 Absatzerwartungen der Nutzfahrzeughersteller zu elektrifizierten Nutzfahrzeugen bis 2030

Die Modellierung der Neuzulassung und der Bestandsflotte wird anhand von Daten des Kraftfahrtbundesamtes (KBA) kalibriert. Dabei wurde für die Jahre bis 2020 zunächst eine Datenlieferung des KBA genutzt. Diese Daten wurden durch aktuellere Statistiken bis 2022 ergänzt. Im Wesentlichen sind das für die Neuzulassungen die Serien FZ14 und FZ26. Die Serie FZ26 liefert die Neuzulassungen nach zulässiger Gesamtmasse (bzw. zGG), die auch für den Vergleich mit ASTRA Modellergebnissen herangezogen werden. Die Jahrgänge bis zum Zulassungsjahr 2021 wurden für die Kalibrierung des Modells genutzt. Abbildung 77 zeigt eine gute Übereinstimmung für die Phase 2017 bis 2021 mit den bis August veröffentlichten Zeitreihen der FZ26 mit etwa 80 000 SNF-Neuzulassungen in Jahren ohne Krise. Im September 2023 wurde die FZ26 für das Jahr 2022 veröffentlicht. Die historischen Daten weisen einen Versatz von etwa 40 000 SNF-Neuzulassungen aus (etwa 35 bis 40% Veränderung gegenüber früheren Statistiken). Unklar ist der Grund für diese Veränderung. Die bereits vollzogene Modellierung und Kalibrierung wurde daher auch nicht mehr überarbeitet.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023, KBA FZ26 (2020, 2022, 2023).

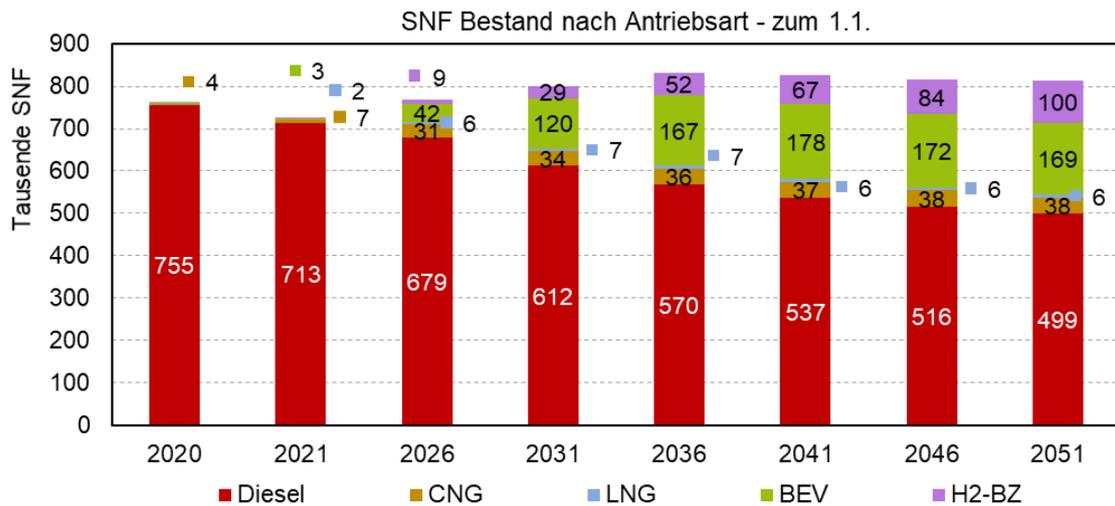
Abbildung 77 Vergleich KBA Daten zu SNF-Neuzulassungen mit ASTRA Modellierung

Abbildung 77 weist auf einen weiteren Aspekt der Modellierung hin. In ASTRA-M werden die Variablen in jedem Jahr für jedes Quartal berechnet. Als Jahreswert wird im Allgemeinen der Wert des ersten Quartals in diesem Bericht ausgewiesen. In den meisten Jahren unterscheiden sich die Quartalswerte nur geringfügig, so dass der Wert des ersten Quartals eine gute Annäherung für den Jahreswert darstellt. In Jahren mit besonderen unterjährigen Einflüssen, die zu starken Schrumpfs- oder Wachstumsprozessen führen, können aber doch größere Differenzen zwischen dem ersten Quartal und dem Jahreswert auftreten, und ein Mittelwert der vier Quartale (bei Flussgrößen auch ein kumulierter Wert) eine treffendere Quantifizierung leisten. Ein Beispiel sind die Neuzulassungen von SNF in ASTRA für das Jahr 2020. Im ersten Quartal wirkte sich die Corona-Krise noch nicht aus. Der Jahreswert der Neuzulassungen läge demnach bei etwa 80 000 SNF (blauer Balken). Tatsächlich brach die Zulassung in den drei übrigen Quartalen ein, so dass sich ein aus den Mittelwerten gebildeter Jahreszulassungswert von etwa 53 000 SNF Neuzulassungen ergab. Dieser ist konsistent mit der KBA-Statistik (FZ26) veröffentlicht bis 2022. Für die Darstellung der SNF-Neuzulassung in REF-2050 wurden die Werte des ersten Quartals genutzt (siehe Abbildung 75).

8.4.2 SNF-Bestandsflotte

Im Bestand schlägt sich die Elektrifizierung im Jahr 2025 nur geringfügig nieder und erreicht einen Anteil von knapp 4 %. Bis 2030 steigt der Anteil elektrifizierter SNF auf 16%. Dies entspricht etwa 125 000 E-SNF (siehe Abbildung 78, dargestellt jeweils am 1.1. und entspricht damit dem Bestand am Ende des Vorjahres). Die Anzahl an Diesel-SNF reduziert sich von 2020 bis 2030 um 18%. Bis 2040 sind es 29% weniger, und bis 2050 34%.

Am Bestand der SNF wird aufgrund der hohen Anzahl an Diesel-SNF deutlich, dass REF-2050 kein Szenario mit Erreichung des Zieles der Klima-Neutralität im Jahr 2045 ist. Die kontinuierliche Senkung der SNF-Kosten und –Preise führt zu einem steigenden Anteil bis 2050. Es fehlt aber ein instrumentierter Impuls, um vollelektrische SNF zur dominanten Antriebsart zu machen. Dies könnte über die entsprechende Setzung des CO₂-Standards nach 2030 sowie durch die Einführung und Ausgestaltung der CO₂-differenzierten LKW-Maut erfolgen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 78 Bestand an SNF nach Antriebsart, jeweils zum 1.1. des entsprechenden Jahres

8.4.3 Altersstruktur der SNF-Flotte

Die Kohortenmodellierung der Neuzulassungs- und Bestandsjahrgänge ermöglicht einen Blick auf die Struktur der SNF-Flotte nach Alter und Antriebsart. Abbildung 79 stellt exemplarisch die Struktur für das Jahr 2030 dar. In allen Jahrgängen dominiert der Diesel-Antrieb. Der kontinuierliche Anstieg der BEV-SNF ab etwa 2022 wird sichtbar, während die gasbetriebenen SNF auf niedrigem Niveau in etwa stabil verharren. Für H2-BZ-SNF ist die besondere Konstellation der Rahmenbedingungen und Instrumente im Jahr 2025 anhand der ab 2026 sichtbar werdenden Bestandszahlen gut erkennbar (siehe Kapitel 8.4.1).

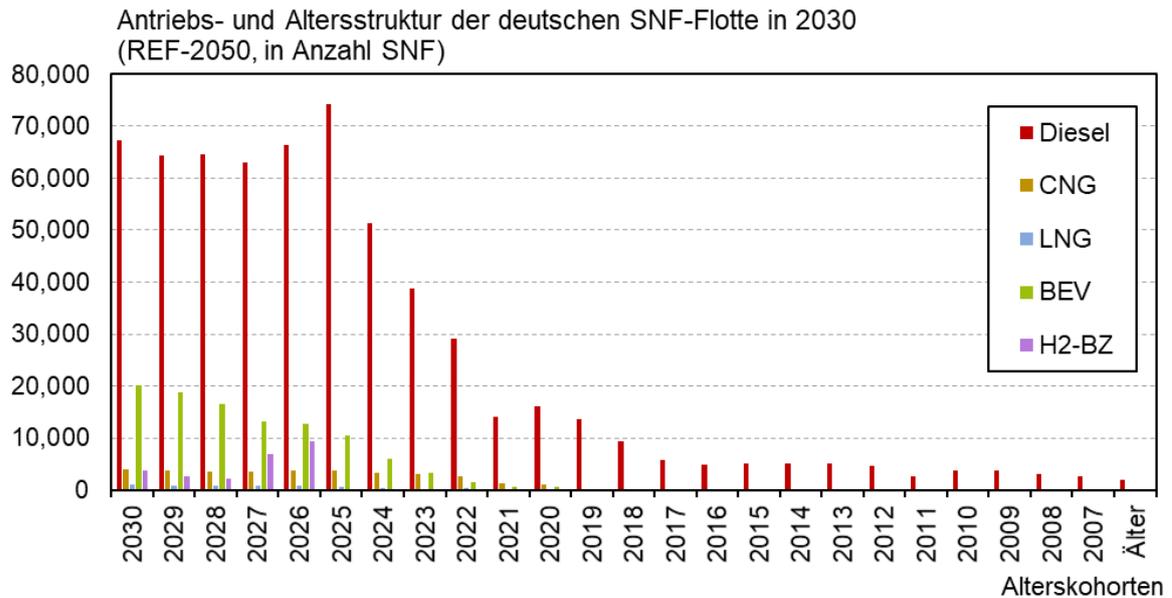


Abbildung 79 Aufteilung der SNF-Flotte im Jahr 2030 nach Alter und Antriebsarten

8.4.4 Durchschnittliche Effizienzentwicklung in der Flotte

In Kapitel 8.2.3 ist die Entwicklung der spezifischen Effizienz einzelner Neufahrzeuge dargestellt worden. Dieses Kapitel fasst die sich aus der Größen- und Altersstruktur ergebende Entwicklung der durchschnittlichen Energieeffizienz nach Antriebsarten zusammen. Den höchsten durchschnittlichen Energieverbrauch haben LNG-SNF. Dies liegt daran, dass diese nur in den beiden schwersten Gewichtsklassen angeboten werden und diese die höchsten spezifischen Verbräuche aufweisen. CNG-SNF werden zunehmend in kleineren Gewichtsklassen genutzt und sinken daher mit ihrer Effizienz unter die von Diesel-SNF. Diesel-SNF verbessern ihre Effizienz kontinuierlich und unterliegen geringen Veränderungen in der Verteilung auf die Gewichtsklassen. H₂-BZ-SNF verbessern ihre spezifische Effizienz und werden zunehmend auch in leichteren Gewichtsklassen attraktiv. Nach 2025 ist vorübergehend ein deutlicher Rückgang der H₂-BZ-SNF-Zulassungen in schweren Gewichtsklassen zu beobachten, welcher dazu führt, dass der Mittelwert der Effizienz durch den relativ höheren Anteil an leichten SNF-Zulassungen sinkt. Für BEV wird zwischen 2020 und 2025 die gegenteilige Entwicklung beobachtet: der Anteil der schweren Gewichtsklassen an den BEV-SNF-Neuzulassungen steigt und dadurch auch der durchschnittliche Energieverbrauch der BEV-Flotte.

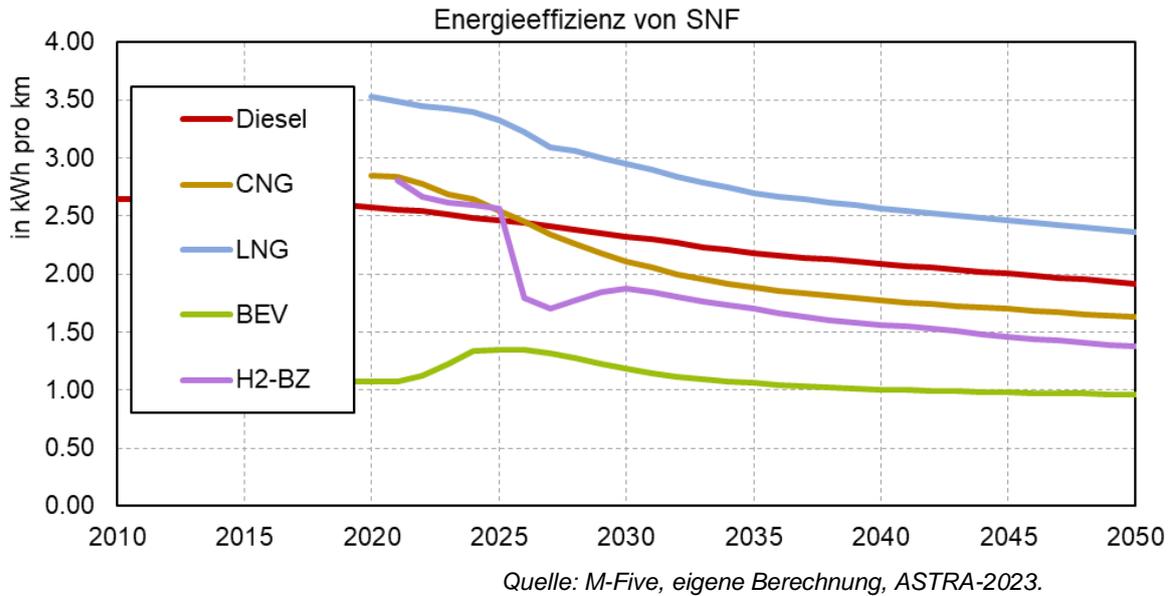


Abbildung 80 Entwicklung der Energieeffizienz der Antriebsarten in der SNF-Flotte

Setzt man den gesamten Endenergieverbrauch der LKW (LNF, und SNF) ins Verhältnis zu den gefahrenen Fahrzeug-Kilometern bzw. zu den transportierten Tonnen-Kilometern, so zeigt sich bis 2050 eine deutliche Verbesserung der Gesamt-Energieeffizienz um knapp 44% bezogen auf Fzg.-km und um knapp 42% bezogen auf den durchschnittlichen tkm (siehe Abbildung 81). Diese Effizienzverbesserungen liegen deutlich über den Verbesserungen der Verbrennertechnologie und resultieren insbesondere aus der Elektrifizierung aber auch aus der moderaten Verbesserung der Beladungsfaktoren und der Nutzung größerer Gefäße.

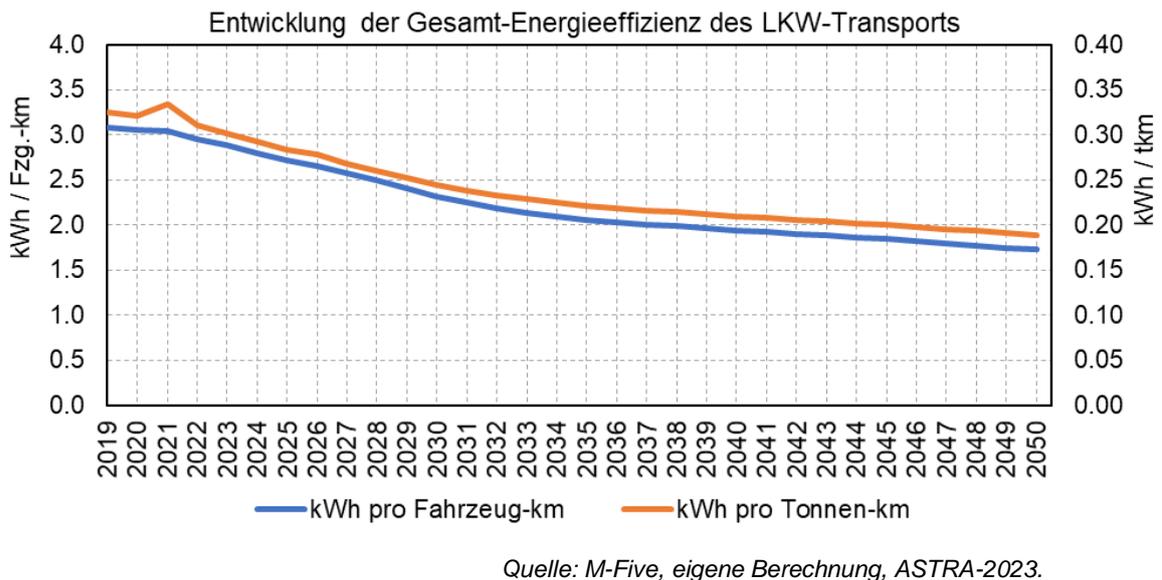


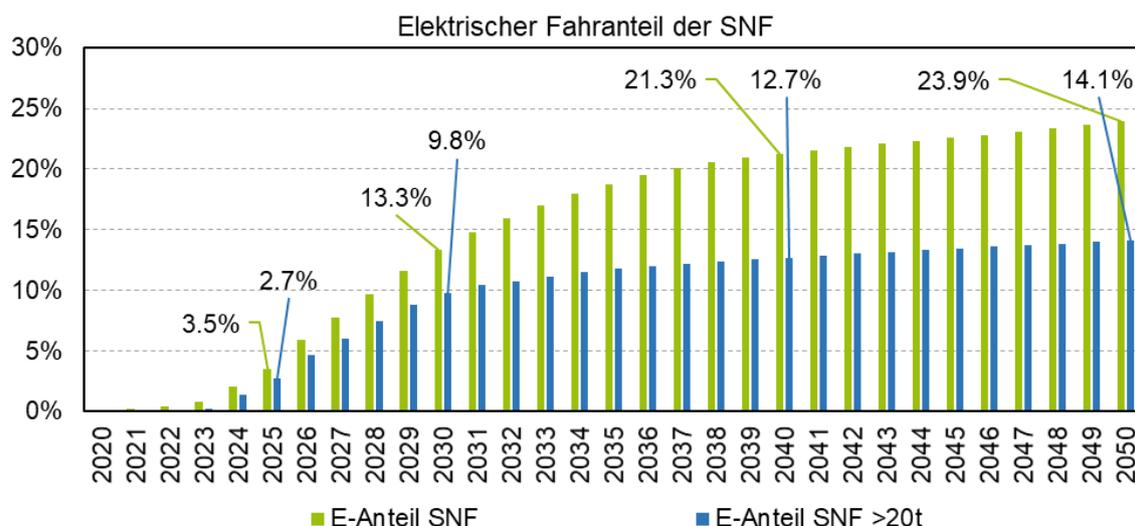
Abbildung 81 Entwicklung der Energieeffizienz des LKW-Transports

8.4.5 Elektrische Fahrleistung von SNF

Mit dem *Klimaschutzprogramm der Bundesregierung* von 2019 wird zum ersten Mal das nationale Ziel benannt, bis 2030 ein Drittel der Fahrleistung mit SNF elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe abzuwickeln (BReg 2019). Das Ziel wird konkretisiert im *Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge* des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastrukturen (BMVI, 2020), welches das Ziel, ein Drittel des SNF-Verkehrs zu elektrifizieren, mit einer Roadmap hinterlegt und bekräftigt. Gleichzeitig wird eine englische Fassung des Gesamtkonzeptes in die europäischen Abstimmungen eingebracht, auch im Hinblick auf die Möglichkeiten zur zukünftigen Ausgestaltung der LKW-Maut über die sogenannte Euro-Vignetten Richtlinie (z.B. um einen CO₂-Aufschlag erheben zu können). Weitere Schritte werden durch die NOW begleitet und über das Portal *Klimafreundliche Nutzfahrzeuge*⁸⁶ in die Branche kommuniziert sowie mit Fördermitteln für die Beschaffung von E-SNF und Ladeinfrastruktur hinterlegt.

Der kontinuierliche und konsistente Einsatz der Verkehrspolitik zur Erreichung des Zieles von einem Drittel elektrischer Fahrleistung im schweren Güterverkehr bis 2030 zeigt die hohe Bedeutung, die das Ziel für die Erreichung der Klimaziele im Verkehr hat.

Deswegen wird für REF-2050 geprüft wie weit die Zielerreichung unter den aktualisierten Rahmenbedingungen und mit der ergänzten Instrumentierung fortgeschritten ist. Abbildung 82 stellt die Entwicklung dar, differenziert nach allen SNF (>3,5 t zGG) und speziell für die Gewichtsklasse über 20t zGG. Mit einem Anteil von 13,1 % der elektrifizierten Fahrleistung kann etwa ein Drittel des Zieles mit den aktuellen Instrumenten erreicht werden. Die schweren Gewichtsklassen stellen mit den Rahmenbedingungen langsamer auf elektrischen Antrieb um und erreichen 9,7 % elektrifizierte Fahrleistung.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 82 Entwicklung des elektrischen Fahranteils von SNF

⁸⁶ NOW: <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/>

Die Verfehlung des Ziels in REF-2050 ist nicht so zu bewerten, dass das Ziel nicht zu erreichen wäre. Es bedarf aber weiterer Instrumente, die sich bereits im politischen Prozess der nationalen Umsetzung befinden, insbesondere der CO₂-differenzierten LKW-Maut mit Abschlägen bei der Infrastrukturmaut für Null-Emissions-LKW.

8.4.6 Einordnung von gasbetriebenen SNF

In den 2010er Jahren wurden zahlreiche Initiativen gestartet, um den Gasantrieb bei LKW auch im Hinblick auf erwartete Minderungen der THG-Emissionen stärker zu etablieren. Dazu gehörte die EU-Richtlinie zum *Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe* (AFID, EU RL 2014/94) und nationale Initiativen wie die von der DENA betreute LNG-Taskforce⁸⁷ oder die *Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr* des BMVI (2017) mit Fokus auf LNG- und Wasserstoff-Antriebe.

Auch wenn der Fokus der politischen Bemühungen heute auf dem Markthochlauf elektrifizierter SNF liegt (siehe Kapitel 8.4.5), haben die Initiativen des letzten Jahrzehnts ein Ergebnis gebracht und führten zur Etablierung von gasbetriebenen SNF zumindest in einer größeren Nische. In den letzten Jahren wurden regelmäßig eine niedrige 4-stellige Anzahl an CNG-SNF zugelassen.⁸⁸ Auch das Angebot an LNG-SNF hat sich etabliert, insbesondere auch in einzelnen Nachbarländern wie den Niederlanden.

Während in 2016 festgestellt wurde, dass zur Erfüllung der EU-Vorgaben in der AFID 6 LNG-Tankstellen in Deutschland aufgebaut werden müssen (BMVI/MKS 2016), und Ende 2020 knapp 50 LNG-Tankstellen in Betrieb waren, sind es in 2023 über 150 Tankstellen, die bisher fast ausschließlich fossiles LNG anbieten. An CNG-Tankstellen wird seit einigen Jahren teilweise 100%-Biogas angeboten und von SNF getankt.

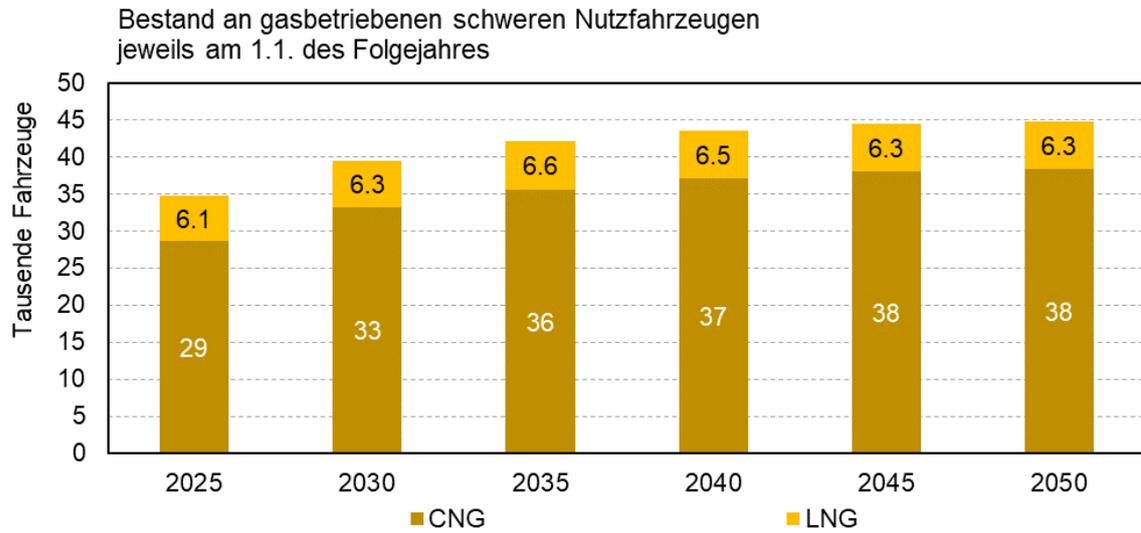
Für LNG plant und baut die Kraftstoffindustrie ebenfalls Kapazitäten in Deutschland auf, um über 10 000 bis 15 000 SNF mit Bio-LNG versorgen zu können. Diese Anlagen sollen zum Jahreswechsel 2023/2024 in Betrieb gehen und ein biogas-basiertes Angebot für LNG-SNF schaffen.⁸⁹

⁸⁷ DENA LNG Taskforce: <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet/>

⁸⁸ Das Kraftfahrtbundesamt (KBA, FZ14) weist für die Jahre 2020 und 2021 jeweils über Tausend Neuzulassungen von mit Druckerddgas (CNG) betriebenen Sattelzugmaschinen aus. Über die tatsächlichen Zulassungszahlen bestehen Unsicherheiten, weil die Zuordnung von CNG, LNG und bivalenten Antrieben nicht einheitlich erfolgte. Vermutlich liegen diese höher als ausgewiesen.

⁸⁹ Bio-LNG Produktion in Burghaun: <https://www.alternoil.de/n614-offizielle-genehmigungsuebergabe-fuer-die-reefuelery-de> . Bio-LNG Produktion im Rheinland: <https://www.shell.de/ueber-uns/newsroom/pressemittelungen-2022/shell-beginnt-mit-bau-der-groessten-bio-lng-anlage-deutschlands.html> . Bio-LNG Produktion in Güstrow: <https://www.envitec-biogas.de/infocenter/pressemeldungen/bioenergie-park-questrow-startet-in-die-inbetriebnahmephase> .

Vor diesem Hintergrund eines etablierten Fahrzeug- und Kraftstoff-Marktes mit wachsenden Kapazitäten an biogen-basierten Gasmengen erscheint uns der modellierte Hochlauf an Gas-SNF (siehe Abbildung 83) als wesentlicher Abnahmeweg von Biogas plausibel (ggf. sogar etwas zu moderat), insbesondere da dieser Weg auch die Erfüllung der Mindestquote an fortschrittlichen Biokraftstoffmengen in der THG-Quote (siehe Kapitel 4.7) bedient.



Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Abbildung 83 Entwicklung der gasbetriebenen SNF-Flotte

9 Referenzszenario der Bus-Flotte

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung der Bus-Flotte in ASTRA, die berücksichtigten Instrumente und deren Wirkung sowie die Entwicklung der Neuzulassungen und des Bestands differenziert nach Segment (Stadtbus, Reisebus) und Antriebsart.

Im Zuge der REF-2050 Modellierung wurde das Bus-Modell vertieft und bis zum Jahr 2050 verlängert. Dabei wurde auch für die Reisebusse eine Differenzierung der Antriebsarten eingeführt. Neue Instrumente wie die EU Clean Vehicles Directive (CVD) und deren nationale Umsetzung im Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeug-BeschG) sowie die Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr führen zu einem verstärkten Hochlauf an emissionsfreien Antriebsarten.

9.1 Übersicht über die Modellierung der Bus-Flotte

Die Basis der Modellierung bildet ein Kohortenmodell, welches die Altersstruktur der Fahrzeuge im Bestand detailliert abbildet. Die Busse werden dabei nach Alterskohorte, Emissionsnorm, Antriebstechnologie und Segment differenziert. Der Aufbau des Kohortenmodells folgt einem Bestands- und Flussgrößen-Modell, mit einem jährlichen Zufluss an Neuzulassungen sowie Abfluss an verschrotteten und aussortierten Fahrzeugen.

Die Anzahl der jährlichen Neuzulassungen ergibt sich dabei aus der endogenen Verkehrsnachfrage für den Verkehrsmodus Bus aus dem Personenverkehrsmodell. Anhand der jährlichen Fahrleistung der Busse wird damit die benötigte Anzahl an Fahrzeugen im Bestand für jedes Jahr berechnet. Diese wird dem vorhandenen Bestand abzüglich der im nächsten Jahr zu erwartenden Verschrottung gegenübergestellt. Übersteigt der Bedarf im nächsten Jahr den vorhandenen Bestand an Fahrzeugen, werden die notwendigen Busse neu zugelassen. Ist dies nicht der Fall, wird lediglich ein Teil der im nächsten Jahr verschrotteten Busse ersetzt. Im Bestand unterliegen die Fahrzeuge einem Alterungsprozess, in dem mit steigendem Fahrzeualter die Rate der Verschrottung steigt. Die Zuordnung der Emissionsnorm erfolgt anhand des Jahres der Neuzulassung. Ab dem Jahr 2014 werden ausschließlich Fahrzeuge der Euro 6-Norm neu zugelassen.

Die Fahrzeuge werden weiter anhand der fünf Antriebsarten Diesel, Hybride, komprimiertes Erdgas (CNG), Batteriebusse (BEV) und Brennstoffzellenbusse (FCEV) unterschieden. In den jeweiligen Segmenten werden Stadtbusse und Reisebusse getrennt voneinander betrachtet. Dabei hat das Segment einen großen Einfluss auf die Wahl der Antriebsart, da einerseits die Anforderungen wie beispielsweise die Fahrleistung pro Tag deutlich voneinander abweichen, und andererseits Politik-Instrumente Stadtbusse oft separat betrachten, während Reisebusse den schweren Nutzfahrzeugen zugeordnet werden. Die Validierung der Aufteilung nach Antriebsart und Segment erfolgt für die vergangenen Jahre bis 2022 anhand von DeStatis und KBA (DeStatis 2022, KBA 2023a). Der Anteil an Stadtbussen liegt bei ca. 66%.

Anders als die Modellierung der PKW, LNF und SNF erfolgt die Wahl der Antriebsart bei Bussen nicht anhand eines Logit- oder TCO-Kaufentscheidungsmodell, sondern anhand

von vorgegebenen, erwarteten und berechneten Anteilen der Antriebsarten an den Neuzulassungen. Dabei wird eine Erfüllung der Instrumente sowie eine vollständige Ausschöpfung der Fördersummen angenommen. Eine hohe Übererfüllung ist aufgrund der aktuell noch deutlich höheren Anschaffungskosten für emissionsfreie Fahrzeuge und deren Infrastruktur in den ersten Jahren nicht zu erwarten. Mit sinkenden Anschaffungskosten im Zeitverlauf und der jährlichen Prämie im Rahmen der THG-Quote können je nach Jahresfahrleistung TCO-Kostenvorteile realisiert werden. Damit ist dann von einer Verselbständigung des Hochlaufs emissionsfreier Fahrzeuge auszugehen.

9.2 Aktualisierung der Inputdaten

Zentral für den Hochlauf alternativer Antriebsarten sind die beiden Instrumente zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr und die Clean Vehicles Directive (CVD). Beide Instrumente adressieren die Linienbusflotte.

Die CVD gibt vor, wie viel Prozent der Neuzulassungen einen sauberen bzw. emissionsfreien Antrieb haben müssen. Im Zeitraum von 2021 bis 2025 sind 45% der Neuzulassungen mit sauberen Antriebsarten, und davon 22,5% mit emissionsfreien Antriebsarten, zu beschaffen. Im Zeitraum von 2026 bis 2030 erhöht sich diese Quote auf 65% bzw. 32,5%. Als emissionsfrei werden BEV und FCEV, als sauber zusätzlich CNG-betriebene Busse definiert. Aufgrund des bisher geringen Bestands an Gas-Bussen wird unter der CVD keine starke Zunahme der Gasflotte erwartet. Stattdessen wird von einer starken Erfüllung durch BEV, in geringen Mengen auch durch FCEV, ausgegangen.

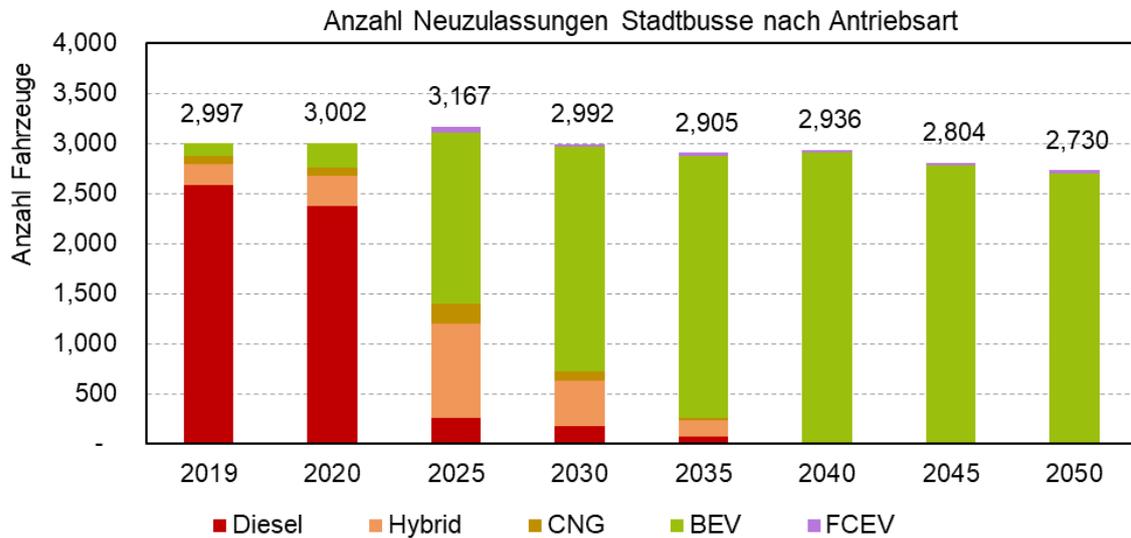
Hierbei spielt auch die anteilige Förderung der Mehrkosten eine zentrale Rolle. Die auf 1.846 Mio. € (UBA 2021) gedeckelte Fördersumme für den Zeitraum 2020-2024 wird vollständig abgerufen. Für die Erfüllung der CVD ist sie allerdings nicht ausreichend. Als Fördersumme für BEV, inklusive Ladeinfrastruktur, werden in 2022 404 000 €, für FCEV 526 000 € und für CNG 12 000 € pro Fahrzeug angenommen. Die Annahmen zu Anschaffungskosten je Antriebsart und deren Entwicklung im Zeitverlauf basieren auf PWC (2023), NOW (2021), IAA Transportation (2022) sowie Pressemitteilungen und eigenen Abschätzungen zur Entwicklung der Batteriepreise. Die Annahmen zu Infrastrukturkosten basieren auf Öko-Institut (2019).

9.3 Entwicklung der Bus-Neuzulassungen

Abbildung 84 und Abbildung 85 stellen die modellierten Entwicklungen der Neuzulassungen an Stadt- und Reisebussen nach Antriebsart bis 2050 dar.

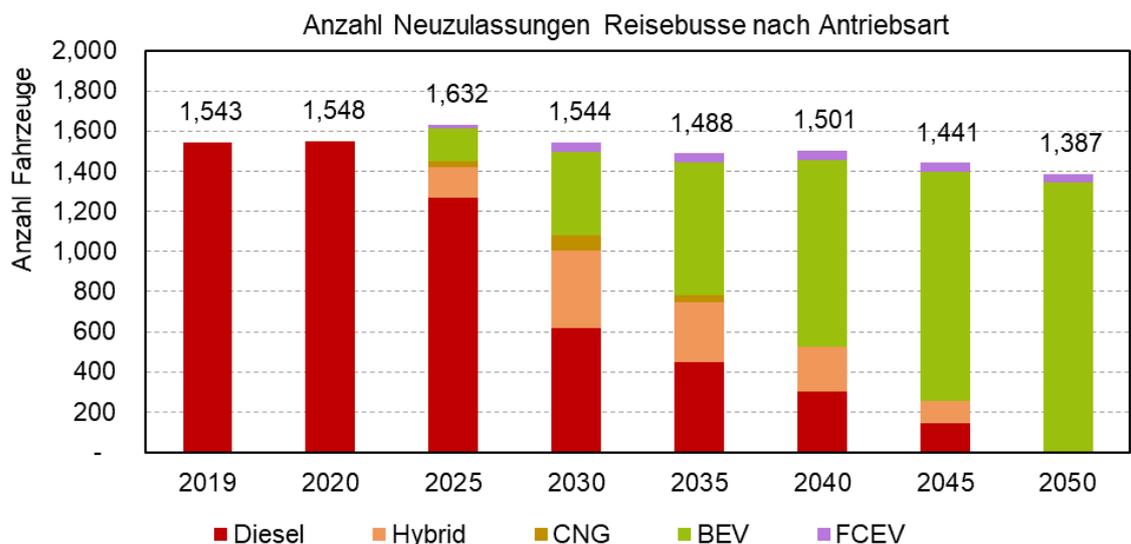
Im Segment der Stadtbusse ist eine deutlich höhere Rate der Elektrifizierung zu beobachten als im Segment der Reisebusse. Bereits im Jahr 2038 werden nur noch emissionsfreie Stadtbusse neu zugelassen. Darunter ein sehr geringer Anteil an FCEV. Bei Reisebussen ist ebenfalls eine Elektrifizierung der Neuzulassungen zu beobachten, allerdings in zeitlich stark verzögerter Entwicklung. Die Anzahl an Neuzulassungen steigt im Zeitraum bis 2030

zuerst leicht an und ist dann, angelehnt an die Personenverkehrsnachfrage nach Bussen, bis 2050 leicht rückläufig.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 84 Anzahl Neuzulassungen Stadtbusse nach Antriebsart



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

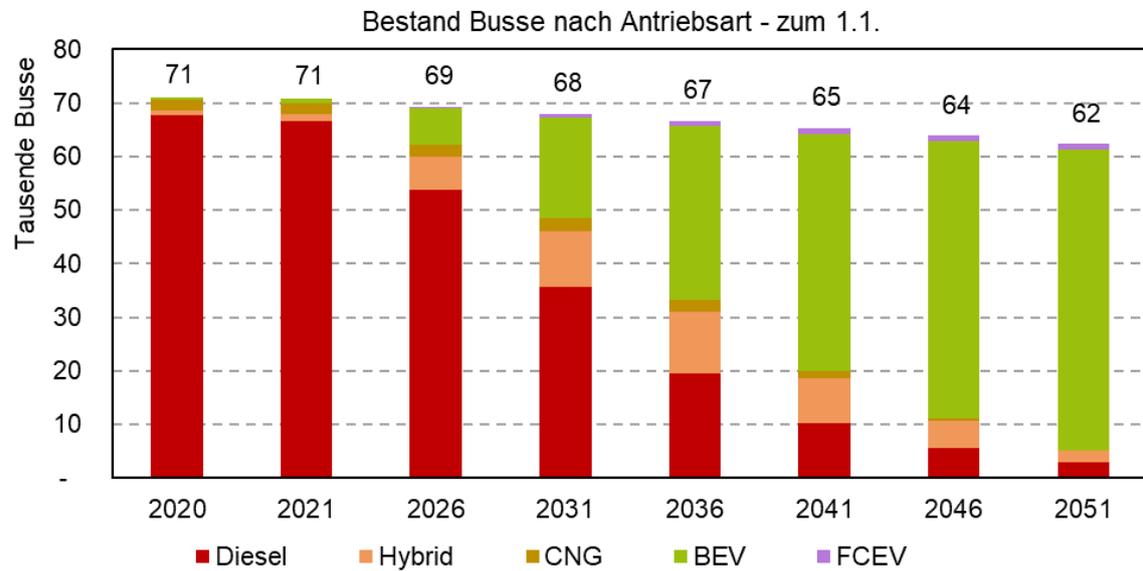
Abbildung 85 Anzahl Neuzulassungen Reisebusse nach Antriebsart

9.4 Entwicklung der Bus-Flotte

Aus den obigen Neuzulassungen ergibt sich der Gesamt-Bestand in Abbildung 86.

Die gesamte Bus-Flotte ist im Jahr 2030 zu knapp 30% elektrifiziert. In 2036 erreicht die Rate der Elektrifizierung 50%. Die Stadtbus-Flotte ist im Jahr 2030 zu knapp 40% elektrifiziert. Im Jahr 2033 erreicht die Rate 50%. Im Referenzszenario befinden sich auch im Jahr 2050 noch fossil betriebene Fahrzeuge im Bestand. Während weiterhin auch

Hybride im Bestand sichtbar sind, verlieren Gas-Busse an Bedeutung und verschwinden aus der Flotte.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 86 Bestand Busse nach Antriebsart

10 Aufbau der Energieinfrastruktur für Verkehr

Nachfolgend sollen sowohl die direkt erforderlichen Infrastrukturbedarfe (wie Ladestationen) als auch die Bedarfe an Infrastrukturen für die EE-Stromerzeugung für den Verkehrssektor überschlägig abgeschätzt werden. Dabei bestimmt jeweils die modellierte Flotte den Bedarf an Ladeinfrastruktur. D.h. hier wurde weder ein vorausseilender Aufbau der Infrastruktur, noch eine rückkoppelnde Einschränkung auf den Hochlauf der elektrifizierten Fahrzeuge unterstellt.

Damit soll dieses Kapitel keine systemische Modellierung ersetzen, in der Ladeinfrastruktur und das Energiesystem gekoppelt und detailliert simuliert werden, sondern einen Eindruck geben über die grobe Anzahl und Ladeleistung der Lade- und Erzeugungsinfrastruktur, die zukünftig für eine erfolgreiche Elektrifizierung im Verkehrssektor bereitzustellen ist.

Für die Investitions- und Vermeidungskostenrechnung des KSPr wurde bereits im Jahr 2019 eine Modellierung des Hochlaufs der Lade- und Tankinfrastruktur für alternativ angetriebene Straßenfahrzeuge in ASTRA-M implementiert. Diese wurde z.B. genutzt, um die notwendigen Förderbedarfe in das KSPr aufzunehmen.

Diese erste Modellierung der Energie-Infrastrukturen wurde weiter entwickelt in Schade et al. (2020) sowie in Schade et. al. (2022) weiterentwickelt und nun nochmals für die Modellierung in REF-2050 um eine Abschätzung der gesamten installierten Leistung der Ladestationen erweitert.

Das ‚Henne-Ei-Problem‘ ist in REF-2050 somit aufgelöst worden, indem die modellierten Flottenhochläufe (siehe Kapitel 6.4.1, 7.4, 8.4) die Mengen an benötigter Infrastruktur bestimmt haben. Dabei wird vernachlässigt, dass die Infrastruktur mit etwas Vorlauf geplant und aufgebaut werden muss. D.h. die dargestellten Hochläufe sollten in der Realisierung als um etwa ein Jahr vorzuziehen interpretiert werden.

10.1 Alternative Lade- und Betankungsinfrastruktur für PKW und LNF

Für PKW und LNF wird angenommen, dass die Lade- und Betankungsinfrastruktur in einem Maße ausgebaut wird, welches ausreicht, um mit den Erfordernissen der Flottenhochläufe Schritt zu halten und sich somit nicht begrenzend auf diese auswirkt. Es wird ferner davon ausgegangen, dass private Ladevorgänge den Großteil der Ladevorgänge bei PKW ausmachen, während LNF eher am Arbeitsplatz bzw. im Betriebshof geladen werden. Tabelle 29 beschreibt die Parameter zur Abschätzung des Bedarfs an Ladestationen bei PKW und LNF. Ab 2023 sinken die Parameter in Abhängigkeit vom Hochlauf der E-Mobilität und vom Ausstattungsgrad mit Ladestationen in Wohngebäuden, so dass im Jahr 2030 in REF-2050 noch 33% der BEV-Neuwagenkäufer eine neue Ladestation mit Drehstrom mit 7,5 kW (bis 11 kW) einbauen lassen (anstatt der 50% zu Beginn).

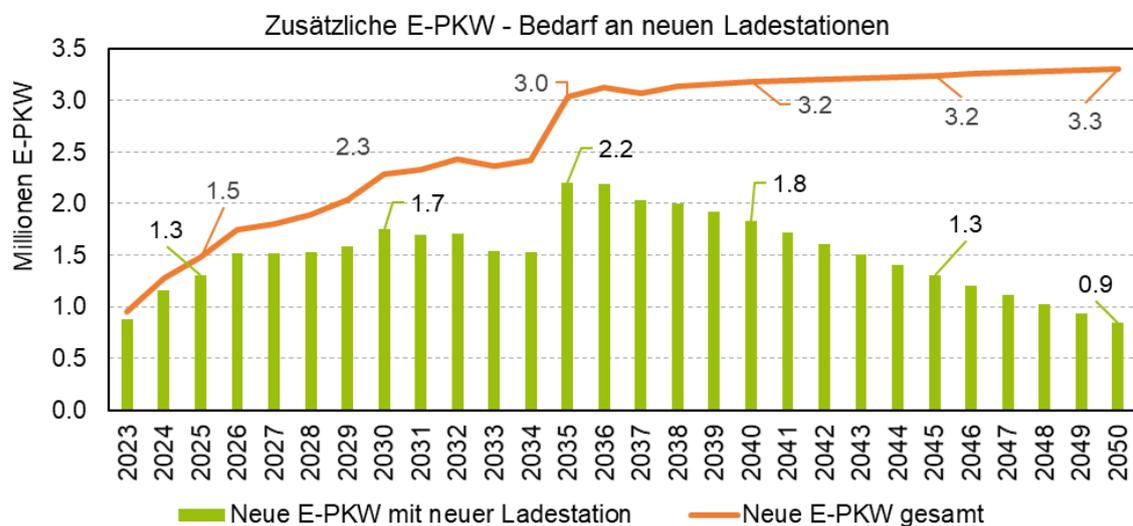
Tabelle 29 Start-Parameter für den Bedarf an Ladestationen bei PKW und LNF

Ladestationen je neuem Fahrzeug		PKW		LNF		Mittlere Zahl der Ladepunkte je Station
Standort	Stationstyp	PHEV	BEV	PHEV	BEV	
Haushalt**	3,7 kW	80%	50%	30%	30%	1.0
	7,5 kW	20%	50%	10%	20%	1.0
Arbeitsplatz	7,5 kW	4%	10%	50%	50%	1.5
	22 kW	3%	12%	50%	50%	2.0
Öffentlich	7,5 kW	3.0%	3.0%	1.0%	2.0%	1.5
	22 kW	2.0%	3.5%	1.0%	2.0%	2.0
	100 kW	0.02%	0.5%	0.2%	0.5%	2.0

** Angaben bilden Ausgangswerte, die mit steigenden Anteilen an bereits ausgestatteten Ein- und Zweifamilienhäusern verringert werden.

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Es wird zunächst angenommen, dass bei einem moderat-ambitionierten Hochlauf von E-PKW (wie in REF-2050 hinterlegt) jeder Haushalt mit einem elektrisch angetriebenen PKW eine Lademöglichkeit besitzt. Außerdem wird berücksichtigt, dass ein Teil der E-PKW als junge Gebrauchte exportiert wird und mit der Zeit auch ältere E-PKW ausgeflottet werden. Damit ergibt sich die Aufteilung zwischen E-PKW mit Aufbau zusätzlicher Ladestation (grün in Abbildung 87) und ohne Bedarf an Ausbau der Ladestationen.

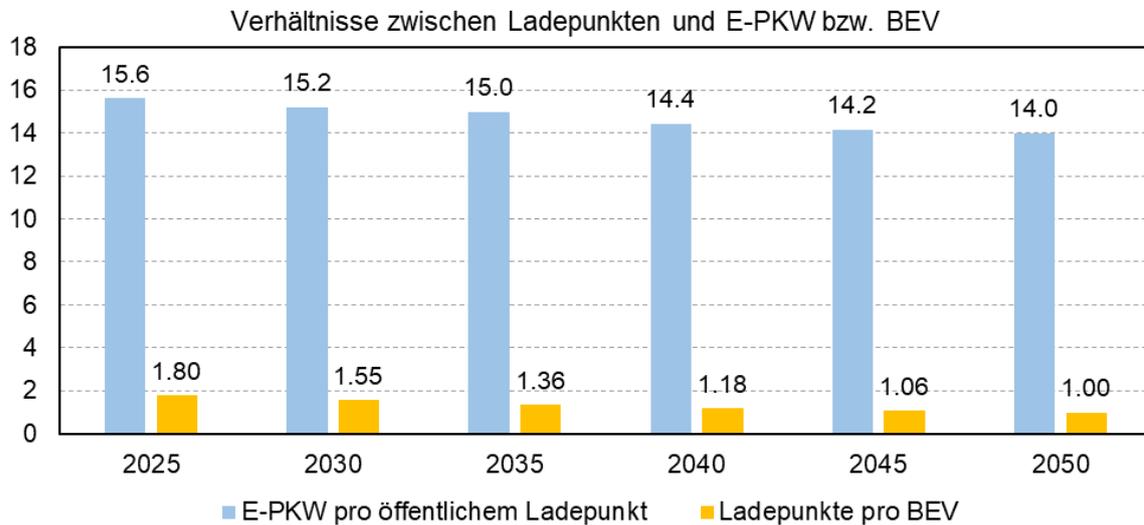


Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 87 Bedarf an Aufbau zusätzlicher Ladestationen.

Aus den Annahmen ergibt sich in REF-2050 ein Verhältnis von E-PKW zu öffentlichen Ladepunkten von 15,6:1 im Jahr 2025, 15,2:1 im Jahr 2030, 14,4:1 im Jahr 2040 und 14:1 im Jahr 2050. Der Aufbau von E-PKW zu öffentlicher Ladeinfrastruktur wird somit in den kommenden Jahren weitestgehend parallel vollzogen. Dagegen schrumpft das Verhältnis

der Ladepunkte insgesamt zur Anzahl BEV bis 2050 um fast die Hälfte (siehe Abbildung 88). Dies zeigt die abnehmende Bedeutung der privaten Ladeinfrastruktur zu Hause und die Zunahme der Bedeutung öffentlicher Lademöglichkeiten, die jeweils mehrere BEV-Nutzer versorgen und zunehmend mit höheren Ladeleistungen ausgestattet sind.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 88 Ausstattung mit Ladepunkten relativ zur Entwicklung des Fahrzeugbestandes.

Abbildung 89 gibt einen groben Überblick über den benötigten Hochlauf an Ladestationen und Ladepunkten für E-PKW. Ende 2030 besteht mit den dargestellten Annahmen ein Bedarf von etwa 430 000 öffentlichen Stationen für diese PKW. Die Stationen *Öffentlich 22+ kW* beinhalten auch Stationen mit bis zu 100 kW (also z.B. auch Stationen mit 50 kW). Am Arbeitsplatz sollten dann 1,23 Mio. Stationen verfügbar sein. Für die private Ladeinfrastruktur ergibt sich ein Bedarf von 9,7 Mio. Ladestationen bis Ende 2030. In den Folgejahren bis 2050 nimmt der Bedarf an Ladeinfrastruktur kontinuierlich zu. Diese geschieht unter-proportional zum Flottenhochlauf elektrischer PKW (siehe Kapitel 6.4.1) und unter Berücksichtigung des Exports junger E-PKW gemäß Tabelle 29.

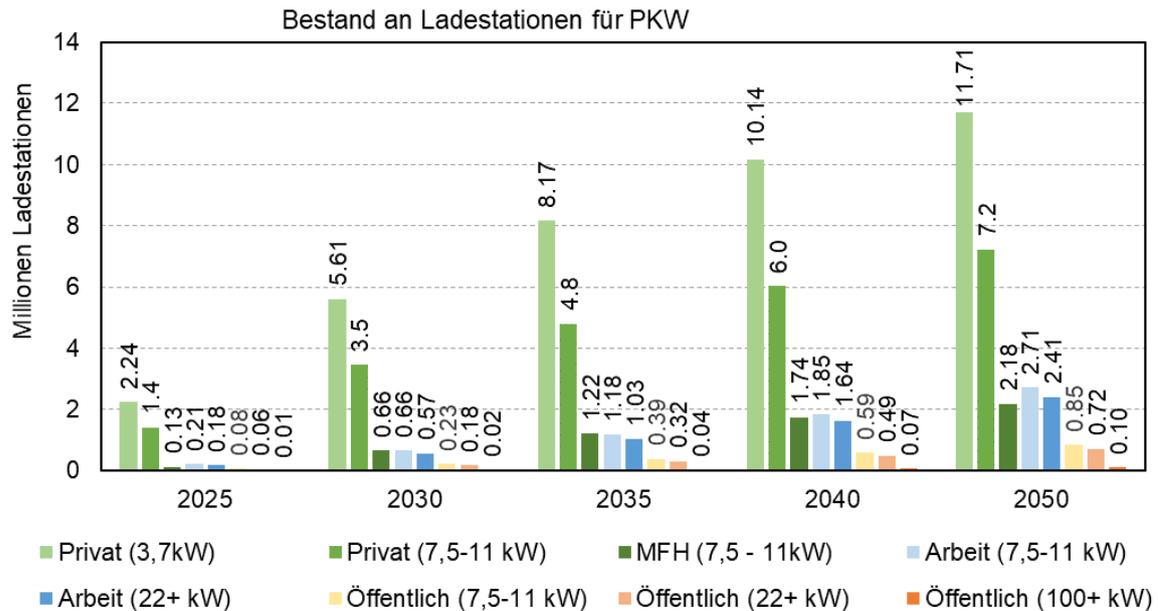
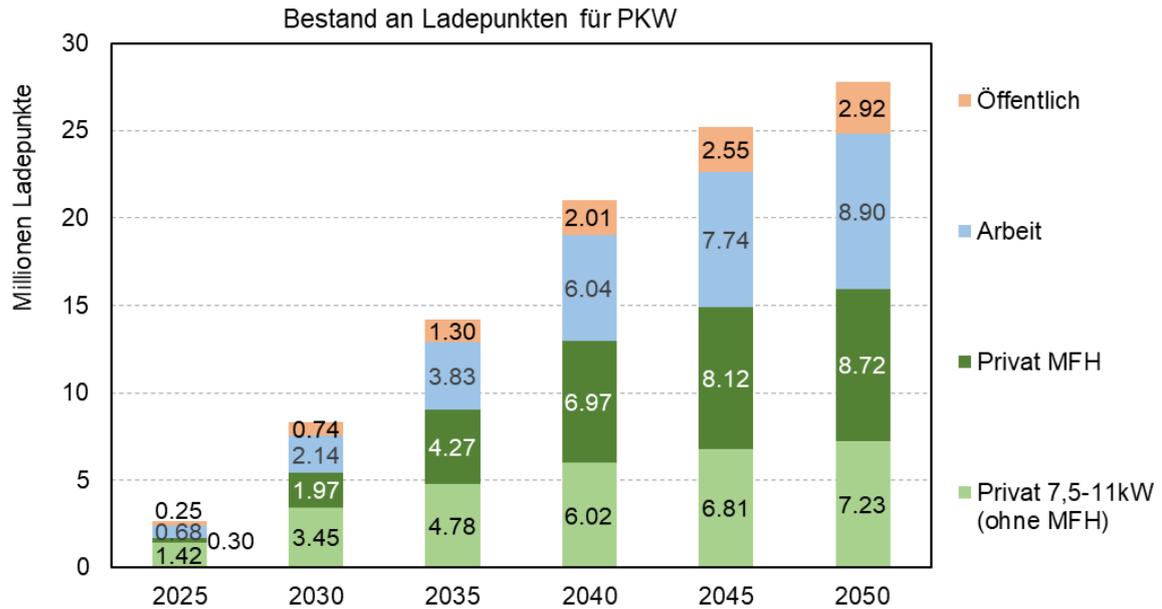


Abbildung 89 Bestand an PKW-Ladestationen in REF-2050

Die privaten Ladestationen weisen jeweils nur einen Ladepunkt auf. In Mehrfamilienhäuser werden zunächst zwei und bis 2040 vier Ladepunkte pro Ladestation installiert. An öffentlichen Ladestationen werden mindestens zwei Ladepunkte angeboten. Damit ergibt sich der in Abbildung 90 illustrativ dargestellte Hochlauf des Angebots an Ladepunkten. Dabei sind die mit Haushaltsstromanschluss (bis 3,7 kW) betriebenen Ladepunkte in der Darstellung weggelassen worden. Die Darstellung dient der Illustration. Je stärker der Hochlauf der E-Mobilität bei PKW und LNF erwartet bzw. wahrgenommen wird, desto ambitionierter wird der Ausbau der öffentlichen Ladestationen mit höherer Leistung (hier dargestellt als 100+ kW, tatsächlich auch immer stärker mit Stationen der Leistungsklasse 350 kW). Dadurch ist gegenüber der hier ausgestalteten illustrativen Darstellung eine Verringerung der Zahl der aufzubauenden Ladestationen in niedrigeren Leistungsklassen (7,5-11 kW, 22+ kW) zu erwarten.

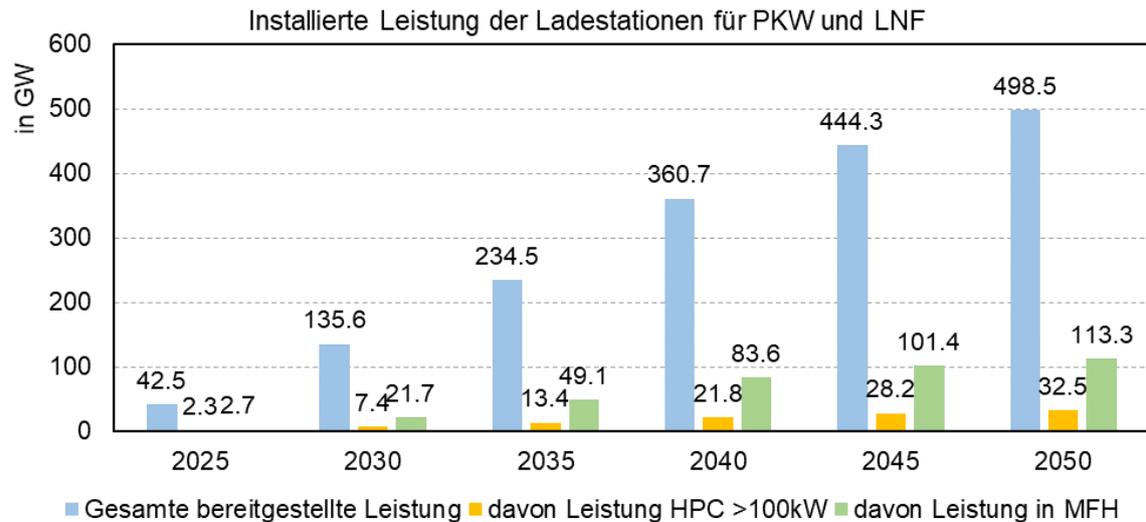
Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NLL, 2020) schätzt einen Ladeinfrastruktur-Bedarf im Jahr 2030 von 2,5 bis 2,7 Mio. Ladepunkten am Arbeitsplatz (REF-2050: 2,14 Mio.), von zwischen 5,4 und 8,7 Mio. privaten Ladepunkten (REF-2050: 5,4 Mio zzgl. einfacher Hausanschlüsse) und von zwischen 440 000 und 843 000 öffentlichen Ladepunkten (REF-2050: 740 000). Damit liegen die Schätzungen für private und öffentliche Ladepunkte in vergleichbaren Bereichen, während das Laden am Arbeitsplatz in REF-2050 eine geringere Nachfrage befriedigen kann. Allerdings wird der von der NLL erwartete E-PKW Hochlauf in REF-2050 erst Anfang 2034 erreicht. Für einen zur NLL vergleichbaren Hochlauf müssten die Parameter in Tabelle 29 abgesenkt bzw. die Sättigungsfunktionen in Reaktion auf bereits erreichte Gebäude-Ausstattungsgrade geschärft werden.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 90 Bestand an PKW-Ladepunkten in REF-2050

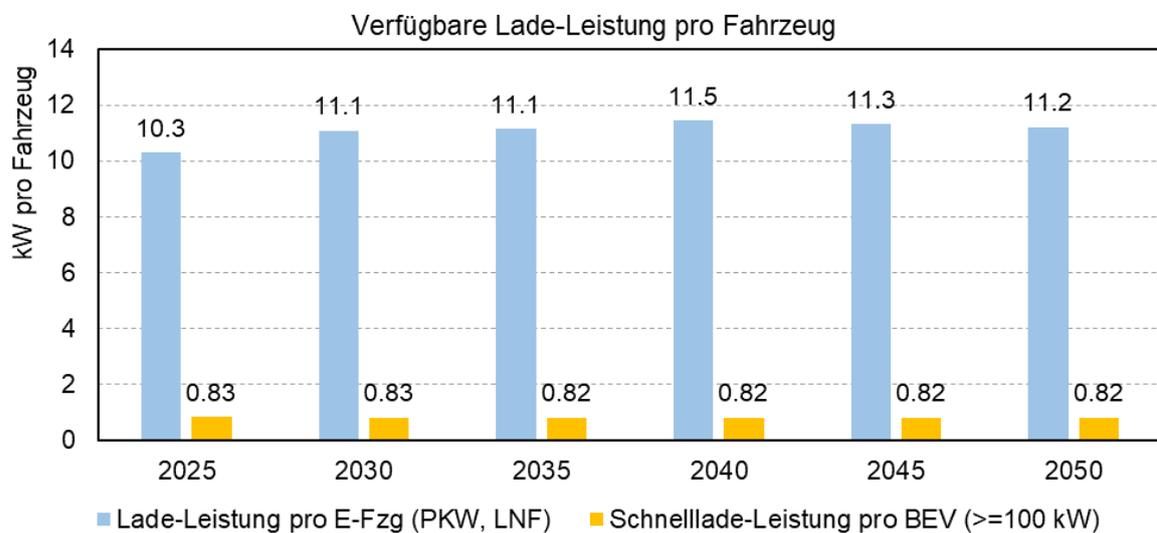
Abbildung 91 stellt die mit diesen Ladepunkten bereitgestellte Ladekapazität dar. Über die Zeit wächst die Bedeutung der Ausstattung von Mehrfamilienhäusern (MFH) mit Ladestationen. Im Jahr 2030 wird angenommen, dass 40% der aufgrund der Zulassung zusätzlicher E-PKW benötigten Ladepunkte im Bereich 7,5 – 11 kW in MFH installiert werden. Bis 2035 steigt dieser Wert auf 45% und fällt dann wieder ab, weil im Jahr 2039 bereits die Hälfte aller MFH mit Ladestationen ausgestattet ist. In 2030 verfügen bereits über die Hälfte aller Ein- und Zwei-Familienhäuser über eine Ladestation. Über ein Fünftel hat eine Ladestation mit 7,5-11kW Leistung einbauen lassen. Knapp ein Fünftel der MFH verfügen ebenfalls über eine Ladestation. Diese bieten insgesamt eine Ladekapazität von 21,7 GW an. Bis 2050 verstärkt sich die signifikante Bedeutung der Installation von Ladekapazitäten in MFH. Dort werden dann 113 GW erreicht. Die angebotene Ladekapazität im übrigen privaten Bereich liegt dann bei 93 GW. Am Arbeitsplatz werden bis 2050 über 137 GW an Ladekapazität aufgebaut.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 91 Kapazität der Ladestationen für PKW und LNF in REF-2050

Je E-Fahrzeug (PKW, LNF) liegt die verfügbare Ladeleistung etwa bei 11 kW. Das Verhältnis zwischen BEV und angebotener Schnellladeleistung liegt etwas über 0,8 kW pro Fahrzeug. Diese Werte haben sich in der verwendeten Parametrierung als relativ konstant erwiesen (siehe Abbildung 92).



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 92 Angebotene Ladekapazität im Verhältnis zur Zahl der Fahrzeuge.

Tabelle 30 zeigt die Investitionskosten für Ladeinfrastruktur zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Investitionskosten werden dynamisch unter Nutzung von Lernkurven in Abhängigkeit der Anzahl installierter Stationen berechnet.

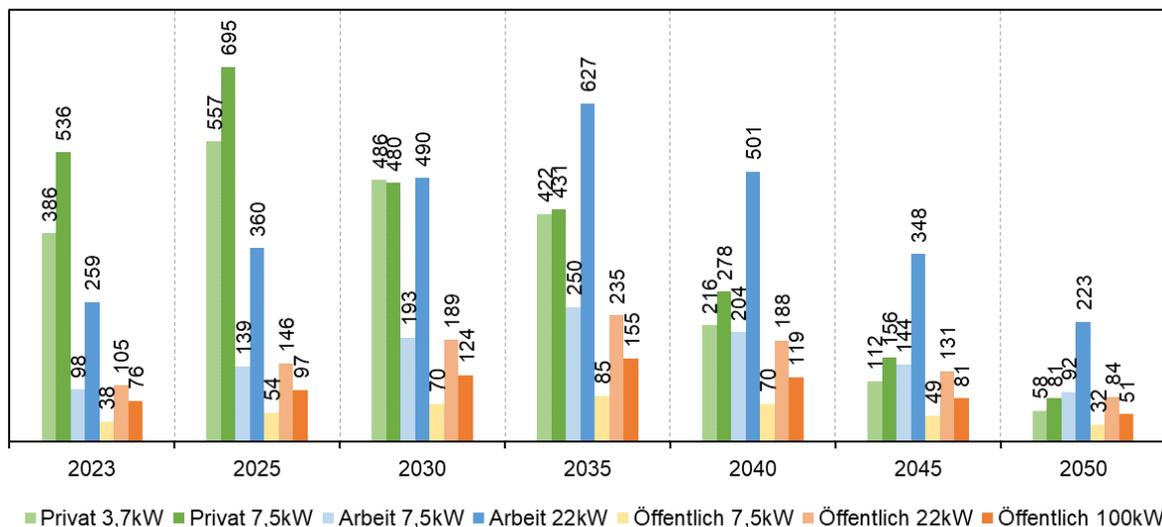
Tabelle 30 Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei PKW und LNF

Investition pro PKW/LNF Ladestation in EUR2010					
Standort	Stationstyp	2020	2030	2040	2050
Haushalt	3,7 kW	800	785	781	780
	7,5 kW	1 686	1 439	1 394	1 378
Arbeitsplatz	7,5 kW	2 060	1 758	1 704	1 685
	22 kW	6 638	5 014	4 645	4 516
Öffentlich	7,5 kW	2 341	1 998	1 937	1 914
	22 kW	8 534	6 447	5 972	5 806
	100+ kW	45 000	31 165	26 512	24 980

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Aufgrund des hohen Anteils an Erstkäufern unter allen Käufern von E-PKW, dem zu Beginn noch höheren Stückkosten und aufgrund der erst langsam ansteigenden E-PKW-Käufe von Nutzern ohne private Ladestation liegen die Investitionen in private Ladestationen im nächsten Jahrzehnt am höchsten (siehe Abbildung 93). Die Investition in Ladestationen am Arbeitsplatz steigt kontinuierlich mit dem Wachstum der Bestandsflotte und nimmt mit der Kostendegression der Anlagen (gerade für die privaten Investoren) wieder ab. Insgesamt entstehen bis 2050 Investitionskosten in Ladestationen von knapp 42,5 Mrd. €₂₀₁₀ ohne Berücksichtigung komplexerer Netzanbindungen z.B. an die Mittelspannung oder mögliche Verstärkungen in der letzten Meile des Stromnetzes.

Jährliche Investition in Ladestationen für PKW in REF-2050 nach Stations-Typ in Millionen EURO2010



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 93 Jährliche Investitionen in Ladestationen für E-PKW.

10.2 Lade- und Betankungsinfrastruktur für alternative SNF

Die relevanten Technologien für den Hochlauf alternativ angetriebener schwerer Nutzfahrzeuge (SNF) wurden in Kapitel 8 herausgearbeitet. Die Elektrifizierung erfolgt vorwiegend über vollelektrische SNF (BEV) in allen Gewichtsklassen sowie über SNF mit Wasserstoff-Brennstoffzelle (H₂-BZ). Dementsprechend wird für diese Technologien der notwendige Aufbau der zugehörigen Infrastruktur in diesem Kapitel dargestellt.

REF-2050 enthält keine Instrumente zum Aufbau der Pendelstrecken von 300 km Länge für Oberleitungs-SNF (O-LKW, einschließlich Hybrid-LKW). Daher werden nur zwei verfügbare Strecken mit bis zu 40 km Länge mittelfristig genutzt (bei Lübeck, bei Darmstadt-Frankfurt, die dritte Test-Strecke im Murgtal wird nach Abschluss der Testphase voraussichtlich nicht weiterbetrieben).

Als weitere Option werden gasbetriebene SNF genutzt. Dafür kommen CNG (Druckerdgas bei 200 bar) und LNG (Flüssigerdgas bei -163 °C) in Frage, die sowohl aus fossilem Ursprung oder aus Biogas erzeugt angeboten werden. Für beide Gasformen existiert in Deutschland ein Tankstellen-Netz, wobei das CNG-Tankstellen-Netz stärker auf Kapazitäten für PKW ausgerichtet ist, so dass einige Akteure eigene Netze zur Betankung von SNF mit Bio-CNG aufbauen.⁹⁰

Der Hochlauf der Ladeinfrastruktur für BEV-SNF wird anhand des Bedarfs eines BEVs an Ladestationen abgeschätzt. Es werden vier Stations-Kategorien mit den folgenden Bezeichnungen unterschieden:

- 50 kW Supercharger (Bandbreite 50 bis < 100 kW Ladeleistung) für Übernachtladen von kleinen bis mittleren SNF.
- 150 kW Supercharger (Bandbreite 100 bis < 250 kW Ladeleistung) für Übernachtladen von mittleren bis großen SNF, sowie für Zwischenladen am Logistikzentrum oder bei Kunden.
- 350 kW Supercharger (Bandbreite 250 bis < 500 kW Ladeleistung, CCS-Standard) für Zwischenladen an Stops oder Unterwegsladen an der Autobahn, insbesondere vor Einführung von Megachargern von mittleren bis großen SNF.
- >750kW Megacharger (über 700 kW einschließlich Megawatt-Laden, zukünftiger MCS-Standard) für Unterwegsladen an der Autobahn ggf. Bundesstraße oder Autohof für große SNF.

Die Zuordnung des Bedarfs an privaten Ladestationen zu den fünf SNF-Gewichtsklassen beschreibt die folgende Tabelle 31. Beispielsweise wird für 9 von 10 zusätzlich beschafften SNF der Gewichtsklasse 3,5 bis 7,5t zGG eine neue Ladestation der 50 kW-Klasse beschafft, in den meisten Fällen um ein Übernachtladen auf dem Betriebshof zu ermöglichen. Ferner wird je zusätzliche 10 SNF mit über 20t zGG ein MCS-Lader mit mindestens 750 kW an den relevanten Strecken aufgebaut.

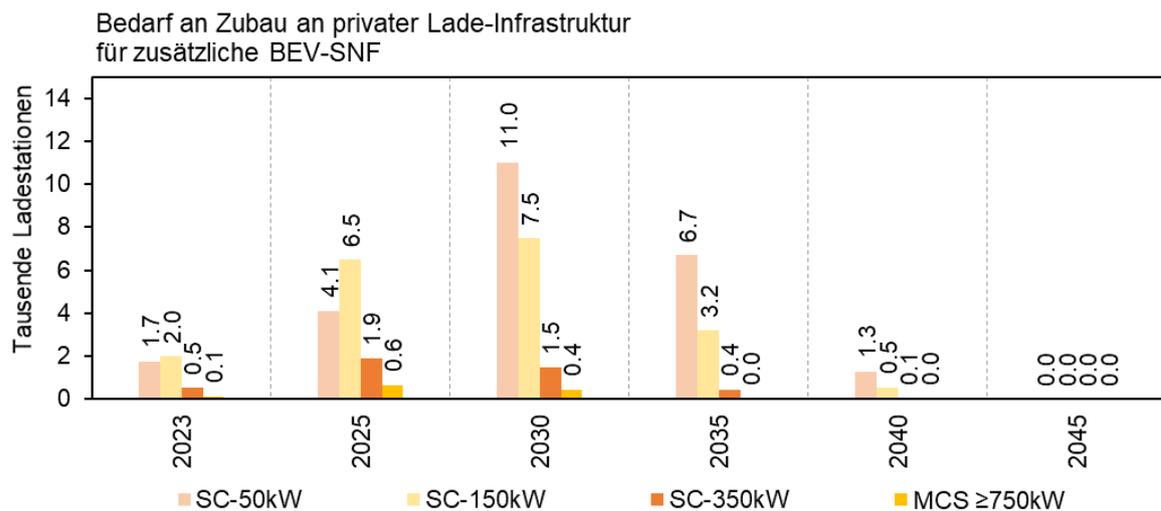
⁹⁰ Siehe Bericht Eurotransport über die Aktivitäten der DHL: <https://www.eurotransport.de/artikel/dhl-tankstellennetz-fuer-bio-cng-klimateutral-mit-og-clean-fuels-unterwegs-11231614.html>

Tabelle 31 Bedarf an Ladestationen je zusätzlichem SNF [in Stationen je SNF]

Stationstyp	SNF-Gewichtsklasse	>3,5 – 7,5t	>7,5-12t	>12-20t	>20t	SZM
50kW		0.90	0.75	0.45	0.05	0.00
150kW		0.30	0.35	0.55	0.75	0.80
350kW (CCS)		0.00	0.05	0.20	0.20	0.30
≥750kW (MCS)		0.00	0.00	0.00	0.10	0.15

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Die Neuzulassungen von SNF sowie die aktive Flotte bestimmen einen Bedarf an Ladestationen zum Betrieb der BEV, der anhand der Parameter aus Tabelle 31 abgeleitet wird. Abbildung 94 stellt den Bedarf an zusätzlich zu bauenden Ladestationen aufgrund des Wachstums der BEV-Flotte dar. Aufgrund der Bedeutung für das Übernachten sind die Bedarfe an 50 kW und 150 kW Stationen deutlich höher als für die anderen beiden Kategorien, weil bei ersteren fast eine 1:1 Relation zwischen SNF und Ladestationen unterstellt wird.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 94 Bedarf an privaten SNF-Ladesäulen (REF-2050)

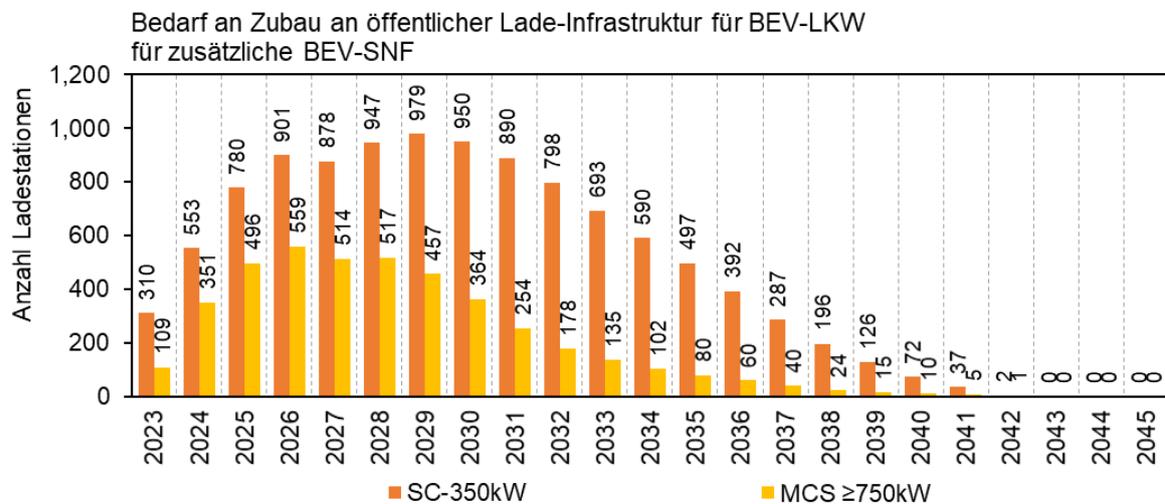
Außerdem sieht das Konzept für klimafreundliche Nutzfahrzeuge und der Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung einen öffentlich unterstützten Aufbau (z.B. durch Ausschreibungen) eines Ladenetzes an den Fernverkehrsstrecken vor (BReg 2022). Für dieses öffentlich unterstützte Netz werden zusätzlich Stationen je zusätzlichem BEV-SNF aufgebaut. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32 Aufbau von öffentlicher oder öffentlich beauftragter Ladeinfrastruktur je zusätzlich gekauftem BEV-SNF [in Stationen je SNF]

Stationstyp	>3,5 – 7,5t	>7,5-12t	>12-20t	>20t	SZM
350kW (CCS)	0.03	0.07	0.11	0.08	0.04
≥750kW (MCS)	0	0.01	0.02	0.06	0.1

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

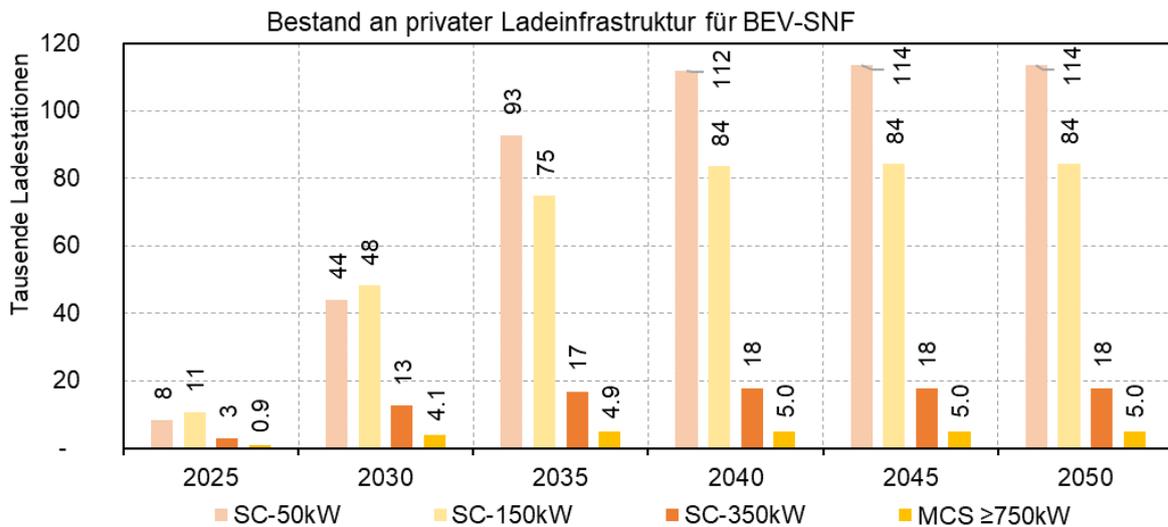
Für den Aufbaubedarf öffentlich unterstützter Ladeinfrastruktur für den Fernverkehr ergibt sich der in Abbildung 95 abgebildete Hochlauf. Auch hier zeigt sich bis etwa 2030 ein Bedarf an schneller Ausweitung des Lade-Stationsnetzes, weil in dieser Phase der Zuwachs an schweren BEV-SNF getrieben durch die CO₂-Standards für 2030 und unterstützt durch Förder-Instrumente und sinkende Fahrzeugkosten am größten ist. Danach ebbt der Zuwachs an BEV-SNF ab und führt zu ebenfalls sinkendem Zubau-Bedarf an Ladestationen. In der Umsetzung wird der Aufbau weniger gleichmäßig und zu Beginn bei MCS verzögert erfolgen, da mit der Standardisierung der MCS-Stationen erst in der zweiten Hälfte 2024 gerechnet wird. Davor beschaffte BEV-SNF werden zunächst maximal an 350 kW CCS-Stationen laden können.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 95 Bedarf an öffentlich unterstützten SNF-Ladesäulen (REF-2050)

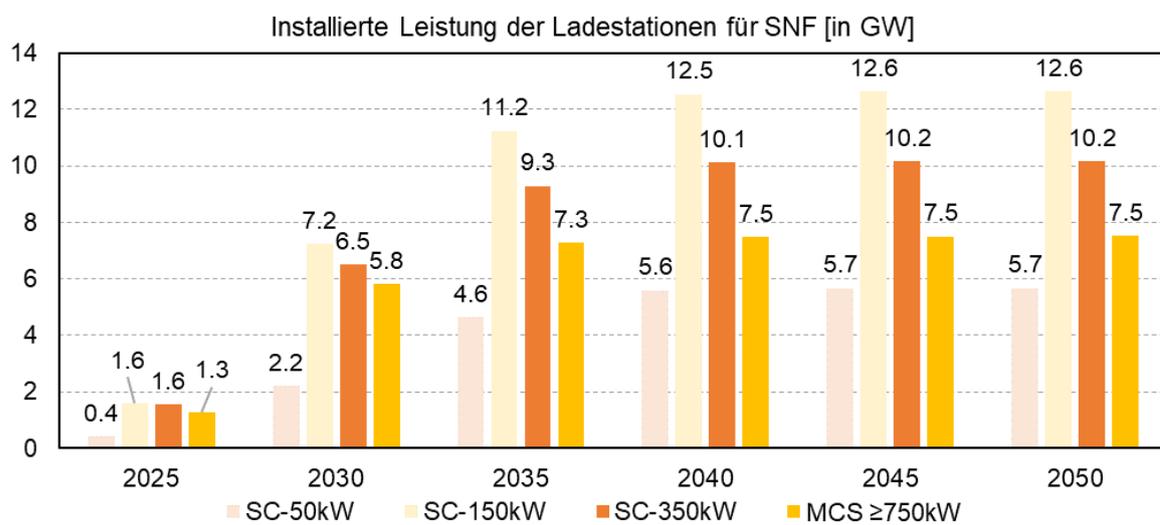
Der aufgebaute Bestand an privaten Ladesäulen ist in Abbildung 96 dargestellt. Bis 2030 werden mit 41 000 (50 kW Stations-Kategorie) und 46 000 (150 kW Stations-Kategorie) Stationen bei den gegebenen Parametern etwa die Hälfte aller bis 2050 benötigten Stationen aufgebaut. Bei 350 kW CCS-Ladern kommen im Jahr 2030 zu den 12 000 privaten 350 kW Stationen noch knapp 6 000 öffentlich unterstützte Stationen hinzu. Die Zahl der MCS-Lader beläuft sich im Jahr 2030 auf 3 900 private und 3 100 öffentlich unterstützte Stationen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 96 Bestand an privaten SNF-Ladesäulen (REF-2050)

Der aufgebaute Bestand an Stationen kann in die entsprechende Ladekapazität bzw. angebotene Ladeleistung umgerechnet werden. Diese ist in Abbildung 97 dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die 150 kW Leistungs-Kategorie die größte Kapazität bereitgestellt wird. Dies wird begünstigt durch die häufige Nutzung als Übernachtlader, die allerdings in vielen Fällen eine geringere Auslastung bedeuten dürfte. Dagegen könnten die Kategorien 350 kW und 750 kW sowohl eine höhere Auslastung ausweisen als auch über eine größere spezifische Kapazität (pro Stunde) verfügen, so dass die übertragenen Strommengen dort höher liegen dürften als bei den 150 kW Ladern.



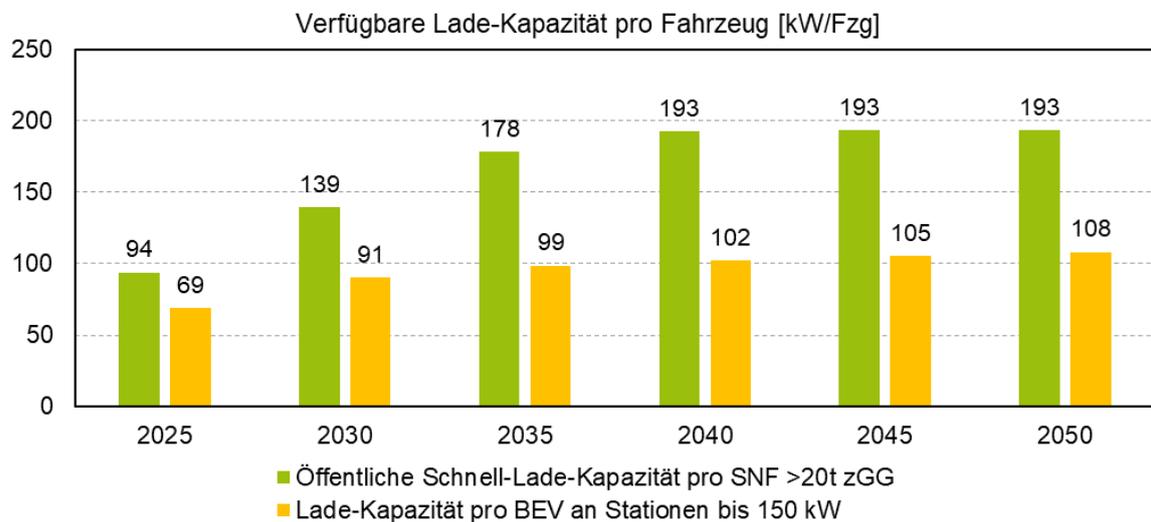
Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 97 Angebotene Ladekapazität an SNF-Ladesäulen (REF-2050)

Abbildung 98 stellt zwei fahrzeugbezogene Indikatoren dar. Das Schnellladen mit MCS oder CCS ist vor allem wichtig für schwere SNF >20t zGG (inkl. SZM). Bezogen auf eines dieser Fahrzeuge liegt die angebotene Schnellladekapazität bei etwa 100 kW / SNF in 2025 und verdoppelt sich bis 2040 auf etwas über 190 kW / SNF. Diese Größenordnung wäre

rechnerisch ausreichend, um den Bestand an SNF im Fernverkehr mit 4-Stundenschichten plus (Lade-)Pause zu versorgen.

Werden nur die kleinen Stationen bis 150 kW auf den gesamten Bestand an BEV-SNF bezogen, ergibt sich mittelfristig eine bereitgestellte Lade-Kapazität von etwa 100 kW pro Fahrzeug.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 98 Ladekapazität für SNF für verschiedene Nutzungen (REF-2050)

Aus dem Aufbau der Ladestationen kann unter Berücksichtigung der spezifischen Investitionskosten für eine Station auch der Investitionsbedarf grob abgeschätzt werden. Tabelle 33 zeigt die spezifischen Investitionskosten für Ladeinfrastruktur zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Investitionskosten werden dynamisch unter Nutzung von Lernkurven in Abhängigkeit von der Zahl der installierten Stationen berechnet.

Tabelle 33 Spezifische Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei SNF

Stationstyp	Investition pro SNF Ladestation in € ₂₀₁₀				
	2020	2025	2030	2040	2050
50kW	36 750	35 000	33 250	30 625	28 000
150kW	88 000	84 000	80 000	74 000	68 000
350kW	216 000	198 000	180 000	171 000	162 000
750kW	585 000	517 500	450 000	405 000	360 000

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 99 zeigt die notwendige Investition in Energieinfrastrukturen zur Versorgung der SNF mit alternativen Antrieben. Dabei werden nur die Investitionen für zusätzlich hinzukommende neue SNF dargestellt und keine Ersatz-Investitionen. Der größte Teil der Investitionen für alternativ angetriebene SNF entfällt auf die Ladestationen für BEV. Dies resultiert auch daraus, dass diese zahlenmäßig die größte Gruppe darstellen, ab 2030 von

H₂-BZ-SNF gefolgt. In den Jahren bis 2024 werden ebenfalls noch LNG-Tankstellen mit einem Aufwand von 10 bis 30 Mio €₂₀₁₀ pro Jahr installiert. Für H₂-Tankstellen wird zunächst eine geringe Anzahl zu Testzwecken bis 2023 aufgebaut und ab 2026 wird der beginnende Hochlauf der Fahrzeuge durch einen Ausbau der H₂-Tankstellen unterstützt. Der gesamte zusätzliche Aufbau an Ladestationen für BEV-SNF erfordert von 2023 bis 2030 knapp 12 Mrd. €₂₀₁₀ und bis 2040 knapp 20 Mrd. €₂₀₁₀.

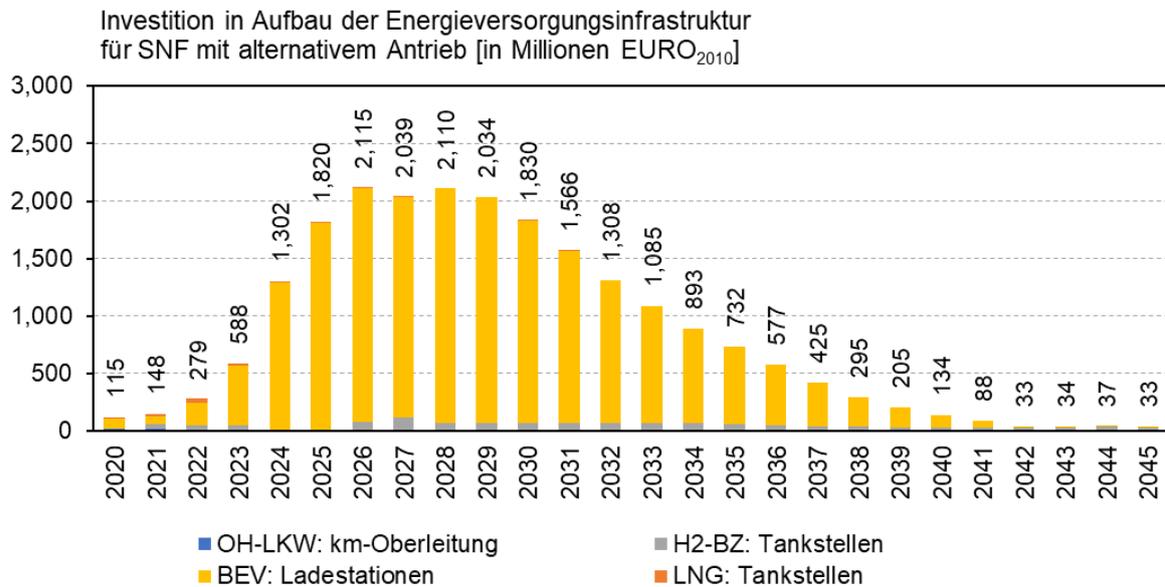


Abbildung 99 Investition in zusätzliche Energieinfrastruktur für SNF mit alternativen Antrieben

10.3 Erzeugungsinfrastruktur für erneuerbare Energien

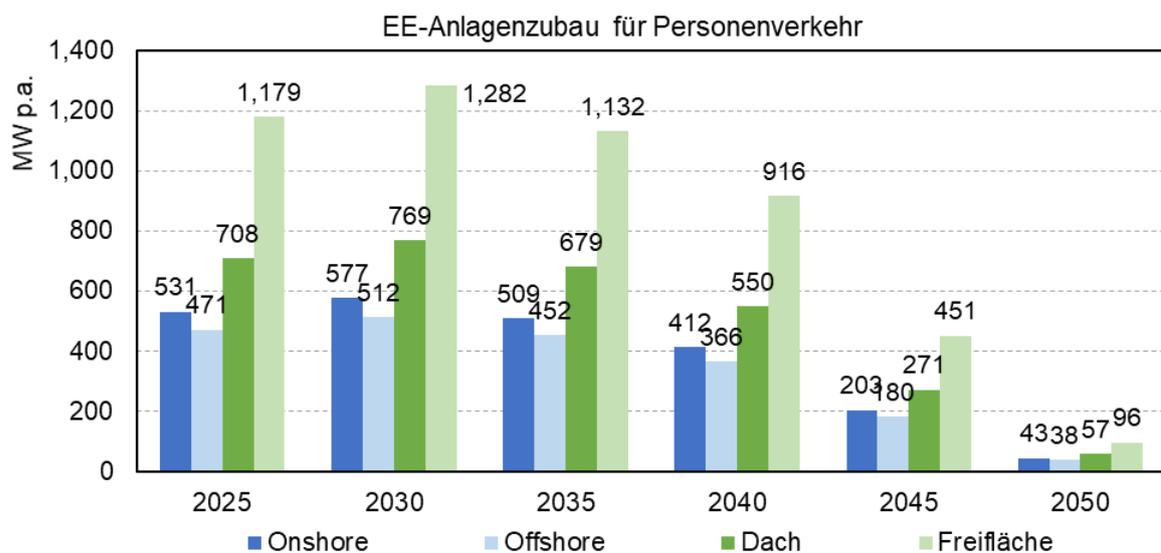
Eine zentrale Voraussetzung für die Klima-Neutralität der E-Mobilität und damit auch für die politische Unterstützung ist, dass die E-Fahrzeuge mit erneuerbarem Strom betrieben werden. Deswegen wurde parallel zur (Investitions-)Bedarfsermittlung der Ladeinfrastruktur auch der Bedarf an zusätzlichen EE-Strom-Erzeugungsanlagen überschlägig ermittelt. Dabei wurden nur die vier wichtigsten EE-Technologien berücksichtigt: Wind (On- bzw. Offshore) und Photovoltaik (PV auf Dachflächen und PV auf Freiflächen). Tabelle 34 stellt zentrale Parameter der EE-Infrastrukturabschätzung dar.

Tabelle 34 Parameter für die Bedarfsrechnung der EE-Infrastruktur

EE-Technologie		Volllaststunden p.a. je Anlage	Technologieanteile
Wind	Onshore	2200	25%
	Offshore	3468	35%
PV	Dach	990	15%
	Freifläche	990	25%

Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 100 zeigt den notwendigen Zubau zur Deckung des EE-Strombedarfs für den Personenverkehr, d.h. für die Nutzung in PKW, Krafträdern, Bussen und auf der Schiene. Der in REF-2050 maximal jährlich benötigte Zubau für die Elektrifizierung des Personenverkehrs liegt bei etwa 3,6 GW Kapazität im Jahr 2027. Die benötigten Investitionen kumulieren sich von 2022 bis 2035 auf knapp 49 Mrd. EUR₂₀₁₀ für einen Gesamtzubau an 43,3 GW installierter EE-Kapazität. Von 2036 bis 2050 ergeben sich Investitionen von ca. 24,3 Mrd. EUR₂₀₁₀ für einen weiteren Zubau von 25,5 GW.

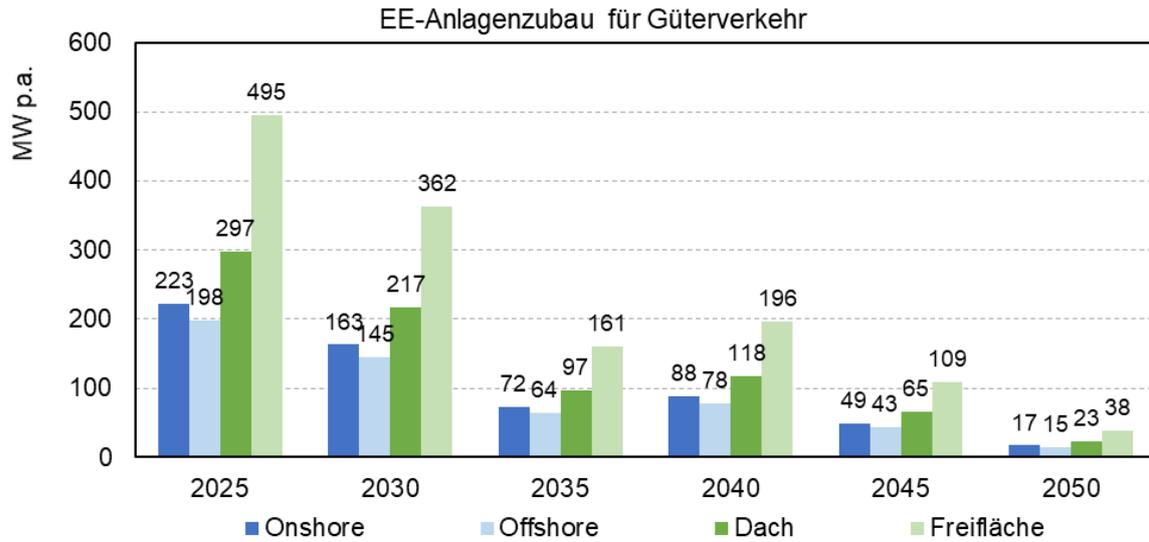


Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 100 Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Personenverkehr (REF-2050)

Abbildung 101 gibt die EE-Infrastrukturbedarfe für den Güterverkehr wieder. Der maximal jährlich benötigte Zubau für die Elektrifizierung des Güterverkehrs in REF-2050 liegt bei knapp 1,2 GW Kapazität im Jahr 2026. Die benötigten Investitionen von 2023 bis 2035 belaufen sich auf etwa 11,1 Mrd. EUR₂₀₁₀ für kumuliert 9,8 GW EE-Kapazität. Im Zeitraum 2036 bis 2050 ergibt sich ein Bedarf von 5,2 GW Zubau für knapp 5 Mrd. EUR₂₀₁₀.

Ein zusätzlich benötigter Ausbau der Übertragungs-Stromnetze ist in diesen Investitionen nicht berücksichtigt.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 101 Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Güterverkehr (REF-2050)

11 Modellierung und Referenzszenario Personenverkehr

11.1 Das 4-Stufen Verkehrsmodell

Der Modellierung des Personenverkehrs liegt die Logik des Vier-Stufen-Modells zugrunde: Zunächst erfolgt die Verkehrserzeugung, danach die Verkehrsverteilung (Zielwahl), anschließend die Verkehrsmittelwahl (Modal Split) und zum Schluss die Verkehrsumlegung. In der Verkehrserzeugung wird das Verkehrsaufkommen unabhängig von der damit einhergehenden Ortsveränderung bestimmt. Hierbei wird in nahezu allen Verkehrssimulationsmodellen auf die Erkenntnisse aus Mobilitätsumfragen zurückgegriffen, um anhand der Wegeraten bestimmter verhaltenshomogener Gruppen und der Entwicklung der einzelnen Gruppen das Verkehrsaufkommen abzuleiten. Das Ergebnis der Verkehrserzeugung, das Verkehrsaufkommen, ist damit die gesamte Anzahl der Wege oder Fahrten, die von einer räumlichen Zone von bestimmten Bevölkerungsgruppen für verschiedene Wegezwecke pro Jahr bzw. pro Tag durchgeführt werden.

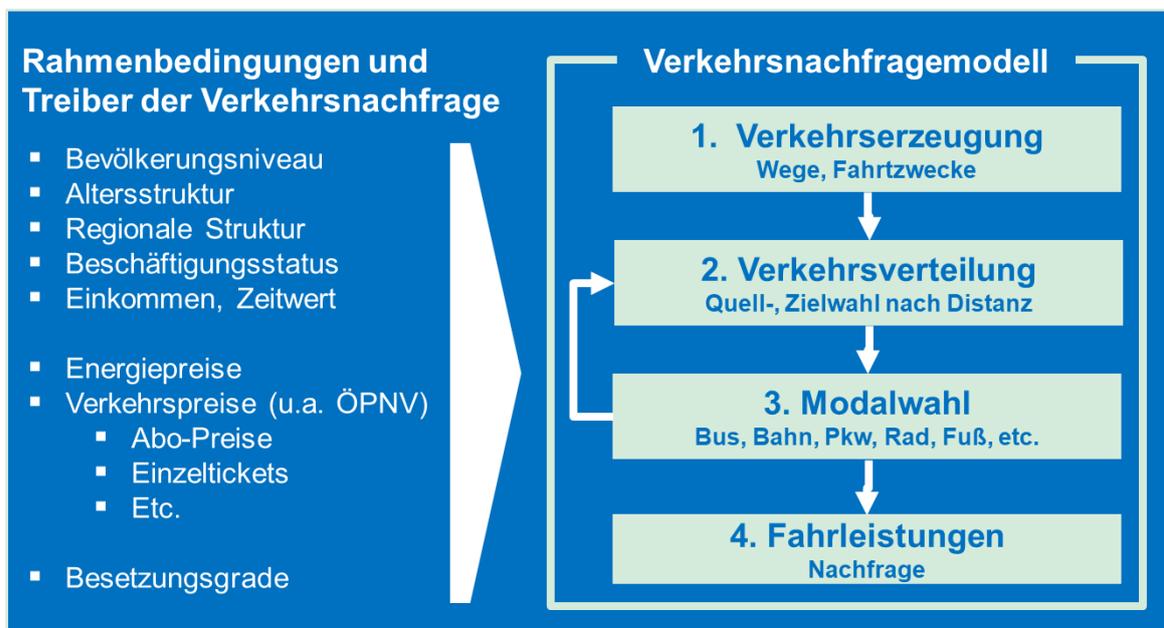
In der zweiten Stufe, der Verkehrsverteilung, werden die in Stufe 1 erzeugten Verkehre räumlich verteilt. Hierfür werden Start-Ziel-Matrizen erarbeitet, die als Verflechtungsmatrix den Start des Verkehrsstroms und dessen Ziel abbilden. Die resultierende Quelle-Ziel-Matrix der jährlichen Wege wird dabei noch nicht mit durchschnittlichen Distanzen multipliziert, da diese abhängig vom Verkehrsmittel sind, mit dem die Wege zurückgelegt werden. Daher ist das Ergebnis das nach Quelle und Ziel aufgelöste Verkehrsaufkommen. Die meisten Verkehrssimulationsmodelle simulieren die Verteilung entweder mittels Gravitationsansatz oder mit Hilfe von Logit-Funktionen auf dem Prinzip von diskreten Wahlentscheidungen.

In der dritten Stufe werden die Verkehrsströme auf die für die jeweilige Quelle-Ziel Relation zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel verteilt. Für die Verkehrsmittelwahl werden Informationen der Mobilitätsnachfragenden, also sozio-demografische wie auch mobilitätsspezifische (bspw. der Autobesitz) Faktoren, ebenso verkehrsmittelspezifische Faktoren, insbesondere Zeit (Fahrt-, Zugangs-, Abgangs- und Wartezeiten) und Kosten, berücksichtigt. Darüber hinaus spielen nicht bzw. schwer quantifizierbare Faktoren wie die Zuverlässigkeit, die Sicherheit sowie der Komfort eine Rolle. Das Resultat der Verkehrsaufteilung ist der Modal Split, der den Anteil der Verkehrsmittel am Verkehrsaufkommen angibt. Als State-of-the-Art werden dabei in den meisten Verkehrssimulationsmodellen die Prinzipien von diskreten Wahlentscheidungen mittels Logit-Funktionen verwendet. Einfachere Modelle verwenden dafür Elastizitäten-Ansätze.

Aus dem modalen Aufkommen der Quelle-Ziel Matrizen lassen sich nach dieser Stufe

- die Verkehrsleistung in Personenkilometern anhand der verkehrsmittelspezifischen durchschnittlichen Distanzen und
- die Fahrleistung in Fahrzeugkilometern durch die Berücksichtigung der verkehrsmittelspezifischen Besetzungsgrade ermitteln.

Im vierten Schritt, der Verkehrsumlegung, werden die Verkehrsströme aus Stufe 2 mit den dazugehörigen Verkehrsmitteln aus Stufe 3 auf die vorhandene Verkehrsinfrastruktur bzw. deren Routen umgelegt. So können Aussagen über Belastungen des Verkehrsnetzes getroffen werden. Das Personenverkehrsmodell von ASTRA-M bildet die ersten drei Stufen des Vier-Stufen-Modells ab und verzichtet auf eine detaillierte Modellierung der letzten Stufe, die Verkehrsumlegung. Dies geschieht aufgrund der Fokussierung des systemdynamischen Ansatzes auf Verkehrsleistung und Verkehrsmittelwahl, um daran anschließend makroökonomische wie auch Umwelt-Effekte des Verkehrs zu berechnen. An vierter Stelle erfolgt daher in diesem Fall die Ermittlung der Fahrleistungen unter Nutzung der spezifischen Besetzungsgrade und auf Basis der Verkehrsverteilung und der Verkehrsaufteilung, um damit Aussagen über die Fahrzeugkilometer der einzelnen Verkehrsmittel treffen zu können. Abbildung 102 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Personenverkehr-Modells in ASTRA-M in den vier oben beschriebenen Stufen.



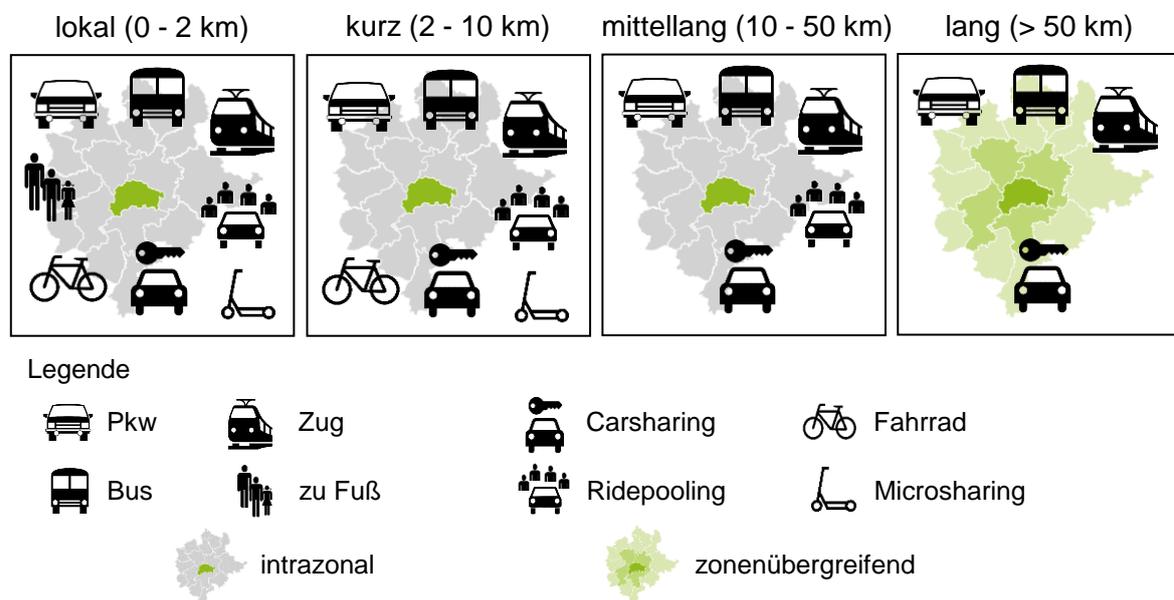
Quelle: M-Five, Fraunhofer ISI.

Abbildung 102 Aufbau der Modellierung des Personenverkehr-Moduls in ASTRA-M

11.2 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

Die Verkehrserzeugung erfolgt im Personenverkehrsmodell von ASTRA-M anhand von Daten aus dem Mobilitätspanel und der Befragung Mobilität in Deutschland (MiD). Unter Berücksichtigung der Entwicklung von verhaltenshomogenen Bevölkerungsgruppen (differenziert nach Alters- und Einkommensgruppen und NUTS2-Zonen) werden auf Basis von Wegeraten (abgeleitet aus der MiD 2017) für vier Wegezwecke ausgehende Wege generiert und um über makroökonomische Entwicklungen induzierte Wege ergänzt. Das Ergebnis von Stufe 1 ist somit die Summe aller Wege in Deutschland.

Unter Verwendung von Start-Ziel-Matrizen aus der Verflechtungsprognose werden die in Stufe 1 generierten Wege räumlich auf Ziele in der gleichen oder anderen NUTS2 Zonen verteilt. Unterschieden wird hier nach interzonalen und intrazonalen Wegen. Interzonal meint Wege mit verschiedenen NUTS2-Zonen als Start und Ziel. Intrazonale Wege finden innerhalb einer NUTS2-Zone statt. Diese werden weiter differenziert in lokale (0-2 km), kurze (2-10 km) und mittellange (über 10 km) Wege. Alle Wege werden danach unterschieden, ob sie in städtischem oder ländlichem Gebiet (Flächennutzung) stattfinden und welcher Wegezweck dem Weg zugrunde liegt. Unterschieden wird in Arbeits-, Dienst-, Privat- (bspw. Einkaufen oder Erledigungen) und Freizeitwege. Des Weiteren wird die Einkommensverteilung der Verkehrsnachfragenden berücksichtigt. Für diese Verkehrsverteilung werden, wie bei vielen Logit-Funktionen, die Prinzipien von diskreten Wahlsentscheidungen angewandt. Dabei gehen sowohl Fahrtzeiten als auch Fahrtkosten in die spezifische Nutzenfunktion im Logit über sogenannte durchschnittliche generalisierte Kosten ein. Je höher Fahrtkosten und Fahrtzeiten sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für eine solche Quell-Ziel Verbindung. Fahrtzeiten werden dabei mit Hilfe von wegezweck-spezifischen Zeitwerten monetarisiert. Das Ergebnis von Stufe 2 ist somit die Anzahl der Wege nach Quelle und Ziel (innerhalb oder zwischen NUTS-II-Zonen sowie städtisch oder ländlich) und dem Wegezweck. Änderungen bei Fahrtkosten oder Fahrtzeiten durch klimapolitische Maßnahmen oder einen Ausbau der Infrastruktur haben somit bereits einen Einfluss auf die Zielwahl.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 103 Distanzklassen und Verkehrsmittel in ASTRA-M

Die Quelle-Ziel-Matrizen werden in Stufe 3 genutzt, um die Verkehrsmittelwahl zu modellieren. Für diese Schätzung werden ebenfalls Logit-Funktionen genutzt, die aus einer Reihe an Einflussfaktoren und der in Stufe 2 ermittelten Wege eine Zuteilung von

Verkehrsmitteln auf diese Wege vorzunehmen. Die Logit-Funktion ist dabei wie folgt definiert:

$$\pi_i = \frac{e^{-\beta_{0ij} + \beta_{ij} * x_{ijk}}}{\sum_i e^{-\beta_{0ij} + \beta_{ij} * x_{ijk}}}$$

Mit:	π	= Modalwahlwahrscheinlichkeit
	β_0	= Konstante
	β_{ij}	= Koeffizient
	x	= Generalisierte Kosten
	i	= Modus [Auto; Bus; Zug; Rad; Fuß; Carsharing; Ridepooling; Microsharing]
	j	= Flächennutzung [städtisch; ländlich]
	k	= Wegezweck [Arbeit; Dienst; Privat; Freizeit].

Wie die Funktion zeigt, werden also für jeden Modus die spezifischen Charakteristika (β_{0ij} und β_{ij}) durch die Summe aller Modi dividiert, um so in jedem Fall in Summe aller Modi eine Modalwahrscheinlichkeit von 1 zu erhalten. Der Koeffizient β_{ij} wird dabei mit den Modi-, Flächennutzungs- sowie Wegezweck-spezifischen generalisierten Kosten x_{ijk} multipliziert. Die generalisierten Kosten bilden sowohl die monetären wie auch die zeitlichen Kosten der entsprechenden Modusnutzung ab. Die monetären Kosten fassen Investitionsentscheidungen (bspw. Kauf privater PKW) und Betriebskosten (bspw. Stromkosten für batterieelektrische Fahrzeuge, Steuern usw.) zusammen. Für die drei neuen geteilten Modi: Carsharing, Ridepooling und Microsharing (Bike- und E-Scootersharing), werden erhobene Realdaten der jeweiligen Anbieter zu Grunde gelegt, um die Kosten je km oder je Stunde abbilden zu können. Auch hier werden Investitionskosten im Sinne von etwaigen Mitgliedsbeiträgen o. Ä. sowie Betriebskosten, also der Kosten je Fahrt, berücksichtigt. Daraus ergeben sich Kosten je Modus pro Personenkilometer (PKM). Die zeitlichen Kosten werden über die Reisezeit und die damit verbundenen Zeitkosten unter Berücksichtigung des Zeitwertes (Value of Time) sowie Modus-spezifischen Zeitkosten (bspw. Zugangszeit bei geteilten Modi und Wartezeit bei ÖPNV) berechnet. Der Value of Time wird ausgehend von einem empirischen Basiswert je Modus und je Wegezweck und einem Wachstumsfaktor über die Zeit berechnet. Dieser Wachstumsfaktor ist an die Entwicklung des BIP geknüpft, um Einkommensentwicklungen der Bevölkerung zu berücksichtigen.

Die Konstante β_0 integriert all jene Faktoren, die im Modellkontext aufgrund von Komplexitätsgründen nicht abgebildet werden können oder gemeinhin als „weiche“ Faktoren bezeichnet werden. Diese können klare Verkehrsmittelpräferenzen der Personen sein (bspw. monomodale Radfahrende) oder anderweitige Faktoren, wie bspw. subjektive Vorstellungen von Zuverlässigkeit, Sicherheit oder Komfort. Zuverlässigkeit und

Komfort sind beispielweise wichtige Faktoren für die Entscheidung für eine Bahnfahrt. β_0 wird für die Schiene im Gegensatz zu anderen Verkehrsmitteln im Verkehrsmittelwahlmodul in ASTRA-M nicht als Konstante angesehen, sondern entwickelt sich über die Zeit anhand von Änderungen im Service und der Zuverlässigkeit der Bahn, weil die positiven Entwicklungen bei der Entwicklung der Fahrgastzahlen der Bahn von 1995 bis 2019 nicht allein mit den Faktoren Reisezeit und Reisekosten erklärbar sind.

Während die privaten PKW in einem endogenen Flottenmodell errechnet werden, ist dies aufgrund der immer noch jungen Marktentwicklung der geteilten Modi nicht möglich. Daher wird für Carsharing, Ridepooling und Microsharing der Ansatz über exogene Angebotsdaten der Anbieter in den jeweiligen NUTS-II-Zonen genutzt. Dies bedeutet, dass für die drei geteilten Modi Daten über die Fahrzeuganzahl vorliegen und sich somit eine Angebotsdichte errechnen lässt. Diese Angebotsdichte wird in Zu- und Abgangszeiten zu den jeweiligen geteilten Fahrzeugen der Dienste übersetzt und ist somit ein zusätzlicher Zeitaufwand für die Verkehrsnachfragenden. Die Angebotsdichte entwickelt sich im Zeitverlauf positiv mit zum Ende des Betrachtungszeitraums sinkenden Wachstumsraten, um Marktsättigungseffekte zu berücksichtigen. In Summe ergibt sich somit als Ergebnis der Logit-Funktionen eine Verteilung von Wegen auf die acht Verkehrsmittel in bzw. zwischen den NUTS-II-Zonen je Flächennutzung und Wegezweck. In Summe ergibt sich damit aus Stufe 3 des Modellierungsansatzes der Modal-Split auf Wegeebe, jeweils unterteilt in die genannten Sub-Kategorien.

Im vierten und letzten Schritt der Modellierung des Personenverkehrs in ASTRA-M werden die in Stufe 3 ermittelten Personenkilometer in Fahrzeugkilometer (Fzg.-km) überführt. Dies geschieht unter Verwendung von Besetzungsgraden je Verkehrsmittel (siehe Tabelle 34), Distanz und Wegezweck. Diese Fahrzeugkilometer fließen im Weiteren in die Umweltbewertung des entstandenen Verkehrs ein.

Tabelle 35 Besetzungsgrade der Personenverkehrs-Fahrzeuge nach Modus, Wegezweck und Distanz

Modus	Distanz	Besetzungsgrad nach Wegezweck			
		Arbeit	Dienstlich	Privat	Tourismus
Privater PKW	bis 2 km	1,24	1,09	1,70	1,75
	2 bis 10 km	1,26	1,11	1,75	1,75
	10 bis 50 km	1,28	1,13	1,75	1,75
	ab 50 km	1,28	1,13	1,50	1,90
Bus	bis 2 km	22			
	2 bis 10 km	22			
	10 bis 50 km	22			
	ab 50 km	28			
Zug	bis 2 km	150			
	2 bis 10 km	230			
	10 bis 50 km	250			
	ab 50 km	310			
Carsharing	bis 2 km	1,24	1,09	1,70	1,75
	2 bis 10 km	1,26	1,11	1,75	1,75
	10 bis 50 km	1,28	1,13	1,75	1,75
	ab 50 km	1,28	1,13	1,50	1,90
Ridepooling	bis 2 km	3			
	2 bis 10 km	3			
	10 bis 50 km	3			

Quelle: Fraunhofer-ISI/M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Zur Übersicht der Modellergebnisse für das REF-2050 zeigt Tabelle 35 die Abschätzung der Entwicklung des Aufkommens (in Mrd. Fahrten bzw. Wege), der Verkehrsleistung (in Mrd. Personen-km) und der Fahrleistungen im Personenverkehr (in Mrd. Fahrzeug-km) anhand des ASTRA-M Modells. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen bzw. den berücksichtigten politischen Instrumenten aus dem REF-2050, der Entwicklung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotten und den sich ändernden Fahrtkosten und Zeitwerten auf Basis der Änderung der Verkehrsinfrastruktur ergibt sich die dargestellte Verkehrsnachfrage. REF-2050 berücksichtigt dabei die während der Covid-19 Pandemie beobachteten Änderungen des Mobilitätsverhaltens in den Pandemie Jahren 2020 und 2021 (siehe Kapitel 4.10) sowie die Effekte zunehmender Automatisierung und Vernetzung des Personen- und Güterverkehrs (siehe Kapitel 4.11).

Die Zahl der motorisierten Fahrten sinkt zwischen 2019 und 2050 um 4,2%. Dies spiegelt eine leichte Abnahme der Mobilität durch Alterung, geringere Beschäftigung sowie einen sehr moderaten Trend zu mehr Home-Office und den Ersatz von dienstlichen Wegen durch die Möglichkeiten der Digitalisierung wider. Ein gegenläufiger Effekt der durch die ansteigende Bevölkerung entsteht kann diesen Trend nur gering abschwächen

Die Verkehrsleistung mit motorisierten Fahrzeugen (ohne innerdeutschen Luftverkehr) steigt um 6,9% bis 2050 im Vergleich zu 2019. Die erwünschte Lenkungswirkung des

Zusammenspiels der berücksichtigten Instrumente zeigt sich beim Pkw aber nicht wie erhofft (+7,4%). Die Steigerung der Verkehrsleistung rührt daher, dass durch die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugflotten die Wirkungen der Verteuerung der fossilen Kraftstoffe kaum mehr spürbar ist und sich die individuelle Mobilität mit dem PKW im Durchschnitt nicht verteuert. Auf der anderen Seite bewirken die Instrumente zur Verbesserung der Rahmenbedingungen und der Verkehrsinfrastruktur im Umweltverbund eine Zunahme des Aufkommens und der Verkehrsleistung auf der Schiene um 9,2% bis 2050. Hierbei ist zwischen den Jahren 2019 bis 2030 ein stärkerer Anstieg von knapp 20% zu verzeichnen, nach 2030 sind keine Instrumente und damit keine Verbesserungen im ÖV mehr modelliert. Demgegenüber wurden aber bevorstehende Sanierungen an der Bahn-Infrastruktur und die damit einhergehenden Effekten im REF-2050 nicht berücksichtigt.

Tabelle 36 Entwicklung des Aufkommens, der Verkehrs- und Fahrleistung im Personenverkehr

Verkehrsmittel	Einheit	2019	2020	2025	2030	2040	2050	Änderung 2019 bis 2050	
								p.a.	abs.
Aufkommen									
PKW	Mrd. Fahrten	57.5	50.1	53.4	51.5	52.7	53.7	-0.6%	-6.5%
Bus	Mrd. Fahrten	5.9	3.5	6.3	6.6	6.1	5.2	-1.1%	-11.9%
Bahn	Mrd. Fahrten	3.7	2.0	4.5	5.2	4.9	4.5	1.8%	21.7%
Carsharing	Mrd. Fahrten	0.3	0.3	0.7	1.4	3.2	4.5	29.0%	1 544.6%
Ridepooling	Mrd. Fahrten	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	38.6%	3 535.6%
Microsharing	Mrd. Fahrten	0.0	0.0	0.1	0.4	0.5	0.5	81.1%	68 800.8%
Rad	Mrd. Fahrten	12.1	14.2	14.9	15.8	14.9	13.9	1.2%	14.6%
Fuss	Mrd. Wege	19.8	16.8	18.9	18.4	17.1	16.0	-1.9%	-19.1%
Gesamt motorisiert	Mrd. Fahrten	67.4	55.8	65.1	65.3	67.7	68.7	0.2%	1.9%

Verkehrsmittel	Einheit	2019	2020	2025	2030	2040	2050	Änderung 2019 bis 2050	
								p.a.	abs.
Verkehrsleistung									
PKW	Mrd. pkm	962.0	886.1	948.2	965.1	999.1	1 024.6	0.6%	6.5%
Bus	Mrd. pkm	88.7	48.0	94.8	96.0	86.7	72.3	-1.8%	-18.4%
Bahn	Mrd. pkm	87.9	46.2	103.2	113.3	106.0	96.5	0.8%	9.7%
Carsharing	Mrd. pkm	3.9	4.1	6.6	10.3	15.3	18.0	15.0%	363.7%
Ridepooling	Mrd. pkm	0.1	0.0	0.2	0.7	1.6	2.0	39.7%	3 843.6%
Microsharing	Mrd. pkm	0.0	0.0	0.2	0.5	0.7	0.7	66.1%	26 469.5%
Rad	Mrd. pkm	41.7	50.9	51.2	54.2	51.2	47.9	1.3%	14.7%
Gesamt motorisiert	Mrd. pkm	1 142	984	1 153	1 186	1 209	1 214	0.6%	6.3%

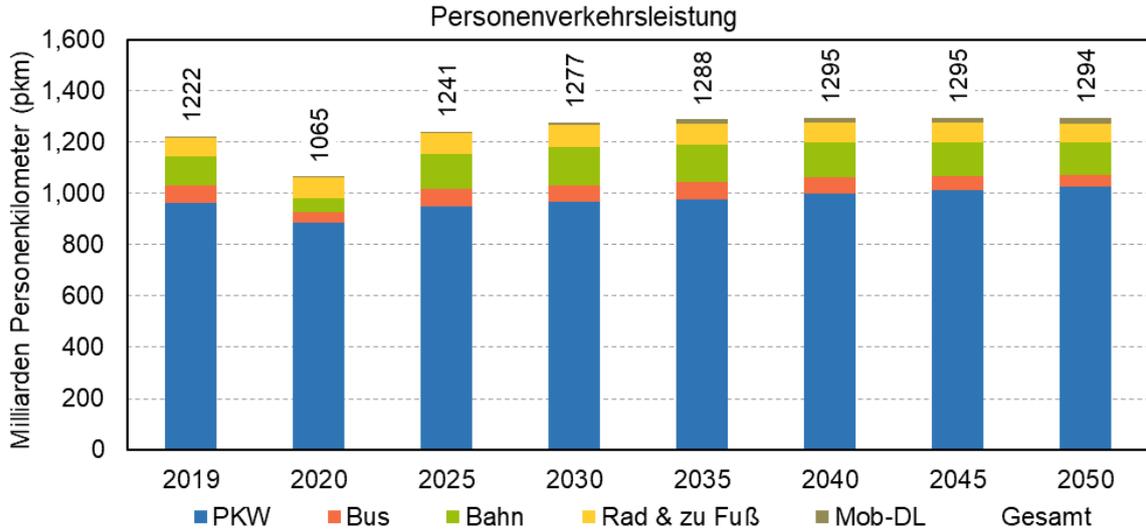
Fahrleistung									
PKW	Mrd. Fzg-km	628.2	575.4	611.2	616.8	637.4	651.7	0.3%	3.7%
Bus	Mio. Fzg-km	3.0	1.7	3.0	2.8	2.6	2.1	-3.1%	-29.5%
Carsharing	Mio. Fzg-km	2.4	2.6	4.0	6.1	8.9	10.4	14.1%	326.3%
Ridepooling	Mio. Fzg-km	0.02	0.00	0.07	0.25	0.53	0.66	39.7%	3 844.2%

Quelle: M-Five/Fraunhofer ISI, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Siehe Kapitel 11.3 und 17.3 zu Vergleichen mit der amtlichen Statistik und anderen Szenarien.

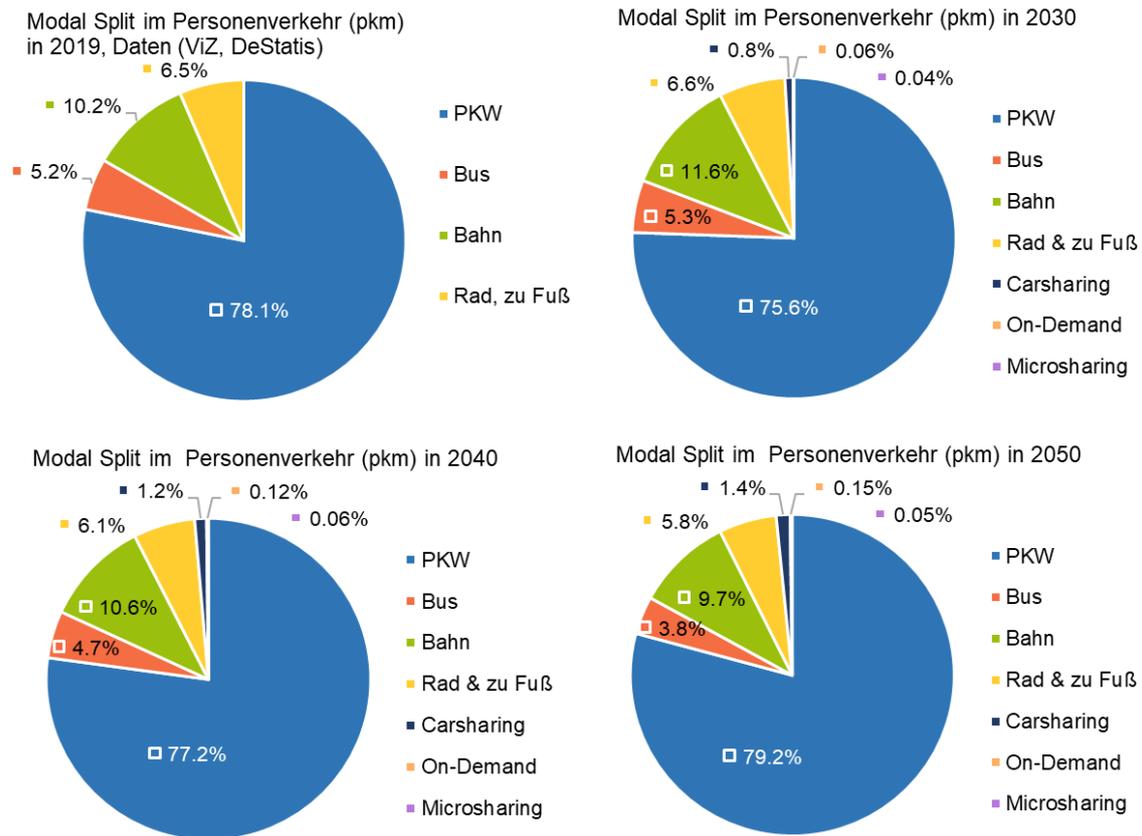
Die Nutzung der neuen Mobilitätsformen Carsharing, Ridepooling und die Mikromobilität (Bikesharing und E-Scootersharing) steigt im REF-2050 bis 2050 kontinuierlich an. Trotz der Anpassungen des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) spielen diese Mobilitätsformen im Alltag nach wie vor eine kleinere Rolle.

Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen die Entwicklung der Personenverkehrsleistung bzw. der Modalanteile der einzelnen Verkehrsmittel im REF-2050.



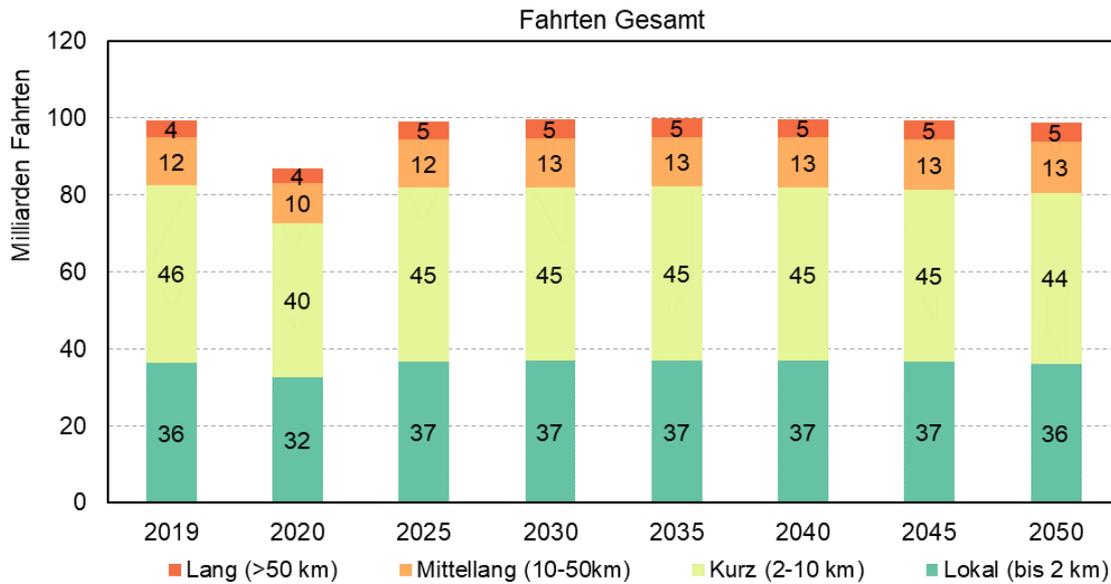
Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 104 Entwicklung der Personenverkehrsleistung in REF-2050



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

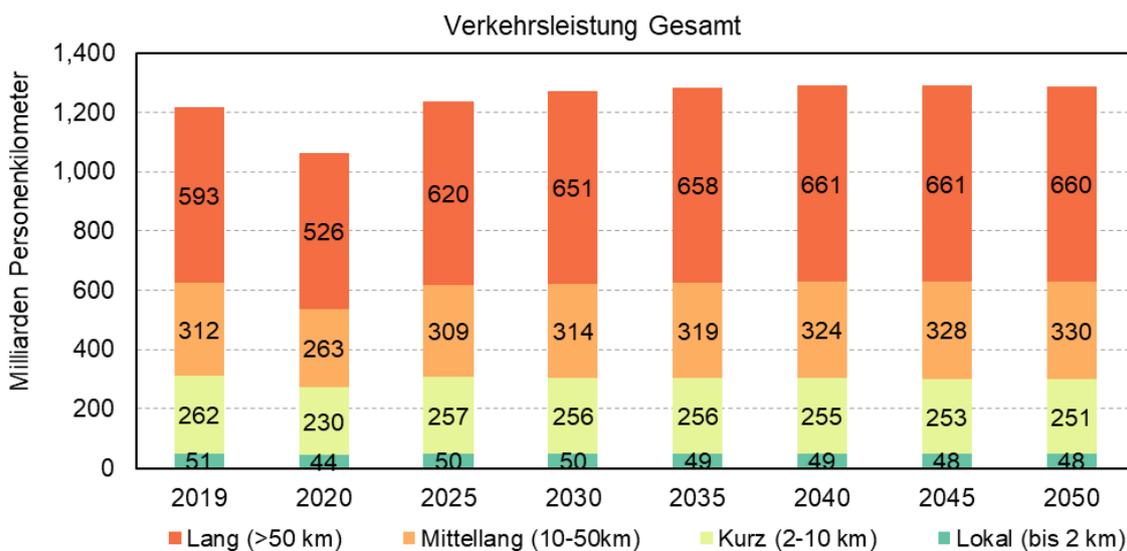
Abbildung 105 Entwicklung der Modalanteile im Personenverkehr in REF-2050



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 106 Aufkommen im Personenverkehr nach Distanzbändern in REF-2050

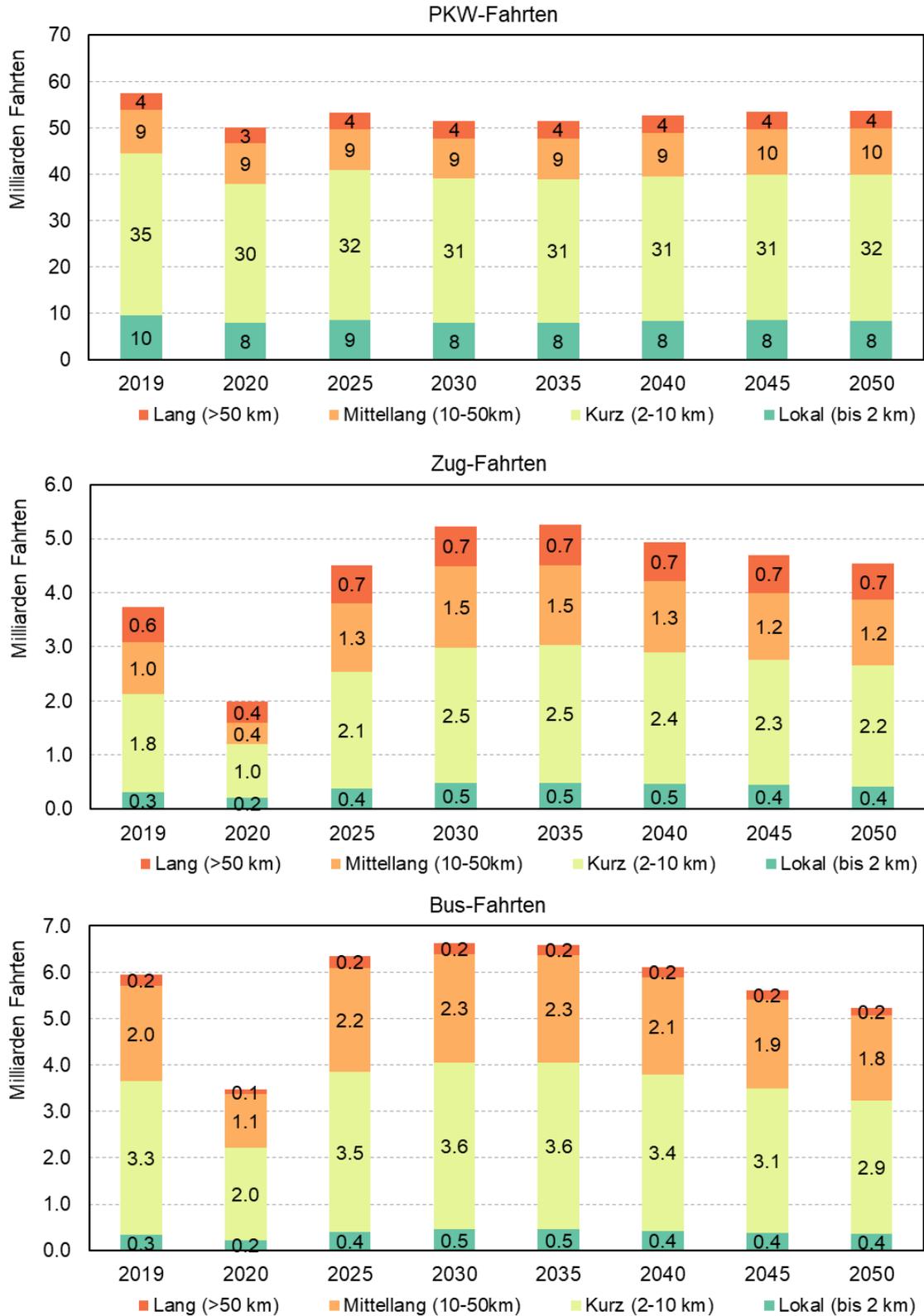
Abbildung 106 und Abbildung 107 zeigen die Verteilung der Verkehrsnachfrage auf die vier Distanzbänder < 2km, von 2 bis 10 km, von 10 bis 50 km und > 50 km. Dabei zeigt sich, dass nur 4,6% der Wege eine Länge von über 50 km haben, aber diese in der Verkehrsleistung einen Anteil an den gesamten Personen-km in Höhe von ca. 50% ausmachen. Dies verdeutlicht im Umkehrschluss auch (1) die Bedeutung von Instrumenten, die das Mobilitätsverhalten auf den längeren Distanzen beeinflussen können, und (2) den begrenzten Einfluss der Veränderungen der Mobilität im urbanen und sub-urbanen Bereich.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 107 Verkehrsleistung im Personenverkehr nach Distanzbändern im REF-2050

Abbildung 108 zeigt die Entwicklung der Verkehrsnachfrage nach der Anzahl der Fahrten für die einzelnen Verkehrsmittel PKW, Zug, Bus in REF-2050.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 108 Entwicklung des Verkehrsaufkommens für PKW, Bahn und Bus nach der Anzahl der Fahrten

Abbildung 109 stellt die Entwicklung der Verkehrsleistung differenziert für die einzelnen Verkehrsmittel PKW, Bahn und Bus in REF-2050 dar.



Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 109 Entwicklung der Verkehrsleistung für die Verkehrsmittel PKW, Bahn und Bus in REF-2050

11.3 Kritische Würdigung der Ergebnisse und der Statistik im Personenverkehr

Die Entwicklungen im Verkehrssektor werden anhand zahlreicher Statistiken und Publikationen dokumentiert und mit Daten hinterlegt. Dabei lassen sich die Daten in drei Gruppen unterteilen:

- Vollständig und verpflichtend erhobene Daten.
- Stichprobenartig erhobene Daten.
- Modellierete Daten (typisches Beispiel: Verkehrsleistung).

Als weiteres Unterscheidungsmerkmal kann die Häufigkeit und Regelmäßigkeit der Erhebung dienen. Hier lassen sich zwei Gruppen von Datenquellen unterscheiden:

- Jährlich erhobene oder modellierte Daten (bzw. regelmäßig in kürzeren Intervallen wie monatlich).
- Nur unregelmäßig bzw. in längeren Perioden nur einmalig erhobene bzw. modellierte Daten.

Für eine Modellierung des Verkehrssektors sind verpflichtend, regelmäßig und vollständig erhobene Daten besonders wichtig, da sie (1) verlässlicher sind als modellierte Daten und (2) Entwicklungen und Veränderungen über die Zeit erfassbar und modellierbar machen, insbesondere auch in einem dynamischen Zeitverlaufsmodell wie ASTRA-M.

Tabelle 37 gibt einen Überblick über die verschiedenen verfügbaren Datenquellen, die für eine Quantifizierung und Modellierung des Verkehrssektors genutzt werden können.

Tabelle 37 Einordnung verschiedener Datenquellen im Verkehr (nicht vollständig)

Häufigkeit bzw. Regelmäßigkeit	Generierung der Daten bzw. Datenquelle		
	Verpflichtend und vollständig erhobene Daten	Stichprobenartig erhobene Daten	Modellierte Daten
Regelmäßig jährlich erhobene Daten	KBA-Bestand und Neuzulassungsstatistik, KBA-Typprüfwerte (NEFZ), BAFA Mineralölzahlen, AGEB Energiebilanz, Steuer- und Mauteinnahmen, DeStatis: ÖPNV, Bahn, Luftverkehr	MoP, RDE	ViZ: Aufkommen, Verkehrsleistung, Fahrleistung, EEV nach Verkehrsträger / -mittel MiV (PKW, Motorrad, Rad) Fzg.-Effizienz im Realbetrieb
Unregelmäßig verfügbare Daten		MiD, Fahrleistungserhebung, KiD	VP2030, HBEFA

Quelle: eigene Darstellung.

Verlässliche und vollständig erhobene Daten finden sich besonders für den Bereich der Neuzulassungen und des Bestandes der Flotten im Straßenverkehr sowie für den Endenergieverbrauch nach verschiedenen Energieträgern, aber nur eingeschränkt nach Verkehrsmitteln. Beispielsweise kann der Kerosinverbrauch eines Jahres vollständig dem Luftverkehr zugeordnet werden, während z.B. der Dieserverbrauch sich auf PKW, LNF, SNF, Binnenschiff, Baumaschinen, Dieselloks, Busse und Seeschiffe aufteilt. Eine

Zuordnung zu den Verkehrsmitteln lässt sich daher in den meisten Fällen nur über eine Modellierung erzeugen. Diese wiederum hängt von den Fahrleistungen und Verkehrsleistungen ab, die ebenfalls nur als modellierte Daten darstellbar sind, insbesondere für den MIV. Auch im Güterverkehr stellen die vollständig und regelmäßig erhobenen Daten nur einen Teil der Verkehrs- und Fahrleistung dar (z.B. mautpflichtige Transporte mit LKW gegenüber Transporten im Nah- und Regionalverkehr). Es liegen hier also Unsicherheiten bei den Daten vor, die sich teilweise auch direkt widersprechen. Hinzu kommt im Verkehrssektor das Problem der Abgrenzung der Verkehrsvorgänge, da diese (1) in verschiedenen Räumen (In- / Ausland), bzw. (2) von verschiedenen Akteuren (z.B. Inländer im Ausland, Ausländer im Inland, im Ausland registrierte LKW im Inland) durchgeführt werden können. Werden beim akteursbasierten Ansatz die Personen wohnend in Deutschland (Inländer) oder die in Deutschland registrierten Fahrzeuge genutzt, wird häufig vom Inländerkonzept gesprochen. Da dieses Konzept eine einfachere Abgrenzung ermöglicht (z.B. Bezug auf alle beim KBA registrierten Fahrzeuge) als die räumliche Abgrenzung (die meist als Inlandskonzept bezeichnet wird), finden sich zahlreiche Modellierungen basierend auf dem Inländerkonzept (siehe Abbildung 110).

Aufgrund der Ausgangssituation mit geringer Verfügbarkeit von verlässlichen und vollständig erhobenen Daten gelingt eine Quantifizierung des Verkehrssektors besser, (1) wenn ein integrierter Ansatz gewählt wird, bei dem sich die Ergebnisse der verschiedenen Bereiche wie Aufkommen, Verkehrs- und Fahrleistung und Energieverbrauch konsistent und gegenseitig stützen, (2) wenn zunächst vollständig und verlässliche Statistiken genutzt werden und (3) wenn die Ergebnisse auch über einen längeren Vergangenheitszeitraum und nicht nur für ein Basisjahr geprüft und kalibriert werden. Dieses Vorgehen ist für ASTRA angewendet worden, da das Modell den historischen Zeitraum von 1995 bis 2021 (bzw. 2022) simuliert, um die Parameter der Funktionsgleichungen empirisch zu kalibrieren und die Güte der Modellierung im Gesamt-System zu testen. Der Ansatz hat den Vorteil, dass in sich konsistente Ergebnisse berechnet werden, die aber durchaus von anderen (modellierten) Daten abweichen können. Die zentrale Größe einer Modellierung für den Klimaschutz stellt der Endenergieverbrauch im Verkehr (EEV) dar, aus dem die Treibhausgasemission durch Emissionsfaktoren abgeleitet werden können. Wichtige Zusammenhänge für die Berechnung des EEV sind wie folgt:

$$EEV = \frac{VLstg}{BelF} * EVF(A, WLTP, \Delta RDE)$$

Mit:	EEV =	Endenergieverbrauch eines Verkehrsmittels, hier PKW (verlässliche Statistik auf Ebene des gesamten Energieverbrauchs eines Energieträgers) [J]
	VLstg =	Verkehrsleistung (im Fall des PKW modellierte „Daten“) [pkm]
	BelF =	Beladungsfaktor bzw. Besetzungsgrad (Stichproben, Durchschnittswerte, häufig zur Kalibration genutzt) [P/Fzg]

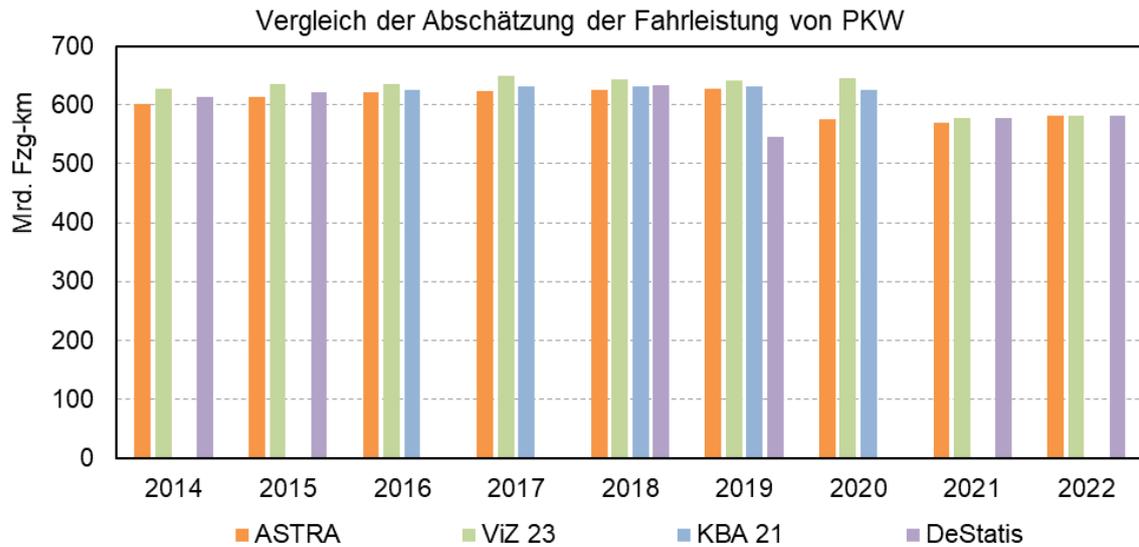
EVF =	Energieverbrauchsfaktor [J/Fzg-km], abhängig von
A =	Antriebsart des Fahrzeugs
WLTP =	EVF gemessen nach WLTP (Typprüfwert der PKW, statistisch abgesichert durch KBA verfügbar)
Δ RDE =	Abweichung von RDE (tatsächlicher Verbrauch) zu WLTP bzw. NEFZ (Stichproben).

Zu den verlässlichen Statistiken in dieser Gleichung gehören die Zahlen zu den Antriebsarten der Fahrzeuge (A),⁹¹ die WLTP-Typprüfwerte der zugelassenen PKW und die Energieverbräuche nach Kraftstoffart. Die übrigen drei Variablen müssen so justiert werden, dass die Gleichung erfüllt ist. Dabei liegen Erhebungen zu den Besetzungsgraden vor, sowie zahlreiche Modellierungen der Verkehrsleistungen (siehe Abbildung 110). Die größte Unsicherheit besteht für die Abweichung zwischen WLTP und RDE (Δ RDE), d.h. zwischen Typprüfwerten und Realverbräuchen. Deswegen wurde diese wie oben beschrieben in ASTRA-M so eingestellt, dass sich bei den gegebenen Werten der anderen Eingangsgrößen eine Lösung der Gleichung ergibt.

Als Beispiel der Abgleichung der Ergebnisse zu modellierten Daten verschiedener Konzepte sollen hier die Fahrleistung sowie die Verkehrsleistung von PKW herangezogen werden, die nicht vollständig erhoben werden können.⁹² In ASTRA ist die Fahrleistung wie oben beschrieben als Inlandsaktivität mit inländischer Flotte berechnet und dann mit ViZ abgeglichen. Diese Inlandsfahrleistung bildet die Grundlage zur Berechnung des EEV in Deutschland. Sie ist als orangener Balken in Abbildung 110 dargestellt. Daneben sind die Ergebnisse verschiedener anderer Quellen abgebildet. Die Ergebnisse von KBA (2021) und DeStatis (2023) sind nach dem Inländerkonzept berechnet. In ASTRA werden zur Kontrolle parallel auch zwei Berechnungen nach dem Inländerkonzept durchgeführt, die zum einen die Jahresfahrleistungen nach Alterskohorten aus BAST (2017a) nutzen und zum anderen die Jahresfahrleistungen nach MiD-2008 mit Bezug zu Antriebsarten und Segmenten.

⁹¹ Hier gibt es nur im Bereich der Gasfahrzeuge kleinere Unsicherheiten.

⁹² Die neuen Möglichkeiten der Digitalisierung im Verkehr könnten zukünftig eine vollständige Erfassung der motorisierten Verkehrs- oder Fahrleistung ermöglichen. Dafür müsste aber zunächst die gesetzliche Grundlage geschaffen werden. Ohne diese werden einzelne Akteure (wie Automobilhersteller) spezifische Teile der Daten erheben ohne dass sich ein Gesamtbild ergibt.



Quelle: ViZ (2023), DeStatis (2023) KBA (2021), eigene Berechnung, M-Five, ASTRA-2023.

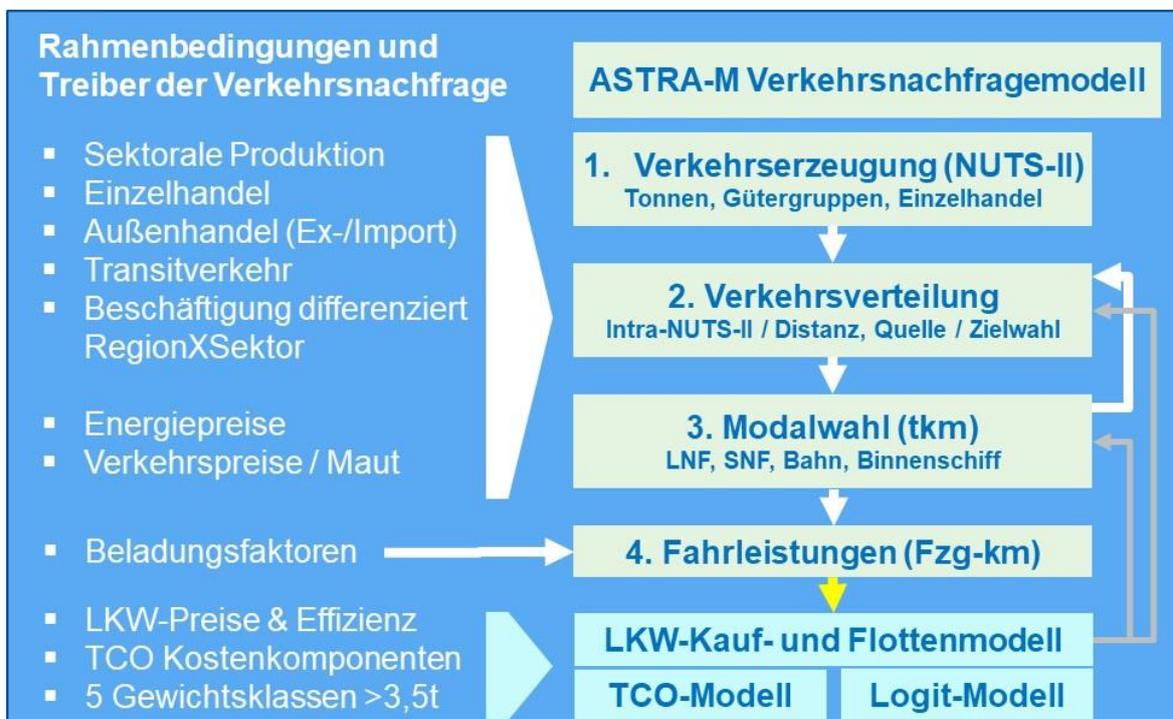
Abbildung 110 PKW-Fahrleistung berechnet nach verschiedenen Konzepten u. Quellen

Ein detaillierter Vergleich anderer relevanter Modellierungen wird in Kapitel 17.1 dargestellt. Der Vergleich bezieht die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose 2023 und die gleitende Langfristprognose 2023 sowie den Projektionsbericht 2023 ein.

12 Modellierung und Referenzszenario Güterverkehr

12.1 Das 4-Stufen Verkehrsmodell

Ähnlich wie im Personenverkehr wird die Verkehrsnachfrage im Güterverkehr endogen in ASTRA-M berechnet. Dafür wird ein sogenannter 4-Stufenansatz genutzt, der auf den Treibern des Güterverkehrs (Außenhandel, Güterproduktion, Verkauf an Endverbraucher) sowie dem Transitverkehr aufsetzt (siehe Abbildung 111). Die Besonderheit des ASTRA-M-Ansatzes ist, dass das 4-Stufenmodell direkt mit den Flottenmodellen der Nutzfahrzeuge gekoppelt ist und sich so Politiken, die die Flottenstruktur und damit die Kostenstruktur der Logistik ändern, sofort auch in der Verkehrsnachfrage und der Modalwahl im Güterverkehr widerspiegeln. Das ist z.B. in der bisherigen Modellierung der BVWP bzw. der VP2030 nicht möglich. Gleichfalls ist durch die Kopplung an politiksensitive Energiepreis- und Strom- / Energieproduktions-Modelle in ASTRA-M auch eine Änderung der Steuer- und Umlage-Politik bei Energieträgern (z.B. H₂, PtL) sofort wirksam auf die Verkehrsnachfrage.



Quelle: M-Five.

Abbildung 111 Modellierung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr und Kopplung mit Nutzfahrzeug-Flottenmodell

12.2 Verkehrsnachfrage im Güterverkehr

Der in ASTRA modellierte Güterverkehr kann als Inlandsverkehr betrachtet werden. Er beinhaltet drei verschiedene Nachfragebereiche:

- Den nationalen Verkehr mit Quelle und Ziel in Deutschland. Das Aufkommen bestimmt sich hier also aus der nationalen Produktion der 26 Gütersektoren aus der deutschen Input-Output-Tabelle in ASTRA-M.

- Den Quell-/Zielverkehr bei dem entweder Quelle oder Ziel in Deutschland liegen und das jeweilige Pendant im Ausland. Dabei wird nur die Strecke innerhalb Deutschlands in die Nachfrage einbezogen. Das Aufkommen wird hier aus den deutschen Ex- und Importen abgeleitet.
- Dem Transitverkehr, bei dem Quelle und Ziel außerhalb Deutschlands liegen, aber ein Teil der Wegstrecke auf deutschem Territorium verläuft. Auch hier wird nur die Strecke in Deutschland einbezogen. Das Aufkommen wird hier aus dem Transitverkehr aus Verkehr in Zahlen (ViZ) und einer Quell-Zielmatrix der grenznahen Zonen abgeleitet.

Als Verkehrsmittel werden bei der Modalwahl drei verschiedene LKW-Klassen (leichte Nutzfahrzeuge mit <3,5t zGG, LKW mit zGG von 3,5t bis 12t, und schwere LKW mit zGG über 12t inklusive Sattelzugmaschinen) sowie die Bahn und das Binnenschiff (ohne See- und Küstenschifffahrt) unterschieden.

Das Aufkommen erhöht sich von 2019 bis 2050 aufgrund der gestiegenen Wirtschaftsleistung und des wachsenden Handels trotz der Corona-Pandemie um etwa 14%. Bis 2030 legt das Aufkommen gegenüber 2019 um 2.8% zu. Davon profitieren insbesondere mittelschwere LKW und die Bahn mit Zuwächsen von +41% bzw. +15% bis 2050. Das Binnenschiff verliert 19% an Aufkommen bis 2050. Die Verkehrsleistungen nehmen bis 2030 um insgesamt +13% und bis 2050 um +25% zu. Die Fahrleistungen im LKW-Verkehr steigen bis 2030 um +14% und bis 2050 um 41%. Für schwere LKW über 20t zGG beträgt der Zuwachs +24%.

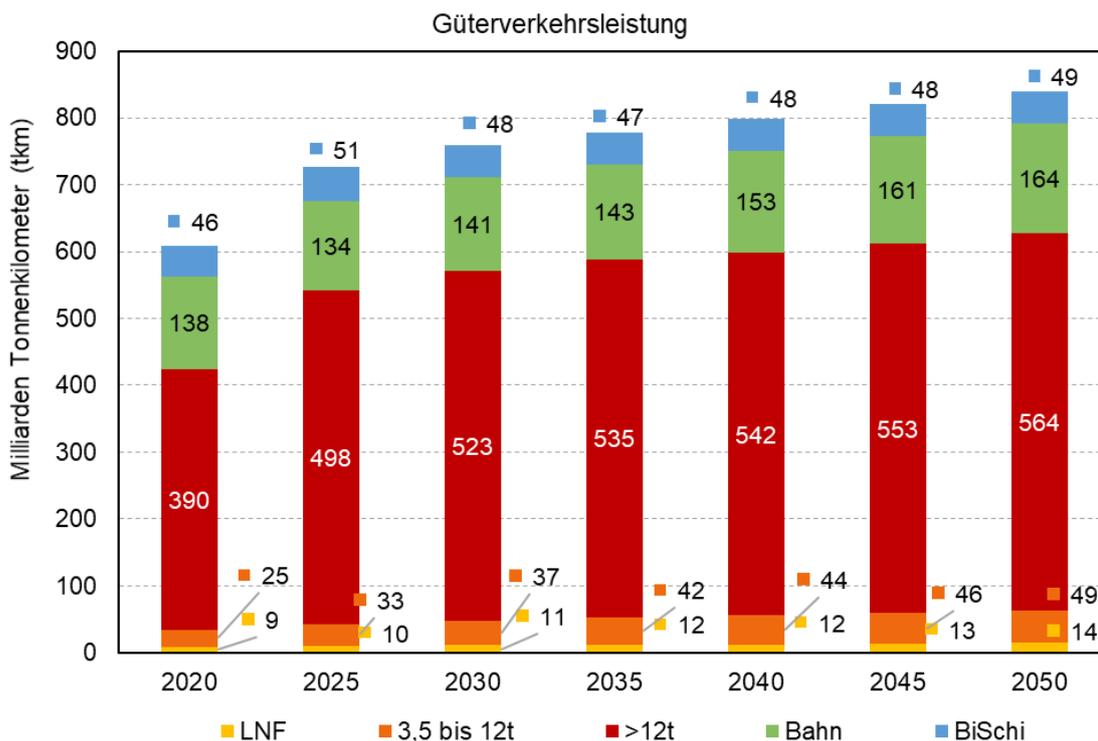
Tabelle 38 Entwicklung der Nachfrage im Güterverkehr

Verkehrsmittel	Einheit	Jahr					Änderung 2019 bis 2050	
		2019	2025	2030	2040	2050	% p.a.	% abs.
Aufkommen								
Leichte NFz	Mio * t	237,4	239,2	256,6	286,7	324,5	1,0%	36,7%
3,5t bis 12t	Mio * t	477,2	496,2	532,3	606,9	674,6	1,1%	41,4%
Über 12t zGG	Mio * t	2 913,5	3 049,9	2 976,8	3 056,2	3 219,1	0,3%	10,5%
LKW gesamt	Mio * t	3 628,1	3 785,3	3 765,8	3 949,9	4 218,2	0,5%	16,3%
Bahn	Mio * t	336,2	340,2	341,8	363,5	387,2	0,5%	15,2%
Binnenschiff	Mio * t	221,0	222,5	194,0	183,5	178,9	-0,7%	-19,1%
Gesamt	Mio * t	4 185,3	4 348,0	4 301,6	4 496,9	4 784,3	0,4%	14,3%
Verkehrsleistung								
L-NFz	Mrd. tkm	9,6	9,8	10,9	12,5	14,4	1,3%	49,6%
3,5t bis 12t	Mrd. tkm	30,6	33,1	37,0	43,5	49,0	1,5%	60,1%
Über 12t zGG	Mrd. tkm	453,5	498,2	523,3	542,4	563,8	0,7%	24,3%
LKW gesamt	Mrd. tkm	493,8	541,1	571,2	598,4	627,3	0,8%	27,0%
Bahn	Mrd. tkm	126,9	133,8	140,7	152,8	163,7	0,8%	29,0%
Binnenschiff	Mrd. tkm	49,9	51,1	47,7	47,8	48,5	-0,1%	-2,9%
Gesamt	Mrd. tkm	670,6	726,0	759,6	799,0	839,5	0,7%	25,2%
Fahrleistung								
L-NFz	Mrd. Fzg-km	46,1	47,0	52,1	60,0	69,4	1,3%	50,6%
3,5t bis 12t	Mrd. Fzg-km	10,7	11,6	13,0	15,4	17,4	1,6%	62,6%
Über 12t zGG	Mrd. Fzg-km	35,9	39,1	41,1	42,8	44,6	0,7%	24,1%
LKW gesamt	Mrd. Fzg-km	92,7	97,7	106,3	118,2	131,4	2,2%	41,7%

Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2023.

Siehe Kapitel 12.3 und 17.3 zu Vergleichen mit der amtlichen Statistik.

Abbildung 112 zeigt nochmals die Entwicklung der Verkehrsleistung im Güterverkehr im Zeitverlauf auf. LKW und Bahn holen ihre Rückgänge aus dem Krisenjahr 2020 auf und legen auch nach 2025 weiter moderat zu. Die Verkehrsleistung im Binnenschiff stagniert ab 2025.



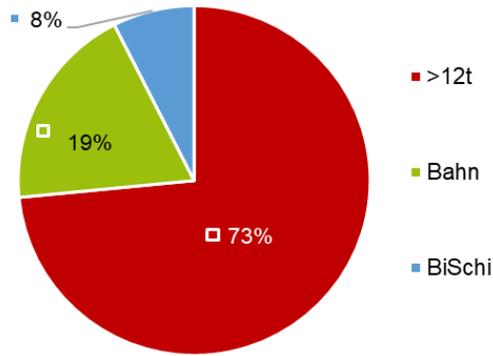
Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 112 Verkehrsleistung im Güterverkehr (in Mrd. tkm)

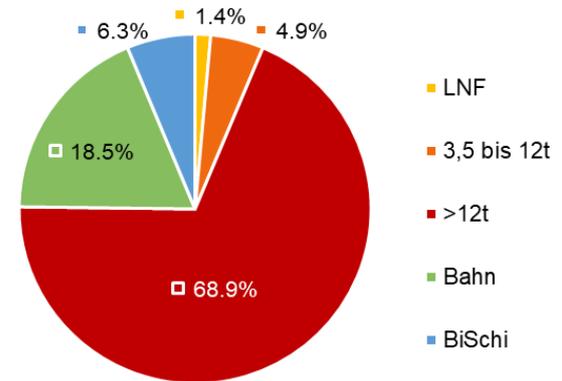
Die in Tabelle 38 beschriebene Inlandsfahrleistung von 106 Mrd. Fahrzeug-km im Jahr 2030 mit der Differenzierung nach Gewichtsklassen wird genutzt, um den EEV und die THG-Emission des Straßen-Güterverkehrs abzuschätzen. Vergleichend wird im Modell aber auch die Inländerfahrleistung abgeschätzt.

Die Entwicklung der Modalanteile verschiebt sich langfristig leicht zugunsten der Schiene (siehe Abbildung 113). Leichte Nutzfahrzeuge gewinnen ebenfalls geringfügig. Schwere NFz geben leicht nach und am stärksten reduziert sich der Modalanteil des Binnenschiffs. D.h. Verbesserungen bei Infrastruktur und Betrieb auf der Schiene werden zu großen Teilen durch Effizienzverbesserungen auf der Straße kompensiert.

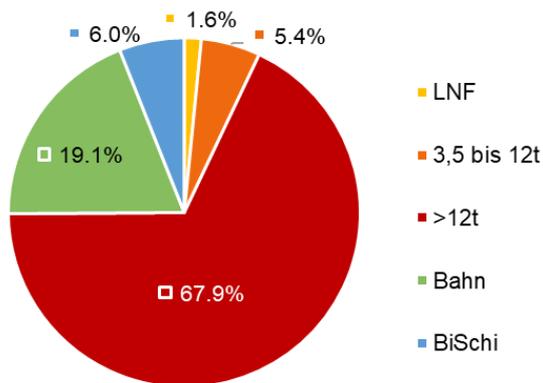
Modal Split im Güterverkehr (tkm) in 2019, Daten aus ViZ



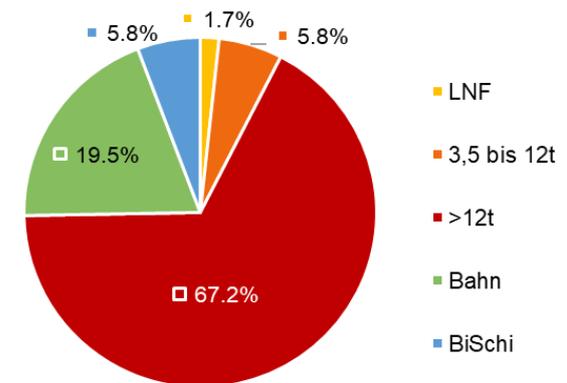
Modal Split im Güterverkehr (tkm) in 2030



Modal Split im Güterverkehr (tkm) in 2040



Modal Split im Güterverkehr (tkm) in 2050

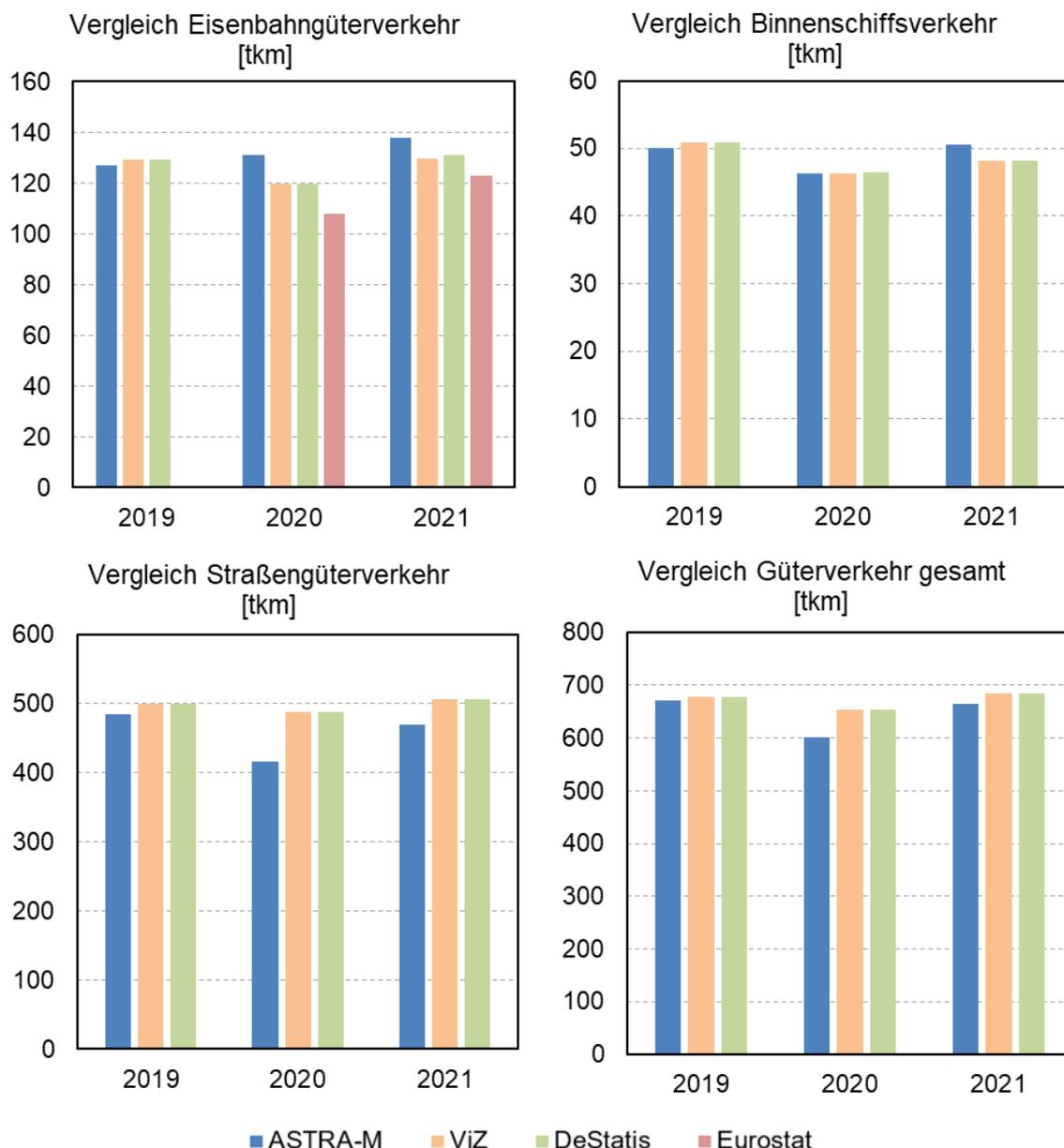


Quelle: M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 113 Modalanteile der Verkehrsmittel im Güterverkehr im REF-2050

12.3 Kritische Würdigung der Ergebnisse und der Statistik im Güterverkehr

Der Vergleich der Verkehrsleistung der Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße zeigt eine gute Konsistenz der Modellierung in 2019 (siehe Abbildung 114). Allerdings ergibt die Simulation in den Krisen Jahren ein etwas abweichendes Bild. Während die Binnenschifffahrt auch 2020 und 2021 gut abgebildet wird, liegt der Schienengüterverkehr zu hoch und der Straßengüterverkehr deutlich zu niedrig. Hier schlagen die ökonomischen Entwicklungen im Aufkommen und dann der Verkehrsleistung auf der Straße sich nieder und überzeichnen in ASTRA-M vorübergehend den ökonomischen Einbruch.



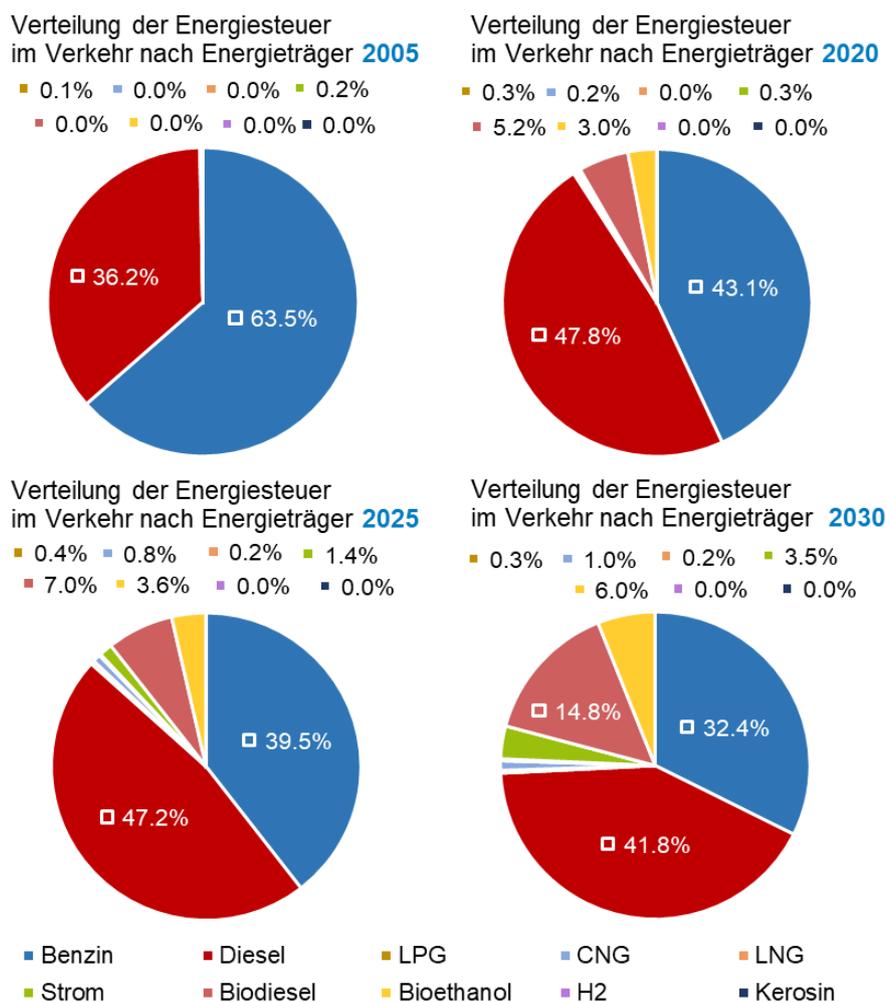
Quelle: ViZ (2023), DeStatis (2023) Eurostat (2023), eigene Berechnung, M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 114 Güterverkehrsfahrleistung nach verschiedenen Quellen und Verkehrsträgern

13 Einnahmen und Investitionen im Verkehr

Der Verkehr führt zu Einnahmen für den Staatshaushalt. Gleichzeitig erfordert er – teils öffentliche – Investitionen in Netzinfrastrukturen, Fahrzeuge und die Energieversorgung. Dieses Kapitel kann keinen umfassenden und exakten Überblick über diese Einnahmen- und Ausgabenbereiche des Verkehrs geben, soll aber eine Einordnung der Veränderungen der monetären Seite des Verkehrs ermöglichen sowie für die Größe der möglichen bzw. notwendigen Veränderungen in einem zukünftigen Klimaschutzprogramm sensibilisieren.

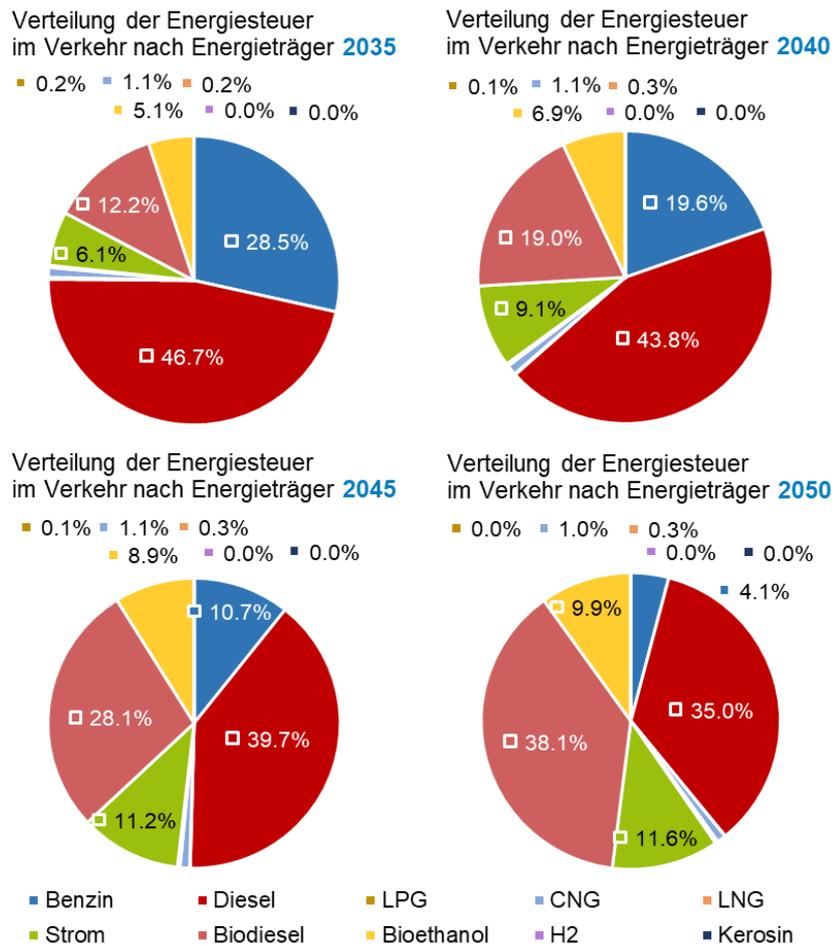
Historisch ist die wichtigste Einnahmequelle aus dem Verkehr die Energiesteuer. Abbildung 118 zeigt die Verteilung der Bestandteile der Energiesteuer im Zeitverlauf. Noch 2005 stammten knapp zwei Drittel der Steuereinnahmen aus Benzin. 2020 entfällt fast die Hälfte auf Diesel und auch weitere Kraftstoffe leisten einen Beitrag zu den Einnahmen wie CNG, Bioethanol (3,0%) oder Biodiesel (5,2%). Diesel- und Benzinabsatz steuern auch 2030 noch fast drei Viertel und damit den größten Teil des Aufkommens bei. Auf im Verkehr genutzten Strom entfällt im Jahr 2030 3,5% des Aufkommens (Stromsteuer). Biomasse-basierte flüssige Kraftstoffe machen im Jahr 2030 gut 20% der Energiesteuereinnahmen aus, während Wasserstoff (H₂) und Kerosin in REF-2050 noch von der Energiesteuer befreit sind.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 115 Verteilung der Einnahmen aus der Energiesteuer in den Jahren 2005, 2020, 2025 und 2030 (REF-2050)

Auf lange Sicht bis 2050 verschieben sich die Einnahmen aus der Energiesteuer deutlich. Im Jahr 2050 entstehen im REF-2050 höhere Einnahmen aus der Besteuerung von Biodiesel (38,1%) als von fossilem Diesel (35%). Dies bedeutet, dass auch die vertankte Menge an Biodiesel über der von fossilem Diesel liegt. Strom liefert über die Stromsteuer den drittgrößten Beitrag zur Energiesteuereinnahme mit 11,6%, gefolgt von Bioethanol (9,9%) und fossilem Benzin (4,1%).



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 116 Verteilung der Einnahmen aus der Energiesteuer in den Jahren 2035, 2040, 2045 und 2050 (REF-2050)

Hier sei nochmal darauf hingewiesen, dass REF-2050 kein Zielerreichungs-Szenario ist, d.h. auch das nationale Ziel *Klima-Neutralität bis 2045* im Szenario nicht erreicht wird. Stattdessen ist REF-2050 ein Maßnahmenzenario und mit den bis August 2022 ergriffenen Maßnahmen wird das Ziel der Klima-Neutralität noch verfehlt.

Die absolute Höhe der Energiesteuereinnahme in realen Werten sinkt seit mindestens 2005 (siehe Abbildung 119). Hier ist die Betrachtung in realen Preisen von großer Bedeutung, weil die Einnahmen in den allgemeinen Steuertopf gehen, und oft gegen die Ausgaben für Verkehr z.B. Verkehrs-Infrastrukturen gegengerechnet werden. Die Höhe der Ausgaben bzw. der Effekt der Ausgaben z.B. in Kilometer gebauter Infrastruktur lässt sich nur anhand realer Einnahmen bzw. Ausgaben beurteilen; und da zeigt der stark abnehmende Trend in Abbildung 117, dass die Energiesteuer einen immer kleineren Beitrag zur Finanzierung von Verkehrsinfrastrukturen leisten können wird. Die Verschiebung der Einnahmen von fossilen, flüssigen Kraftstoffen zu Biomasse, Strom und begrenzt auch Gas wird ebenfalls sichtbar. Der Anteil der alternativen (und zunehmend erneuerbaren) Energieträger (Strom, Biomasse) steigt von 8,8% im Jahr 2020 auf über 23% in 2035 und erhöht sich bis 2050 auf fast 60%. Bis 2035 hat sich die absolute Höhe der realen Einnahmen fast halbiert.

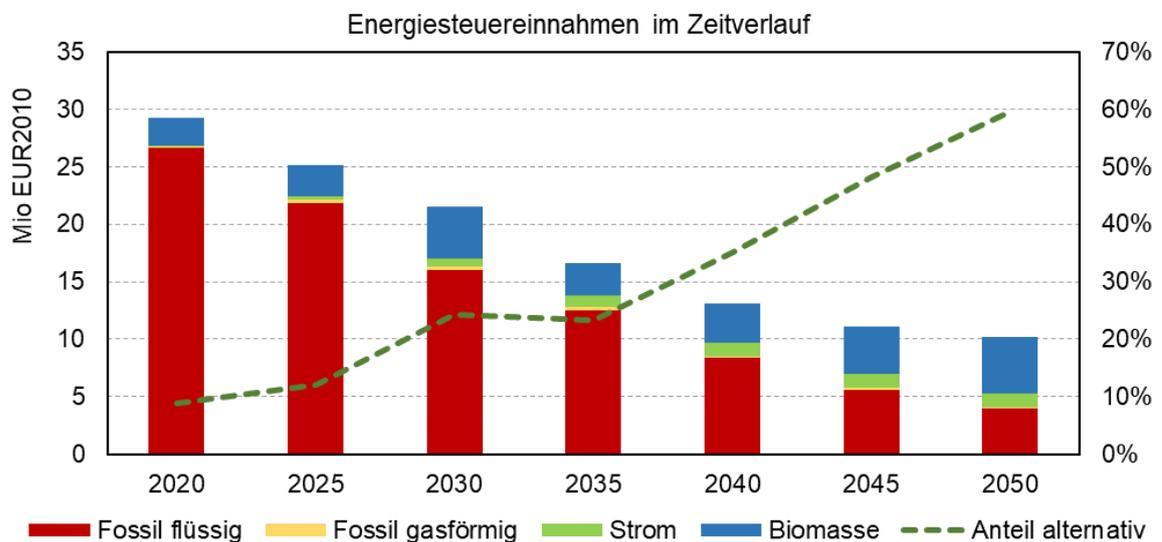
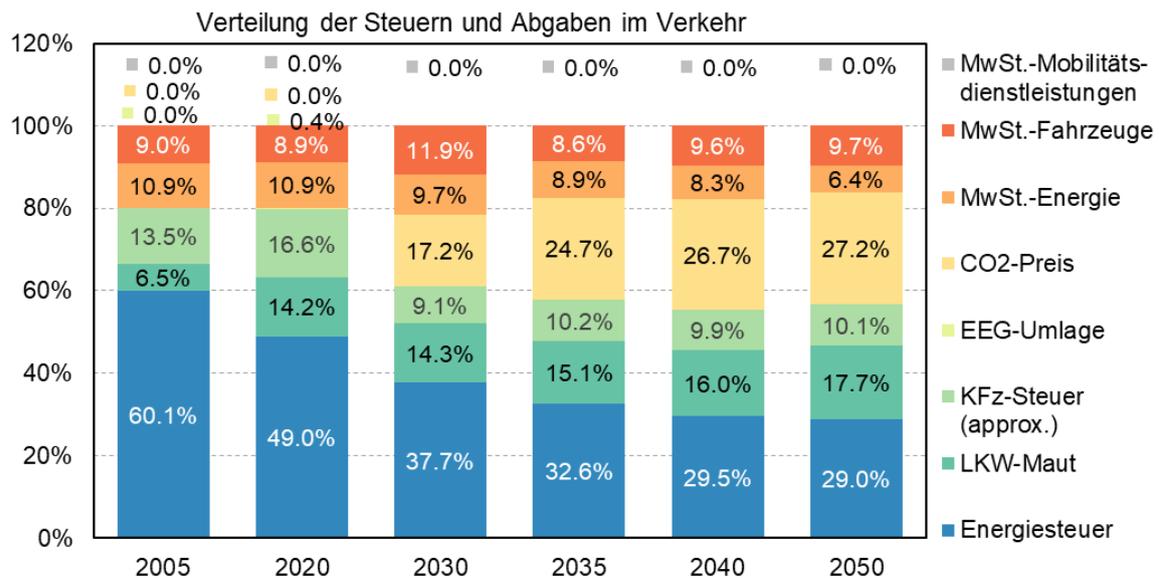


Abbildung 117 Entwicklung der Einnahmen aus der Energiesteuer (REF-2050) ⁹³

Die staatlichen Einnahmen aus dem Verkehrssektor entfallen auf verschiedene Steuern und Abgaben. In der Modellierung von REF-2050 und mit Fokus auf den nach KSG abgegrenzten Verkehrssektor lassen sich 8 wichtige Kategorien unterscheiden (siehe Abbildung 118). 2005 entfallen drei Fünftel der Einnahmen auf die Energiesteuer. Bis 2035 schrumpft dieser Anteil auf ein Drittel und sinkt anschließend nur noch leicht. Auch die Anteile der MwSt. auf den privaten Kauf von Energie im Verkehr, Fahrzeuge und Verkehrsdienstleistungen (z.B. ÖV-Tickets, Car-Sharing) verringern sich leicht von knapp 20% auf etwas über 16%. LKW-Maut und KFz-Steuer, die aufgrund der komplizierten

⁹³ In diesem Kapitel sind Steuerzahlungen und Investitionen in realen €₂₀₁₀ angegeben, da diese die in ASTRA-M gültige monetäre Zeitbasis darstellt. Zur Umrechnung auf €₂₀₂₂ nutzen wir einen Faktor von 1,253. Zur Umrechnung in nominale Werte für Jahre nach 2022 können Sie von diesem Wert ausgehen und mit ihrer Inflationsannahme für die kommenden Jahre multiplizieren.

Berechnungsweise nur näherungsweise bestimmt werden können, halten knapp ihre Anteile von insgesamt etwa einem Viertel von 2019 bis 2050. An Bedeutung gewinnen die ab 2021 neu hinzukommenden Einnahmen aus dem CO₂-Preis, der 2030 17% der hier betrachteten und modellierten Steuern und Abgaben aus dem Verkehr ausmacht und im Jahr 2050 über 27%. Die EEG-Umlage aus dem Verkehr sinkt ab 2023 auf null, da diese Mitte 2022 abgeschafft bzw. ab dann aus dem Staatshaushalt finanziert wurde. Davor werden noch bis zu 200 Mio. €₂₀₁₀ pro Jahr im Verkehr bezahlt.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 118 Verteilung der modellierten Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2050)

Die Entwicklung der modellierten Steuern und Abgaben über die Zeit in realen Preisen sinkt von 2020 bis 2035 um 15% von rund 60 Mrd. €₂₀₁₀ pro Jahr auf etwas über 50 Mrd. €₂₀₁₀ (siehe Abbildung 119). Bis 2050 gehen die staatlichen Einnahmen aus dem Verkehrssektor gegenüber 2019 sogar um 43% zurück. Die LKW-Maut verzeichnet steigende reale Einnahmen bis 2019 durch die verschiedenen Maut-Anpassungen wie schrittweise Ausdehnung des bemautes Netzes, Erweiterung der einbezogenen Fahrzeugklassen und Umwelteffekte sowie Wachstum des Straßengüterverkehrs, während die Einnahmen aus der Energiesteuer, wie oben beschrieben, deutlich rückläufig sind. Ab 2021 werden die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung (BEHG) sichtbar und betragen im Jahr 2030 knapp 10 Mrd. €₂₀₁₀. Hinsichtlich der Nutzfahrzeuge ist zu beachten, dass in REF-2050 noch kein CO₂-Preis im Rahmen der LKW-Maut beschlossen ist, dafür aber auch LKW den CO₂-Preis im Diesel zu bezahlen haben.

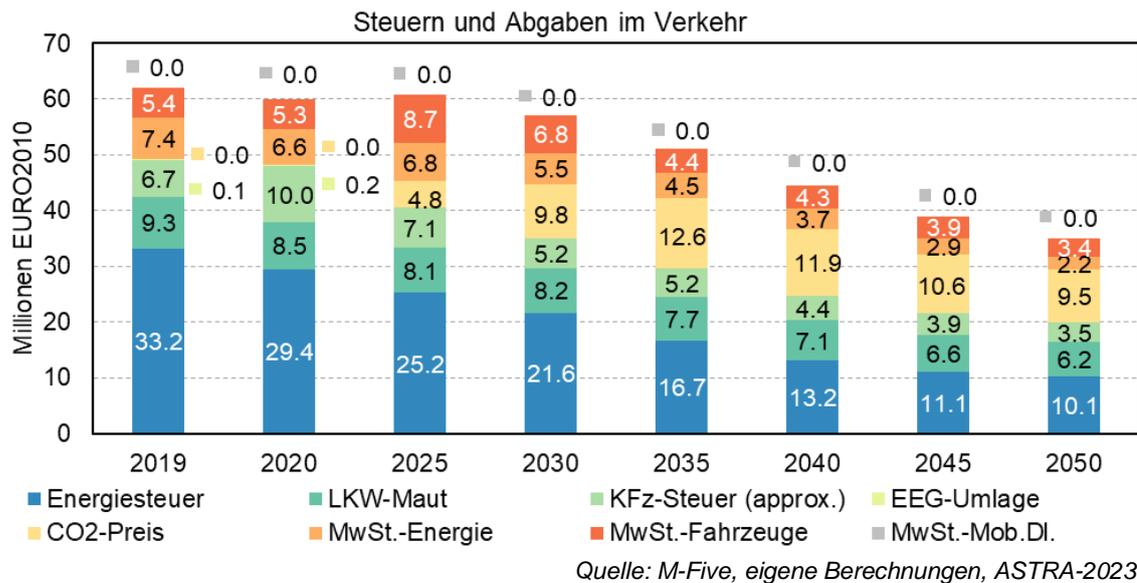


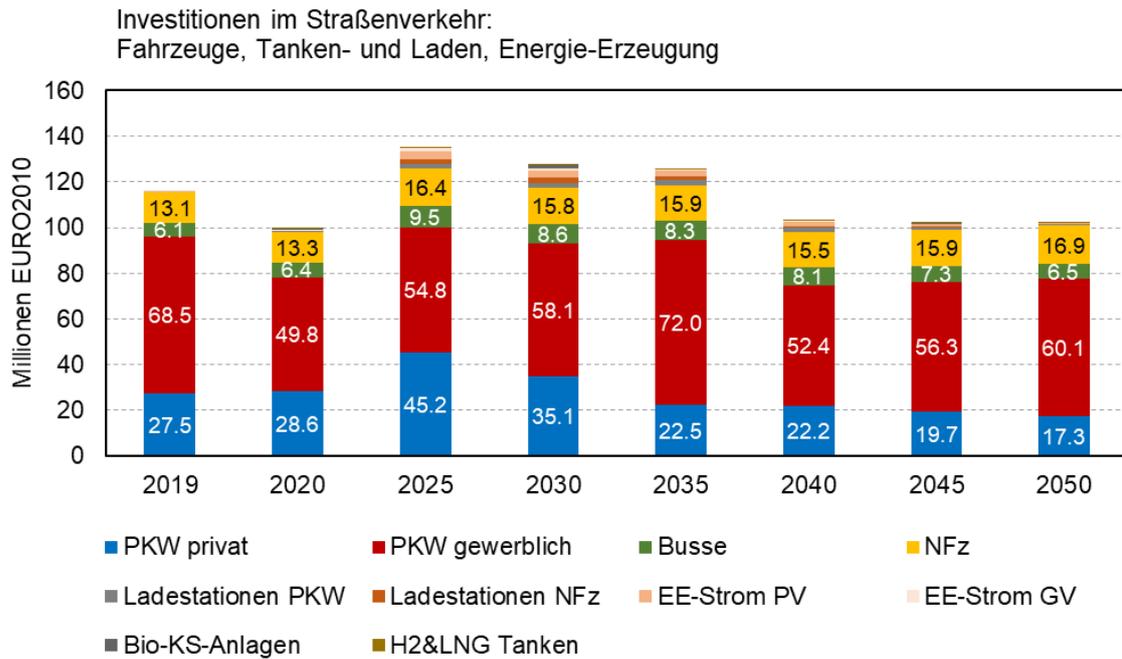
Abbildung 119 Entwicklung verschiedener Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2050)

Ein KSP+ Politikprogramm wird die Investitionsstruktur und ggf. auch das Niveau der Investitionen im Verkehr verändern. Daher ist es von Bedeutung, die wichtigsten, weil umfangreichsten Investitionen im Verkehr zu kennen. Dies sind die Investitionen in Straßenfahrzeuge, während Investitionen in Verkehrs-Infrastrukturen erst mit weitem Abstand an zweiter Stelle folgen.⁹⁴ Die jährlichen Investitionen für den Straßenverkehr (ohne Straßeninfrastruktur) belaufen sich auf zwischen 100 und 135 Mrd. €₂₀₁₀ zwischen 2019 und 2050.

Abbildung 120 stellt die Verteilung der Investitionen in verschiedene Fahrzeugkategorien und zugehörige Energieinfrastrukturen im REF-2050 im Zeitverlauf dar sowie Abbildung 121 die Entwicklung des Niveaus der Investitionen. Etwa die Hälfte der Investitionen im Jahr 2019 entfällt auf gewerbliche PKW-Käufer, etwa ein Viertel auf private PKW-Käufer⁹⁵ und ein Neuntel auf Käufe von leichten und schweren LKW. Im Zeitverlauf verringert sich der Anteil der privaten PKW-Käufer deutlich von etwa einem Drittel auf unter einem Fünftel. Von 2023 bis 2040 gewinnt der Aufbau von Ladestationen und zusätzlichen Erzeugungsanlagen für elektrischen Fahrstrom aufgrund des Markthochlaufs an E-PKW und E-NFz an Bedeutung. Der Aufbau von Ladestation für BEV-LKW erfordert ähnliche jährliche Investitionen wie für PKW, etwa 2 Mrd. €₂₀₁₀ p.a. Der Aufbau von Tankstellen für LNG und H₂ sowie von Anlagen zur Erzeugung von zusätzlichen Biokraftstoffen fällt dagegen kaum ins Gewicht.

⁹⁴ Eine detailliertere Analyse des Verhältnisses von Infrastruktur- und Fahrzeug-Investitionen erfolgte in einer gesamtwirtschaftlichen Analyse des Verkehrssystems (Schade et al. 2020).

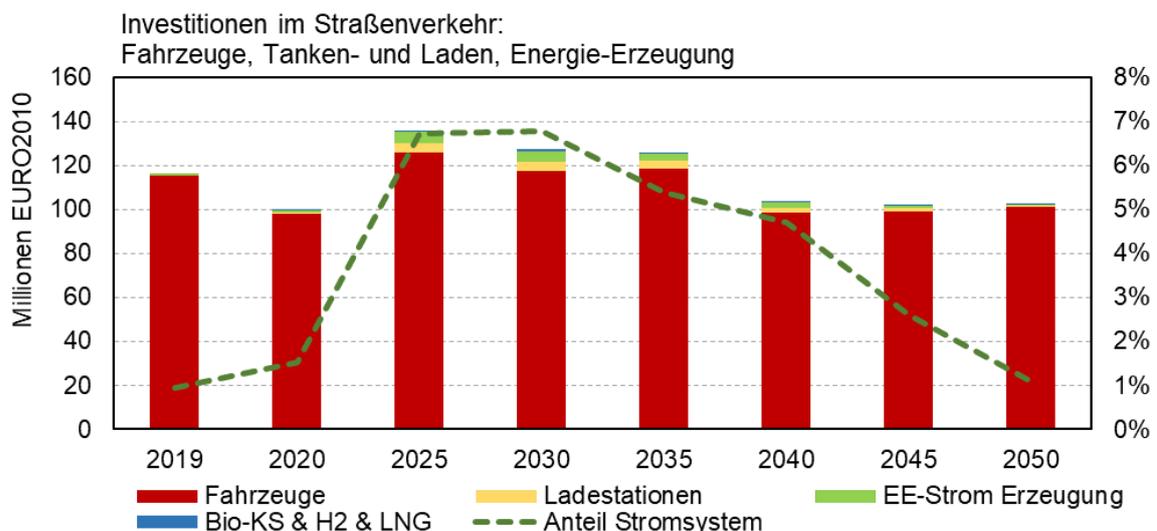
⁹⁵ Die Angabe der Investitionen privater Haushalte erfolgt hier ohne Berücksichtigung der MwSt. und damit aus der Sicht der durch Investitionen erzielten Einnahmen der Unternehmen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 120 Entwicklung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2050)

Die jährlichen Investitionen in Straßenfahrzeuge in Deutschland liegen etwa bei 100 Mrd. €₂₀₁₀ (Abbildung 121). Ab 2020 kommen Investitionen in Ladestationen und die notwendige EE-Stromerzeugung in größerem Umfang hinzu, die 2030 etwa 10 Mrd. €₂₀₁₀ erreichen. Das bedeutet aber für REF-2050 weiterhin, dass die Investitionen in Fahrzeuge deutlich die Investitionen in die zugehörige Energieinfrastruktur (ohne Stromnetze) übersteigt (auch im Jahr 2030 noch um den Faktor 10).



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

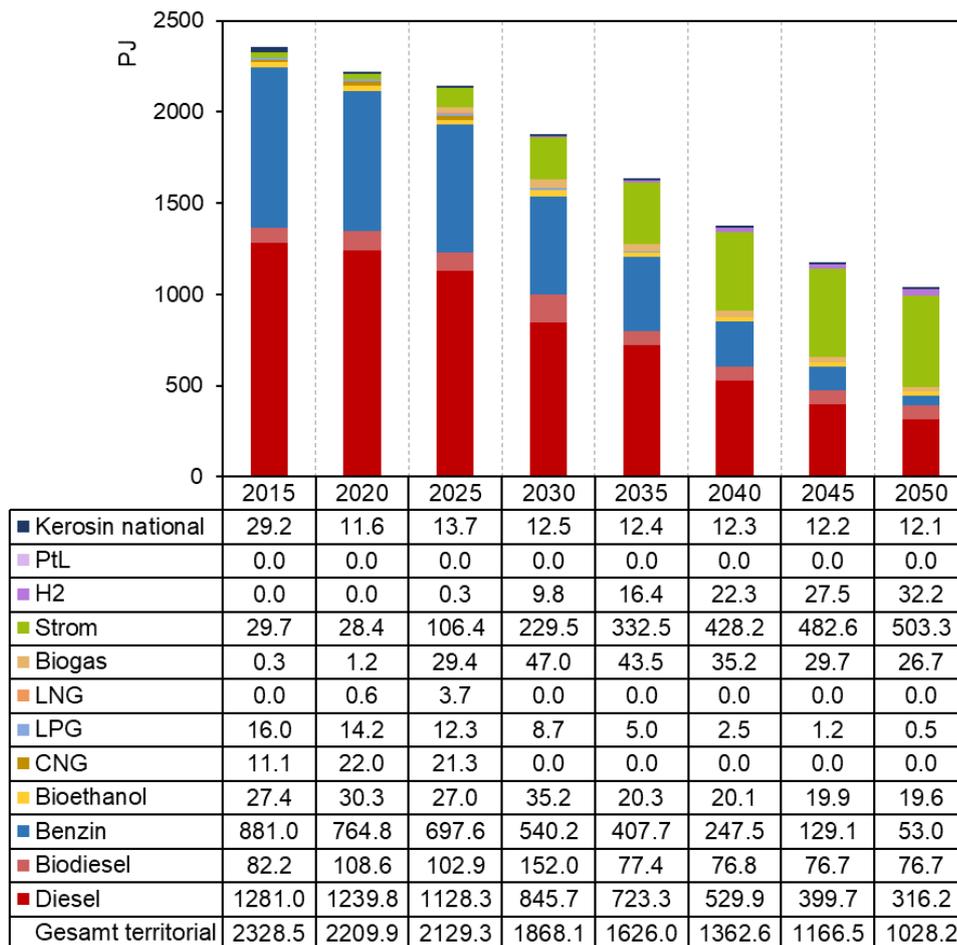
Abbildung 121 Entwicklung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2050)

14 Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr

14.1 Entwicklung des Endenergieverbrauchs (EEV)

Der Endenergieverbrauch (EEV) des Verkehrs sinkt durch die Elektrifizierung deutlich. Hinzu kommen Reduktionsbeiträge durch die Veränderungen der Nachfrage (Modal-Wahl und Digitalisierung). Von 2020 bis 2030 nimmt der EEV um -16% ab. Bis 2035 beträgt die Abnahme -26%. In den folgenden Dekaden sinkt der EEV weiter um -45% bis 2040 und um weitere -25% bis 2050.

Abbildung 122 zeigt die Entwicklungen nach Energieträgern. Im REF-2050 ergibt sich die stärkste Zunahme für die Stromnachfrage, die sich von 2020 bis 2035 verzehnfacht. Biokraftstoffe nehmen bis 2030 zu, während fossile Kraftstoffe abnehmen. Der Anteil der fossilen Kraftstoffe am EEV des Verkehrs sinkt von 92% im Jahr 2020 auf 74% in 2030 und auf 35% in 2050. Eine begrenzte Menge von 9,8 PJ H₂ kommt im Jahr 2030 in Straßenfahrzeugen zum Einsatz. Diese erhöht sich auf 32,2 PJ bis 2050. Die Modellierung berücksichtigt dabei explizit die Vorgaben der RED-II (Stand 2018) mit nationaler Umsetzung in die THG-Quote (BlmSchG, BlmSchV). Dies führt zu einem starken Zuwachs des Einsatzes von Biogas und steigenden Biodieselmengen bis 2030 (siehe Kapitel 4.7).



Quelle: M-Five, bei Bahn Strom nur Fahrstrom, alle Jahre eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 122 Endenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2050)

Durch die Defossilisierung des EEV im Verkehr getrieben durch Elektrifizierung, Verlagerung und Effizienzsteigerung sinkt der Verbrauch fossiler Kraftstoffe gegenüber 2020 um 32% bis 2030 und um 83% bis 2050. Bis 2036 hat sich der Verbrauch fossiler Kraftstoffe in Deutschland halbiert.

Abbildung 123 zeigt den Verlauf der Endenergienachfrage nach Verkehrsmittel. Bei PKW verringert sich die Nachfrage um etwa 241 PJ von 2020 bis 2030 (-17%). Bis 2050 verstärkt sich die Reduktion und der EEV von PKW geht um weitere 687 PJ zurück (-58%).

Auch im Güterverkehr mit LNF und SNF reduziert sich trotz Steigerung der Verkehrsleistung der EEV durch Elektrifizierung und Effizienzverbesserung um etwa 127 PJ (-17%). Die weitere Reduktion bis 2050 liegt in absoluten Mengen in vergleichbarer Höhe bei 120 PJ (-20%). Bei dem geringeren Rückgang im Vergleich zum PKW macht sich die ohne CO₂-Standards nach 2030 in REF-2050 nur noch moderate Entwicklung der Elektrifizierung bei SNF bemerkbar.

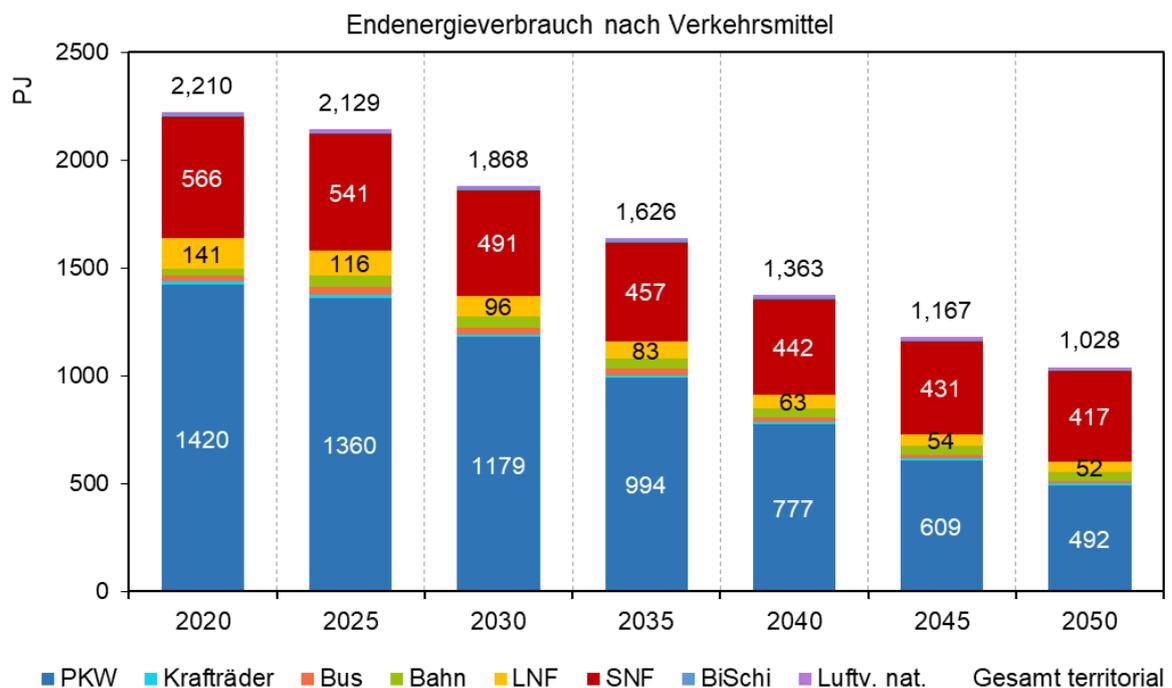
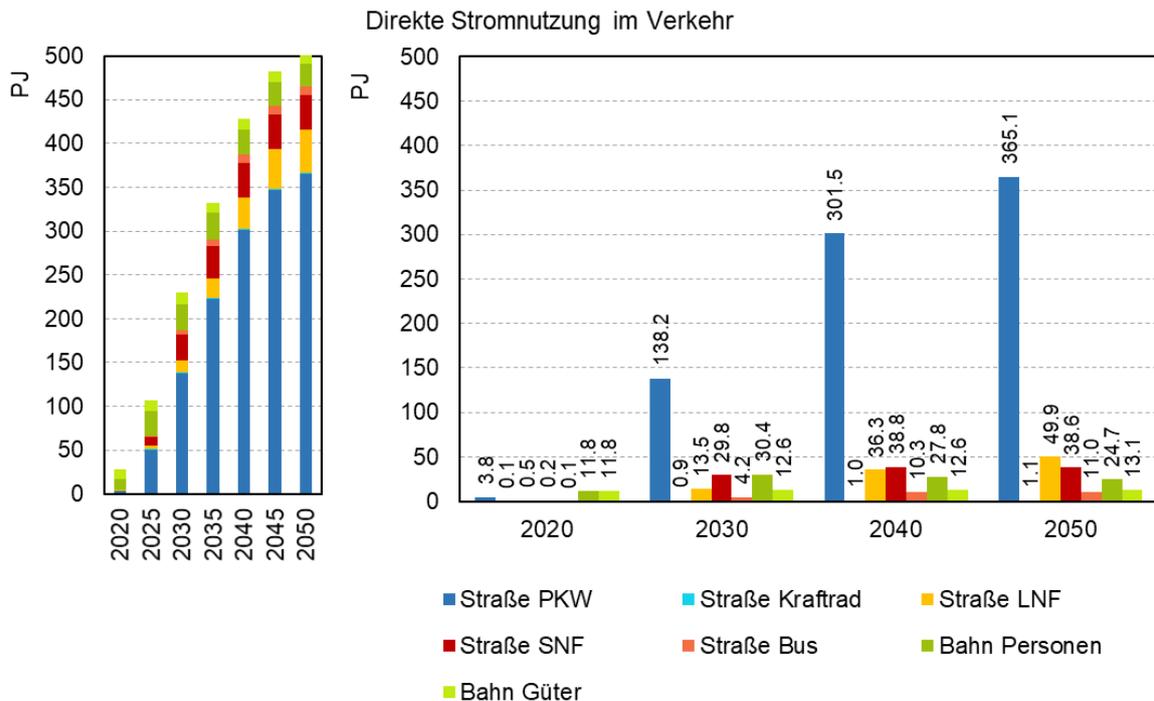


Abbildung 123 Endenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2050)⁹⁶

⁹⁶ In Einzeljahren unterliegen die Endenergieverbräuche starken quartalsweisen Schwankungen. Hier ausgewiesen ist jeweils die Hochrechnung des ersten Quartals auf das Gesamtjahr. In Jahren mit starken unterjährig Schwankungen entspricht dies nicht dem Mittel aus den in ASTRA jeweils für die vier Quartale berechneten Wert des EEV, welches repräsentativer für den Gesamtenergieverbrauch eines Jahres wäre.

Abbildung 124 zeigt den Hochlauf der Stromnachfrage der einzelnen Verkehrsmittel für die direkte Stromnutzung, d.h. ohne die Erzeugung von PtL oder H₂ sondern nur durch BEV, PHEV, E-Busse und E-LKW. PKW sind in REF-2050 ab 2025 der dominante Stromnachfrager aus dem Verkehr. Bei SNF wäre in einem KSPr+ Szenario unter Einschluss der CO₂-differenzierten Maut als zusätzliches Instrument ebenfalls eine deutlich höhere Stromnachfrage zu erwarten.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 124 Stromnachfrage der verschiedenen Verkehrsmittel (nur direkte Nutzung als Fahrstrom)

Abbildung 125 präsentiert den Hochlauf der biogenen Kraftstoffe, der sich insbesondere aus der Nutzung von Biodiesel und Biogas speist und durch die Regulierung in der THG-Quote geprägt ist. Dabei entsteht die Biogasnachfrage zum großen Teil durch SNF, sowohl mit CNG- als auch mit LNG-Antrieb. Aus Sicht der Verfügbarkeit könnten größere Anteile an fortschrittlichem Bioethanol zu Benzin beigemischt werden, solange eine ausreichend hohe Zahl an Benzin-Verbrennern in der Flotte vorhanden ist und sobald Abnahmemöglichkeiten für höhere Beimischungsanteile als E10 bei Benzin geschaffen werden. Hierfür müsste ein KSPr+ Programm Instrumente vorsehen, die die technische Nutzbarkeit höherer Bioethanol-Anteile bei PKW und LNF sicherstellen. Zu beachten ist auch, dass die Erreichung politischer Ziele (hier 15 Mio. E-PKW im Jahr 2030) dazu führen würden, dass die Benzinnachfrage weiter sinkt und damit höhere Bioethanol-Mengen nur mit noch höher gesetzten Beimischungsgrenzen erreichbar wären.

Auch die Biogasmengen können ab 2026 nicht weiter erhöht werden, weil bereits die gesamte Gasnachfrage aus dem Verkehr durch Biogas befriedigt wird. Um mehr Biogas absetzen zu können, müssten spätestens ab Mitte der 2020er Jahre mehr Gas-Fahrzeuge neu zugelassen werden.

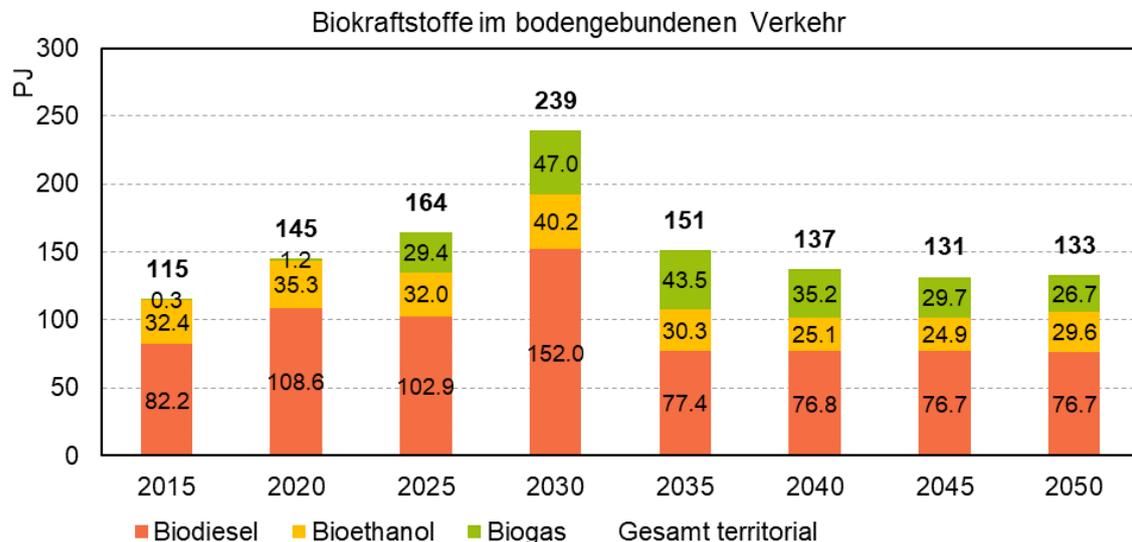
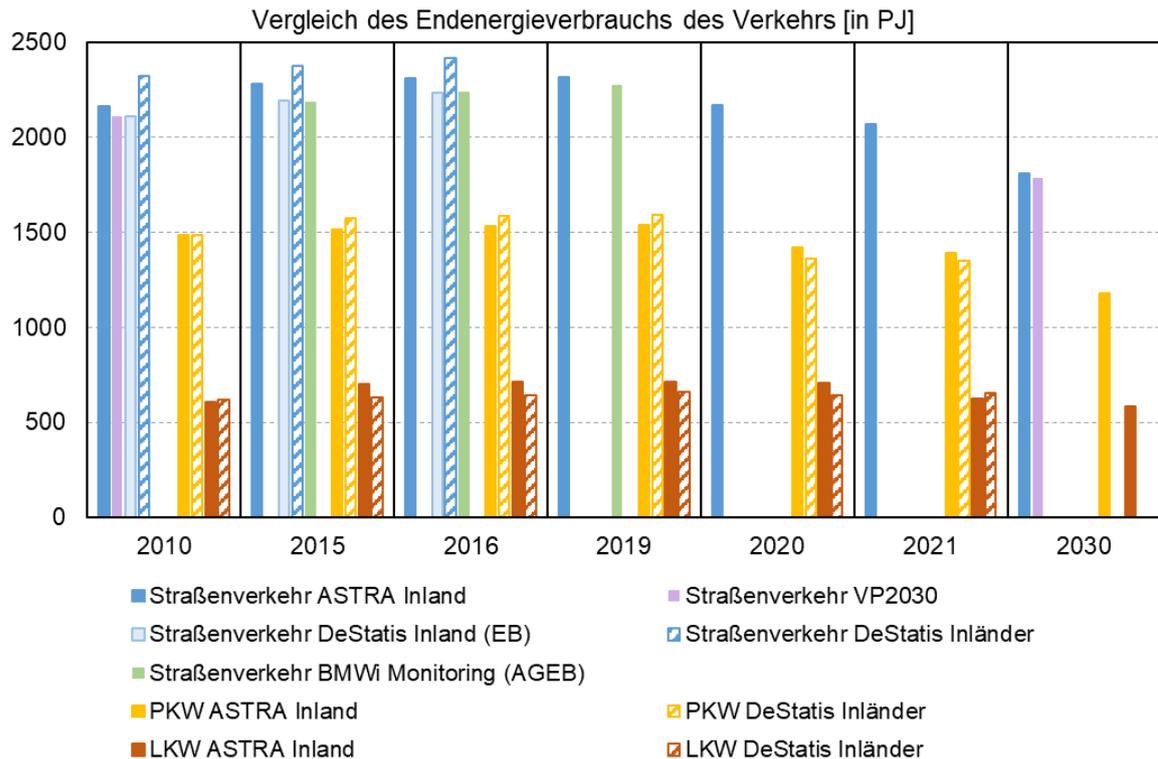


Abbildung 125 Aufteilung des EEV von Bio-Kraftstoffen auf Energieträger (REF-2050)

Die folgende Abbildung 126 zeigt den EEV des Verkehrs mit Fokus auf den Straßenverkehr und nach verschiedenen Berechnungs- bzw. Statistik-Konzepten. Der in ASTRA berechnete Inlandsverbrauch liegt für den Straßenverkehr bis einschließlich 2016 zwischen den von DeStatis abgeschätzten Werten für das Inlands- bzw. das Inländer-Konzept. Dies entspricht auch der allgemeinen Erwartung. Dabei liegt der Inländerverbrauch höher als der Inlandsverbrauch, was ausdrückt, dass Inländer im Ausland mehr tanken als Ausländer in Deutschland. Ab dem Berichtsjahr 2017 haben sich die Datenquelle und Berechnungsmethode der umwelt-ökonomischen Gesamtrechnung von DeStatis geändert. Die (modellierten) Daten von DeStatis sind daher mit den Vorjahren nicht mehr vergleichbar. Dies erklärt auch den Sprung im Jahr 2017. Im Allgemeinen liegt ASTRA beim EEV des Straßenverkehrs etwa 4% höher als DeStatis. Dabei liegen die PKW-Werte in einem Bereich von -1% bis +2% Abweichung zu DeStatis. Bei der Bewertung des LKW-EEV unterscheiden sich die EEV-Ergebnisse von ASTRA deutlicher von DeStatis.

Im Vergleich mit der VP2030 weist ASTRA für 2010 ca. 4% und für 2030 ca. 8% höhere Werte aus. Dies zeigt, dass die VP2030 für Straßenfahrzeuge bereits deutliche Effizienzverbesserungen unterstellt hatte.



Quelle: ITP et al. (2014), DeStatis (2020), DeStatis (2023b), BMWi (2021), eigene Berechnungen, M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 126 Vergleich des EEV im Verkehr von REF-2050 mit anderen Quellen

14.2 Entwicklung des Primärenergieverbrauchs (PEV)

Die im vorherigen Kapitel dargestellte Endenergie „bezeichnet den Teil der Primärenergie, der die Verbraucher nach Abzug von Transport- und Umwandlungsverlusten erreicht“ (BMU, 2021, S.57). Der Primärenergieverbrauch (PEV) gibt den „rechnerisch genutzten Energiegehalt eines natürlich vorkommenden Energieträgers [an], bevor er in eine andere Energieform, in sogenannte Sekundärenergieträger, umgewandelt wird“ (BMU, 2021, S.58). Die Betrachtung des PEVs spielt vor dem Hintergrund der Verbrauchs- und Effizienzziele der Bundesregierung eine wichtige Rolle. Der PEV soll bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2008 um 30% sinken und bis 2050 halbiert werden. Hierfür hat die Bundesregierung die Energieeffizienzstrategie 2050 im Jahr 2019 verabschiedet. Im Jahr 2020 wurde der gesamte PEV in Deutschland gegenüber 2008 um 18,1% gesenkt und damit das Ziel von 20% verfehlt. Es wird davon ausgegangen, dass die Ziele durch Änderungen des Klimaschutzgesetzes weiter angepasst werden müssen (BMU, 2021).

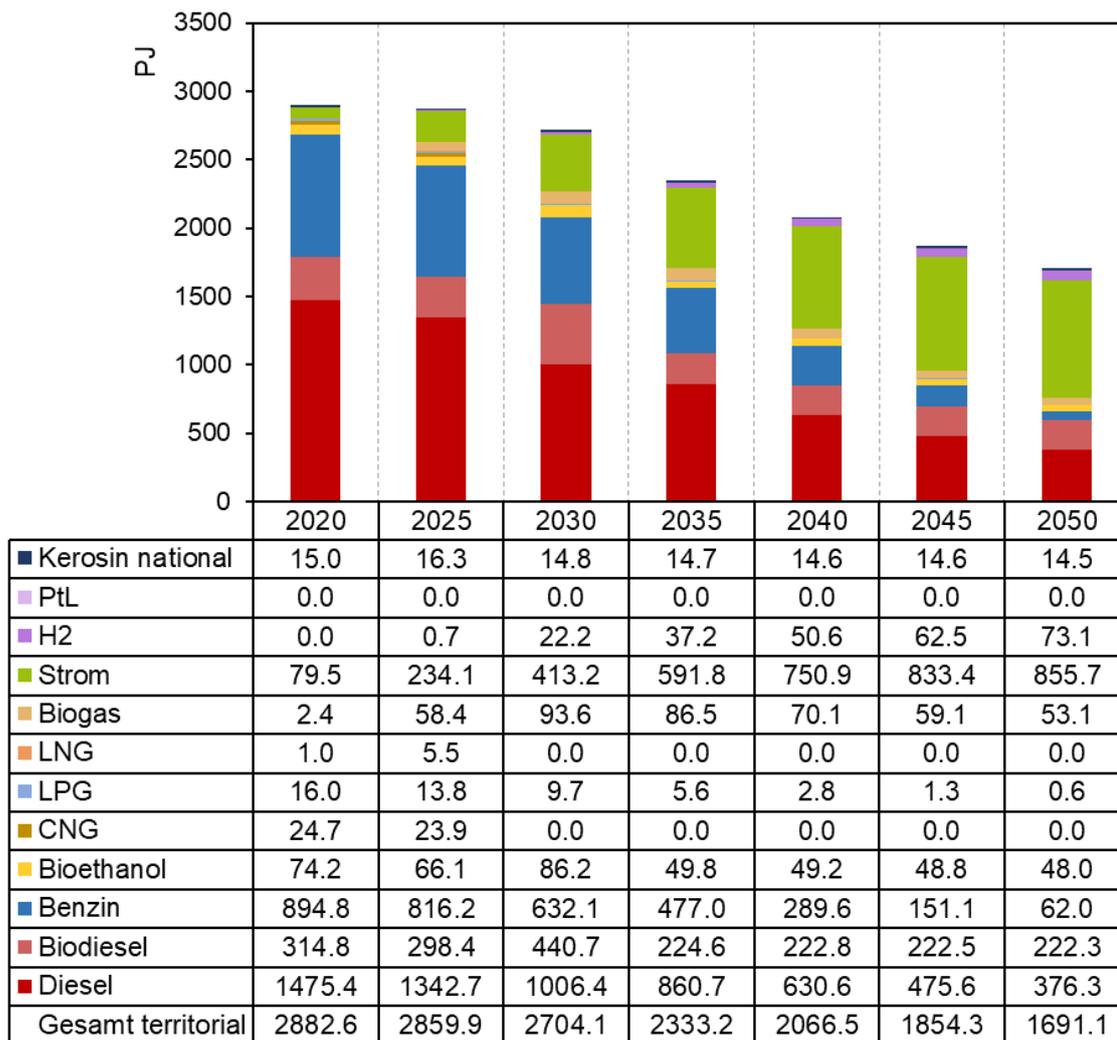
Im REF-2050 wird aus der Verknüpfung des EEVs mit den spezifischen Primärenergiefaktoren der Primärenergieverbrauch approximativ berechnet. So wird der gesamte vorgelagerte Aufwand der Produktionskette, beispielsweise Förder- und Transportaufwand sowie Umwandlungsverlusten, berücksichtigt. Tabelle 39 gibt eine Übersicht der verwendeten Faktoren für die Energieträger auf Basis der Europäischen Norm DIN EN 16258.

Tabelle 39 Primärenergiefaktoren

Energieträger	Primärenergiefaktor	Anmerkung
PtL	2,08	
Strom (gesamt)	2,80	2025: 2,20; 2030:1,80 nach Prognos AG (2020)
Diesel	1,19	Ohne Bioanteil
Benzin	1,17	Ohne Ethanol
Kerosin	1,19	
Bio-LNG (Schiffsverkehr)	2,02	Je nach Herstellung und Transport 1,45 – 2,50
Biokerosin	2,22	Je nach Herstellung und Transport bis zu 2,86
Biodiesel	2,90	
Bioethanol	2,45	
Biogas (Straßenverkehr)	1,99	Je nach Herstellung und Transport 1,50 – 2,47
LNG	1,50	
LPG	1,12	
CNG	1,12	
H ₂	2,27	Wert ist stark abhängig von Herstellungsverfahren.

Quelle: Berechnungen M-Five auf Basis der Europäischen Norm DIN EN 16258, ASTRA-2023.

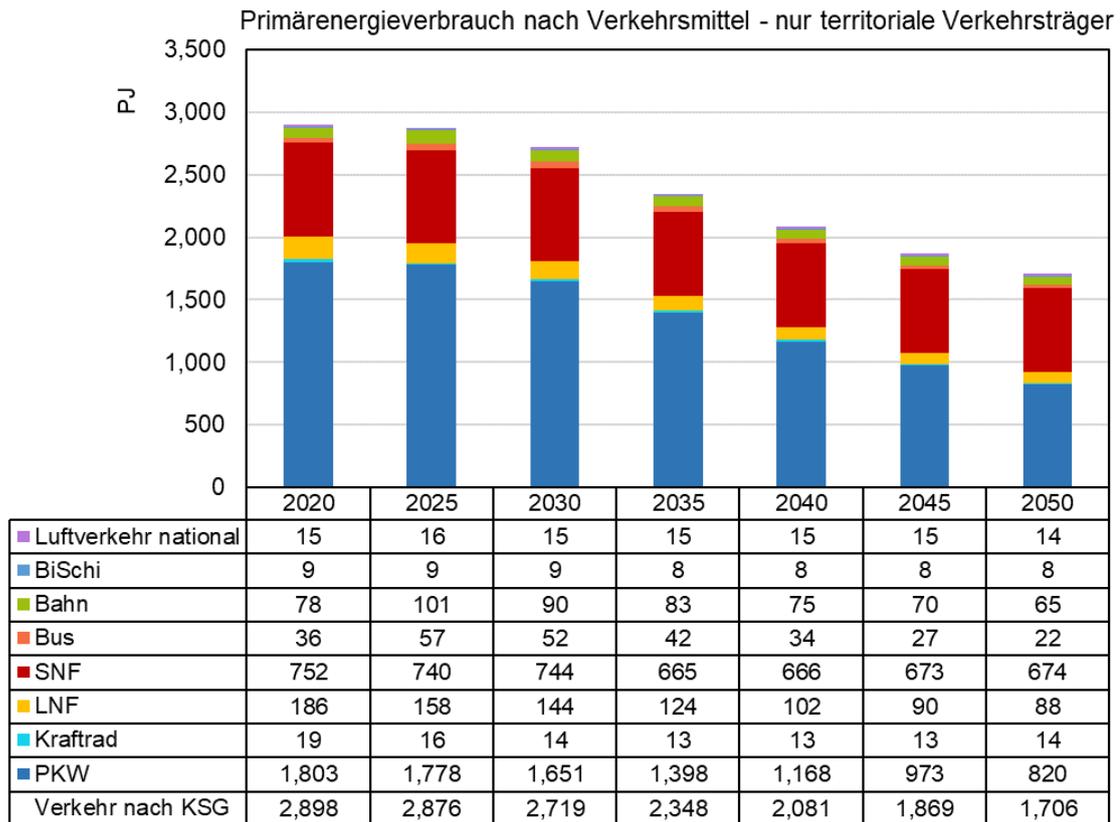
Im Vergleich der Primärenergiefaktoren weist Strom einen der höchsten Faktoren auf. Aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien am Strommix, wird von einer Reduktion der Primärenergiefaktoren in Zukunft ausgegangen. Der resultierende Primärenergieverbrauch nach Energieträger (Abbildung 127) sowie nach Verkehrsmitteln (Abbildung 128) wird im Folgenden dargestellt. Die Abgrenzung des territorialen Energieverbrauchs nimmt dabei den Luftverkehr aus. Für die Abgrenzung nach KSG ist dementsprechend der Energieverbrauch des nationalen Luftverkehrs hinzuzurechnen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 127 Primärenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2050)

Der Primärenergieverbrauch (PEV) im Verkehr verringert sich bis ins Jahr 2030 gegenüber dem Basisjahr 2008 nur um etwa 6%. Damit wird im Verkehrssektor das 30%-Reduktionsziel der Bundesregierung für den PEV nicht erreicht. Diese Entwicklungen werden von der zunehmenden Elektrifizierung und der Verbesserung der Fahrzeugeffizienz bestimmt. Unabhängig davon, dass Strom einen hohen PEV aufweist, verursacht er geringe Treibhausgasemissionen und ist daher wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierung.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 128 Primärenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2050)

Zukünftig könnte eine detailliertere Modellierung des PEV die Bedeutung der Gewichtung von erneuerbaren Kraftstoffen und Energieeffizienz versus direkter Stromnutzung im Verkehr unterstreichen. Beide sind Schlüsselstrategien für das Erreichen der Klimaziele im Verkehr sowie in der Abwägung der Kostenträgerschaft der Sektoren. Für die Gewichtung und Bewertung der Strategien können weitere Indikatoren analysiert werden, u.a. die makroökonomische Energieeffizienz als grober Richtwert für die energetische Effizienz des Energieverbrauchs sowie der Importanteil als Maßstab der Importabhängigkeit und Quantifizierung von Lieferrisiken.

15 Entwicklung der THG-Emission des Verkehrs

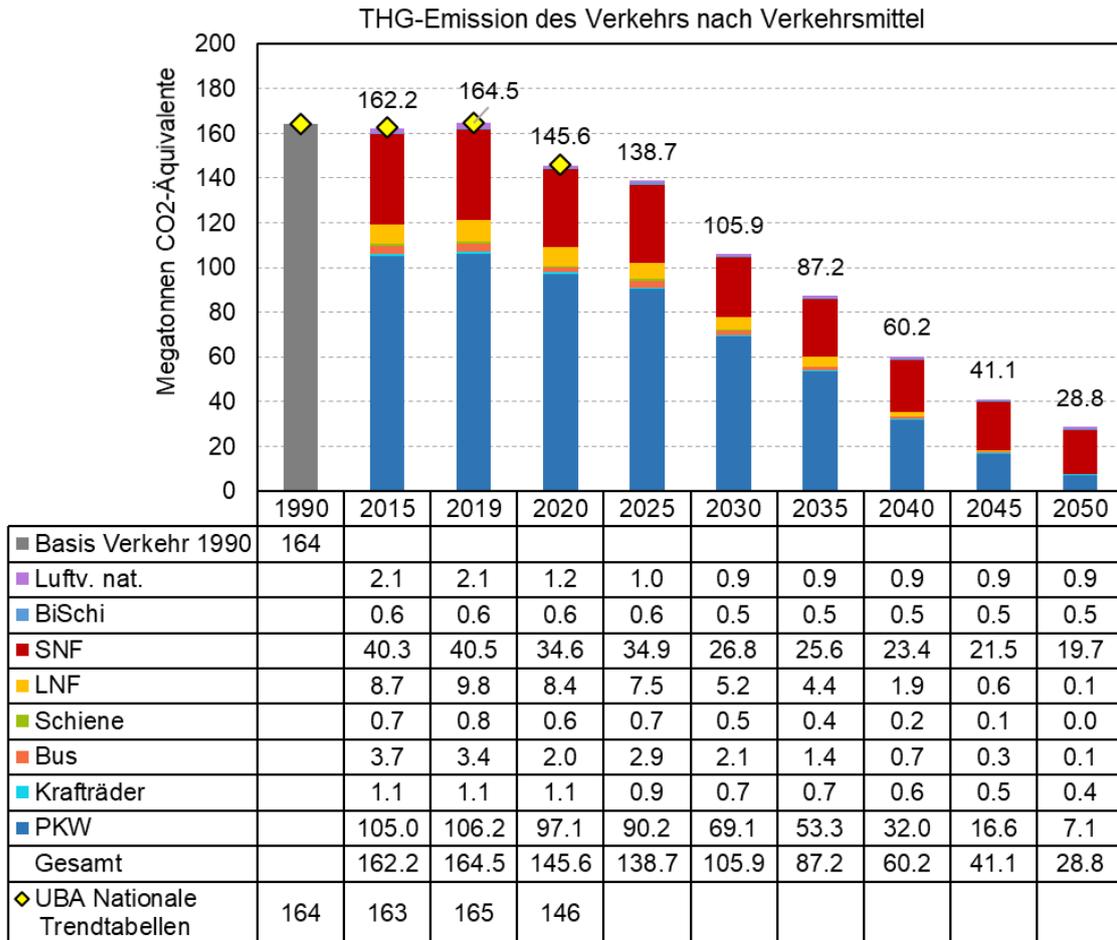
Die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors entwickelten sich seit 1990 in vier Phasen bis 2021. Von 1990 bis 1999 stiegen sie kontinuierlich auf einen Höchstwert von knapp 187 Mt CO_{2äq.}, um anschließend über eine längere Phase bis etwa 2010 auf 154 Mt CO_{2äq.} zu sinken. Von 2010 bis 2019 stiegen sie wieder an und lagen in 2019 bei etwa 164,5 Mt CO_{2äq.} und damit ungefähr auf dem Niveau von 1990 (Daten nach UNFCCC). Es hat also bis 2019 gegenüber 1990 keine THG-Minderung im Verkehr stattgefunden.

Die vierte Phase beginnt mit der Corona-Pandemie im Jahr 2020, die zu einem deutlichen Einbruch der THG-Emission des Verkehrs auf 146 Mt CO_{2äq.} geführt hat.⁹⁷ Dieses Niveau wird auch in den beiden folgenden Jahren in etwa gehalten. Danach setzt sich in REF-2050 der Abwärtstrend der THG-Emission ab 2024 weiter fort getrieben durch die Elektrifizierung im PKW-, LNF-, Bus- und auch SNF-Bereich. Im Jahr 2030 werden so etwa 106 Mt CO_{2äq.} im Verkehrssektor erreicht, das ursprüngliche Ziel des KSG in der Fassung von 2021 von 85 Mt CO_{2äq.} damit jedoch deutlich verfehlt. Es verbliebe mit den bereits ergriffenen Instrumenten (siehe Tabelle 8) eine Lücke von 21 Mt CO_{2äq.} zur Erreichung des Zielwertes im Jahr 2030 von 85 Mt CO_{2äq.} nach KSG in der Fassung von 2021.

Das Umweltbundesamt (UBA) berichtete im März 2023 zu den sektoralen Zielverfehlungen der einzelnen Sektoren für das Jahr 2022 (UBA 2023a). Die erneute Zielverfehlung des Verkehrssektors führt aufgrund der Anpassungsmechanismen des KSG dazu, dass der Zielwert für den Verkehrssektor im Jahr 2030 auf 83,7 Mt CO_{2äq.} abgesenkt wird. Damit erhöht sich die Lücke für das Jahr 2030 auf 22,2 Mt CO_{2äq.}. Die kumulierte Lücke in REF-2050 liegt damit bei 129 Mt CO_{2äq.}.

Abbildung 129 stellt die Entwicklung der THG-Emission aus dem für das KSG relevanten Verkehr und für die verschiedenen Verkehrsmittel dar.

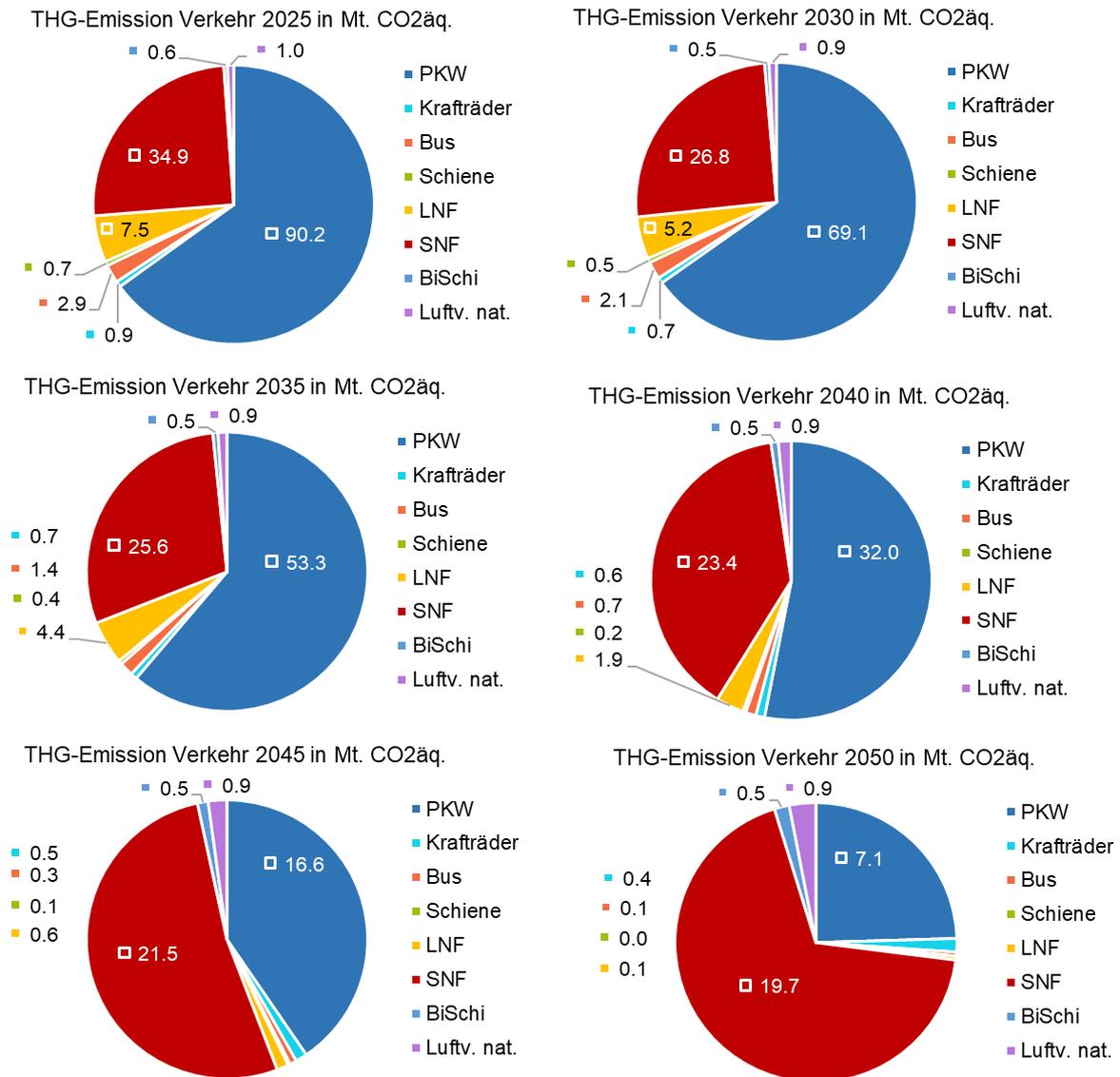
⁹⁷ In ASTRA-M entwickeln sich in der Modellierung die Effekte der Corona-Pandemie, um etwa ein halbes Jahr verzögert. Für die Darstellung der THG-Minderung in 2020 und 2021 wurde diese Verzögerung korrigiert.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 129 Entwicklung der THG-Emission im Verkehr in REF-2050

Abbildung 130 stellt die Verteilung der THG-Emission auf die Verkehrsmittel dar. Der Anteil des PKW-Verkehrs von 65% im Jahr 2019 verbleibt bis 2035 ungefähr auf dieser Höhe. Ein leichter Anstieg des Anteils von SNF kann beobachtet werden. Dies ist zurückzuführen auf den gegenüber PKW und LNF langsameren Fortschritt bei der Elektrifizierung von SNF. Für das Binnenschiff und den Luftverkehr wurden keine vergleichbaren Dekarbonisierungsfortschritte wie im Straßenverkehr unterstellt bzw. Maßnahmen hierfür ergriffen, so dass sich ihr Anteil an den THG-Emissionen über die Zeit leicht erhöht aber auf niedrigem Niveau verbleibt.



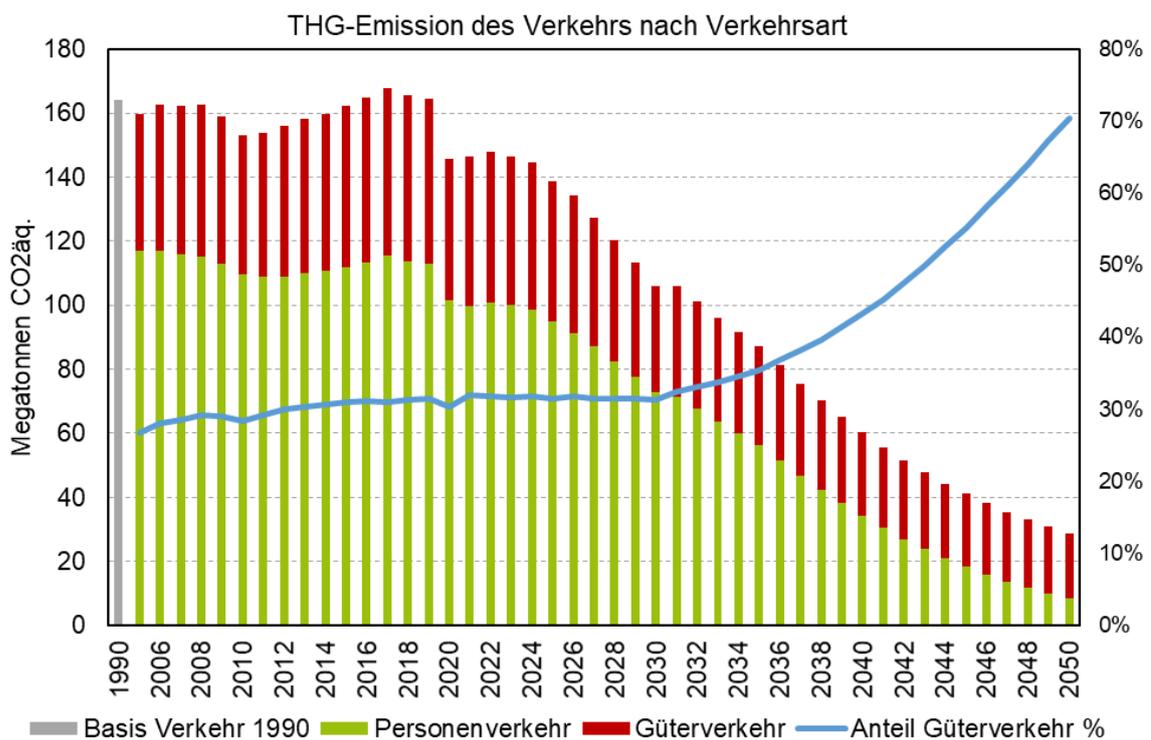
Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 130 Verteilung der THG-Emissionen auf die Verkehrsmittel zu verschiedenen Zeitpunkten (REF-2050)

Die sich wandelnden Trends der THG-Emissionen der wichtigsten Verkehrsmittel PKW und SNF sind ebenfalls bei der Verteilung der THG-Emission auf den Personen- und Güterverkehr zu beobachten (siehe Abbildung 131). Seit etwa 2010 steigt der Anteil des Güterverkehrs kontinuierlich an, wobei die ersten Jahre auch auf einen Nachholeffekt der Finanzkrise von 2008/09 zurückzuführen sind, da der Güterverkehr im Zuge dieser Krise stärker eingebrochen war als der Personenverkehr. In diesem Punkt unterscheidet sich die Finanzkrise 2008/09 deutlich von der Corona-Krise 2020/21. Bei letzterer brach der Personenverkehr viel deutlicher ein und der Güterverkehr war wesentlich geringer betroffen.

Bis 2030 entwickeln sich die Anteile der THG-Emissionen von Personen- und Güterverkehr in etwa gleichbleibend. Die Elektrifizierung sowohl bei PKW und LNF als auch bei SNF führt zu einer Reduktion der THG-Emissionen. Bei SNF kommt eine weitere Verbesserung der Energieeffizienz hinzu, die die etwas geringere Elektrifizierung ausgleicht. Bis 2030 ergibt

sich sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr unter den gegebenen Rahmenbedingungen und Instrumenten eine leichte Verlagerung auf die Schiene. Nach 2030 erhöht sich der Anteil des Güterverkehrs an den THG-Emissionen von 30% auf fast 70%. Hier wirken sich die CO₂-Standards für PKW und LNF mit dem Ausphasen fossiler Verbrenner und Marktanteilen von BEV nahe 100% ab 2035 sowie die Elektrifizierung der Linienbusflotte aufgrund des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (CVD) sehr deutlich aus. Eine vergleichbare Regulierung existiert in REF-2050 für SNF nicht. Die bis August 2022 beschlossenen CO₂-Standards von -30% gegenüber 2019 werden nach 2030 nicht verschärft.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 131 Entwicklung der THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr (REF-2050)

Abbildung 132 vergleicht die THG-Emissionen des Verkehrs mit Daten der VP2030, der UBA THG-Berichterstattung sowie von DeStatis. Die Emission des Gesamtverkehrs liegt für die betrachteten Jahre nahezu auf gleicher Höhe und ist insbesondere mit der relevanten UBA-Quelle konsistent. Im Jahr 2030 liegt die VP2030 deutlich über den aktualisierten Berechnungen von REF-2050. Dies ist so auch zu erwarten, da die Rahmenbedingungen und Instrumente sich mittlerweile deutlich unterscheiden und einen stärkeren Impuls zur THG-Minderung setzen.

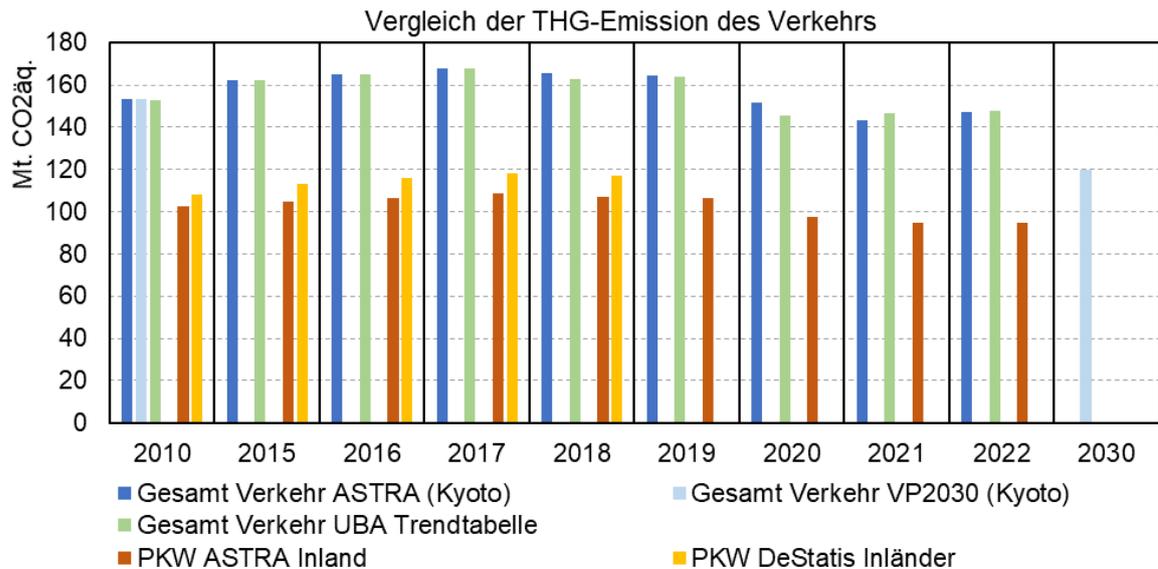


Abbildung 132 Vergleich der THG-Emissionen im Verkehr von REF-2050 mit anderen Quellen

Die THG-Minderung im Verkehr kann, aufgeschlüsselt in Personen- und Güterverkehr, per Dekompositionsanalyse in die verschiedenen zentralen Komponenten zerlegt werden (siehe auch Kapitel 3.5):

- Entwicklung der Treiber z.B. Bevölkerung, Gütervolumen
- Verkehrsintensität: Verkehrsaufwand, der für eine transportierte Einheit (d.h. Person oder Tonne) benötigt wird
- Energieintensität: Energieeinsatz, der für das Zurücklegen eines Kilometers (pkm oder tkm) aufgewendet wird
- THG-Intensität: verursachte THG-Emission durch die eingesetzte Energie für den Transport.

Abbildung 133 zeigt die Dekompositionsanalyse der THG-Entwicklung für den Personenverkehr mit dem Jahr 2019 als Basis. Die zunehmende Entwicklung der Bevölkerung leistet zunächst einen leichten Wachstumsbeitrag zur THG-Emission sinkt aber bis 2050 wieder unter den Ausgangswert. Die Verkehrsintensität (motorisierte Pkm pro Person und Jahr) steigt nahezu kontinuierlich und liegt in 2050 knapp 7 Punkte über 2019. Die großen Beiträge zur THG-Minderung kommen aus der verbesserten Energieintensität (gemessen in MJ pro Pkm) und der Reduktion der THG-Intensität (gemessen in kg CO₂ pro MJ). Die Energieintensität des Verkehrs sinkt bis 2030 um über 21 Punkte und bis 2050 um 56 Punkte. Einen noch stärkeren Beitrag leistet die verminderte THG-Intensität um 35 Punkte bis 2030 und 92 Punkte bis 2050. Beide Effekte profitieren insbesondere von der Elektrifizierung und werden durch Verlagerung auf energie-effizientere Verkehrsmittel (Bahn, Bus, Rad, Sharing-Angebote) unterstützt.

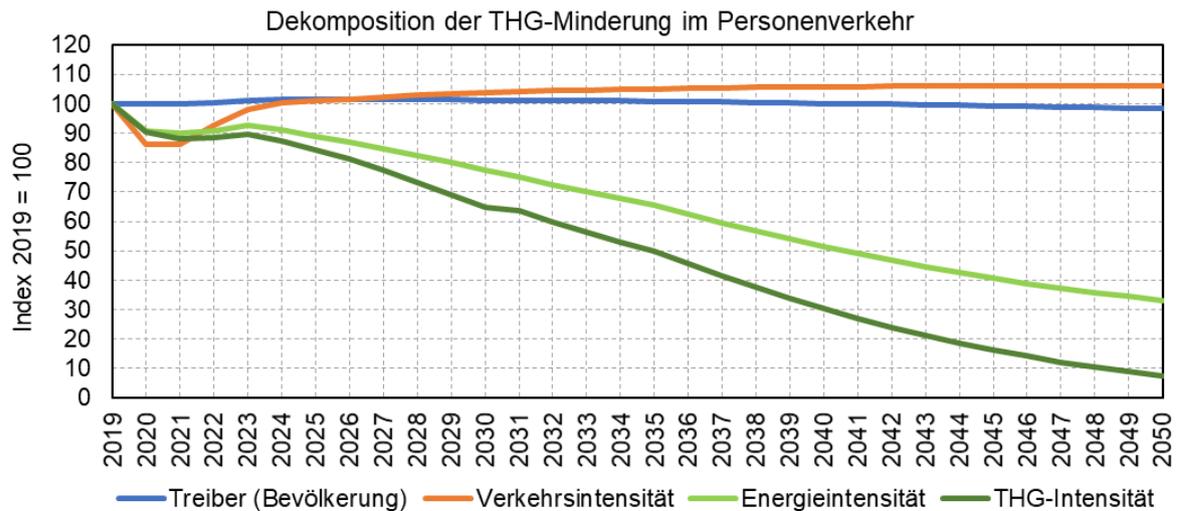


Abbildung 133 Dekompositionsanalyse der THG-Minderung im Personenverkehr

Abbildung 134 stellt die Dekompositionsanalyse der THG-Entwicklung für den Güterverkehr dar, ebenfalls mit dem Jahr 2019 als Basis. Der zentrale Treiber im Güterverkehr ist das Aufkommen aufgrund der wirtschaftlichen Entwicklung. Beim Aufkommen kann in der Modellierung zwischen Aufkommen durch den Außenhandel (einschließlich Transitfahrten) und Aufkommen durch inländische Quellen, insbesondere durch die Produktion und Auslieferung von Gütern in Deutschland, unterschieden werden. Beim Aufkommen führt in den Jahren mit geringem BIP-Wachstum zunächst noch der Außenhandel zu steigendem Volumen (in Tonnen). Ab etwa 2035 machen sich die höheren Wachstumsraten auch in einem Anstieg der inländischen Produktion und damit des Aufkommens bemerkbar.

Die Verkehrsintensität (tkm pro Tonne und Jahr) steigt noch bis 2030 um 13 Punkte an und stagniert anschließend. Die großen Beiträge zur THG-Minderung kommen aus der verbesserten Energieintensität (gemessen in MJ pro tkm) und der Reduktion der THG-Intensität (gemessen in kg CO₂ pro MJ). Im Güterverkehr kommt - anders als im Personenverkehr - der stärkste Beitrag zur THG-Minderung aus einer verbesserten Energieintensität. Diese sinkt bis 2030 um etwa 30 Punkte und bis 2050 um 50 Punkte. Die THG-Intensität vermindert sich um knapp 23 Punkte bis 2030 und um 40 Punkte bis 2050. Beide Effekte profitieren von der Elektrifizierung, werden aber auch durch effizientere LKW sowie die Verlagerung auf energie-effizientere Verkehrsmittel (hier insbesondere die Bahn) unterstützt.

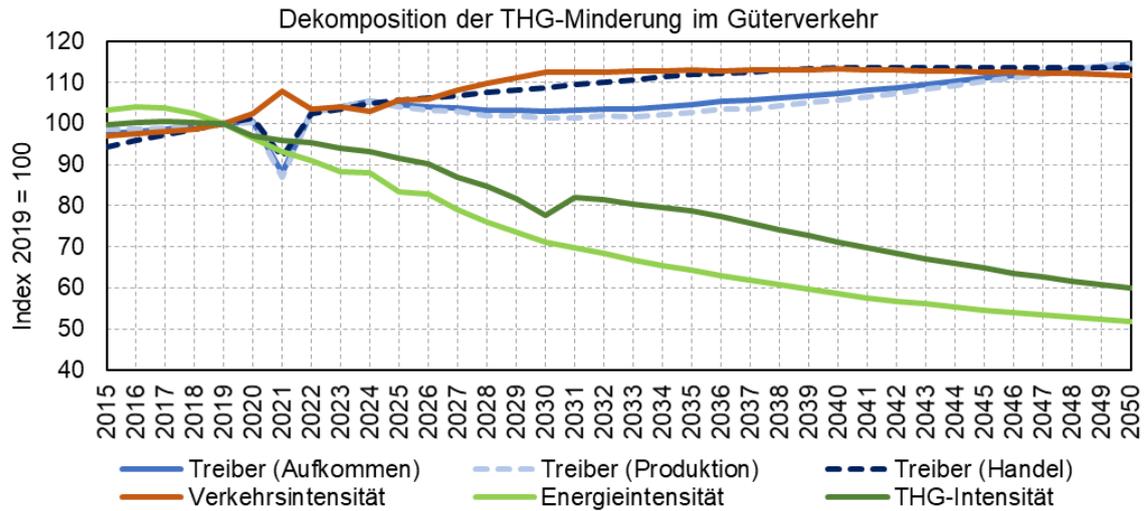


Abbildung 134 Dekompositionsanalyse der THG-Minderung im Güterverkehr

Die Energienachfrage des Personenverkehrs reduziert sich um -66% bis 2050 gegenüber 2019, die des Güterverkehrs jedoch nur um -34%. Die THG-Emissionen werden im Personenverkehr bis 2050 um über -92% verringert und im Güterverkehr um fast -61%.

16 Synthese und Ausblick

Das überarbeitete und auf den Stand 2022 gebrachte MKS-Referenzszenario (REF-2050) wurde im MKS-Modellsystem neu implementiert und die Modellierung bis 2050 verlängert. Dabei sind bis zum Stichtag 31. August 2022 beschlossene Instrumente bereits Bestandteil des Referenzszenarios.

Die THG-Emissionen des bodengebundenen Verkehrs in REF-2050 sinken bis 2030 auf 106 Mt CO₂äq. und verringern sich damit um 35% gegenüber 1990. Unter Einbeziehung des nationalen Luftverkehrs beträgt im Jahr 2030 die Lücke zur Erreichung des aufgrund vergangener Zielverfehlung verschärften Sektorziels für Verkehr aus dem KSG-neu rund 22,5 Mt CO₂äq. Diese Lücke soll durch Maßnahmen, die seit dem Stichtag und bis 2030 noch verabschiedet und umgesetzt werden, geschlossen werden. Allerdings sinkt in der Startperiode des Szenarios von 2022 bis 2024 die jährliche THG-Minderung des KSG-Zielpfades schneller als die THG-Emission in REF-2050. D.h. die Lücke zwischen Ziel und sektoraler Emission vergrößert sich weiter. Erst in den Folgejahren ab 2025 liegen die jährlichen THG-Reduktionen in etwa auf dem Niveau der Zielpfadreduktionen.

Die Ziele der CO₂-Standards für neuzugelassene PKW, LNF und SNF werden für Deutschland alle eingehalten oder übertroffen. Dies sagt aber noch nichts darüber aus, ob auch auf EU-Ebene die Ziele erreicht werden, oder ob Strafzahlungen für die Fahrzeug-Hersteller fällig werden. Im Einzelnen ergibt sich für die 2030er Ziele in Deutschland:

- EU-PKW-Ziel -55%: die deutschen Neuzulassungen erreichen gegenüber 2021 -64,8% aufgrund des Anteils von über 60% BEV im Jahr 2030.
- EU-LNF-Ziel -50%: die deutschen Neuzulassungen erreichen gegenüber 2020 knapp -56,2%, ebenfalls aufgrund der starken Elektrifizierung.
- EU-SNF-Ziel (>16t zGG) -30%: die deutschen Neuzulassungen erreichen gegenüber 2019 knapp -31,6% aufgrund einer Mischung aus Effizienzverbesserung und Elektrifizierung.

Aus modaler Sicht werden bis 2030 Zuwächse für den Personenverkehr auf der Schiene (Fern- und Nahverkehr) sichtbar wo gemessen an der Verkehrsleistung über 11% Modalanteil erreicht werden. Dies entspricht einem Zuwachs der Verkehrsleistung gegenüber 2022 von +33%. Dagegen stagniert im Schienengüterverkehr der Modalanteil bei knapp 19%. Dies entspricht jedoch immer noch einem Zuwachs der absoluten Verkehrsleistung. Dieser beträgt +8% gegenüber 2021. Im Güterverkehr spiegelt sich wider, dass in der Modellierung der Rückgang der Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen rückgekoppelt wurde an die Verkehrserzeugung im Sektor der Mineralölindustrie und sich dort die Verkehrserzeugung von bahnaffinen Massengütern reduziert hat.

Das MKS-Referenzszenario in der vorliegenden Form ist vorbereitet, um als Vergleichsmaßstab zu dienen, an dem die THG-Minderungswirkungen von ab 09/2022 ergriffenen bzw. ab 2023 zu ergreifenden Maßnahmen im Verkehrs- und gekoppelten Energiesektor gemessen und bewertet werden.

17 Anhang

17.1 Vergleich von REF-2050 mit anderen Szenarien

Die folgenden Darstellungen ordnen die Ergebnisse des REF-2050 in einem Szenario-Vergleich ein. Dafür wurden aktuelle Prognosen für den Verkehrssektor in Deutschland evaluiert und aufbereitet. Das REF-2050 ist als maßnahmengetriebenes Szenario im Ansatz eher konsistent mit dem Projektionsbericht 2023 der Bundesregierung (UBA 2023b), und weicht von den Vergleichs-Szenarien – der gleitenden Kurz- und Mittelfristprognose 2023 und der gleitenden Langfristprognose 2023 - tendenziell ab. Betrachtet werden im Folgenden die Entwicklung der Personen- und Güterverkehrsleistung, die PKW-Neuzulassungen und der PKW-Bestand sowie der aggregierte Endenergieverbrauch im Verkehr, ebenso die aggregierten THG-Emissionen im Verkehr.

Personenverkehr

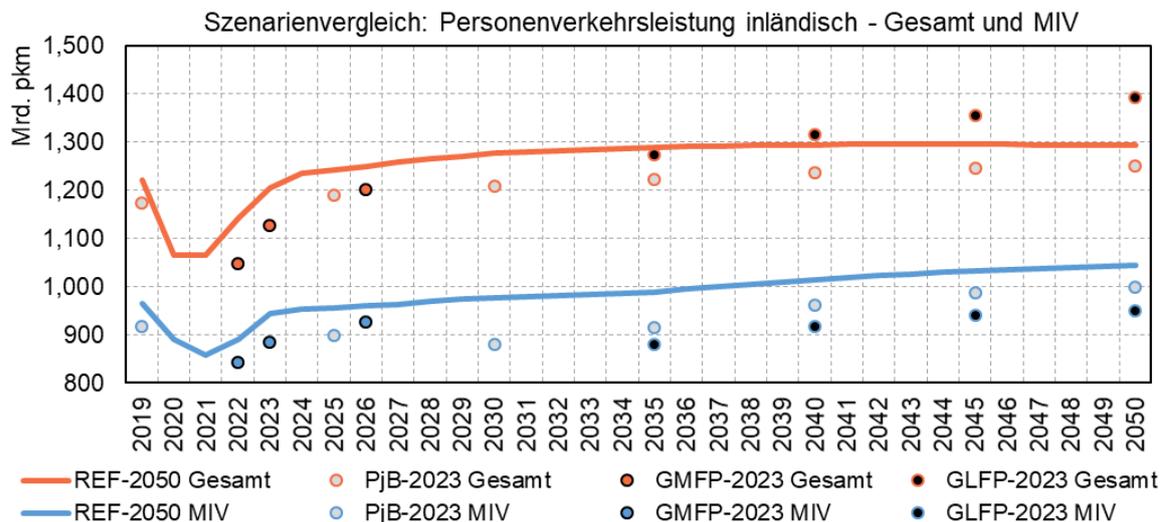
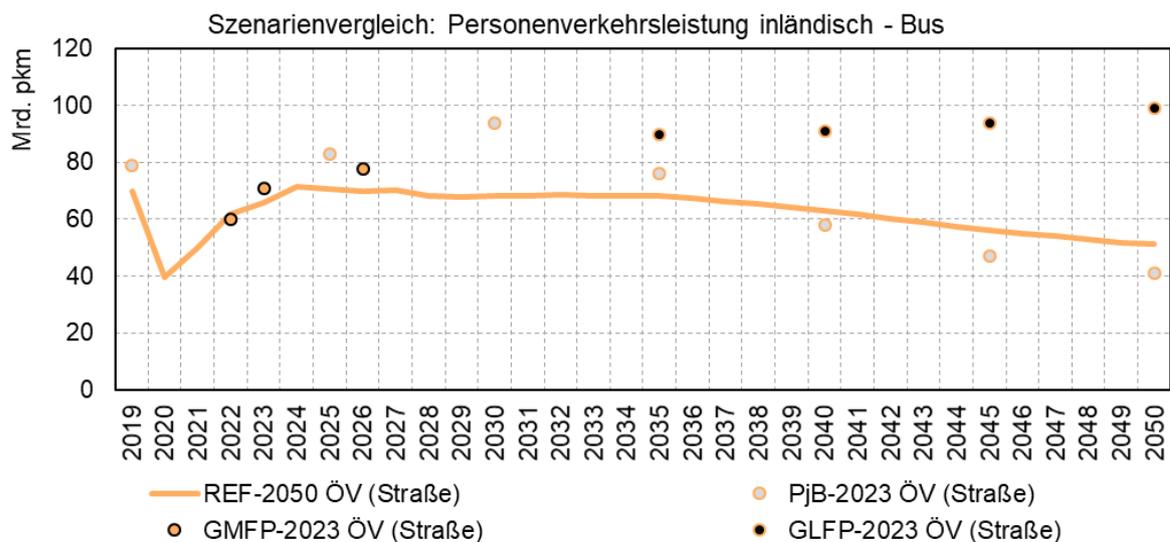


Abbildung 135: Szenarienvergleich Personenverkehr gesamt und MIV

Abbildung 135 zeigt die prognostizierte Entwicklung der gesamten Personenverkehrsleistung (exklusive des Luftverkehrs) und des MIVs. Die gesamte Personenverkehrsleistung steigt im Vergleich bis 2030 um 5,3% ggü. 2019 auf über 1 300 Mrd. pkm pro Jahr und stagniert anschließend auf diesem Niveau. Der kurz- und mittelfristige Anstieg und die langfristige Stagnation wird auch im Projektionsbericht entsprechend erwartet, wobei das Wachstum im PjB-2023 teilweise etwas geringer ausfällt. Die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose liegt mit den Annahmen für die Jahre 2022 und 2023 unter dem prognostizierten Niveau. Die gleitende Langfristprognose erwartet einen deutlich größeren Anstieg der Verkehrsleistung ab 2035. Die Verkehrsnachfrage im MIV steigt langfristig bis auf annähernd 1 050 Mrd. pkm pro Jahr an. Für 2030 geht der Projektionsbericht hingegen von einem deutlichen Rückgang der Verkehrsleistung aus. Die Erwartungen der gleitenden Langfristprognose von 2035 bis 2050 liegen ebenfalls deutlich unter der in REF-2050 prognostizierten Entwicklung.

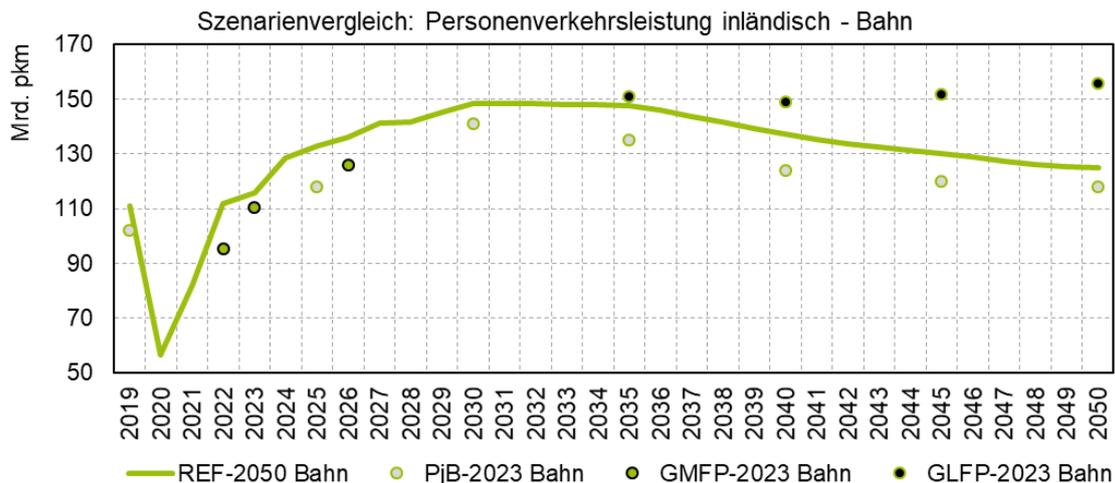
Erklärungen für die Abweichungen der gesamten Personenverkehrsleistung finden sich neben der MIV-Entwicklung in den nachfolgenden Abbildungen zur Entwicklung der Verkehrsleistung im Busverkehr, im Bahnverkehr und der „aktiven Modes“. Der PjB-2023 geht für 2030 von einem geringeren Anstieg des MIV und des Bahnverkehrs aus, während eine größere Zunahme des Busverkehrs und der aktiven Modes angenommen wird. Langfristig gleichen sich die Erwartungen für MIV und Bahn an den REF-2050 Trend an, während der Busverkehr unter die im Referenzszenario prognostizierte Entwicklung fällt, wodurch die gesamte Personenverkehrsleistung im Jahr 2050 in etwa auf REF-2050 Niveau liegt. Die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose geht von einem stärkeren Anstieg des Busverkehrs (ab 2023), einem schwächeren Anstieg des Bahnverkehrs, einer kurzfristig (2022/23) leicht niedrigeren und mittelfristig (2026) leicht erhöhten Entwicklung des MIV aus. Insgesamt liegen die erwarteten Entwicklungen deshalb kurzfristig leicht unter und mittelfristig leicht über den Erwartungen des REF-2050. Die gleitende Langfristprognose erwartet eine schwächere Zunahme des MIV, während Sie von deutlich stärkeren Zunahmen des Bus- und Bahnverkehrs sowie der „aktiven Modes“ ausgeht. Dies resultiert in einem deutlich stärkeren Anstieg der Personenverkehrsleistung.



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 136 Szenarienvergleich Personenverkehrsleistung Bus

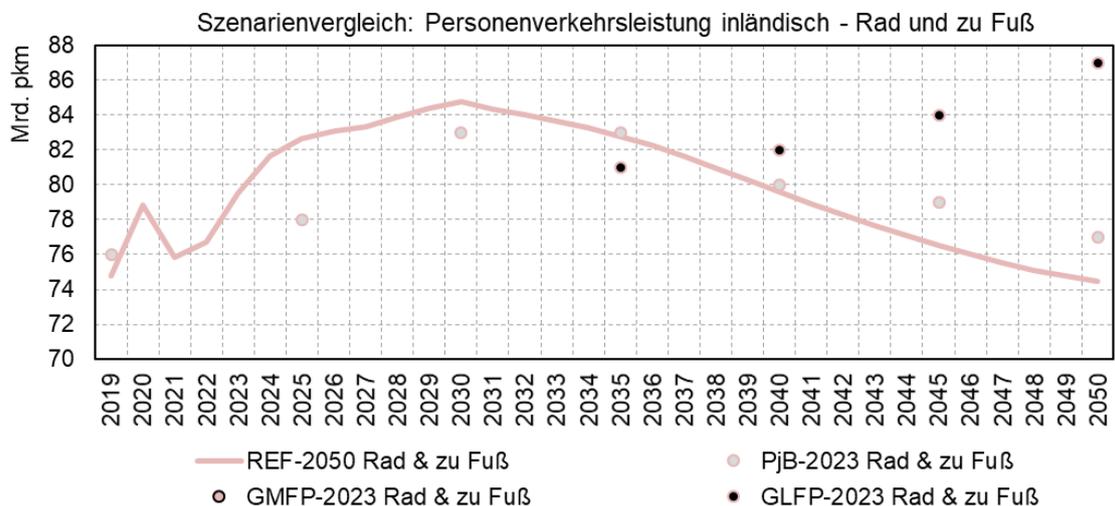
Für den Busverkehr wird ein kurzfristiger Anstieg (bis 2024) mit anschließender Stagnation und langfristiger Abnahme (ab 2035) erwartet. Die Entwicklung der Busverkehrsnachfrage ist im Projektionsbericht, mit einem deutlich stärkeren Anstieg bis 2030 und anschließend größerem Abfall, dynamischer dargestellt. Die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose und die gleitende Langfristprognose gehen von einem stärkeren und anhaltenden Wachstum der Personenverkehrsleistung im Busverkehr aus.



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 137 Szenarienvergleich Personenverkehrsleistung Bahn

Für die Verkehrsleistung der Bahn gehen alle betrachteten Studien von einem deutlichen Anstieg bis 2030 aus, wobei die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose und der Projektionsbericht von einem weniger starken Anstieg ausgehen. Wie im Referenzszenario prognostiziert auch der Projektionsbericht langfristig eine Abnahme der Verkehrsleistung, wobei die Differenz zum Referenzszenario in etwa gleichbleibt. Die gleitende Langfristprognose trifft für 2035 in etwa die erwartete Nachfrage des Referenzszenarios, geht aber anstatt von einer anschließenden Abnahme von einer Stagnation, hin zu einem leichten Wachstum bis 2050 aus.

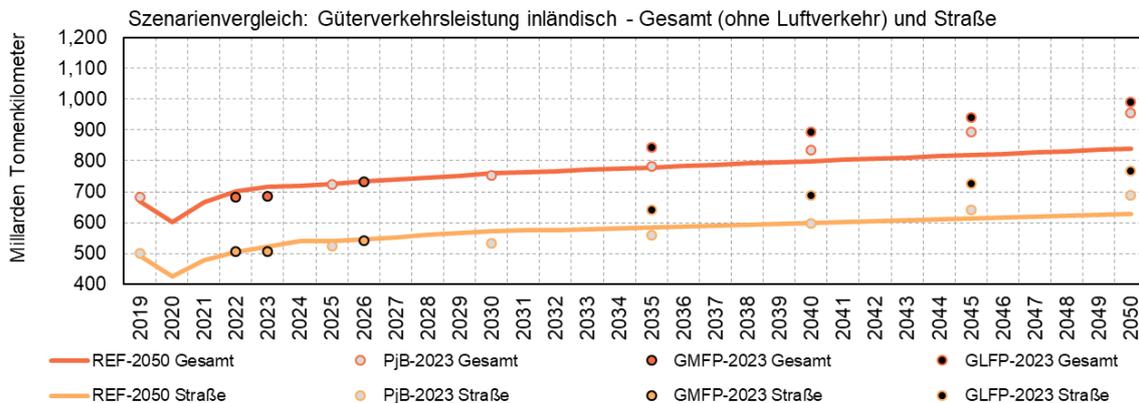


Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 138 Szenarienvergleich Personenverkehrsleistung Rad und zu Fuß

Im Referenzszenario wird ein moderater Anstieg der Verkehrsleistung aktiver Modes bis 2030 erwartet, der anschließend stark zurückgeht. Der Projektionsbericht geht hingegen von einem deutlich stärkeren Zuwachs bis 2030 aus, sieht ab 2035 aber ebenfalls einen leichten Rückgang. Die gleitende Langfristprognose erwartet hingegen einen deutlichen Anstieg der Verkehrsleistung bis 2050. Die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose weist für Rad und Zufußgehen keine Werte aus.

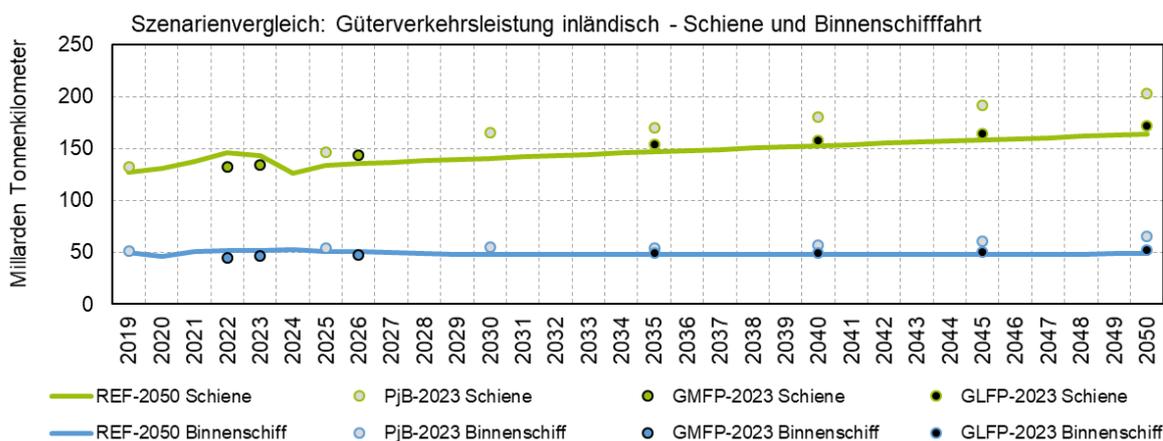
Güterverkehr



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 139 Szenarienvergleich Güterverkehrsleistung gesamt und Straßengüterverkehr

Wie Abbildung 139 veranschaulicht, stimmen die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose und das Referenzszenario hinsichtlich der kurz- und mittelfristigen Entwicklung der Güterverkehrsleistung, sowohl für den Straßengüterverkehr als auch insgesamt, weitestgehend überein. Während der PjB-23 bis 2035 eher von einem geringen Wachstum ausgeht, insbesondere beim Straßengüterverkehr (2030), wird ab 2045 ein höheres Wachstum erwartet. Die erwarteten Verkehrsleistungen der gleitenden Langfristprognose liegen deutlich über den betrachteten Szenarien.



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 140 Szenarienvergleich Güterverkehrsleistung Schiene und Binnenschifffahrt

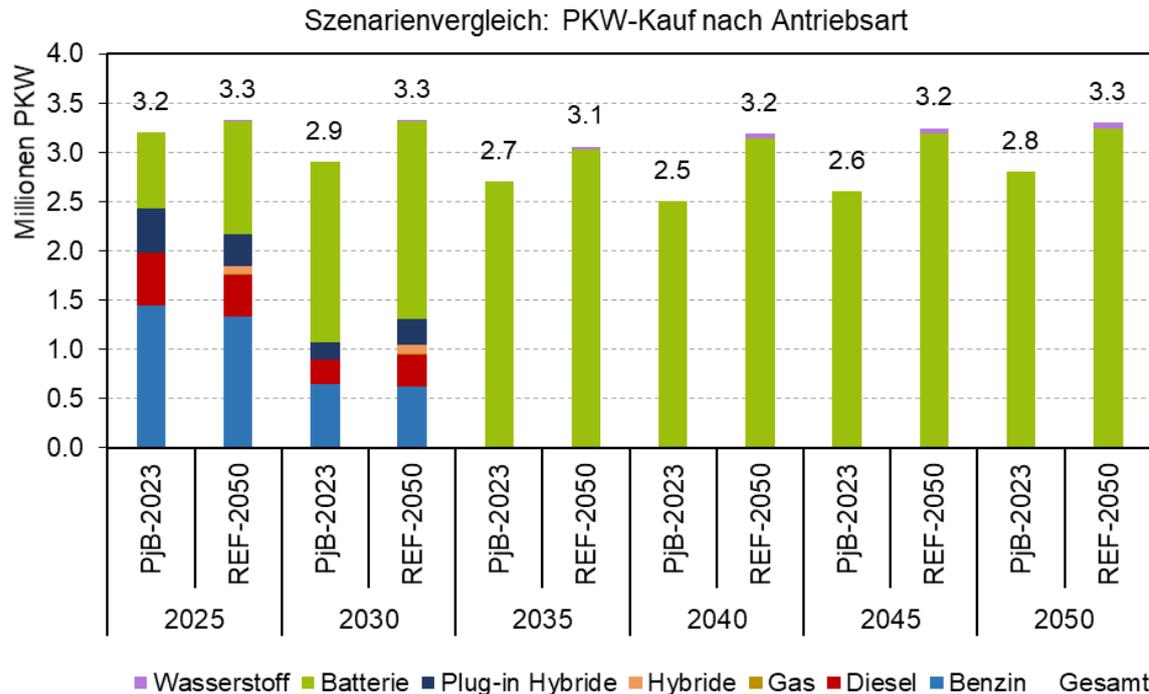
Während die gleitende Kurz- und Mittelfristprognose eine ähnliche Entwicklung des Güterverkehrs auf der Schiene wie REF-2050 erwartet, liegen die Prognosewerte für die Binnenschifffahrt unter dem im REF-2050 prognostizierten Niveau. Der Projektionsbericht geht im Schienengüterverkehr und langfristig auch in der Binnenschifffahrt von einem

stärkeren Wachstum aus. Die gleitende Langfristprognose geht für 2035 von einem leicht stärkeren Wachstum der Schienengüterverkehrsleistung und anschließend von einem leicht niedrigeren Niveau aus. Für die Binnenschifffahrt werden vergleichsweise leicht geringere Transportleistungen angenommen.

Entsprechend der Entwicklung der Güterstruktur und des Außenhandels geht die gleitende Langfristprognose von einem starken Anstieg der Güterverkehrsleistung aus, die sich in einem starken Anstieg der Tonnenkilometer des Straßengüterverkehrs niederschlagen. Vor dem Hintergrund des Güterstruktureffekts und den damit einhergehenden Veränderungen der Beladungsfaktoren (mehr Volumen, weniger Gewicht) geht das Referenzszenario von einem moderateren Anstieg – gemessen in der Einheit Tonnenkilometer (tkm) - aus. Des Weiteren könnten Trends, hin zu mehr lokaler Produktion im Kontext resilienter Lieferketten den starken Anstieg der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr in der gleitenden Langfristprognose abschwächen. Die Abweichung zwischen REF-2050 und Projektionsbericht im Schienengüterverkehr könnte in den Annahmen zum Umsetzungsstand der Schieneninfrastrukturprojekte sowie der erwarteten Güterstruktur vor dem Hintergrund des Güterstrukturwandels liegen.

Mit Blick auf REF-2050 gleichen sich die geringere Güterverkehrsleistung der Straße (mittelfristig) und der stärkere Anstieg auf der Schiene im PjB-23 mittelfristig aus und führen langfristig (2050) zu einer ähnlich hohen Verkehrsleistung wie in der gleitenden Langfristprognose. Das Wachstumspotential der Binnenschifffahrt wird im Referenzszenario, im Einklang mit der gleitenden Langfristprognose und im Gegensatz zum Projektionsbericht, aufgrund des Güterstruktureffekts, des Wegfalles von Energiegütern wie Mineralölerzeugnissen, Kohle und Kokerei-Produkten im Rahmen der Energiewende und aufgrund von Extremwetterereignissen wie Dürren und Hochwasser und letztlich trotz gegenläufiger Trends wie der steigenden Transportnachfrage im Hafenhinterlandverkehr als sehr gering eingeschätzt.

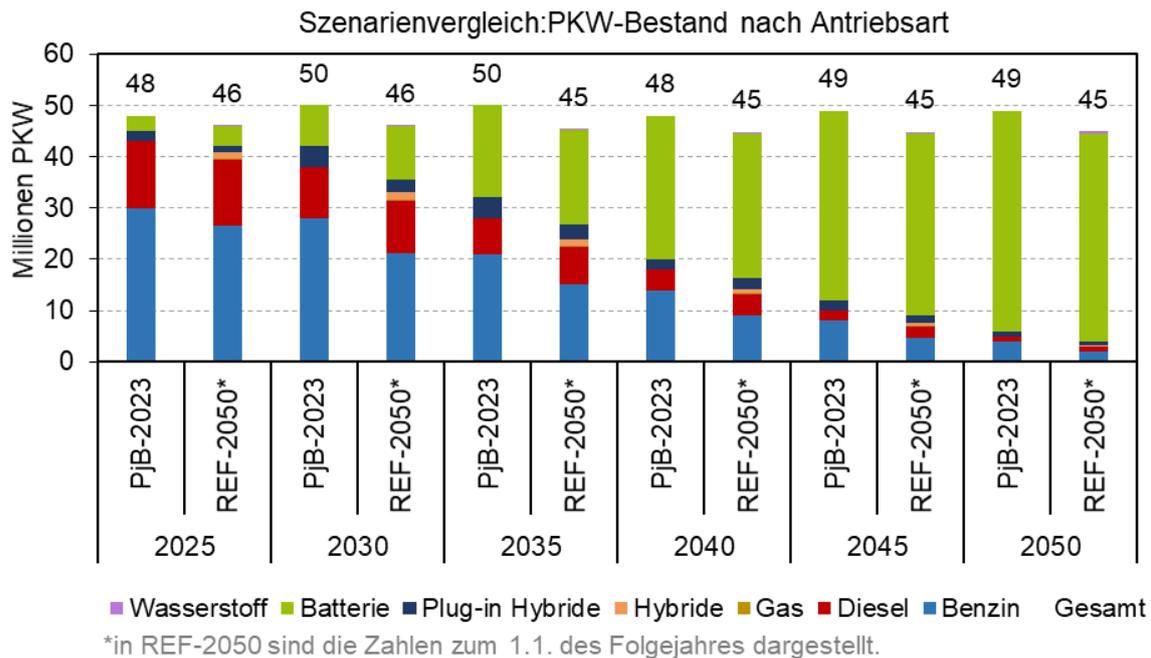
PKW-Flotte



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 141 Szenarienvergleich PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart

Abbildung 141 vergleicht die Entwicklung der Neuzulassungen von Pkw nach Antriebsart des PjB-23 mit REF-2050. Für 2025 geht REF-2050 von einem schnelleren Hochlauf der E-Mobilität (1,2 zu 0,8 Mio.) aus. Für 2030 erwartet der PjB-23 einen Einbruch in der Nachfrage, wobei deutlich mehr BEV verkauft werden. Im Vergleich zu PjB-23 nimmt die Nachfrage im Referenzszenario 2030 leicht zu. Allerdings werden nicht nur mehr BEV (in 2 zu 1,8 Mio.), sondern auch mehr Plug-in Hybride verkauft. Während der Projektionsbericht für die Prognosejahre bis 2040 von sinkenden und erst ab 2045 wieder von leicht steigenden Zulassungszahlen ausgeht, bewegt sich die Nachfrage laut REF-2050 auf einem relativ konstanten Niveau zwischen 3,1 und 3,3 Millionen. Im Einklang mit den Flottenzielen gehen beide Szenarien davon aus, dass ab 2035 keine Pkw mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen werden. Im Gegensatz zum PjB-23 zeigt das REF-2050 aber einen beschränkten Markt für Brennstoffzellenautos.



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 142 Szenarienvergleich PKW-Bestand nach Antriebsart

Der PKW-Bestand des Referenzszenarios ist aufgrund der Darstellung (Werte zum 01.01. des Folgejahres), der geringeren Bevölkerung und der höheren BEV-Anteile (mehr Verschrottung älterer Verbrenner) trotz der höheren Anzahl neuzugelassener Pkw stets geringer als im PjB-23. Ab 2045 finden sich im Szenario des PjB-23 mehr BEV im Bestand als im REF-2050 Szenario, was auf eine geringere Verschrottung alter BEVs und einen geringeren Export von gebrauchten BEVs im PjB-23 schließen lässt. Verschrottungsraten scheinen in PjB-23 deutlich niedriger als in REF-2050 und die Haltedauern entsprechend länger.

Endenergieverbrauch

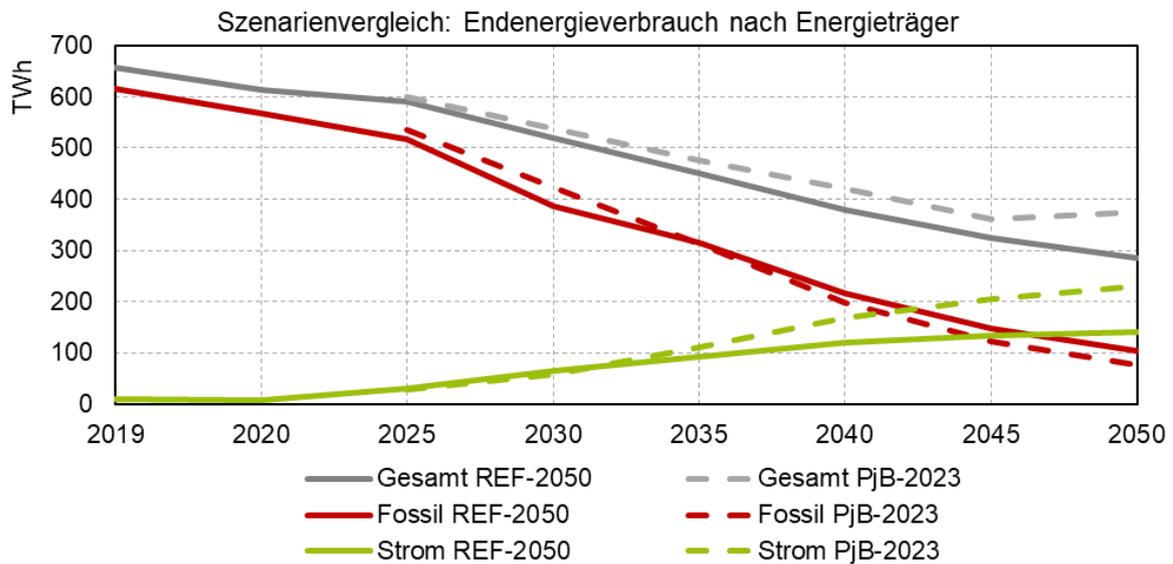
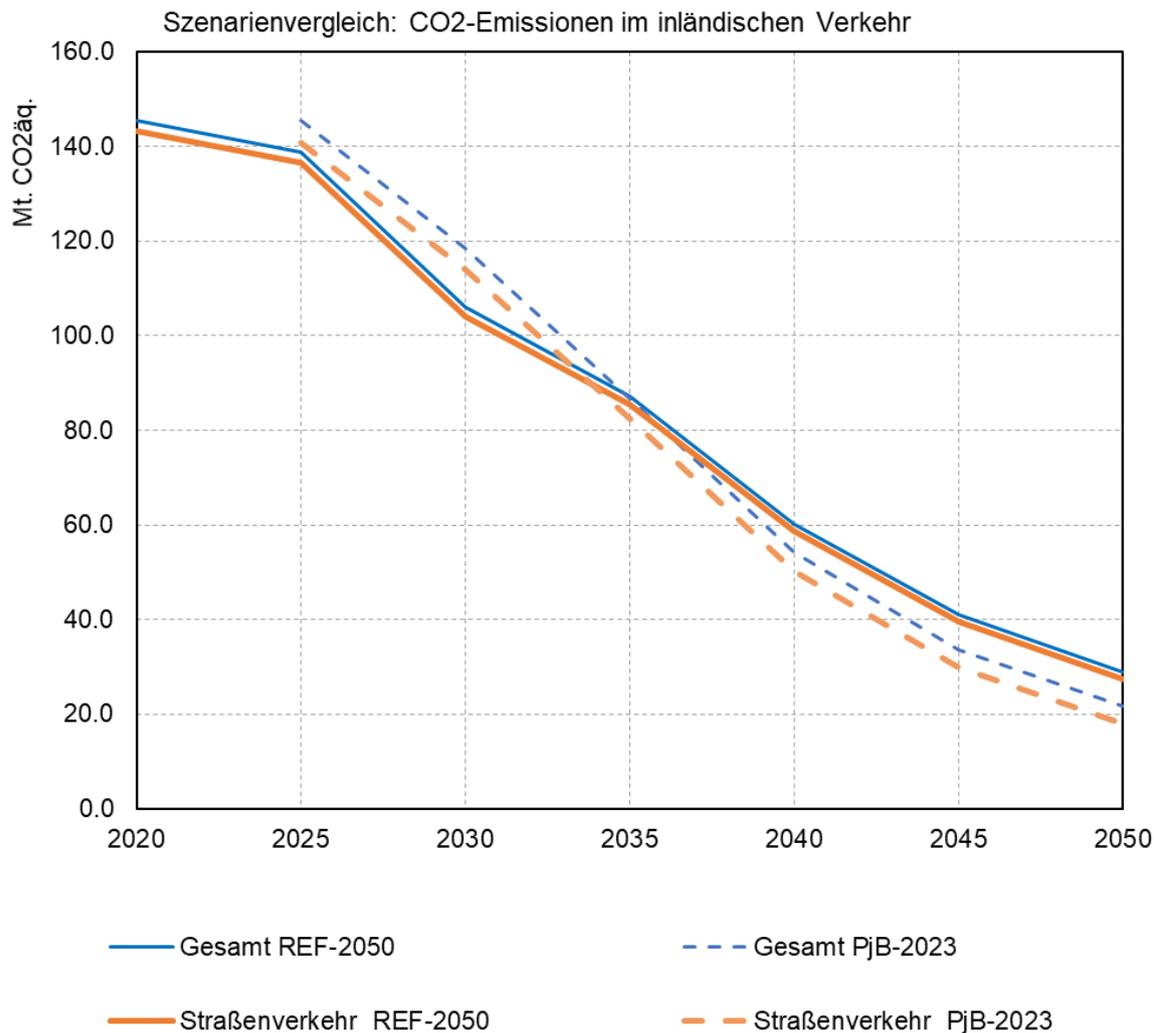


Abbildung 143 Szenarienvergleich Endenergieverbrauch nach Energieträger

Abbildung 143 vergleicht den erwarteten Endenergieverbrauch aus fossilen Energieträgern, Strom sowie den aggregierten Verbrauch des PjB-23 mit REF-2050. Der gesamte Energiebedarf geht in beiden Szenarien zurück, wobei der Projektionsbericht von einem höheren Ausgangsniveau und einem etwas kleineren Rückgang ausgeht. Bis 2035 geht der PjB-23 auch für die fossile Energieträger von einem größeren Bedarf aus, anschließend fällt dieser unter die Erwartungen des Referenzszenarios. Der Endenergieverbrauch für Strom beschreibt in beiden Szenarien einen gegenläufigen Trend, wobei der PjB-23 mittelfristig (bis 2030) von einem leicht schwächeren Anstieg ausgeht, langfristig dafür einen deutlich höheren Verbrauch prognostiziert.

THG-Emissionen



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2023.

Abbildung 144: Szenarienvergleich THG-Emissionen im inländischen Verkehr

Wie Abbildung 144 veranschaulicht, sinken die gesamten THG-Emissionen des inländischen Verkehrs in beiden Szenarien von über 140 Mt. CO₂äq. (2020) auf etwas über 30 Mt. CO₂äq. (2050), wobei das Referenzszenario etwas höhere THG-Emissionen als der PjB-23 erwartet. Die Differenz zum Projektionsbericht spiegelt sich auch in den prognostizierten Entwicklungen der Emissionen des Straßenverkehrs wider.

17.2 Einordnung der PKW Flottenstruktur 2030 in REF-2050 in den europäischen Kontext

Für die Erreichung der **Ziele des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2030** ist der **Bestand** an elektrifizierten PKW und die Effizienz der Verbrenner im Bestand entscheidend. Diese sind in Kapitel 6 beschrieben. Zur Einordnung ob die **europäischen Flottenziele** erreicht werden können, dies mit dem Beitrag von etwa -66% Verbesserung gegenüber 2021 den Deutschland in REF-2050 leistet, müssen die **Neuzulassungen** der deutschen PKW-Flotte in 2030 im gesamten Kontext der Neuzulassungen in anderen Mitgliedsstaaten geprüft werden.

Tabelle 40 weist ein exemplarisches Mengengerüst aus, welches für die EU27 im Jahr 2030 das Reduktionsziel von -55% im Jahr 2030 erreicht. Dabei werden folgende Festlegungen und Annahmen für die Abschätzung getroffen:

- Ausgangspunkt der Berechnung sind die EEA-Monitoringdaten aus dem CO₂-Monitoring des Jahres 2021:
 - 2021 beträgt der EU-weite Durchschnitt der Neuzulassungen von Diesel 144 gCO₂/km, bei Benzinern 134 gCO₂/km und bei PHEV 65 gCO₂/km (Angaben nach WLTP).
- Für Deutschland werden für das Jahr 2030 die Ergebnisse aus der ASTRA-M Modellierung in REF-2050 vorgegeben. Vereinfachend enthalten die Benziner-PKW ebenfalls die CNG und Hybride ohne Stecker, sowie die BEV-PKW auch die FCEV-PKW.
- Für die übrigen Mitgliedstaaten wird als Ausgangspunkt der Berechnung ein Annahmen-Set genutzt, wie es bereits 2018 dem BMDV vorgestellt (damals noch unter Nutzung der EEA-Monitoring-Daten von 2016) und in Diskussionen mit der NPM 2021 und dem EKM im Jahr 2023 verfeinert wurde. Dieses beinhaltet:
 - Die Mitgliedsstaaten werden in vier Gruppen je nach Affinität zur Elektrifizierung abhängig von Kaufkraft, Stabilität Energie-System und Ambitions-Niveau Klimapolitik eingeteilt,
- Für 2030 wurde angenommen:
 - Die Elektrifizierung der vier Ländergruppen beläuft sich auf 80/60/40/30%. Anteile an PHEV liegen bei 10/20/25/25% in den vier Gruppen.
 - 2030 beträgt der EU-weite Durchschnitt der Neuzulassungen von Diesel noch 99 gCO₂/km, bei Benzinern 104 gCO₂/km und bei PHEV 65 gCO₂/km (Angaben nach WLTP).

In diesem exemplarischen Beispiel hätten einige Länder deutlich höhere Elektrifizierungsraten erreicht als Deutschland. Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl anderer Mengengerüste denkbar ist, die ebenfalls das Reduktionsziel von -55% aller Neuzulassungen in der EU erreichen würden.

Tabelle 40 Mengengerüst zur Einordnung des deutschen Beitrages zur Erreichung des EU-Minderungszieles im Jahr 2030 im REF-2050 (exemplarisch)

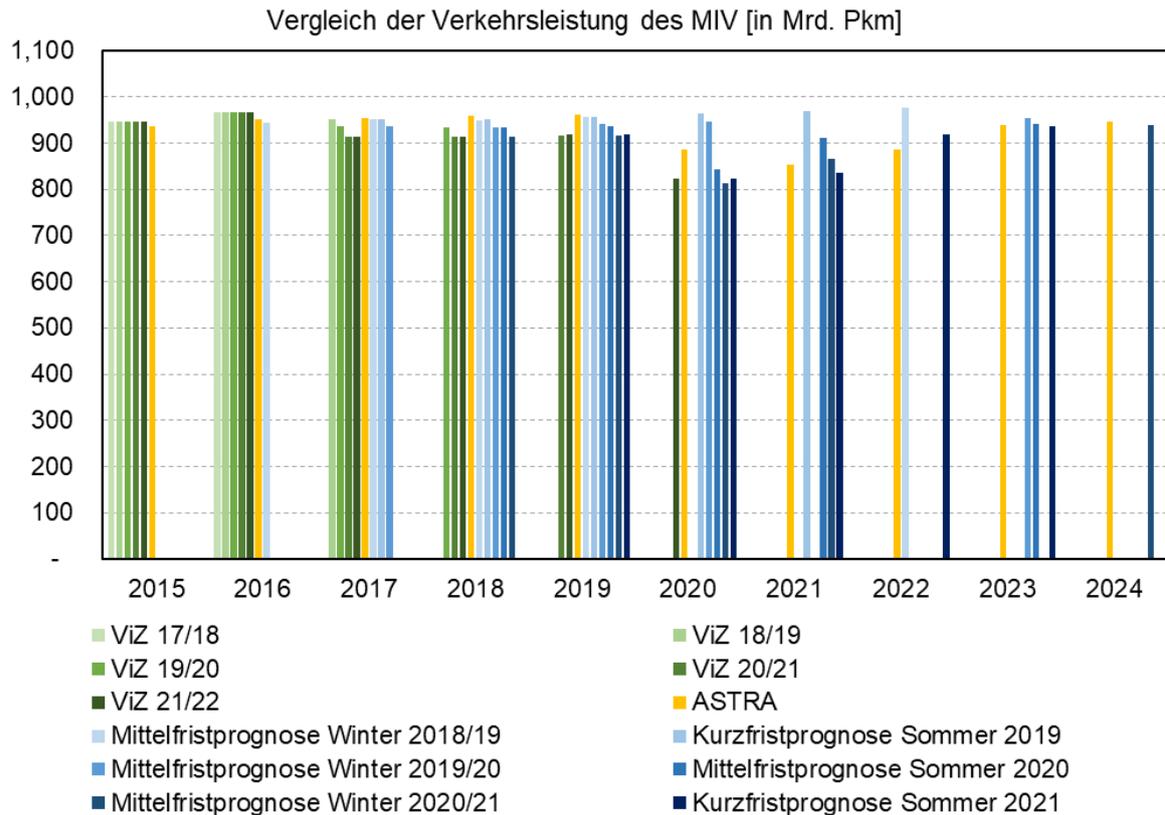
Mitgliedsstaat	Neuzulassungen in 2030					Elektrifizierung		Spezifische WLTP-Werte 2030				CO ₂ -Reduktion
	Gesamt	Diesel	Benzin	PHEV	BEV	PHEV-Anteil	xEV-Anteil	Diesel	Benzin	PHEV	Länder-Prüfwert	2030 vs. 2021
	PKW	PKW	PKW	PKW	PKW	%	%	gCO ₂ /km	gCO ₂ /km	gCO ₂ /km	gCO ₂ /km	%
Österreich	250,887	36,590	99,351	30,307	121,229	20%	60%	102.9	105.8	65.0	64.8	-45.0%
Belgien	418,591	49,406	165,762	50,566	202,263	20%	60%	95.2	105.6	65.0	60.9	-49.0%
Bulgarien	26,333	5,051	18,433	1,975	5,925	25%	30%	103.2	104.7	65.0	98.0	-27.4%
Zypern	11,003	1,384	7,702	825	2,476	25%	30%	107.9	109.0	65.0	94.7	-33.9%
Tschechien	227,616	42,322	159,331	17,071	51,214	25%	30%	103.8	104.6	65.0	97.4	-28.7%
Deutschland	3,331,532	322,376	726,304	262,287	2,020,564	11%	69%	106.5	112.3	65.0	39.9	-65.9%
Dänemark	198,699	7,480	38,946	15,975	143,778	10%	80%	96.7	98.8	65.0	28.2	-71.5%
Estland	21,617	3,623	15,132	1,621	4,864	25%	30%	105.7	112.7	65.0	101.4	-29.5%
Griechenland	106,525	15,186	74,568	7,989	23,968	25%	30%	86.5	98.2	65.0	86.0	-29.1%
Spanien	937,819	112,836	371,376	113,289	453,154	20%	60%	95.0	100.0	65.0	58.9	-53.6%
Finnland	98,918	2,233	19,388	7,953	71,577	10%	80%	104.3	100.3	65.0	27.2	-73.8%
Frankreich	1,811,208	109,488	354,997	145,621	1,310,590	10%	80%	89.5	98.0	65.0	29.9	-73.0%
Kroatien	47,881	10,785	33,517	3,591	10,773	25%	30%	94.3	101.5	65.0	97.1	-24.4%
Ungarn	126,103	17,846	75,158	12,736	38,209	25%	40%	107.6	105.5	65.0	84.7	-36.8%
Irland	109,229	18,399	43,254	13,195	52,780	20%	60%	93.3	97.0	65.0	62.0	-45.9%
Italien	1,318,150	251,731	785,618	133,133	399,399	25%	40%	95.3	98.1	65.0	83.2	-31.2%
Litauen	33,691	3,620	23,584	2,527	7,580	25%	30%	107.0	108.0	65.0	91.9	-32.5%
Luxemburg	42,979	6,519	17,020	5,192	20,767	20%	60%	101.7	119.4	65.0	70.6	-44.2%
Lettland	15,279	2,950	10,695	1,146	3,438	25%	30%	106.5	112.3	65.0	104.1	-27.4%
Malta	5,188	377	3,092	524	1,572	25%	40%	94.9	92.6	65.0	68.6	-34.8%
Niederlande	328,752	1,174	64,435	26,432	237,885	10%	80%	96.1	100.1	65.0	25.2	-74.1%
Polen	487,730	61,800	341,411	36,580	109,739	25%	30%	102.5	105.3	65.0	91.6	-32.3%
Portugal	156,839	19,445	62,108	18,946	75,785	20%	60%	89.5	99.2	65.0	58.2	-47.1%
Rumänien	120,901	21,044	84,630	9,068	27,203	25%	30%	102.0	104.1	65.0	95.5	-25.5%
Schweden	292,688	15,864	57,367	23,532	211,789	10%	80%	109.1	108.0	65.0	32.3	-66.2%
Slowenien	53,883	8,510	32,114	5,442	16,327	25%	40%	104.7	103.8	65.0	85.0	-36.7%
Slowakei	81,864	14,066	57,305	6,140	18,419	25%	30%	104.9	106.7	65.0	97.6	-30.0%
EU27	10,661,903	1,162,105	3,742,597	953,663	5,643,267	14%	62%	99.4	103.5	65.0	53.0	-55.0%

Quelle: Berechnungen M-Five, EEA-Monitoring Daten von 2021, WLTP-Werte

17.3 Anmerkung zu Statistiken im Verkehr – Bandbreite und Variabilität

Wie bereits in Kapitel 11.3 zur kritischen Würdigung der Ergebnisse ausgeführt, existieren für die Kalibrierung des Verkehrssektors in Modellen unterschiedliche Datenquellen und Statistiken. Da nicht alle Parameter erhoben werden können, findet auch in amtlichen Statistiken eine Modellierung von wichtigen Indikatoren statt, beispielsweise für die Verkehrsleistung. Durch diese Modellierung können (1) auch offizielle amtliche Statistiken eines Jahres voneinander abweichen. (2) ist durch Anpassungen in der Modellierung der amtlichen Statistik die Vergleichbarkeit der Jahre untereinander nicht immer vollständig gegeben. (3) In Einzelfällen können Sprünge in der amtlichen Statistik entstehen. Dies soll im Folgenden anhand einer Betrachtung verschiedener Jahrgänge der Kurz- und Mittelfristprognosen, von Verkehr in Zahlen (ViZ) und der ASTRA-Berechnungen veranschaulicht werden.

Die gleitende Verkehrsprognose für den Güter- und Personenverkehr, die jährlich durch das BMDV in Auftrag gegeben wird, besteht aus einer Mittelfristprognose, die im Winter mit einer Vorausschau von vier Jahren erscheint, sowie einer Kurzfristprognose, die im Sommer mit einer Vorausschau von zwei Jahren erscheint. Gleitend heißt dabei, dass die aktuelle Prognose die vorhergehende ablöst. Verkehr in Zahlen wird ebenfalls jährlich vom BMDV herausgegeben, enthält aber keine Prognosen für zukünftige Jahre. Abbildung 145 zeigt einen Vergleich der Modellierung der Verkehrsleistung des MIV über aktuelle und vergangene Publikationen sowie die ASTRA-Berechnung. Hervorzuheben ist für die gleitende Verkehrsprognose z.B. das Jahr 2019, für welches 6 Prognosen aus einem Zeitraum von drei Jahre vorliegen. Jeweils zwei Prognosen sind identisch, während die jeweils jüngere Prognose niedriger liegt als die Prognosen ein Jahr davor. Der Unterschied der Werte für 2019 beträgt bis zu 4%. Auch für das Jahr 2021 zeigen die vier verfügbaren Datenpunkte der gleitenden Verkehrsprognose Unterschiede von bis zu 14% (Corona-Pandemie noch nicht bekannt) und 8% bzw. 3,5% (Corona-Pandemie in Auswirkungen bekannt und bei Prognose berücksichtigt).



Quelle: ITP (2021, verschiedene Jahrgänge), ViZ (2021, verschiedene Jahrgänge), M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2023.

Abbildung 145 Vergleich der Verkehrsleistung des MIV mit Statistiken und Studien

Die Daten bzw. die amtliche Statistik der Verkehrsleistung aus Verkehr in Zahlen (ViZ) sind besonders im Jahr 2017 schwierig oder gar nicht in theorie- und empirie-gestützten Modellen wie ASTRA-M darstellbar. Der erste Datenpunkt für 2017 aus ViZ 17/18 liegt etwa 1,5% niedriger als im Jahr 2016 und damit im Rahmen einer normalen jährlichen Schwankung. Der zweite Datenpunkt für 2017 aus ViZ 18/19 liegt 3,1% niedriger und die weiteren Datenpunkte ViZ 19/20 liegen für 2017 5,5% niedriger als 2016. Dieser deutliche Sprung lässt sich nicht auf eine Änderung der Bedingungen in der Realität zurückführen. Zentrale Treiber der Verkehrsleistung wie Kraftstoffpreis, Bevölkerung oder Beschäftigung haben sich nicht so verändert, dass eine Reduktion um über 5% damit erklärt werden kann. Tatsächlich erfolgte für ViZ ab 2017 eine Neu-Modellierung der Fahrleistungs- und Verbrauchsrechnung sowie des Personenverkehrsmodells, welches die amtliche Statistik in ViZ generiert. Diese Neu-Berechnung verursacht die unterschiedlichen Werte für 2017 und den Sprung nach unten gegenüber 2016.

Die Kalibrierung von ASTRA-M, d.h. die Anpassung der Funktionsparameter, so dass die Empirie abgebildet ist, erfolgt über den Zeitraum von 1995 bis 2021. Dabei dienen die ersten 10 Jahre dem Einschwingen des Modells. Ab 2005 soll ASTRA-M den Trend wichtiger Indikatoren wie z.B. Aufkommen, Verkehrsleistung, Modal-Split, Fahrzeugflotten EEV und THG-Emission endogen nachbilden. Dabei kommt es nicht darauf an, ein einzelnes Jahr exakt zu treffen, sondern die Trends und Dynamik der Indikatoren abzubilden, um dann plausible Aussagen über deren zukünftige, quantitative Entwicklung

treffen zu können. Für einzelne historische Jahre werden kleinere Abweichungen von der amtlichen Statistik in Kauf genommen, solange die Trend-Entwicklung korrekt die Statistik wiedergibt.

Durch den langen Kalibrierungszeitraum und die vielfältigen Wechselwirkungen in ASTRA-M ist die Kalibrierung und damit auch die Erstellung einer neuen Referenz der aufwändigste Vorgang im Modell. Dieser könnte zwar – die Finanzierung vorausgesetzt – jährlich wiederholt werden. Dies erscheint aber nicht notwendig, zumindest wenn der Auslöser für eine Anpassung der Trends in ASTRA-M eine kurzfristige Prognose sein soll, die jährlich angepasst wird (wie in der gleitenden Verkehrsprognose) oder ein statistisches Artefakt (wie in ViZ für das Jahr 2017).

Eine Anpassung von ASTRA-M könnte notwendig sein, wenn (1) zentrale Trends sich wandeln (z.B. von konstanten zu zunehmenden Besetzungsgraden im PKW-Verkehr), oder (2) neue Trends entstehen oder entstanden sind (z.B. ein neuer multi-modaler Markt an Sharing-Dienstleistungen), oder (3) eine neue Empirie über mehrere Jahre vorliegt, oder (4) die Rahmenbedingungen einschließlich des politischen Rahmens sich geändert haben. Dabei würde aber auf eine exakte Kalibrierung auf ein einzelnes Jahr anhand der amtlichen Statistik verzichtet, weil diese sich sehr aufwendig gestaltet und mit jeder neuen Herausgabe erneut erfolgen müsste. Dies gilt insbesondere, wenn die amtliche Statistik oder Prognose, wie oben gezeigt, jährlichen, singulären Sprüngen unterliegt.

Eine Betrachtung der Gründe für Unterschiede in den Prognosen ist möglich. Diese lassen sich (1) auf Differenzen in den Rahmendaten oder (2) Unterschiede der Modellansätze zurückführen. Beispielsweise basiert die Berechnung der Verkehrsleistung auf den Rahmendaten von REF-2050 wie BIP, Bevölkerung und sektoraler Wertschöpfung. Mit dem Verkehrsmodell von ASTRA-M werden damit die verkehrlichen Indikatoren ermittelt. Diese können aufgrund von abweichenden Rahmenbedingungen oder verkehrlichen Parametern (z.B. Besetzungs- oder Beladungsgrade, Fahrzeug- und damit Verkehrskosten) von der laufenden und kurzfristigen Berichterstattung des BMDV abweichen. So ist im REF-2050 beispielsweise ein höheres BIP im Jahr 2024 zugrunde gelegt als in der Mittelfristprognose Winter 2020/ 21, sowie ein höherer Benzinpreis.

18 Referenzen

- ADAC (2023): *Automarken und Modelle – Autokatalog*. Abrufbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/>
- Alfen, Aviso, Bung (2018): *Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022*. Bericht im Auftrag des BMDV, Berlin.
- Alfen, Aviso (2022): *Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2023 bis 2027*. Abrufbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/wegekostengutachten-2018-2022-endbericht.pdf?__blob=publicationFile
- BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen (2017a): *Fahrleistungserhebung 2014: Inländerfahrleistung*. BAST Heft V290 & Tabellenanhang.
- BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen (2017b): *Fahrleistungserhebung 2014: Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko*. BAST Heft V291.
- BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen (2018): *Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0518/2014: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie*. Februar 2018. Bergisch Gladbach. Abrufbar unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1879/file/F122_barrierefreies_ELBA_PDF.pdf
- BCG, Prognos (2018): *Klimapfade für Deutschland*. Abrufbar unter <https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/climate-paths-for-germany>
- BCG (2021): *Klimapfade 2.0. Gutachten für den BDI*. Abrufbar unter <https://www.bcg.com/de-de/klimapfade>
- BDEW (2021): *BDEW-Strompreisanalyse Januar 2021: Haushalte und Industrie*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
- BGL (2015) *Kosten-Informationen-System für die leistungsorientierte Kalkulation von Straßengütertransporten*. Sammelwerk zum Stand 2015 des Bundesverbands Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung.
- BLE (2021): *Evaluations- und Erfahrungsbericht 2021*. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.
- BloombergNEF (2020): *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*. Abrufbar unter <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>

- BloombergNEF (2021): *Hitting the EV Inflection Point. Studie im Auftrag von Transport & Environment.* Mai 2021. Abrufbar unter https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2021_05_05_Electric_vehicle_price_parity_and_adoption_in_Europe_Final.pdf
- BMWi (2021): *Die Energie der Zukunft – Berichtsjahre 2018 und 2019 - Achter Monitoringbericht zur Energiewende.* Berlin.
- BMU (2021): *Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik.* Ausgabe 2021. Berlin. Abrufbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf
- BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021): *Projektionsbericht der Bundesregierung 2021.* Abrufbar unter <https://www.bmu.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2021>
- BMVI (2016): *Bundesverkehrswegeplan 2030.* Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Abrufbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/BVWP/bundesverkehrswegeplan-2030-inhalte-herunterladen.html> .
- BMVI, MKS (2016): *Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe.* MKS-Studie im Auftrag Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Abrufbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mks-nationaler-strategierahmen-afid.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI (2017): *Initiative klimafreundlicher Straßengüterverkehr: Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr (Antriebe und Kraftstoffe).* Dialogprozess im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Abrufbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS-Wissenschaftliche-Untersuchungen/initiative-klimafreundlicher-strassengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI / Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020): *Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf.* Vom BMVI über die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur unter dem Dach der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) beim Reiner Lemoine Institut (RLI) in Auftrag gegebene Studie. Abrufbar unter https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/11/Studie_Ladeinfrastruktur-nach-2025-2.pdf
- BMWK (2023): *Frühjahrsprojektion 2023.* Vom 26.04.2023 Abrufbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/Projektionen-der-Bundesregierung/projektionen-der-bundesregierung-fruehjahr-2023.html>
- Bundesamt für Güterverkehr BAG 2008 bis 2020: *Mautstatistik Jahrestabellen 2007 bis 2019.* Abrufbar unter: https://www.bag.bund.de/DE/Service/Open-Data/Mautstatistik/mautstatistik_node.html

- Bundesnetzagentur: *Netzentgelte Strom und Gas*. Abrufbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/A_Z/N/Netzentgelt.html
- BReg (2018): *Sofortprogramm saubere Luft 2017 – 2018 – Lotsenstelle Fonds Nachhaltige Mobilität*. Bundesregierung. Abrufbar unter: <https://bmdv.bund.de/blaetterkatalog/catalogs/437670/pdf/complete.pdf>
- BReg (2019a): *Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung*. Bundesregierung. Abrufbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile
- BReg (2019b): *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*. Maßnahmenbeschluss der Bundesregierung vom 20.9.2019.
- BReg (2022): *Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung*. Abrufbar unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur-2.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesverband Paket & Expresslogistik e. V. BIEK (2018): *Innenstadtlogistik der Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP)*. Faktenpapier im August 2018. Berlin. Abrufbar unter https://www.biek.de/download.html?getFile=BIEK_KEP-Studie_2018.pdf
- Business Insider Deutschland (28.02.2023): *EU-Studie: Fast jeder zweite Geflüchtete aus der Ukraine will langfristig in Deutschland bleiben*.
- Data Bridge (2021): *Global SUV Market – Industry Trends and Forecast to 2028*. Bericht, April, 2021. Abrufbar unter <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-suv-market>
- DAT-Report (2022): *DAT-Report 2022*. Deutsche Automobil Treuhand GmbH.
- DeStatis (2020): *Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Verkehr und Umwelt. Berichtszeitraum 2005 – 2018*. Wiesbaden.
- Destatis - Statistisches Bundesamt (2022): *Personenverkehr mit Bussen und Bahnen*. Abrufbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/inhalt.html#sprg475826>
- Destatis - Statistisches Bundesamt (2023a): *15. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*.
- DeStatis (2023b): *Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR): Verkehr und Umwelt. Berichtszeitraum 2005 – 2021*. Statistischer Bericht des Statistischen Bundesamtes, Wiesbaden.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (dena, 2021): *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*. Abrufbar unter <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>

- Deutscher Bundestag (2020): *Energiespeicher der Elektromobilität*. Sachstand vom 17. Dezember 2020. Aktenzeichen: WD 8 – 3000 – 090/20. Abrufbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/819220/31128d3d32638f43627fa8a99bd3cb83/WD-8-090-20-pdf-data.pdf>
- DLR (2022): *Sechste DLR-Erhebung: Wie verändert Corona unsere Mobilität?* <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/news/sechste-dlr-erhebung-wie-veraendert-corona-unsere-mobilitaet>
- EEA (2022): *CO₂-emissions from new passenger cars*. European Environment Agency. Abrufbar unter: <http://co2cars.apps.eea.europa.eu/>
- Element Energy (2016): *Low carbon cars in the 2020s: Consumer impacts and EU policy implications*. Final report for BEUC (The European Consumer Organisation).
- EnergieStG: *Energiesteuergesetz §2 Steuertarif*. Abrufbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/_2.html
- EV-Database (2023): *Elektroauto Vergleich – EV Database*. Abrufbar unter: <https://ev-database.org/>
- Eucar (2019): *Battery requirements for future automotive applications*. Abrufbar unter <https://eucar.be/wp-content/uploads/2019/08/20190710-EG-BEV-FCEV-Battery-requirements-FINAL.pdf>
- EU Richtlinie 2014/94 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 *über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*. Abrufbar unter eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094&from=ES
- EU Verordnung 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 *zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 (Neufassung)*. Amtsblatt der Europäischen Union L 111/13. Abrufbar unter <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj>
- (The) Faraday Institution (2020): *High-energy battery technologies*. Faraday Report. January 2020. Abrufbar unter <https://faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2020/01/High-Energy-battery-technologies-FINAL.pdf>
- Flämig H., Fieltsch P., Müller-Steinfahrt U., Kille C. (2021): *Use Cases für klimafreundliche Nutzfahrzeuge*. MKS-Studie im Auftrag des BMDV, Hamburg/Würzburg. Abrufbar unter: <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/use-cases-zum-aufbau-von-privater-und-oeffentlicher-tank-und-ladeinfrastruktur-fuer-emissionsfreie-nutzfahrzeuge/>

- Forschungszentrum Jülich (2019): *Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*. Abrufbar unter https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/News/TransformationStrategies2050/_node.html
- Forschungszentrum Jülich (2021): *Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045*. Abrufbar unter https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/News/strategiesGHGNeutralEnergySupply2045/_node.html
- Fraunhofer ISI, Consentec, Ifeu, TU Berlin (2021): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien. Modul Verkehr*. Abrufbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>
- Hacker, F., Mottschall, M., & von Waldenfels, R. (2015): *Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung*. Studie im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Abschlussbericht. Aktualisierte Fassung April 2015. Berlin: Öko-Institut. Abrufbar unter https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/IKT-EM/ikt2-studie-wirtschaftlichkeit-ikt-elektromobilitaet-2.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Haug I., Schade W. (2021): *Modellhochlauf E-PKW: Angebot in Deutschland*. M-Five Policy & Futures Note, Ausgabe No. 2, Karlsruhe. Abrufbar unter: https://m-five.de/wp-content/uploads/M-Five_PolicyFutures_Note_No2_210615.pdf
- Haug, I., Schade, W., Berthold, D. (2022): *Battery Study 2021: Analysis of battery value chains in Europe and of European OEM*. M-Five Working Paper on behalf of the European Trade Union Institute (ETUI) (forthcoming).
- Heinen, F. (2023): *Entwicklungen der rechtlichen Rahmenbedingungen im Verkehrs- und Kraftstoffsektor*. Präsentation des BMUV auf der VDV-Jahrestagung. Abrufbar unter: <https://www.vdv.de/falk-heinen-bundesministerium-fuer-umwelt,-naturschutz,-nukleare-sicherheit-und-verbraucherschutz-entwicklungen-und-auswirkungen-der-gesetzlichen-rahmenbedingungen-euro-vii,-co2-flotte.pdfx>
- IAA Transportation (2022): *Am E-Bus geht kein Weg mehr vorbei*. Pressemitteilung. <https://www.iaa-transportation.com/de/newsroom/e-bus>
- ICCT (2017): *From Laboratory to road: a 2017 update of official and real world fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe*. Weißbuch des International Council on Clean Transportation (ICCT) und TNO (NL), Berlin.
- ICCT (2019): *Update on electric vehicle costs in the United States through 2030*. Abrufbar unter <https://theicct.org/publications/update-US-2030-electric-vehicle-cost>

- IEA (2020): *World Energy Outlook 2020*. Paris. Abrufbar unter <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- IHS Markit (2020): *CO₂ compliance and investments for EU passenger car manufacturers - The challenges of the 2025 and 2030 targets*. Whitepaper. Dezember 2020. Abrufbar unter <https://ihsmarkit.com/research-analysis/co2-compliance-and-investments-for-eu-passenger-car-maker.html>
- INRIX (2017): *The Impact of Parking Pain in the US, UK and Germany*. Abrufbar unter <https://inrix.com/press-releases/parking-pain-de/>
- ITP, IVV, BVU, Planco (2014): *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (VP 2030)*. Los 3, Schlussbericht, München.
- ITP (2021): *Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2020/21*. Im Auftrag des BMVI. München/ Köln.
- Kehler (2015): *Entwicklung einer Tankstelleninfrastruktur für Erdgas und Biomethan*. Erdgas mobil e.V.
- Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2019): *Verkehr in km 2014-2016* https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Kraftverkehr/VK/2019/vk_2019_xlsx.xlsx?__blob=publicationFile&v=7
- Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2020): *Verkehr in Zahlen 2020*. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-xls.xlsx?__blob=publicationFile
- Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2023a): *Neuzulassungen nach Umwelt-Merkmalen (FZ 14)*. Abrufbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz14_n_uebersicht.html
- Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2023b): *Bestand nach Umwelt-Merkmalen (FZ 13)*. Abrufbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz13_b_uebersicht.html
- Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2021): *Übermittelter Datensatz zu Neuzulassungen und Bestand*.
- Krail M., Dütschke E., Flämig H., Hellekes J., Luchmann I., Mader S., Rüdiger D., Schade W., Schellert M., Schneider U., Steindl A., Wagner U., Waßmuth V. (2018): *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Studie im Auftrag des BMVI im Rahmen der MKS, Karlsruhe/Berlin. Abrufbar unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2019/energie-treibhausgaswirkungen-vernetztes-fahren.pdf>

- Matt C. und Flämig H. (2018): *AP6: Komponenten Modell und TCO-Rechnung LKW*. In Schade W. (2019) *Finanzielle Anreize für die Dekarbonisierung des Verkehrs*. Arbeitspapiere der MKS im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung für das BMVI. Hamburg.
- McKinsey (2019): *Making electric vehicles profitable*. Abrufbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/making-electric-vehicles-profitable>
- NOW (2021): *Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben*. NOW: Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie. Abrufbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/03/Leitfaden-fuer-Busse-mit-alternativen-Antrieben_NOW.pdf
- NOW (2023): *Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengüterverkehr: Auswertung der Cleanroom Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern*. NOW: Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie. Studie im Auftrag des BMDV.
- NPM - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019): *Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor*. Zwischenbericht der NPM AG1. Abrufbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Zwischenbericht-03_2019-der-AG1-Klimaschutz-der-NPM-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf
- NPM - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2020): *Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge: Wege zur Dekarbonisierung schwerer LKW mit Fokus der Elektrifizierung*. Abrufbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nutzfahrzeuge.pdf
- NPM - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2021): *Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr. Bericht der Arbeitsgruppe 1 „Klimaschutz im Verkehr“*. Berlin, Juli 2021. Abrufbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM_AG1_Wege-fuer-mehr-Klimaschutz.pdf
- OECD (2023): [OECD Economic Outlook](#), Volume 2023 Issue 1, OECD Publishing, Paris.
- Öko Institut (2019): *Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr*. Abrufbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Schlussbericht-Energieeffizienz-OEPNV.pdf>
- PE Institut für Politikevaluation GmbH, fka GmbH, Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen und Roland Berger GmbH (2019): *Automobile Wertschöpfung 2030/2050*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Endbericht. Abrufbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16

- Prognos AG, navigant, Öko-Institut, ifeu, adelphi, bbh und dena (2020): *Kurzgutachten zu Maßnahmen zur Zielerreichung 2030 zur Begleitung des Klimakabinetts*. Im Auftrag des BMWi. Berlin, Basel, Freiburg, Heidelberg, Köln, 2020. Abrufbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kurzgutachten-zu-massnahmen-zur-zielerreichung-2030-zur-begleitung-des-klimakabinetts.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): *Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität*. Abrufbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland>
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045*. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende. Abrufbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-vollversion/>
- PwC (2017): *The World in 2050: The Long View - How will the global economic order change by 2050?*
- PWC (2023): *E-Bus-Radar 2023*. Abrufbar unter: <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/pwc-e-bus-radar-2023.pdf>
- Ricardo-AEA (2015): *Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission.
- Robinius M., Linßen J., Grube T. (2018): *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles*. Forschungszentrum Jülich.
- Schade W., Hartwig J., Krail M., Waßmuth V., Wietschel M. (2016): *Methodik und Gestaltung eines Referenzszenarios zur Nutzung in der MKS*. Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Karlsruhe (BMVI).
- Schade W., Perez E., Berthold D., Wagner U., Krail M., Waßmuth V. (2018): *Gestaltung des neuen Referenzszenarios zur Nutzung in der MKS 2017+*. Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Karlsruhe.
- Schade W., Berthold D., Mader S., Scherf C., Stich M., Wagner U. (2020): *Gesamtwirtschaftliche Wirkungen durch die Transformation zu nachhaltiger Mobilität*. Arbeitspapier im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung, Karlsruhe.
- Schade W., de Stasio C., Bielanska D., Fermi F., Himmelsbach M., Lindberg N., Maffii S., Rothengatter W., Skinner I., Stich M., Streif M., Zani L. (2021): *Analysis accompanying the Impact Assessment for the revision of Regulation (EU) N° 1315/2013 – FINAL REPORT*. Studie und Bericht im Auftrag der Europäischen Kommission. Karlsruhe, Mailand.

- Schade W., Stich M., Kleemann M., Berthold D., Scherf C., Krail M., Brauer C., Krauß K., Anstett P., Walther C., Waßmuth V. (2022): *Gestaltung des MKS Referenzszenarios für die Periode 2021 bis 2035 (REF-2020)*. Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Karlsruhe.
- Scherf C., Streif M., Ruhrort L., Bösl M., Emmerich J., Knie A. (2021): *Mobilitätsmonitor Nr. 13 – November 2021*. Erschienen in Internationales Verkehrswesen. Abrufbar unter https://m-five.de/wp-content/uploads/mobilitaetsmonitor_nr-13_nov-2021.pdf
- Statistisches Bundesamt (2011): *Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Weiterentwicklung der Berechnungen zum Energieverbrauch und zu den CO₂ - Emissionen des Straßenverkehrs im Rahmen des NAMEA- Rechenansatzes*. Methodenbericht im Februar 2011. Wiesbaden. Abrufbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Publikationen/Downloads-Material-und-Energiefluesse/ugr-weiterentwicklung-emission-5850009119004.pdf?__blob=publicationFile
- Transport & Environment (2021): *Hitting the EV Inflection Point*. Bloomberg Studie. Mai 2021. Abrufbar unter https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2021_05_05_Electric_vehicle_price_parity_and_adoption_in_Europe_Final.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2019): *Projektionsbericht 2019 für Deutschland*. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2019-fuer-deutschland>
- UBA – Umweltbundesamt (2021): *Projektionsbericht 2021 für Deutschland*. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2021): *Treibhausgasemissionen in Deutschland 2020*. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/galerie/treibhausgasemissionen-in-deutschland-2020>
- UBA – Umweltbundesamt (2023a): *Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2022 gemäß Bundesklimaschutzgesetz*. Abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310_vjs_2021_-_begleitender_bericht_-_sauber_vbs_korr_kurzfassung.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2023b): *Projektionsbericht 2023 für Deutschland*. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland>
- Vision Mobility (2022): *Vision Mobility, verschiedene Ausgaben*. Huss-Verlag, München.
- VDV (2018): *Modernisierung des deutschen Eisenbahnnetzes durch Digitalisierung und ETCS-Ausrüstung*. VDV-Positionspapier. Abrufbar unter: <https://www.vdv.de/vdv-positionspapier-etcs.pdf>

ViZ – Verkehr in Zahlen (2021): *Verkehr in Zahlen 2021/ 2022*. Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.

Wietschel M., Gnann T., Kühn A., Plötz P., Moll C., Stütz S., Balz W., Waßmuth V., Rödl A., Schade W., Mader S. (2017): *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw*. MKS-Studie im Auftrag des BMVI. Abrufbar unter: <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/Wissenschaftliche-Untersuchen/hybrid-oberleitungslkw.html>

Ziegler, Trankic (2021): *Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline*.