Gestaltung des MKS Referenzszenarios für die Periode 2021 bis 2035 (REF-2020)

ARBEITSPAPIER zum Projekt

„Klimaschutz-Maßnahmen“

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

Rollierende Entwurfsversion v1.3

Karlsruhe, 7.03.2022

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

© M-Five 2022

Autoren des Arbeitspapiers:

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

Dr. Wolfgang Schade, Meike Stich, Max Kleemann, Daniel Berthold, Ines Haug, Christian Scherf

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

Dr. Michael Krail, Konstantin Krauß, Clemens Brauer

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

Philipp Anstett

PTV AG (PTV)

Prof. Dr. Christoph Walther

PTV Transport Consult GmbH (PTV)

Dr. Volker Waßmuth

Hinweise:

Rollierende Überarbeitung mit kleineren Ergänzungen und Korrekturen zum 17.10.2022.

Quantitäten aus der Fassung vom 7.3.2022 unverändert.

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

Vorgeschlagene Zitierweise des Arbeitspapiers:

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. Karlsruhe.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 17

2 Einleitung 18

3 Konzept des neuen Referenzszenarios 19

3.1 Stichtag für Instrumente im MKS-Referenzszenario (REF-2020) 20

3.2 Konzept der MKS Szenario-Architektur 20

3.3 Infrastruktur der Verkehrsnetze 21

3.4 Überblick Modellsystem ASTRA-VALIDATE 23

3.5 THG-Berechnung mit dem System-Modell ASTRA-M 24

4 Aktualisierung der Rahmenbedingungen 26

4.1 Bevölkerung in Deutschland 26

4.2 Bruttoinlandsprodukt (BIP) 28

4.3 Inflationsindex 30

4.4 Kraftstoffpreise 31

4.4.1 Flüssige Kraftstoffe 31

4.4.2 Gasförmige Kraftstoffe 36

4.5 Strompreise 38

4.5.1 EEG-Umlage 38

4.5.2 Haushaltsstrompreis 40

4.5.3 Industriestrompreis und Großverbraucher im Verkehr 41

4.6 Wasserstoffpreise 44

4.7 Anteil Biokraftstoffe und Preiseffekte 47

4.8 CO_2-Preispfad 51

4.9 Energiepreise im Vergleich 54

4.10 Die Effekte der Corona-Pandemie 55

4.11 Die Effekte der Automatisierung im Verkehr 57

5 Berücksichtigung von Instrumenten in REF-2020 60

5.1 Liste der Instrumente im Referenzszenario (REF-2020) 60

5.2 Reisezeitreduktion in ÖPNV und Fahrrad-Verkehr 62

5.3 Hinweis auf Maßnahmen in Ergänzung zum Referenzszenario 63

6 Referenzszenario PKW-Flotte 64
6.1 Modellhochlauf von E-PKW und Entwicklung der Batteriekosten und -technologie 64
6.2 Rolle und Aufbau der Ladeinfrastruktur 69
6.3 Übersicht über die Modellierung der PKW-Flotte 70
6.3.1 Modellierung des PKW-Kaufs und der PKW-Flotte im Kohortenmodell 70
6.3.2 Entscheidungsfunktionen für den PKW-Kauf 72
6.3.3 Dekompositionsanalyse der Treiber des Hochlaufs von E-PKW 74
6.3.4 Modellierung der PKW-Kosten in ASTRA 79
6.4 Entwicklung der PKW-Flotte 85
6.4.1 Kauf und Bestand der PKW 85
6.4.2 Effizienzentwicklung der PKW 89
7 Referenzszenario der Flotte leichter Nutzfahrzeuge (LNF) 95
7.1 Übersicht über die Modellierung der LNF-Flotte 96
7.2 Das Kaufentscheidungsmodell 97
7.3 Aktualisierung der Inputdaten und Kalibrierung 99
7.4 Entwicklung der Flotte LNF 102
7.5 Entwicklung der Neuzulassungen LNF 104
7.6 Effizienzentwicklung LNF 106
8 Referenzszenario der Flotte schwerer Nutzfahrzeuge (SNF) 108
8.1 Übersicht über die Modellierung der SNF-Flotte 109
8.1.1 Modellierung der Raten der Außerbetriebnahme von SNF 110
8.1.2 Modellierung der SNF-Neuzulassungen 113
8.2 LKW-Maut 116
8.2.1 Ausgestaltung der LKW-Maut 116
8.2.2 Modellierung der LKW-Maut 117
8.3 Das Kaufentscheidungsmodell 122
8.3.1 TCO-Ast 125
8.3.2 Logit-Ast 127
8.3.3 Berechnung der Vollkosten der SNF 130
8.3.4 Komponentenmodell Anschaffungskosten SNF 131
8.4 Entwicklung der Neuzulassungen SNF 138
8.5 Entwicklung der Flotte SNF 142

8.6 Altersstruktur der SNF in 2030 146
8.7 Effizienzentwicklung SNF 147
9 Aufbau der Energieinfrastruktur für Verkehr 149
9.1 Alternative Lade- und Betankungsinfrastruktur für PKW und LNF 149
9.2 Alternative Lade- und Betankungsinfrastruktur für SNF 152
9.3 Erzeugungsinfrastruktur für erneuerbaren Energien 155
10 Modellierung und Referenzszenario Personenverkehr 157
10.1 Das 4-Stufen Verkehrsmodell 157
10.2 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr 159
10.3 Kritische Würdigung der Ergebnisse und der Statistik 165
11 Modellierung und Referenzszenario Güterverkehr 169
11.1 Das 4-Stufen Verkehrsmodell 169
11.2 Verkehrsnachfrage im Güterverkehr 170
12 Einnahmen und Investitionen im Verkehr 172
13 Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr 178
13.1 Entwicklung des Endenergieverbrauchs (EEV) 178
13.2 Entwicklung des Primärenergieverbrauchs (PEV) 182
14 Entwicklung der THG-Emission des Verkehrs 185
15 Synthese und Ausblick 190
16 Anhang 191
16.1 Vergleich von REF-2020 mit anderen Szenarien 191
16.2 Einordnung der PKW Flottenstruktur 2030 in REF-2020 in den europäischen Kontext 193
16.3 Anmerkung zu Statistiken im Verkehr – Bandbreite und Variabilität 195
17 Referenzen 199

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1 Integrierte Anwendung der Modelle ASTRA und VALIDATE in der MKS 24

Abbildung 2 Prinzipienskizze der Ermittlung von EEV und THG im Verkehr (ASIF-Konzept) 25

Abbildung 3 Überblick über Module und Modelle von ASTRA-M 26

Abbildung 4 Entwicklung des Bruttoinlandprodukts, 2019 = 100....29

Abbildung 5 Entwicklung des Inflationsindex mit Basis 2010 bis 2035....31

Abbildung 6 Entwicklung der Rohstoffpreise Rohöl und Erdgas nominal bis 2035....32

Abbildung 7 Entwicklung der Diesel Preisbestandteile (nominal) bis 2035....33

Abbildung 8 Entwicklung der Diesel Preisbestandteile (real) bis 2035....33

Abbildung 9 Entwicklung der Benzin Preisbestandteile (nominal) bis 2035....34

Abbildung 10 Entwicklung der Benzin Preisbestandteile (real) bis 2035....34

Abbildung 11 Entwicklung der Kraftstoffpreise im Vergleich (REF-2020)....35

Abbildung 12 Entwicklung der Steuersätze von Benzin und Diesel nominal und real (REF-2020) 36

Abbildung 13 Entwicklung der CNG Preisbestandteile (nominal) bis 2035....37

Abbildung 14 Entwicklung der CNG Preisbestandteile (real) bis 2035....38

Abbildung 15 Fortschreibung der EEG-Umlage - Varianten....39

Abbildung 16 Entwicklung des Haushaltsstrompreises - nominal 41

Abbildung 17 Entwicklung des Haushaltsstrompreises – nominal versus real 41

Abbildung 18 Varianz der Industriestrompreise für Großverbraucher in 2020....42

Abbildung 19 Industriestrompreise für Nutzung im Verkehr (REF-2020)....43

Abbildung 20 Struktur der Industriestrompreise für Großverbraucher (REF-2020)....44

Abbildung 21 Entwicklung des Wasserstoffpreises in der Mobilität bis 2030....45

Abbildung 22 Entwicklung des CEP-Preises und des H_2-Elektrolyse Preises aus Netzstrom 46

Abbildung 23 Entwicklung des Wasserstoffpreises in der Mobilität bis 2030....46

Abbildung 24: Darstellung der eingesetzten Mengen an Biodiesel (N-&FM und IX B) und Bioethanol (N-&FM) 50

Abbildung 25: Einsatz von Biokraftstoffen zwischen den Jahren 2020 und 2030 aufgeteilt nach Kraftstoffart und Ausgangsrohstoffen 51

Abbildung 26 CO_2-Preispfad in REF-2020 – 25-65-125-150.....52

Abbildung 27 CO_2-Preisaufschlag für verschiedene Kraftstoffe in REF-2020 (real) 53

Abbildung 28 Entwicklung der Einnahmen aus der CO_2-Bepreisung 54

Abbildung 29 Vergleich der Energiepreise aus Nutzersicht 55

Abbildung 30 Reduktion der Kraftstoffkosten durch primäre Effekte in beiden Szenarien gegenüber REF 58

Abbildung 31 Reduktion der Vollkosten durch Rückgang der Fahrerkosten.....59

Abbildung 32 Treiber, Modellstufen und Entscheidungsfunktionen des PKW-Kaufmodells 71

Abbildung 33 Aufbau des PKW-Kohortenmodells in REF-2020.....72

Abbildung 34 Dekompositionsanalyse des E-PKW Absatzes bis 2030.....76

Abbildung 35 Modellpolitik, Modellhochlauf und Kaufwiderstand 77

Abbildung 36 Einfluss CO_2-Standards auf Produktionsplanung und E-PKW-Absatz 78

Abbildung 37 Dekompositionsanalyse des Verbleibs des E-PKW Absatzes von 2022 – 2030 im Jahr 2030.....79

Abbildung 38 Entwicklung des PKW-Bestandes bis 2035.....85

Abbildung 39 Entwicklung des PKW-Bestandes bis 2035 nach Antriebsart.....86

Abbildung 40 Entwicklung der jährlichen PKW-NZL nach Antriebsart bis 2035 87

Abbildung 41 Entwicklung der Segmente im PKW-Bestand bis 2035 88

Abbildung 42 PKW-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur in 2030 89

Abbildung 43 Entwicklung des CO_2-Flottenwertes der Neuzulassungen (nach NEFZ) und des Bestandes an PKW (Realbetrieb, RDE) 91

Abbildung 44 CO_2-Typprüfwerte nach Segmenten von PKW-Neuzulassungen (NEFZ)92

Abbildung 45 CO_2-Emissionswerte nach Segmenten der PKW-Flotte (RDE) 92

Abbildung 46 CO_2-Typprüfwerte nach Antriebsart von PKW-Neuzulassungen (NEFZ).93

Abbildung 47 Ableitung von NEFZ-, RDE- und WLTP-Werten in ASTRA-M 95

Abbildung 48 Entwicklung des LNF-Bestandes bis 2035 nach Segmenten 103

Abbildung 49 Bestand an LNF nach Antriebsart bis 2035.....103

Abbildung 50 Entwicklung der LNF-Käufe bis 2035 nach Segmenten 104

Abbildung 51 Kauf von LNF nach Antriebsart bis 2035.....105

Abbildung 52 LNF-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur in 2030.....106

Abbildung 53 Entwicklung des CO_2-Flottenwertes der Neuzulassungen (nach NEFZ) und des Bestandes an LNF (Realbetrieb) 107

Abbildung 54 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für Sattelzugmaschinen in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a]. 110

Abbildung 55 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >20t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a] 111

Abbildung 56 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >12t ≤20t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a] 111

Abbildung 57 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >7,5t ≤12t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a] 111

Abbildung 58 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >3,5t ≤7,5t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a] 112

Abbildung 59 Abhängigkeit der Reduktion der Rate der Außerbetriebnahme (Faktor) in Abhängigkeit der Deckung des Transportbedarfes: ganz links: Bedarf=2*Angebot, ganz rechts: Bedarf=Angebot.....113

Abbildung 60 Anteil der Abgasnormen an den Neuzulassungen (gestapelt).....115

Abbildung 61 Mauttarife und deren Wirkung auf Flotten, Fahrleistung und Mauteinnahmen 117

Abbildung 62 Differenzierung von 2 zGG-Klassen auf 5 zGG-Klassen: Die % der unteren beiden und der oberen drei feineren Klassen ist in Summe je 100% (die gröberen 2 zGG-Klassen) 119

Abbildung 63 Anteil der Inlandsfahrleistung, welcher von inländischen LKW erbracht wird, differenziert nach Gewichtsklassen. 120

Abbildung 64 Entwicklung des Anteils der Inlandsfahrleistung (Bruchteil), welcher bemautet wird, nach zGG. 121

Abbildung 65 Aufbau des Kaufentscheidungs-Modells für SNF 124

Abbildung 66 Einfluss der Verbreitung von Antriebsarten auf Verzerrungen in der Wahrnehmung des Nutzens (d.h. implizit des Preises) 128

Abbildung 67 Entwicklung der Komponentenpreise für Sattelzugmaschinen für verschiedene Antriebsoptionen.....133

Abbildung 68 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >20t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen 134

Abbildung 69 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >12t ≤20t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen 134

Abbildung 70 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >7,5t ≤12t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen. 135

Abbildung 71 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >3.5t ≤7,5t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen 135

Abbildung 72 Entwicklung der Preise für Batterien für SNF 136

Abbildung 73 Größe der Batterien für SNF 137

Abbildung 74 Entwicklung der Preise für H_2-Brennstoffzellen für SNF 137

Abbildung 75 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen, aggregiert über alle Gewichtsklassen nach Antriebsart 138

Abbildung 76: Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen, aggregiert über alle Gewichtsklassen nach Antriebsart, mit fossilen SNF desaggregiert nach Antriebsart 139

Abbildung 77 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >3,5t ≤7,5t nach Antriebsart 140

Abbildung 78 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >7,5t ≤12t nach Antriebsart 141

Abbildung 79 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >12t ≤20t nach Antriebsart 141

Abbildung 80 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >20t nach Antriebsart 142

Abbildung 81 Entwicklung der Neuzulassungen an Sattelzugmaschinen nach Antriebsart 142

Abbildung 82 Entwicklung des Bestandes schwerer Nutzfahrzeuge aggregiert über alle Gewichtsklassen nach Antriebsart 143

Abbildung 83 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >3,5t ≤7,5t nach Antriebsart 144

Abbildung 84 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >7,5t ≤12t nach Antriebsart 144

Abbildung 85 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >12t ≤20t nach Antriebsart 145

Abbildung 86 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >20t nach Antriebsart 145

Abbildung 87 Entwicklung der Flotte an Sattelzugmaschinen nach Antriebsart 146

Abbildung 88 Anzahl SNF in 2030 je Neuzulassungsjahr. Der Übersichtlichkeit halber wurden H2 und OH weggelassen, da diese im REF-2020 durch Geringfügigkeit ohnehin kaum darstellbar sind.....146

Abbildung 89 Entwicklung der Energieeffizienz von SNF nach Antriebsart.....148

Abbildung 90: Bestand an PKW-Ladestationen (REF-2020).....151

Abbildung 92 Bestand an öffentlichen SNF-Ladesäulen (REF-2020).....155

Abbildung 93 Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Personenverkehr (REF-2020) 156

Abbildung 94 Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Güterverkehr (REF-2020) 157

Abbildung 95 Aufbau der Modellierung des Personenverkehr-Moduls in ASTRA-M ...159

Abbildung 96 Aufkommen im Personenverkehr nach Distanzbändern (in Mrd. Fahrten) 164

Abbildung 97 Verkehrsleistung im Personenverkehr nach Distanzbändern (in Mrd. pkm) 165

Abbildung 98 PKW-Fahrleistung berechnet nach verschiedenen Konzepten u. Quellen 168

Abbildung 99 Verkehrsleistung berechnet nach verschiedenen Konzepten u. Quellen 169

Abbildung 100 Modellierung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr und Kopplung mit Nutzfahrzeug-Flottenmodell 170

Abbildung 101 Verkehrsleistung im Güterverkehr (in Mrd. tkm) 172

Abbildung 102 Verteilung der Einnahmen aus der Energiesteuer über die Zeit (REF-2020) 173

Abbildung 103 Entwicklung der Einnahmen aus der Energiesteuer (REF-2020) 174

Abbildung 104 Verteilung der modellierten Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2020) 175

Abbildung 105 Entwicklung verschiedener Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2020) 176

Abbildung 106 Verteilung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2020).....177

Abbildung 107 Entwicklung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2020).....178

Abbildung 108 Endenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2020) 179

Abbildung 109 Endenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2020) 180

Abbildung 110 Stromnachfrage der verschiedenen Verkehrsmittel (nur direkte Nutzung als Fahrstrom) 180

Abbildung 111 Aufteilung des EEV von Bio-Kraftstoffen auf Energieträger (REF-2020) 181

Abbildung 112 Vergleich des EEV im Verkehr von REF-2020 mit anderen Quellen 182

Abbildung 113 Primärenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2020) 184

Abbildung 114 Primärenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2020).....185

Abbildung 115 Entwicklung der THG-Emission aus Verkehr in KSG-Abgrenzung (REF-2020) 186

Abbildung 116 Verteilung der THG-Emissionen auf die Verkehrsmittel über die Zeit (REF-2020) 187

Abbildung 117 Entwicklung der THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr (REF-2020) 188

Abbildung 118 Vergleich der THG-Emissionen im Verkehr von REF-2020 mit anderen Quellen 189

Abbildung 119 Szenario-Vergleich Endenergieverbrauch Verkehr 191

Abbildung 120 Szenario-Vergleich THG-Emissionen Verkehr 192

Abbildung 121 Szenario-Vergleich PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart 193

Abbildung 122 Szenario-Vergleich PKW-Bestand nach Antriebsart.....193

Abbildung 123 Vergleich der Verkehrsleistung des MIV 196

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Übersicht über wichtige Zielgrößen und Kern-Indikatoren in REF-2020 ..17

Tabelle 2: Entwicklung der Bevölkerung in REF-2020 27

Tabelle 3: Zuwanderung in der 13. und 14. Vorausberechnung (14-BV) 27

Tabelle 4: Bevölkerung gemäß 14. koordinierter Vorausberechnung von Destatis (14-BV G2-L2-W2) 28

Tabelle 5: Ökonomische Kennziffern in REF-2020 30

Tabelle 6: Übersicht der 2021 eingesetzten Biokraftstoffmengen 48

Tabelle 7: Übersicht der angenommenen Anteile für Biokraftstoffe für die Jahre 2020, 2025 und 2030.....49

Tabelle 8: Maßnahmen des MKS-Referenzszenarios (REF-2020) 60

Tabelle 9: Verbesserung der Fahrzeiten durch die Instrumente im Personennah- und -regionalverkehr (REF-2020) 63

Tabelle 10: Potentiale zur Kostensenkung von E-PKW nach NPM (2021).....65

Tabelle 11: Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugcharakteristika von BEV 67

Tabelle 12: Entwicklung von Batteriekosten in der Literatur (Schätzungen) in €$_{2010}$/kWh 68

Tabelle 13: Entwicklung der jährlich anfallenden Kosten (ohne Energie) von neuen PKW 82

Tabelle 14: Entwicklung der Energiekosten von neuen PKW 83

Tabelle 15: Entwicklung der Beschaffungskosten von neuen PKW 84

Tabelle 16: Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Neuzulassung (NEFZ) 94

Tabelle 17: Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Bestandsflotte (RDE) 94

Tabelle 18: Fahrzeugkosten für LNF nach Antriebsart (in €$_{2010}$).....100

Tabelle 19: Kosten im LNF-Kaufentscheidungsmodell (Gewerbe, in €$_{2010}$/km) 101

Tabelle 20: Entwicklung der Energieeffizienz im Realbetrieb der LNF-Flotte (in kWh/km) 108

Tabelle 21: Anteile ausländischer LKW an der Fahrleistung von Strecken die teilweise auf deutschem Boden verlaufen 114

Tabelle 22: Einteilung von SNF in Klassen zulässigen Gesamtgewichtes (zGG.)....118

Tabelle 23: Abbildung der Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeitsorientierung der Kaufentscheidungsfindung bei SNF von der Fahrzeuggröße als TCO-Anteil in ASTRA-M (Rest durch Logit-Ast bestimmt) 125

Tabelle 24: Jahresfahrleistung je Gewichts- und Distanzklasse (km/a) 125

Tabelle 25: Anteile der Fahrzeuge je Gewichts- und Distanzklasse.....126

Tabelle 26: Verzerrungen im Kaufverhalten über den TCO-Ast, monetarisiert über TCO-Aufschläge 126

Tabelle 27: Basis-Beta-Parameter der Logit-Funktion für die Antriebswahl von schweren Nutzfahrzeugen (ohne Akzeptanzrückkopplung).....129

Tabelle 28: Entwicklung der Energieeffizienz von SNF nach Antriebsart.....148

Tabelle 29: Parameter für den Bedarf an Ladestationen bei PKW und LNF 150

Tabelle 30: Parameter für die Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei PKW und LNF.....151

Tabelle 31: Parameter für den Bedarf an öffentlichen Ladestationen je zusätzlichem SNF 153

Tabelle 32: Installation von privaten Ladepunkten je neu gekauftem BEV-SNF welcher andere Antriebsart ersetzt.....153

Tabelle 33: Parameter für den Bedarf an Tankstellen bei SNF.....154

Tabelle 34: Parameter für die Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei SNF .154

Tabelle 35: Parameter für die Bedarfsrechnung der EE-Infrastruktur 155

Tabelle 36: Besetzungsgrade der Personenverkehrs-Fahrzeuge nach Modus, Wegezweck und Distanz.....162

Tabelle 37: Entwicklung des Aufkommens, der Verkehrs- und Fahrleistung im Personenverkehr 163

Tabelle 38: Einordnung verschiedener Datenquellen im Verkehr (nicht vollständig) 166

Tabelle 39: Entwicklung der Nachfrage im Güterverkehr.....171

Tabelle 40: Primärenergiefaktoren 183

Tabelle 41: Mengengerüst zur Einordnung des deutschen Beitrages zur Erreichung des EU-Minderungszieles in REF-2020 (exemplarisch) 195

Verzeichnis der Abkürzungen

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
ASTRA	Assessment of Transport Strategies, System-Modell
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung (besonders BImSchV 37, 38)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (jetzt BMUV)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (jetzt BMDV)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (jetzt BMWK)
BVerfG	Bundesverfassungsgericht
CEP	Clean Energy Partnership
CNG	(Druck-)Erdgas, Compressed Natural Gas
CO_2	Kohlendioxid
CO_2eq.	Alle THG-Emissionen umgerechnet auf die Wirkung von CO_2
ct	Eurocent
DeStatis	Statistisches Bundesamt
EEV	Endenergieverbrauch
ESt, EStG	Energiesteuer bzw. Energiesteuergesetz
Fit455	Fit-for-55-Politikvorschlag der EU-Kommission (14 Einzelpolitiken)
GV	Güterverkehr
HB-EFA	Handbuch Emissionsfaktoren
H_2	Wasserstoff
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge mit zulässigem Gesamtgewicht bis 3,5t
LIB	Lithium-Ionen-Batterien

LKW	Lastkraftwagen
LNG	Flüssigerdgas, Liquified Natural Gas
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
MiD	Mobilität in Deutschland, Verkehrsdatenerhebung
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
MoP	Mobilitätspanel, Verkehrsdatenerhebung
Mt	Millionen Tonnen
MwSt.	Mehrwertsteuer
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NFz	Nutzfahrzeug
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
PjB	Projektionsbericht der Bundesregierung 2021
PKW	Personenkraftwagen
PV	Personenverkehr
PtL	Power-to-liquid, strombasierter synthetischer Flüssigkraftstoff
RDE	Real-driving emissions, Emission im Realbetrieb
REF	Referenzszenario
REF-2017	MKS Referenzszenario hinterlegt mit Instrumenten bis 30.6.2017
REF-2020	MKS Referenzszenario hinterlegt mit Instrumenten bis 31.8.2020
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge (zulässiges Gesamtgewicht >3,5t)

SZM	Sattelzugmaschine
TCO	Total-cost-of-ownership, Vollkostenrechnung
THG	Treibhausgas, Treibhausgasemission
TtW	Tank-to-wheel Emissionen, Emissionen während der Fahrt
UBA	Umweltbundesamt
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 2020, und deswegen als REF-2020 bezeichnet, vorgestellt. Der abgedeckte Prognose-Zeithorizont erstreckt sich von 2021 bis 2035.

Die Quantifizierung des Referenzszenarios dient als Basis zur Bewertung der Wirkung von politischen Instrumenten im Verkehr, die zur Erreichung der THG-Minderungsziele für den Verkehr nach Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) herangezogen werden könnten. Damit stellt REF-2020 auch eine Grundlage dar, um die Wirkung von Instrumenten für ein mögliches Klimaschutz-Sofort-Programm (KSSP) für den Zeithorizont 2030 zu bewerten.

Die Rahmenbedingungen von REF-2020 sind mit dem *Projektionsbericht der Bundesregierung 2021* (PjB, BMUV 2021) konsistent. Das unterstellte Instrumentenbündel ist vergleichbar dem PjB und wurde mit demselben Stichtag 31.8.2020 in der Modellierung von REF-2020 berücksichtigt. Mit einer THG-Emission aus dem Verkehr von 123 Mt $CO_{2äq.}$ in 2030 liegt die erreichte Minderung in vergleichbarer Größenordnung wie im *Projektionsbericht 2021*. Damit werden die Ziele aus dem KSG verfehlt und es bleibt in REF-2020 eine Minderungs-Lücke von 38 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 in 2030 ist mit 7,8 Mio. E-PKW (davon 5,2 Mio. rein batterieelektrisch (BEV)) unzureichend. Der elektrische Fahranteil von LKW (>3,5t zGG) beträgt etwa 13% in 2030 und verfehlt somit deutlich die Zielgröße von einem Drittel elektrischer Fahrleistung. Die verkehrlichen Zielgrößen zur Verlagerung 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-2020

	Zielgröße2030	Erreicht 2030
Anzahl BEV in der PKW-Flotte *[in Millionen]*	15	5.2
CO_2-Flottenemissionen der Neuzulassungen in DE	% vs. Basisjahr	
PKW	-37.5%	-43.3%
LNF	-31%	-55.8%
SNF	-30%	-30.3%
Elektrische Fahrleistung LKW *[Anteil in %]*	33%	13.0%
Personenverkehr		
Verdopplung Verkehrsleistung Schiene *[Mrd. pkm]*	200	126
Verdopplung Verkehrsleistung Rad *[Mrd. pkm]*	60	40
Güterverkehr		
Modal-Anteil auf der Schiene	25%	21.9%
Modal-Anteil Binnenschifffahrt		7.3%
THG-Emission Verkehr *[Mt $CO_{2äq.}$]*	**85**	**123**

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

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 wird unterstützt und wissenschaftlich beraten durch ein Konsortium unter Führung des Fraunhofer ISI mit den Partnern M-Five GmbH Mobility, Futures, Innovation, Economics, PTV Group, Technische Universität Hamburg Harburg (TUHH), Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, IVE mbH, Technische Universität Dresden, Trimode und Kanzlei BBG und Partner. Neben der langjährigen wissenschaftlichen Erfahrung in der Mobilitätsforschung und -beratung bringt dieses Konsortium eine Reihe von Methoden und Modellen in die wissenschaftliche Begleitung der MKS ein.

Primäres Ziel der MKS-Methodik ist die Berechnung des Endenergieverbrauches (EEV) im Verkehr in Deutschland von 2010 bis 2035 und die Bewertung von Instrumenten und Instrumentenbündeln zum Klimaschutz im Verkehr. Dabei werden Ergebnisse für die Jahre 2020[2], 2030 und 2035 ausgewiesen. Zum besseren Verständnis der Entwicklungen werden auch Zwischenjahre dargestellt. Aus dem EEV des Verkehrs lassen sich als sekundärer zentraler Indikator der MKS die Treibhausgas (THG)-Emissionen des Verkehrs ermitteln und als CO_2-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 auch eine vollständige Modellierung des Verkehrssystems und der Fahrzeugflotten mit einem strategischen und dynamischen Ansatz.

Ziel dieses Arbeitspapiers ist die Dokumentation der Entwicklung eines auf den Stand 2020 aktualisierten Referenzszenarios (REF-2020). Dieses Referenzszenario baut auf dem bisherigen MKS-Referenzszenario zum Stand 2017 (REF-2017) (Schade et al. 2018) auf und berücksichtigt dabei zusätzlich zwischen Juli 2017 und August 2020 ergriffene Instrumente sowie die technologische und kostenseitige Entwicklung in diesem Zeitraum. REF-2017 diente als Vergleichsfall zur Maßnahmenanalyse für die Entwicklung des Klimaschutzprogramms 2030 (KSPr) in 2019. Das neue Referenzszenario soll als Vergleichsfall für die Entwicklung von Klimaschutzpolitiken im Verkehr zur Erreichung der durch nationale und europäische Zielerhöhungen ambitionierteren Klimaschutzziele für 2030 dienen. Gegenüber REF-2020 werden damit Maßnahmen bzw. Politikprogramme zur Erreichung einer THG-Minderung von -48% in 2030 quantifiziert. Die Aktualisierung des Referenzszenarios wird auch notwendig, weil:

(1) Die in der 14. aktualisierten Bevölkerungsprognose von DeStatis erwartete Einwohnerzahl in 2030 um weitere 1,5 Millionen Menschen höher liegt als in der zuletzt genutzten 13. Prognose.

[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. D.h. die Werte aus 2020 sind keine amtlichen Statistiken sondern Modellergebnisse. Kapitel 10.3 und 16.3 erläutern den Kontext der amtlichen Statistik.

(2) Das Bruttoinlandsprodukt durch die Corona-Pandemie kurzfristig einen Einbruch erlitten hat und vermutlich auch langfristige ökonomische und verkehrliche Effekte verbleiben werden. Beispielsweise führen eine erhöhte Homeoffice-Nutzung und virtuelle Meetings statt Dienstreisen zu einer Verringerung der Nachfrage im Personenverkehr.

(3) Die technischen und Preis-Parameter z.B. im Bereich der elektrischen Straßenfahrzeuge sich deutlich verändert haben. Z.B. sinken Batteriepreise schneller als ursprünglich unterstellt und die Automobilhersteller haben ihre Produktionsstrukturen und -planung deutlich angepasst, wodurch schneller fallende Fahrzeugpreise realisiert werden.

Erläuterungen zur Methodik der Modelle ASTRA und VALIDATE sind im Arbeitspapier aus 2016 beschrieben (Schade et al. 2016). Seither erweiterte Modellelemente und Funktionalitäten sind in diesem Arbeitspapier vertieft dargestellt.

Das vorliegende Arbeitspapier ist inhaltlich in 12 Teile gegliedert. Im ersten Teil (Kapitel 3) wird das Konzept für die Erstellung des neuen Referenzszenarios erklärt. Im Kapitel 4 wird die Entwicklung wichtiger Rahmenbedingungen vorgestellt. Kapitel 5 listet die in REF-2020 bereits berücksichtigten Instrumente auf. Die Kapitel 6, 6.4, und 7 beschreiben die Fahrzeugflotten für PKW, leichte Nutzfahrzeuge (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Der Aufbau der notwendigen Energieinfrastruktur wird in Kapitel 9 beschrieben. Anschließend wird im Kapitel 10 die Entwicklung des Personenverkehrs dargestellt. Das Kapitel 11 widmet sich dem Güterverkehr. Die Kapitel 13 und 14 stellen den EEV bzw. die THG-Emissionen des Verkehrs dar. Das letzte Kapitel zieht ein vorläufiges Fazit. Das Arbeitspapier wird durch einen Anhang und die Auflistung der verwendeten Referenzen abgeschlossen.

3 Konzept des neuen Referenzszenarios

Vier Ziele sollen mit der Neugestaltung des Referenzszenarios der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (REF-2020) erreicht werden:

- Erstellung einer soliden und detaillierten Basis für die Berechnung und Bewertung weiterer Instrumente für zukünftig ambitioniertere Klimaschutzprogramme (KSPr+) inkl. der Bereitstellung von verlässlichen Vergleichswerten.
- Aktualisierung des Basisjahres des Referenzszenarios auf den IST-Stand 2019. REF-2017 basierte auf den historischen Werten von und verfügbar bis 2015.
- Verlängerung der Modellierung und Quantifizierung bis 2035.
- Gestaltung als Aktuelles-Maßnahmen-Szenario (AMS), d.h. Maßnahmen bzw. Instrumente, die bis Ende August 2020 beschlossen und damit wirksam sind, sollen im Referenzszenario enthalten sein. Weitere noch nicht von der Bundesregierung zu diesem Zeitpunkt beschlossene und in der Umsetzung befindliche Vorhaben hingegen nicht. Damit sind z.B. die Vorschläge der EU im Fit-for-55 Paket nicht Bestandteil des REF-2020.

- Die Entwicklung bis 2035 soll als plausibles Trendszenario gestaltet werden, d.h. die Quantifizierung soll in sich konsistent und nicht nur ein fiktives Rechenszenario sein. Enthalten sind die aktuellen Entwicklungen, wie z.B. die Senkung der Fahrzeugpreise von E-Fahrzeugen durch technische Verbesserungen (durch z.B. die Senkung der Batteriekosten), aber keine spezifischen Maßnahmen oder Instrumente zur Verbesserung der Kosten bzw. der Wettbewerbsposition nach August 2020. Das Referenzszenario ist als ein virtuelles Szenario zu sehen, welches in dieser Form nicht eintreten wird, da zwischen 2020 und 2030 weitere Maßnahmen ergriffen werden werden.

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

3.1 Stichtag für Instrumente im MKS-Referenzszenario (REF-2020)

Grundsätzlich sollen Instrumente im Referenzszenario enthalten sein, die bis **Ende August 2020** soweit **bindend beschlossen** sind, dass sie im Szenario-Horizont bis 2035 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 kann in Abstimmung mit dem BMDV die Umsetzung eines Instrumentes auch ausgesetzt werden, 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. 10% Biokraftstoffquote bis 2020). Ein weiterer Ausnahmenfall von der Stichtagsregelung betrifft Instrumente, welche absehbar reformiert werden, die Reform aber noch nicht abgeschlossen ist und es für die Konsistenz von REF-2020 problematischer wäre, das Instrument nicht angepasst zu hinterlegen als es bereits sinngemäß zu reformieren (z.B. die weitere Anpassung der EEG-Umlage nach 2021).

3.2 Konzept der MKS Szenario-Architektur

Die Einordnung der bisher in der MKS erarbeiteten Szenarien und Politik-Bündel 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 dem Abschneidezeitpunkt 06/2017 des REF-2017 und 08/2020 des REF-2020 verändern drei Treiber die THG-Entwicklung in REF-2020:

- **Neue Daten,** die für die Jahre 2017 bis 2019/2020 verfügbar sind und zur Parametrisierung (z.B. Technologiekosten Batterien) oder zur Kalibrierung (z.B. Verkehrsleistung im Personen- oder Güterverkehr) dienen.
- **Corona-Schock** mit kurzfristigen Effekten der Corona-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021. Potenzielle langfristige Wirkungen durch verstetigte Verhaltens- oder Systemänderungen der Pandemie sind nicht in REF-2020 berücksichtigt worden.
- **Neue Instrumente, beschlossen** zwischen 06/2017 und 08/2020. Beispielsweise sind durch das Klimaschutzprogramm (KSPr-2019) in 12/2019 oder die verschiedenen pandemie-bedingten Konjunkturprogramme (z.B. 06/2020) eine Vielzahl von Instrumenten beschlossen worden, deren Wirkungen jetzt in REF-2020 sichtbar werden (z.B. Innovationsprämie E-PKW). Auch auf der EU-Ebene wurden Instrumente beschlossen (z.B. CO_2-Standards PKW mit -37,5% Ziel in 2030). Aber bis 08/2020 wurden noch nicht alle Instrumente des KSPr aus 09/2019 beschlossen und umgesetzt. Als eines der wichtigsten fehlenden Instrumente ist die CO_2-differenzierte LKW-Maut zu nennen, für die zunächst die Novelle der Euro-Vignetten Richtlinie (EU RL 1999/62/EG) auf EU-Ebene zu erfolgen hat, bevor die nationale Umsetzung nach KSPr erfolgen kann.

3.3 Infrastruktur der Verkehrsnetze

Grundlage einer Verkehrsprognose sind auch Überlegungen zur Entwicklung des Verkehrsangebots bzw. der Verkehrsinfrastruktur. Das Verkehrsangebot beeinflusst prinzipiell die Verkehrsnachfrage in allen individuellen Entscheidungen. So führt z.B. ein Ausbau der Straßeninfrastruktur häufig zu einer Zunahme der Straßen-Verkehrsleistung durch modale Verlagerungen, längere Wege und veränderte Routenwahl. Aufgrund des hohen Niveaus der 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 auch realisiert werden können, ist es nicht möglich und nicht sinnvoll, für REF-2020 eine Auswahl zu treffen.

Für den Bereich Schieneninfrastruktur ergibt sich eine deutlich differenziertere Struktur der Annahmen:

- 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 in 2019 erreicht. Diese Verkehrsleistung kann dann aber nicht mehr mit 100%-iger Engpassfreiheit erreicht werden.

- Hingegen wird von einer vollständigen Umsetzung aller notwendige Erhaltungsmaßnahmen im Sinne einer conditio sine qua non ausgegangen. Da die Erhaltungs- und Ersatzinvestitionen planmäßig 70% aller Investitionsmittel für den Schienensektor ausmachen, ist dies die zentrale Annahme für das MKS REF-2020.

- 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 des Stichtages 31.8.2020 für REF-2020, den bis dahin veröffentlichten strategischen Planungen des BMDV zum Deutschlandtakt gekoppelt mit den Finanzierungszusagen (z.B. LUFV-III) und aufbauend auf den drei vorherigen Annahmen wird davon ausgegangen, dass zentrale Projekte des Deutschlandtakts, die über die Projekte des Vordringlichen Bedarfs hinausgehen, bis 2030 realisiert werden können, so dass etwa 50% der maximalen Vorteile im Bereich Reisezeitverbesserungen und Zuverlässigkeit bereits realisiert werden können. Dabei ist zu beachten, dass diese Verbesserungen nicht gegenüber der heutigen, nicht zufriedenstellenden Situation berechnet werden dürfen, sondern ggü. dem Bezugsfall des BVWP 2030.

- 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 Kapazitätszuwächse 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.

- 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, Elektrifizierungsinseln im Personenverkehr von bis zu 40 km zu überbrücken. Insgesamt könnten so ca. 50% der CO_2-Emissionen durch die bisherige Dieseltraktion entfallen.

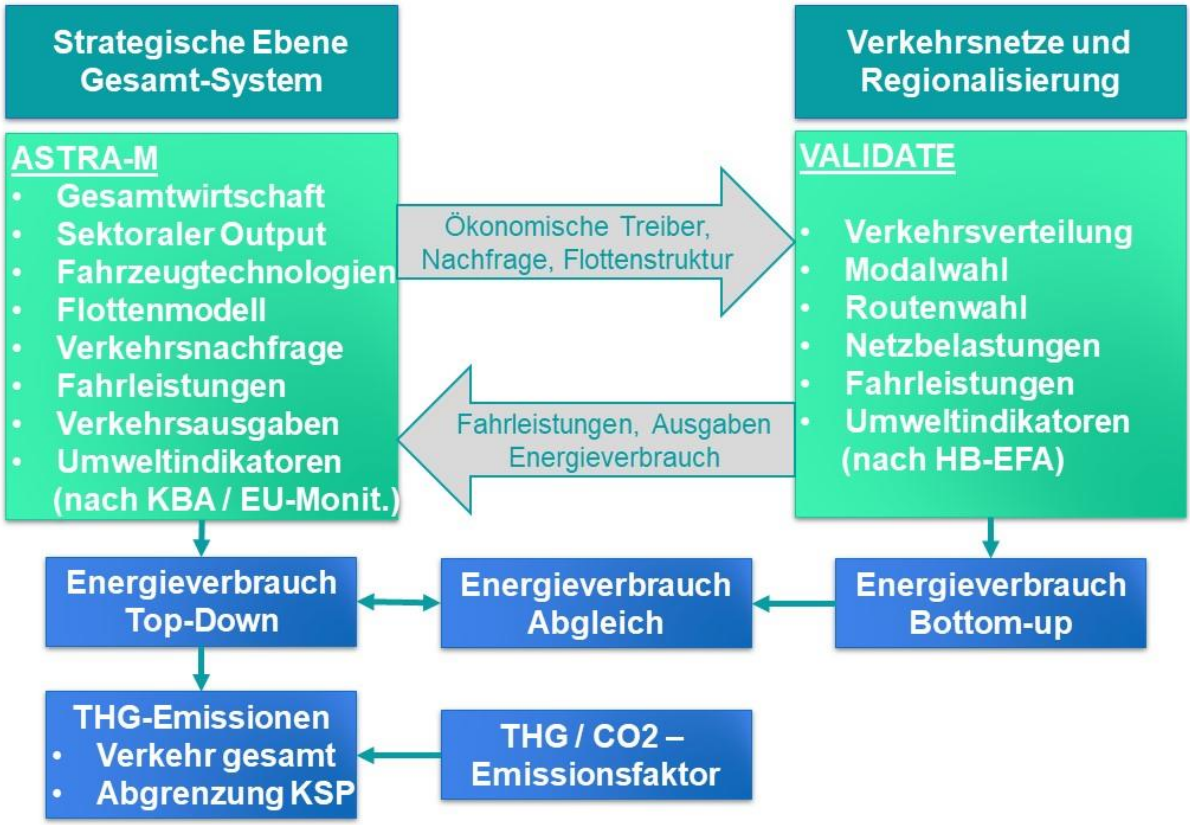
- Mögliche Kapazitäten der Schieneninfrastruktur werden am ineffizientesten genutzt, wenn sich verschiedene Zuggattungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungsverhalten einen Streckenabschnitt teilen. Dies ist in Deutschland aber sehr häufig mit paralleler Nutzung durch langsame 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). Es wird von einem deutlichen Ausbau der Terminals vor dem Hintergrund einer 50%-igen Kranbarkeit der Sattelauflieger ausgegangen. Dabei ist einschränkend festzuhalten, dass in anderen Ländern der EU andere Umschlagsmöglichkeiten für Sattelauflieger eingesetzt werden. Bis 2024 wird 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.

3.4 Überblick Modellsystem ASTRA-VALIDATE

Die folgende Abbildung 1 stellt den integrierten Ansatz der Nutzung der beiden 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, während ASTRA alle territorialen Verkehre abbildet und durch weitgehend exogene Inputs für den internationalen See- und Luftverkehr ergänzt. ASTRA wird aber genutzt werden, 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 Modellvariante entwickelt, die zur Verdeutlichung als ASTRA-M bezeichnet wird.



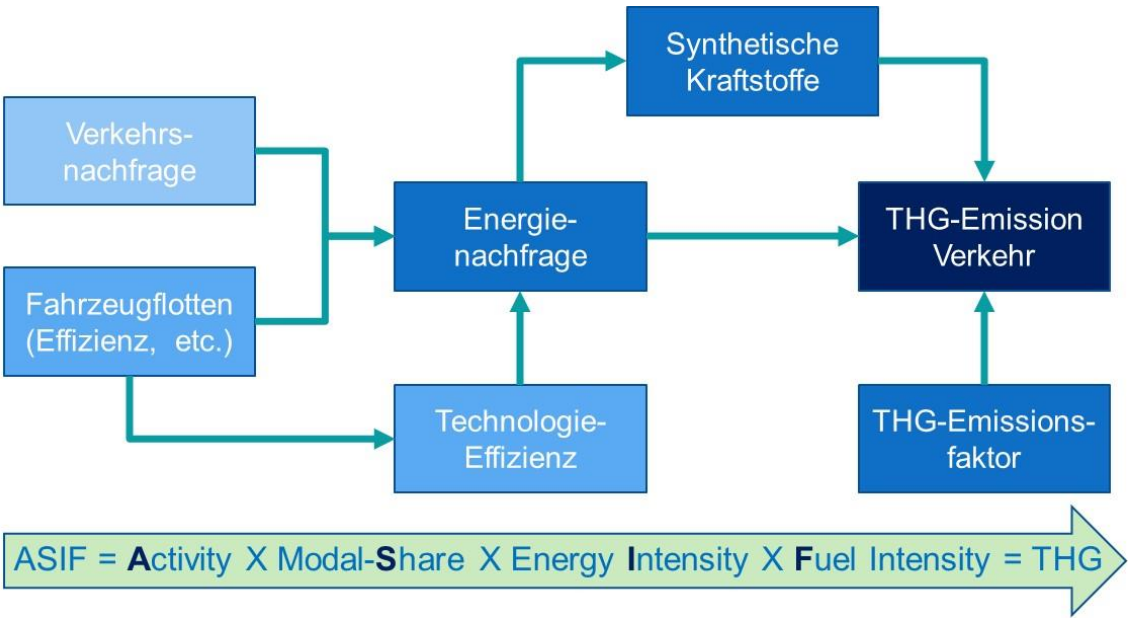
Quelle: MKS-Konsortium.

Abbildung 1 Integrierte Anwendung der Modelle ASTRA und VALIDATE in der MKS

Der Fokus der Arbeiten für REF-2020 lag auf Verbesserungen und Erweiterungen in ASTRA-M.

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, wobei das Akronym sich aus dem englischen ableitet (siehe Abbildung 2), aber deutsche Pendants aufweist: mit A für Verkehr-Aktivität, S für Modal-Split, I für Energie-Intensität und F für CO_2-EFfizienz. Dabei werden die Verkehrsnachfrage, die modale Verteilung, technische Eigenschaften der Fahrzeuge und chemische Eigenschaften der Kraftstoffe berücksichtigt. Die verschieden komplexen Ansätze unterscheiden sich meist dadurch (1), wie viele Einflussparameter berücksichtigt werden und (2) ob eine lineare Modellierung (in Abbildung 2 von links nach rechts) oder eine komplexe Modellierung mit Berücksichtigung der verschiedensten Rückkopplungen – teils sogar sektorübergreifend zwischen Verkehr, Energie und Ökonomie – erfolgt.



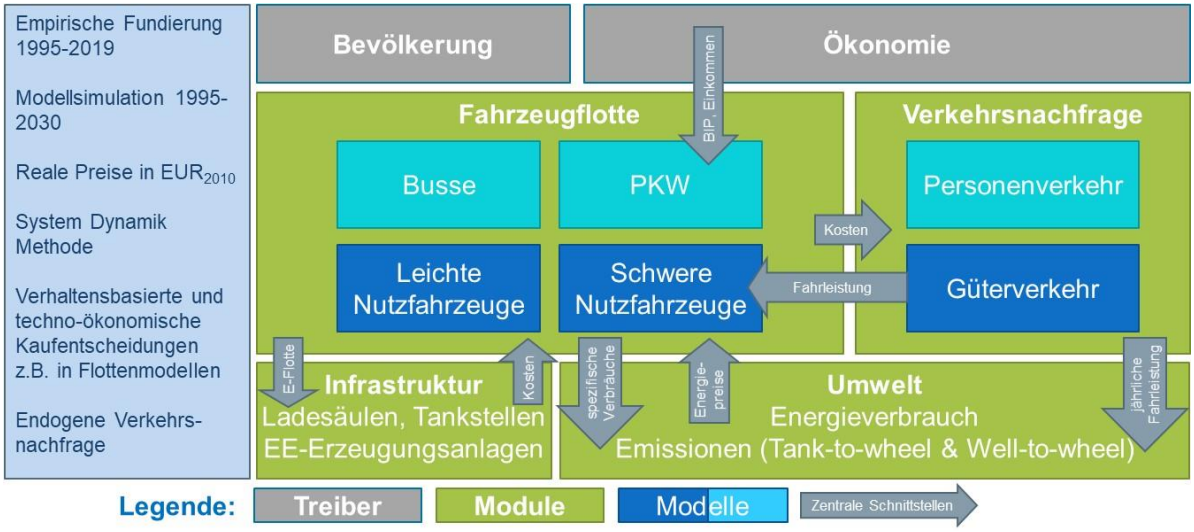
Quelle: M-Five.

Abbildung 2 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 3). Das Modell simuliert den historischen Zeitraum von 1995 bis 2019, um die Parameter der Funktionsgleichungen empirisch zu kalibrieren und die Güte der Modellierung im Gesamt-System zu testen.[3] Durch die Betrachtung der Gesamt-Systems 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 2021 beginnt das Modell die Zukunft zu simulieren und quantifiziert diese in Form von Szenarien bis 2035. Dabei werden verschiedene mathematische Modelle genutzt, um Wahlentscheidungen der Verkehrsnutzer und Fahrzeugkäufer zu simulieren. Insbesondere werden Discrete-Choice Ansätze (Logit-Modelle) genutzt, wenn unterschiedliche Präferenzen und nicht-monetäre Faktoren zu berücksichtigen sind, und Vollkostenrechnungen (Total-Cost of Ownership, TCO), wenn Entscheider rein rational als Homo Oeconomicus agieren.

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



Quelle: M-Five.

Abbildung 3 Überblick über Module und Modelle von ASTRA-M

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

4 Aktualisierung der Rahmenbedingungen

In Abstimmung mit dem BMDV wurden die folgenden drei zentralen Rahmenbedingungen aufgrund neuer Prognosen bzw. der historischen Entwicklung von 2010 bis 2020 angepasst:

- Bevölkerung
- Bruttoinlandsprodukt (BIP)
- Kraftstoffpreise und Steuern.

Dabei wurde soweit möglich auf ressortabgestimmte Annahmen aus Szenarien aus dem Bereich der Energie- und Klimapolitik zurückgegriffen.

4.1 Bevölkerung in Deutschland

Das Bevölkerungsmodell wurde gegenüber der Version des letzten Referenzszenarios umfangreich erneuert. Zusammen mit den neuen Prognosen von Destatis (siehe unten) ergeben sich die folgenden Veränderungen in den Ergebnissen: Die Bevölkerung ist durch etwas höhere Geburtenraten und stärkere Zuwanderung um etwa eine Million gestiegen (sowohl 2020 als auch 2030). Die jüngeren Bevölkerungsschichten sind größer geworden, vor allem durch angepasste Geburten- und Sterberaten sowie veränderte Schlüssel für die Aufteilung der Netto-Migration. Dagegen ist der Anteil von Menschen über 65 Jahren an der Gesamtbevölkerung niedriger als in der alten Modellversion, aber natürlich weiterhin über die Zeit steigend. Diese Veränderungen (insbesondere die größere Bevölkerung) führen zu einer höheren Verkehrsnachfrage, da diese direkt von der Größe der Bevölkerung abhängt.

Tabelle 2: Entwicklung der Bevölkerung in REF-2020

Merkmal		2020	2030	2035	Veränderung 2020 bis 2035	
	Einheit				% abs.	in % p.a.
Gesamtbevölkerung	Tsd.	83.290	82.810	82.160	-1,36%	-0,09%
Erwerbspersonen	Tsd.	42.650	41.010	40.210	-5,72%	-0,39%
Aktivitätsrate	Anteil	78,51%	79,93%	80,06%	1,97%	0,13%
0 bis 19 Jahre	Tsd.	16.440	16.440	16.290	-0,91%	-0,06%
20 bis 39 Jahre	Tsd.	20.500	19.440	18.920	-7,71%	-0,53%
40 bis 64 Jahre	Tsd.	29.590	27.640	26.680	-9,83%	-0,69%
65 bis 79 Jahre	Tsd.	12.060	14.070	14.650	21,48%	1,31%
80 Jahre und älter	Tsd.	4.702	5.216	5.624	19,61%	1,20%

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Für die zukünftige Entwicklung haben wir die zentralen Parameter einer moderaten Variante der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung (G2-L2-W2) des Statistischen Bundesamtes implementiert. Die stabil bleibende Geburtenrate von 1,55 Geburten je Frau und die mittleren Wanderungssalden, die von 341.000 in 2018 bis 2026 stetig abnehmen und ab dann pro Jahr konstant bei 206.000 liegen, wurden als Nettomigration direkt in die Modellierung übernommen, während die steigende Lebenserwartung weiterhin annäherungsweise modelliert wird. Ausgehend von einer Bevölkerung von 82,9 Mio. im Jahr 2018 prognostiziert das Statistische Bundesamt in diesem Szenario ein leichtes Wachstum auf 83,34 Mio. bis 2030 und einen Rückgang auf 80,2 Mio. bis 2050. Gegenüber früheren Versionen des Referenzszenarios bedeutet dies eine höhere Ausgangsbevölkerung 2018 sowie höhere prognostizierte Bevölkerungsniveaus in der Zukunft.

Tabelle 3: Zuwanderung in der 13. und 14. Vorausberechnung (14-BV)

Variante	Einheit	2016	2017	2018	2019	2020	2021-2060
Variante 2 - W2 (2018) (14-BV)	Pers.	386.000	363.500	341.000	318.500	296.000	273.500
Variante 2a (2015) (13-aBV)	Pers.	750.000	500.000	400.000	300.000	250.000	200.000
Variante 2 (2013)	Pers.	450.000	400.000	350.000	300.000	250.000	200.000

Quelle: DeStatis 2017, 2019.

Tabelle 4: Bevölkerung gemäß 14. koordinierter Vorausberechnung von Destatis (14-BV G2-L2-W2)

Merkmal		2018	2019	2020	2030	2050	2018 bis 2030	
	Einheit						% abs.	in % p.a.
Gesamtbevölkerung	Tsd.	82.902		83.365	83.341	80.200	2,9%	0,1%
Erwerbspersonen	Tsd.		43.570		40.147-42.648*			
0 bis 19 Jahre	Tsd.	15.254		15.298	15.704	14.086	3,0%	0,24%
20 bis 64 Jahre	Tsd.	49.849		49.776	46.001	42.990	-7,7%	-0,67%
65 und älter	Tsd.	17.799		18.291	21.635	23.123	21,6%	1,64%

Quelle: DeStatis 2019.
**: je nach Annahmen zu Erwerbsquoten bei W2-Migration*

In der Modellstruktur wurden einige Parameter überarbeitet, die in früheren Versionen vor allem Annahmen-basiert oder Ergebnisse von Kalibrierungen waren und jetzt differenziert wurden und auf Datenauswertungen basieren. Insbesondere:

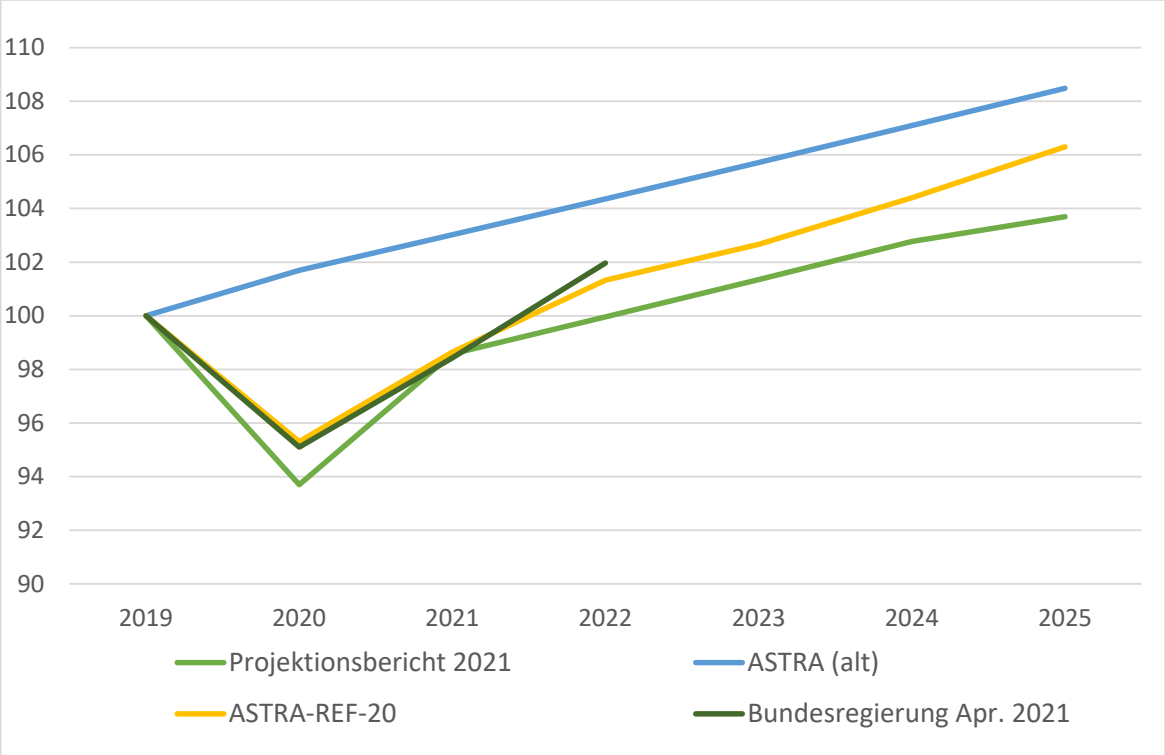
- Korrektur der Aufteilung der zukünftigen Migration auf NUTS-2-Zonen basierend auf bisher implementierten Daten der Migration pro NUTS-2-Zone. Hier werden jetzt auch negative Wanderungsraten in Zonen mit abnehmender Bevölkerung berücksichtigt.
- Korrektur der Sterberaten, die vor allem für junge Menschen deutlich zu hoch waren. Diese Änderung trägt zu dem Anstieg der Zahl und des Anteils jüngerer Menschen bei (insbesondere unter 30 Jahren). Sterberaten wurden auch über die Zeit variiert, um sie an die Unterschiede in den Sterbefällen zwischen den späten 1990er Jahren und seit 2000 anzupassen.
- Die Aufteilung der Migration nach Alter wurde differenziert auf Basis von Destatis-Daten. Als Ergebnis gibt es jetzt mehr Netto-Einwanderung junger Menschen, die auch über mehr Altersklassen verteilt ist. Bei älteren Menschen (etwa ab 57 bis 60 Jahren) kommt es zu einer leichten Netto-Abwanderung. Auch diese Anpassungen tragen zu einem höheren Anteil junger Menschen gegenüber der letzten Modellversion bei.

Die größere Bevölkerung und jüngere Bevölkerungsstruktur führen zu einer höheren Verkehrsnachfrage in allen Modi verglichen mit früheren Modellversionen und dem vorherigen Referenzszenario. In der Regel sind diese im Modell schon 2020 und auch dauerhaft etwa 2-3 Prozent höher, wobei die Schienenverkehrsnachfrage etwas weniger stark gestiegen ist als die bei PKW und Bussen. Das Bruttoinlandsprodukt ist von den Veränderungen dagegen unbeeinflusst, da es für das aktuelle Referenzszenario exogen eingestellt wurde.

4.2 Bruttoinlandsprodukt (BIP)

Für das neue Referenzszenario wurde das BIP exogen festgelegt, um die Auswirkungen der Pandemie und der dadurch ausgelösten Rezession möglichst genau abzubilden. 2020

ist das BIP um fast 5 Prozent eingebrochen. Für 2021 wurde zur Zeit der Modellierung eine deutliche Erholung von 3,5 Prozent prognostiziert, für 2022 ein Plus von 3,6 Prozent. Die weitere Entwicklung ist 2021 noch sehr ungewiss: Einerseits dauern die Pandemie und die internationalen Einschränkungen länger an als erwartet und Versorgungsengpässe, logistische Schwierigkeiten und Preissteigerungen setzen der Wirtschaft zu. Andererseits reagiert die Wirtschaft nicht mehr so stark wie auf den ersten Lockdown 2020 und zusätzliche Investitionen in Zukunftstechnologien wurden mobilisiert. Im Ergebnis ist der neue BIP-Trend (gelbe Linie in Abbildung 4) deutlich niedriger als die alte ASTRA-Modellierung (blau), aber nicht so niedrig wie die früheren Prognosen des Projektionsberichts (hellgrün) – da in diesem ein stärkere Einbruch und eine etwas schwächere Erholung prognostiziert wurde.



Quelle: eigene Zusammenstellung, ASTRA-2020.

Abbildung 4 Entwicklung des Bruttoinlandprodukts, 2019 = 100

Für die Zeit nach der unmittelbaren Erholung wurden Wachstumsraten zwischen 1,3 und 2,0 Prozent angenommen. Dieses Wachstum ist etwas höher als zuvor angenommen: Orientiert an einem Referenzszenario von Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2017) wurden Wachstumsraten von durchschnittlich 1,3 Prozent zwischen 2015 und 2030 modelliert. Im neuen Referenzszenario erreicht das BIP in 2030 wieder etwa dasselbe Niveau wie in REF-2017 und wächst danach etwas langsamer weiter. Die sich ergebende ökonomische Entwicklung in ASTRA ist in Tabelle 5 dargestellt.

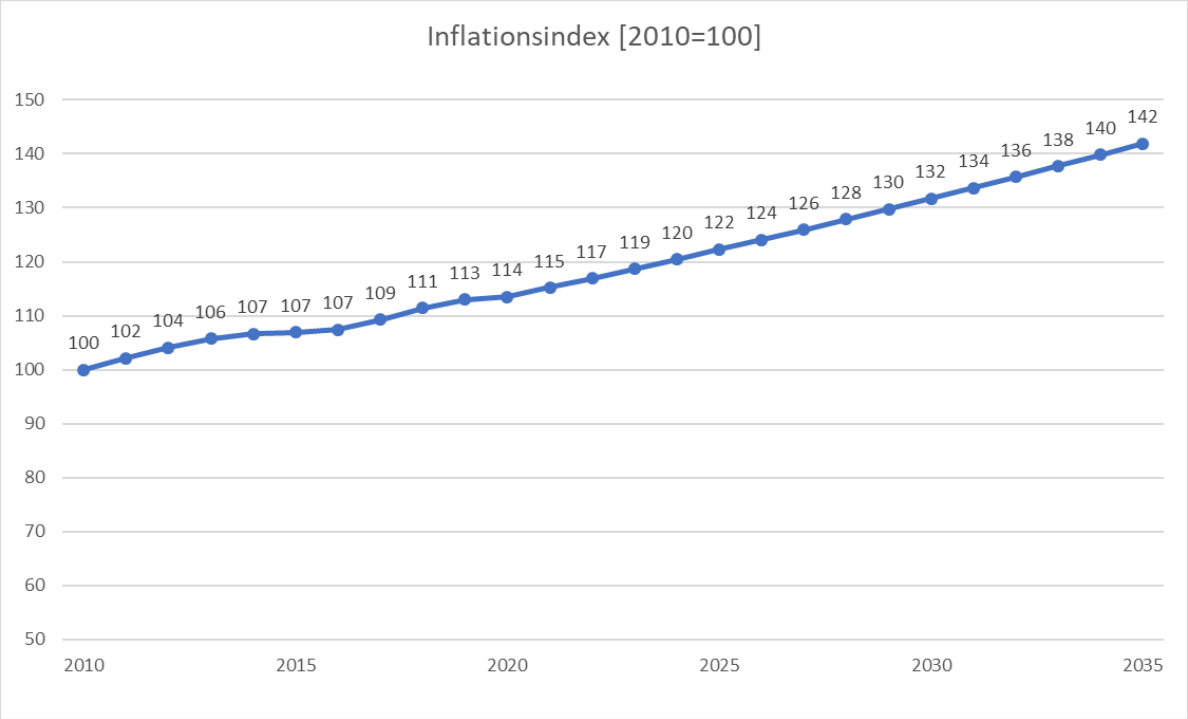
Tabelle 5: Ökonomische Kennziffern in REF-2020

Merkmal		Jahr				Änderung 2020 bis 2035	
	Einheit	2020	2025	2030	2035	% abs.	in % p.a.
BIP	Mrd. $€_{2010}$	2.850	3.179	3.410	3.531	23,88%	1,35%
Bruttoproduktionswert	Mrd. $€_{2010}$	6.169	6.803	7.250	7.669	24,32%	1,37%
Sektorale Bruttowertschöpfung							
Landwirtschaft	Mrd. $€_{2010}$	13,5	14,9	16,2	16,2	20,00%	1,15%
Verarbeitendes Gewerbe	Mrd. $€_{2010}$	1.000	1.112	1.203	1.287	28,75%	1,59%
Versorgungsindustrie, Bergbau	Mrd. $€_{2010}$	28	31	33	33	16,85%	0,98%
Bausektor	Mrd. $€_{2010}$	163	152	164	175	6,88%	0,42%
Marktbestimmte Dienstleistungen	Mrd. $€_{2010}$	1.063	1.168	1.292	1.394	31,13%	1,71%
Nicht marktbestimmte Dienstleistungen	Mrd. $€_{2010}$	824	875	927	968	17,58%	1,02%

Quelle: eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

4.3 Inflationsindex

Da sämtliche monetären Werte in ASTRA preisbereinigt (real) mit Basis 2010 angegeben werden, besteht keine Notwendigkeit der Inflationsratenprognose, sofern sich diese innerhalb des Zielkorridors der EZB befindet. Davon wird im aktuellen Szenario ausgegangen. Zur Verdeutlichung der Unterschiede von realen und nominalen Preisen (z.B. Energiepreise und Steuersätze) in 2030 und 2035 werden bei Bedarf auch nominale Werte angegeben. Diese wurden dann von 2020 bis 2030 mit einer jährlichen Inflationsrate von 1,5 % berechnet. Die folgende Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Inflationsindex mit Basis 2010 = 100.



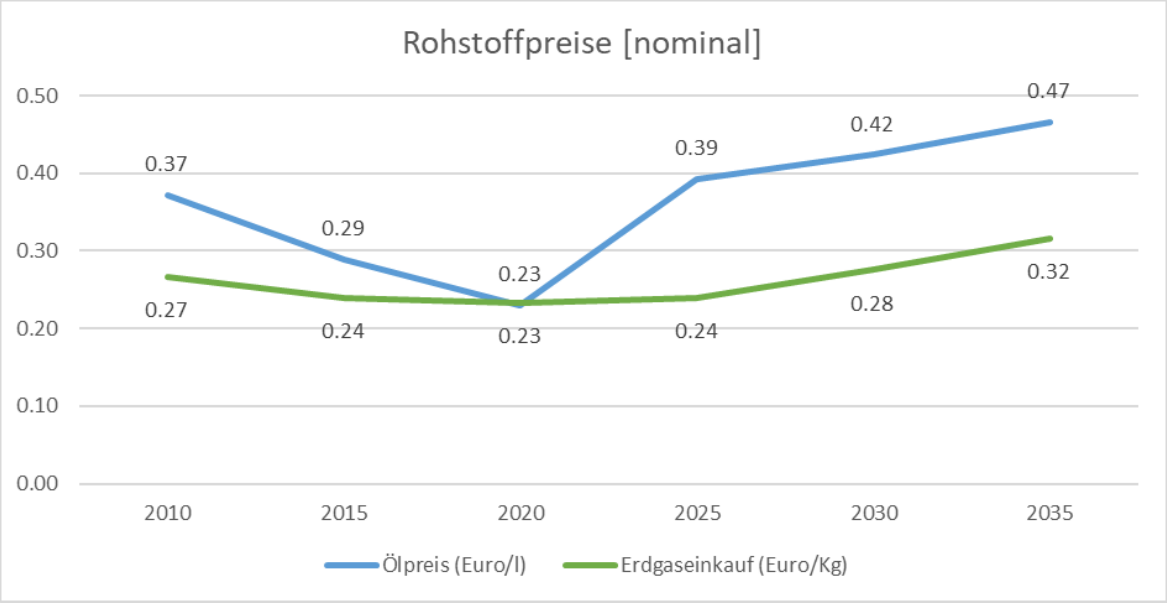
Quelle: M-Five, Destatis, ASTRA-2020.

Abbildung 5 Entwicklung des Inflationsindex mit Basis 2010 bis 2035

4.4 Kraftstoffpreise

4.4.1 Flüssige Kraftstoffe

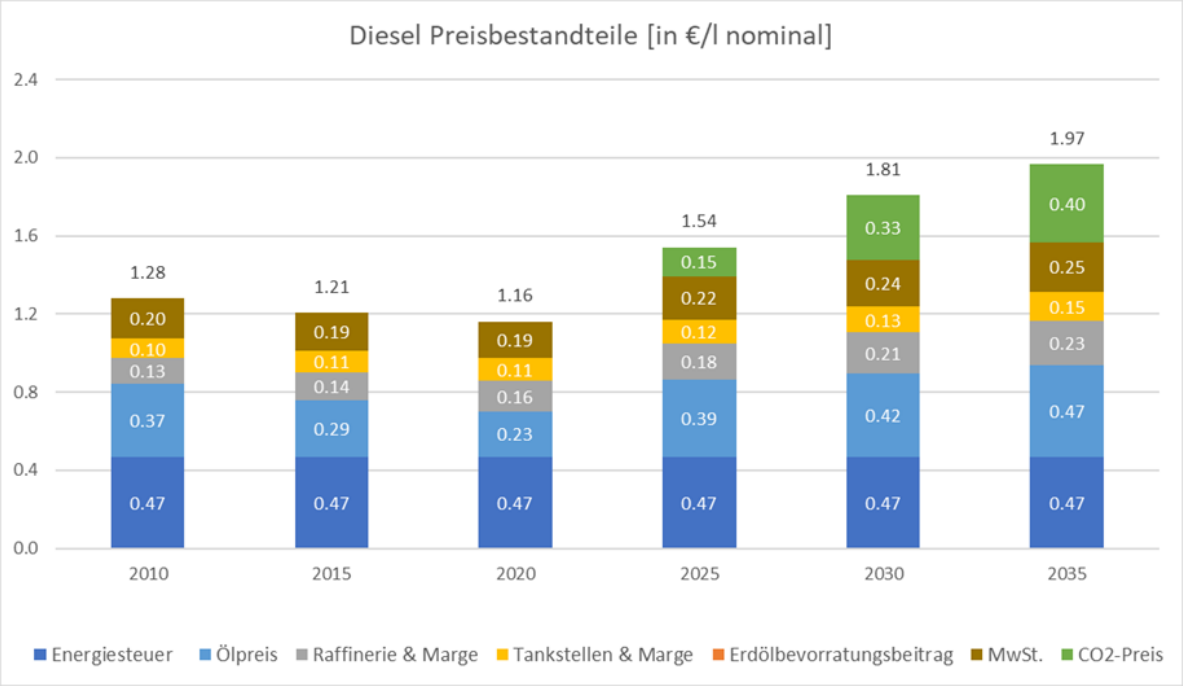
Die Preisentwicklung von Rohöl sowie von Erdgas im Zeitraum von 2010 bis 2035 zeigt Abbildung 6. Beide Rohstoffe verzeichnen einen zukünftigen Preisanstieg, insbesondere Rohöl aufgrund zunehmender Nachfrage, welche jedoch Mitte der 2020er aufgrund steigender Nachfrage nach Elektromobilität abflachen wird. Für das Jahr 2035 erreicht der Rohölpreis 0,47 €/l, der Erdgaspreis 0,32 €/kg.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen basierend auf Wirtschaftsverband Fuels und Energie, BMUV (2021), IEA (2020).

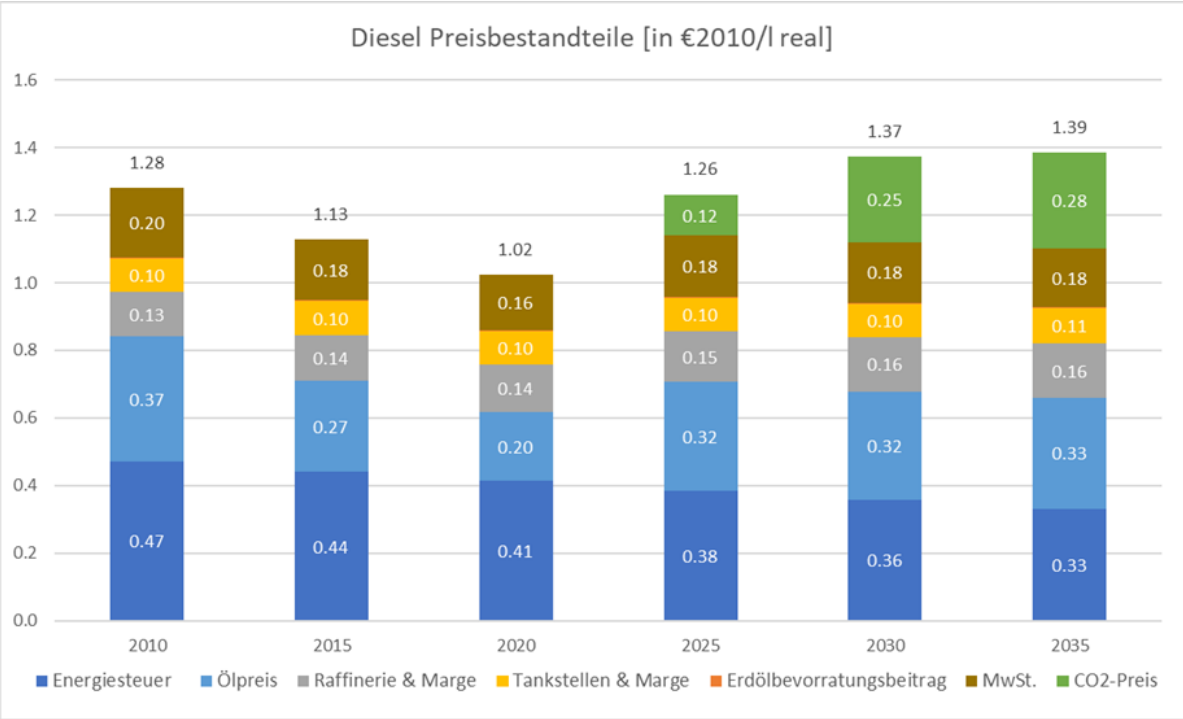
Abbildung 6 Entwicklung der Rohstoffpreise Rohöl und Erdgas nominal bis 2035

Heute dominieren noch Diesel und Benzin als Kraftstoffe im Verkehr. Die Preise der beiden Kraftstoffe hängen dabei von (1) der Energiesteuer, (2) dem Rohölpreis, (3) der Raffinerie und Marge, (4) den Infrastrukturkosten der Tankstelle, (5) dem Erdölbevorratungsbeitrag und (6) dem Mehrwertsteuersatz ab, wobei der Erdölbevorratungsbeitrag hier aufgrund seiner geringen Größe vernachlässigbar ist. Ab dem Jahr 2021 wird der Preis durch (7) den CO_2-Preisbestandteil ergänzt und somit erhöht. Die einzelnen Preisbestandteile für Diesel und Benzin sowie deren Entwicklung im Zeitverlauf sind in den nachfolgenden Abbildungen, Abbildung 7, Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10, dargestellt. Dabei werden sowohl nominale als auch reale Preise ausgewiesen.



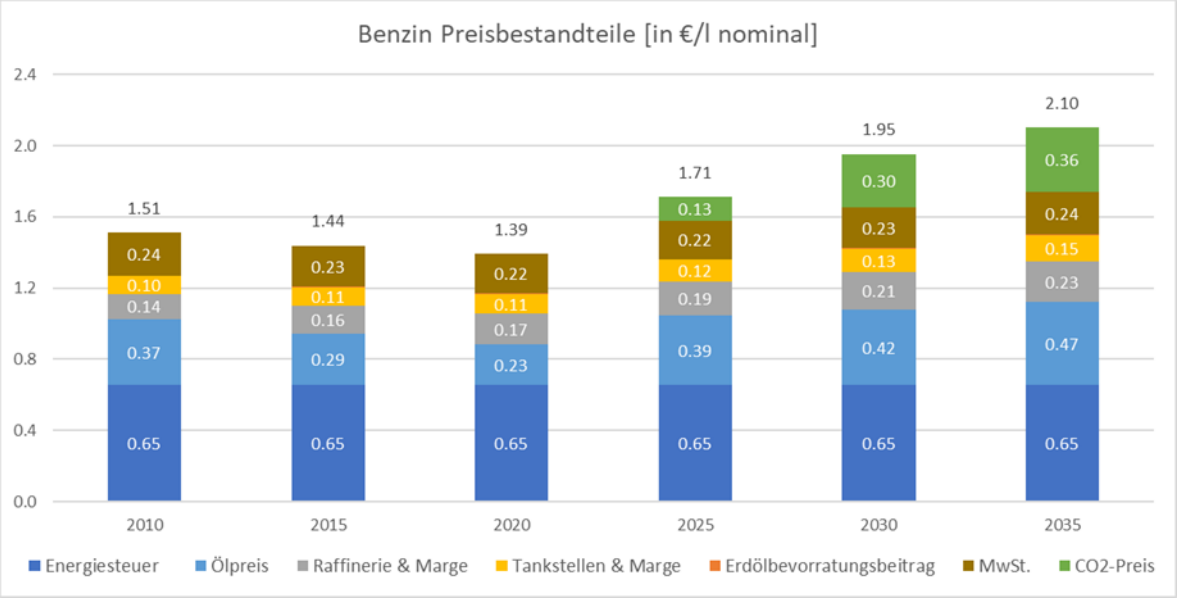
Quelle: M-Five, eigene Berechnung.

Abbildung 7 Entwicklung der Diesel Preisbestandteile (nominal) bis 2035



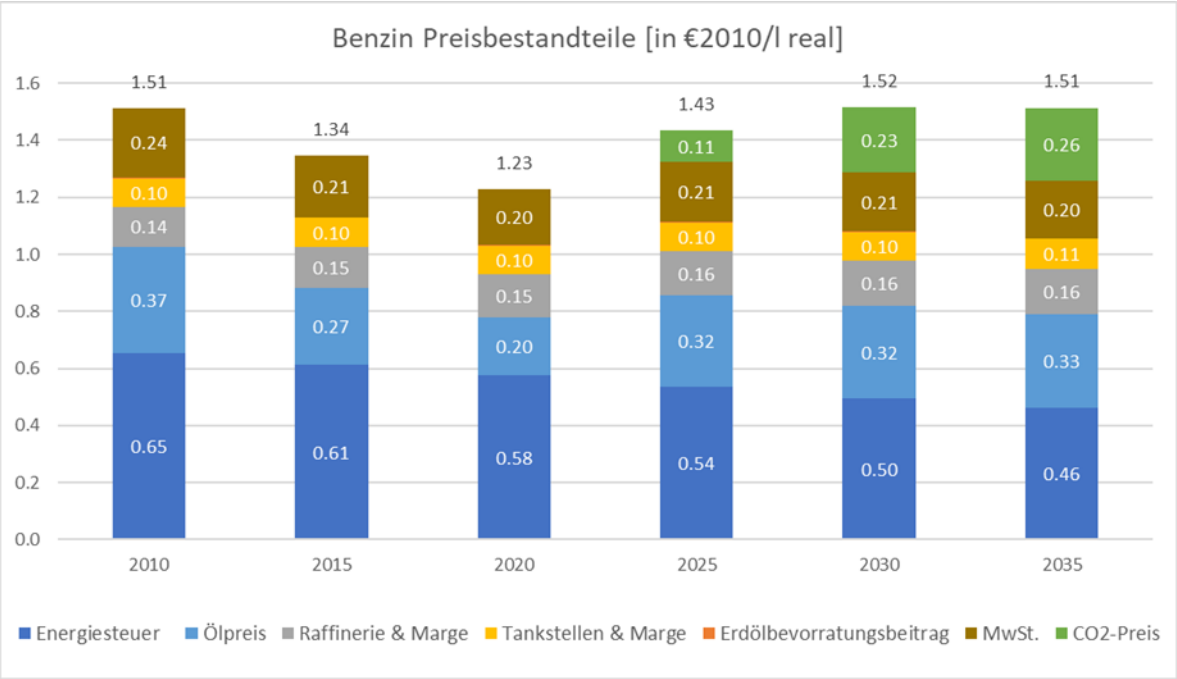
Quelle: M-Five, eigene Berechnung.

Abbildung 8 Entwicklung der Diesel Preisbestandteile (real) bis 2035



Quelle: M-Five, eigene Berechnung.

Abbildung 9 Entwicklung der Benzin Preisbestandteile (nominal) bis 2035

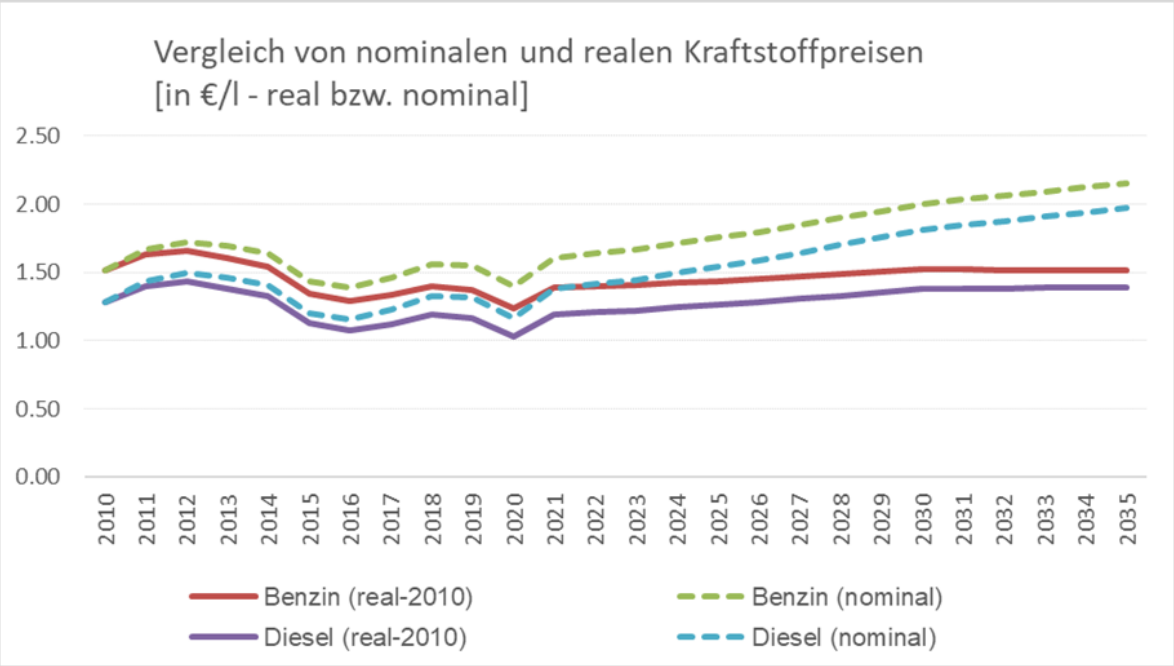


Quelle: M-Five, eigene Berechnung.

Abbildung 10 Entwicklung der Benzin Preisbestandteile (real) bis 2035

Der größte Preisbestandteil bildet die Energiesteuer, gefolgt vom Rohölpreis. Dieser basiert auf historischen Preisen des Wirtschaftsverband *Fuels und Energie* sowie auf dem Projektionsbericht der Bundesregierung (BMUV 2021) und eigenen Abschätzungen. Der bis 2030 kontinuierlich auf 125 €/t ansteigende CO_2-Preis bildet im Jahr 2030 den drittgrößten Preisbestandteil.

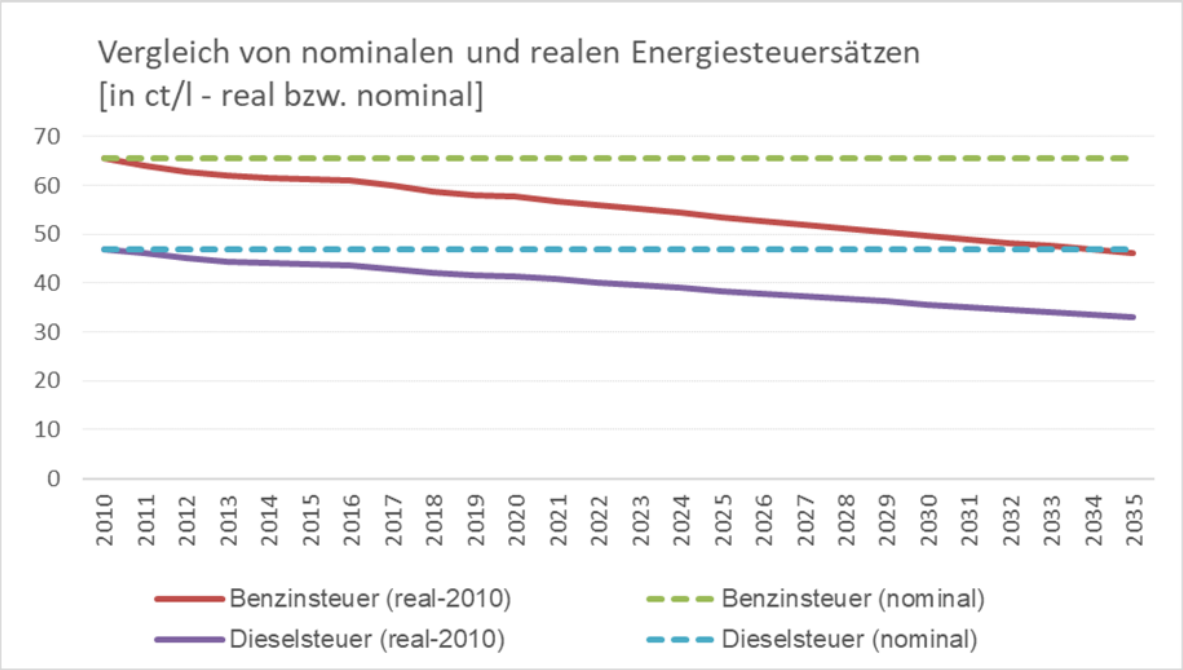
Bei der Betrachtung der Energiepreise und Energiesteuern ist die explizite Unterscheidung von nominalen und realen Preisen von großer Bedeutung. Während die nominalen Energiesteuersätze für Benzin und Diesel seit 2003 konstant bleiben, sind sie real deutlich gesunken. Dies führt aufgrund des bis 2030 real steigenden Rohölpreises und der Einführung des CO_2-Preises dazu, dass die realen Preise für Diesel und Benzin nahezu konstant liegen und für Benzin 1,51 $€_{2010}$/l und für Diesel 1,39 $€_{2010}$/l im Jahr 2035 betragen. Nominal liegt der Benzinpreis bei der unterstellten Inflation von 1,5% bei 2,10 €/l und der Dieselpreis bei 1,97 €/l im Jahr 2035. Diese Entwicklung zeigt Abbildung 11.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 11 Entwicklung der Kraftstoffpreise im Vergleich (REF-2020)

Abbildung 12 zeigt den Vergleich der nominalen und realen Steuersätze von Benzin und Diesel im Zeitverlauf von 2010 bis 2035. Die realen Steuersätze liegen in 2030 rund 25% niedriger im Vergleich zu 2010.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 12 Entwicklung der Steuersätze von Benzin und Diesel nominal und real (REF-2020)

In REF-2020, und damit ohne weitere Maßnahmen, werden strombasierte Kraftstoffe nicht im Verkehr eingesetzt. Es wurden aber Analysen durchgeführt, welche Preise in 2030 zu erwarten sind. Dabei wurden die folgenden drei Optionen unterschieden (inkl. MwSt.):

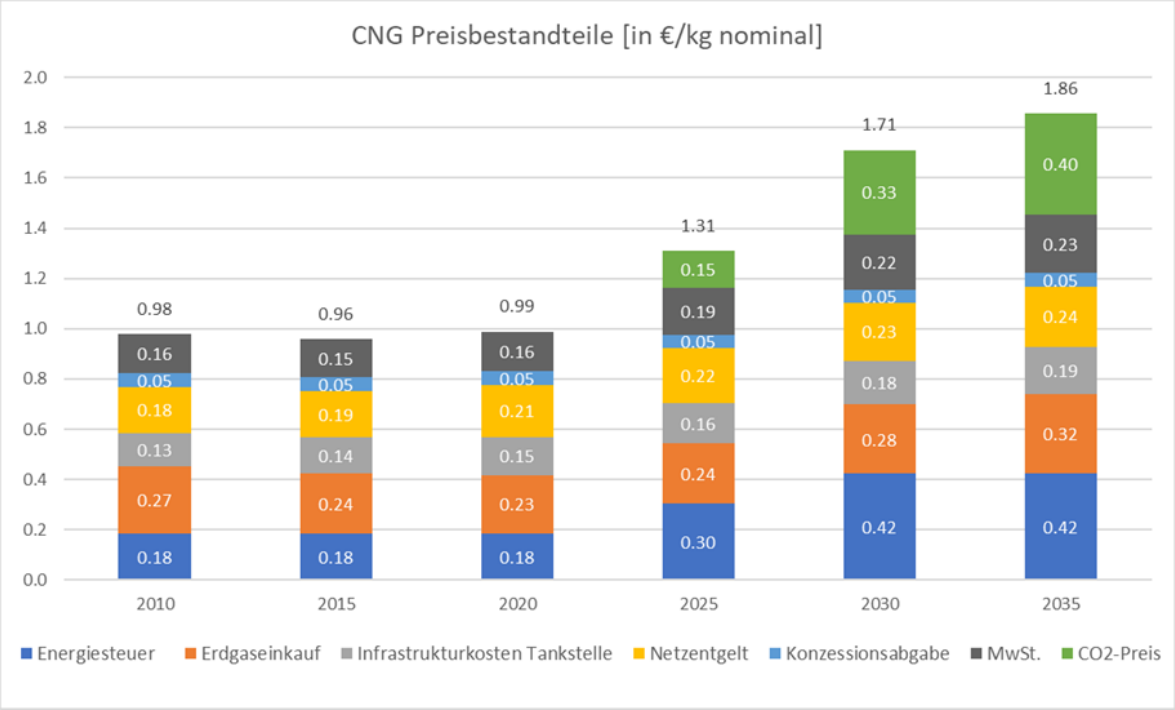
- PtL-Import (eDiesel, eKerosin) pessimistisch 2030: 20,89 ct_{2010}/kWh
- PtL-Import (eDiesel, eKerosin) optimistisch 2030: 15,39 ct_{2010}/kWh
- PtL nationale Herstellung 2030: 29,10 ct_{2010}/kWh.

Es ergibt sich selbst für den optimistischen Importpfad ein Dieselpreis von 1,49 $€_{2010}$/l, der damit noch über dem realen Preis des fossilen Pendants inklusive CO_2-Preis liegt.

4.4.2 Gasförmige Kraftstoffe

Erdgas, Compressed Natural Gas (CNG), wird als alternativer Kraftstoff im Verkehr eingesetzt und an Tankstellen in Kilogramm verkauft. Der Preis von CNG setzt sich dabei aus (1) der Energiesteuer, (2) dem Erdgaseinkaufspreis, (3) den Infrastrukturkosten der Tankstelle, (4) dem Netzentgelt, (5) der Konzessionsabgabe und (6) der Mehrwertsteuer zusammen, sowie ab dem Jahr 2021 zusätzlich aus (7) dem CO_2-Preis.

Abbildung 13Abbildung 13 stellt den Gesamtpreis sowie die einzelnen CNG Preisbestandteile in €/kg und im Zeitraum 2010 bis 2035 dar. Für 2020 ergibt sich ein Gesamtpreis von 0,99 €/kg inklusive Mehrwertsteuer der bis 2035 auf 1,86 €/kg steigt.

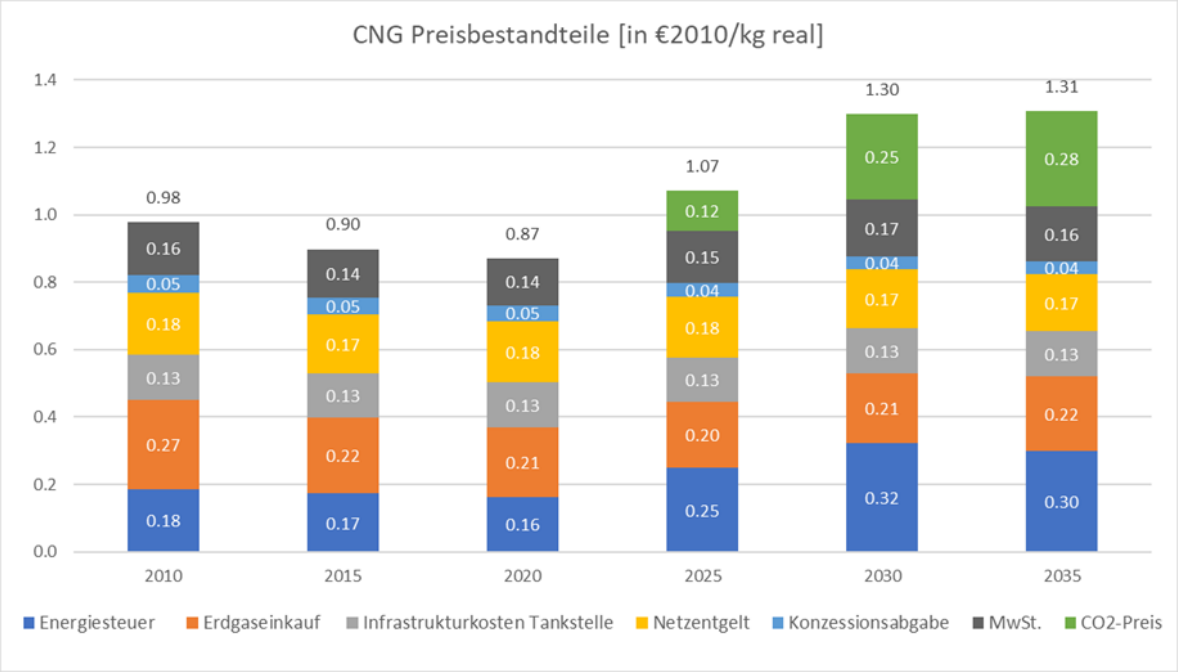


Quelle: M-Five, eigene Berechnungen.

Abbildung 13 Entwicklung der CNG Preisbestandteile (nominal) bis 2035

Die Energiesteuer auf Erdgas ist bis einschließlich 2026 reduziert, wird aber ab 2024 bereits schrittweise auf das Endniveau von 0,42 €/kg angehoben (EnergieStG). Der Erdgaseinkaufspreis setzt sich aus den Kosten für Beschaffung und Vertrieb von Erdgas in Europa zusammen (IEA, 2020). Die Infrastrukturkosten einer Tankstelle für Erdgas liegen mit 0,15 €/kg im Jahr 2020 deutlich über den Infrastrukturkosten für Benzin und Diesel (Kehler, 2015). Das Gas-Netzentgelt steigt zwischen 2007 und 2020 leicht an. Diese Entwicklung wird für die Jahre nach 2020 ebenfalls angenommen und fortgeschrieben (Bundesnetzagentur). Bei der Konzessionsabgabe für Gas wurde die obere Grenze einer Tariflieferung für Gemeinden mit über 500.000 Einwohnern als Konstante angenommen (Konzessionsabgabenverordnung).

Bis zum Jahr 2020 bildet der Einfuhr- und damit der Einkaufspreis von Erdgas den größten Preisbestandteil; ab dem Jahr 2025 wird dieser von der Energiesteuer abgelöst. Die schrittweise Erhöhung der Energiesteuer ab 2024 ist auf den stufenweisen Abbau bisheriger Steuervorteile von CNG als alternativer Kraftstoff zurückzuführen. Bis auf die als konstant angenommene Konzessionsabgabe verzeichnen alle Komponenten einen Preisanstieg, insbesondere jedoch die Energiesteuer. Der Anstieg im Gesamtpreis für CNG geht damit hauptsächlich auf die stark ansteigende Energiesteuer sowie leicht steigende Preise im Erdgaseinkauf zurück. Eine Betrachtung der CNG Preisbestandteile in realen Preisen auf Basis Euro 2010 ist in Abbildung 14 dargestellt. Für 2020 ergibt sich ein Gesamtpreis von 0,87 $€_{2010}$/kg inklusive Mehrwertsteuer der bis 2035 auf 1,31 $€_{2010}$/kg steigt.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen.

Abbildung 14 Entwicklung der CNG Preisbestandteile (real) bis 2035

Die inflationsbereinigte Betrachtung der Preisbestandteile von CNG verdeutlicht den Einfluss der Energiesteuer auf den Gesamtpreis, der zwischen 2020 und 2025 stark ansteigt.

Verflüssigtes Erdgas, Liquified Natural Gas (LNG), ist ein weiterer im Verkehr eingesetzter alternativer und zunächst fossiler Kraftstoff. Hier liegen die Kosten ca. 8% über den Kosten von CNG.

4.5 Strompreise

Die Strompreise wurden für REF-2020 überarbeitet, da in REF-2017 vor allem der Haushaltsstrompreis differenziert berücksichtigt wurde, es sich aber erwiesen hat, dass 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 H_2-Herstellung). Für alle Nutzerbereiche spielt die Entwicklung der im Strompreis enthaltenen Umlagen und Abgaben eine wichtige Rolle, insbesondere die EEG-Umlage. Die Preis-Modelle sind so angelegt, das alternative Preis- und Abgaben-Regime leicht angepasst werden können und so Teil der Instrumentenbündel eines KSPr+ bilden können. Im Folgenden wird daher zunächst die EEG-Umlage beschrieben und anschließend der Haushalts- bzw. der (Groß-)Industriestrompreis.

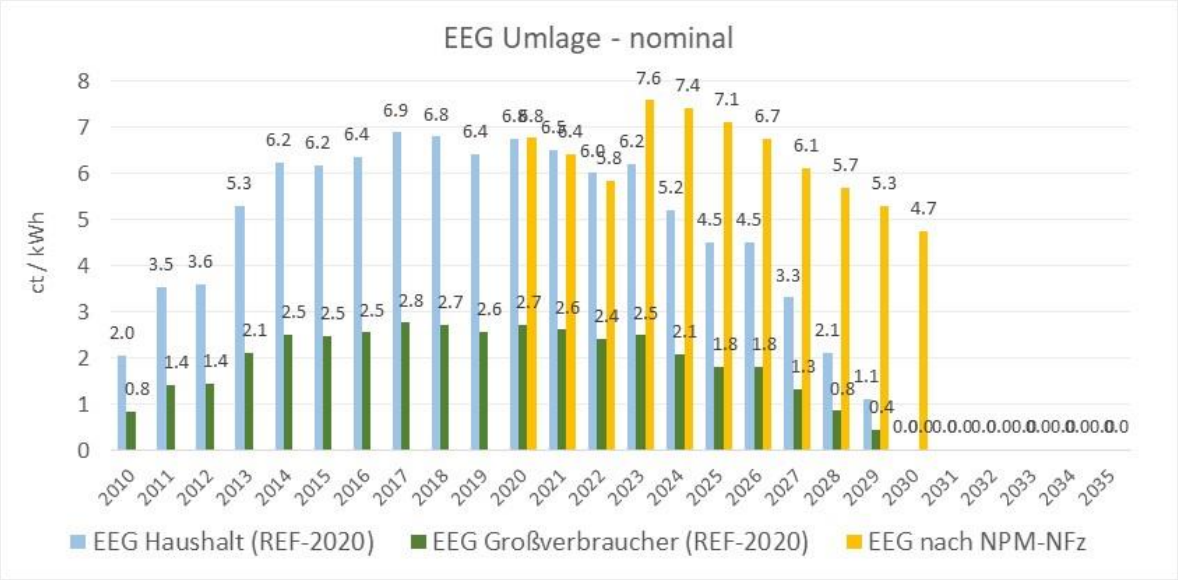
4.5.1 EEG-Umlage

Die EEG-Umlage lag 2020 bei 6,76 ct/kWh für private Haushalte und gewerbliche bzw. industrielle Kleinverbraucher. In 2021 wäre sie aufgrund der Corona-bedingten niedrigen

Strompreise um über 40% auf 9,65 ct/kWh gestiegen.[4] Im Klimaschutzprogramm (KSPr) hatte die Bundesregierung aber eine Deckelung für 2021 auf 6,5 ct/kWh und für 2022 auf 6 ct/kWh beschlossen. Diese wird durch Zuschüsse aus dem Haushalt auf das EEG-Konto finanziert.

Die EEG-Umlage unterscheidet sich für Haushalte und gewerbliche bzw. industrielle Kleinverbraucher und für industrielle Großverbraucher. Abbildung 15 stellt die in REF-2020 angelegt EEG-Umlage für Haushalte und Großverbraucher im Vergleich mit einer Entwicklung aus der NPM-AG1 Nutzfahrzeuggruppe dar. In 2020 wurde basierend auf dem AGORA-EEG-Umlagerechner nach Ende der Deckelung ab 2023 zunächst ein Anstieg um etwa 25% abgeschätzt und dann ein Abfall von 7,6 auf 4,7 ct/kWh für Haushalte und Kleinverbraucher.

Für REF-2020 wurden diese Annahmen nicht genutzt. Weil verschiedene Studien und die politische Debatte von einer Fortführung der Absenkung der EEG-Umlage bis hin zum kompletten Entfall in 2030 ausgingen, wurde auch in Abstimmung mit anderen Ressorts ein entsprechend ab 2023 weiter sinkender Pfad entwickelt, bei dem 2025 noch 4,5 ct/kWh für Haushalte (und damit auch das häusliche Laden von E-PKW) anfallen. 2030 entfällt die EEG-Umlage dann ganz (siehe Abbildung 15).



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 15 Fortschreibung der EEG-Umlage - Varianten

[4] 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 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.

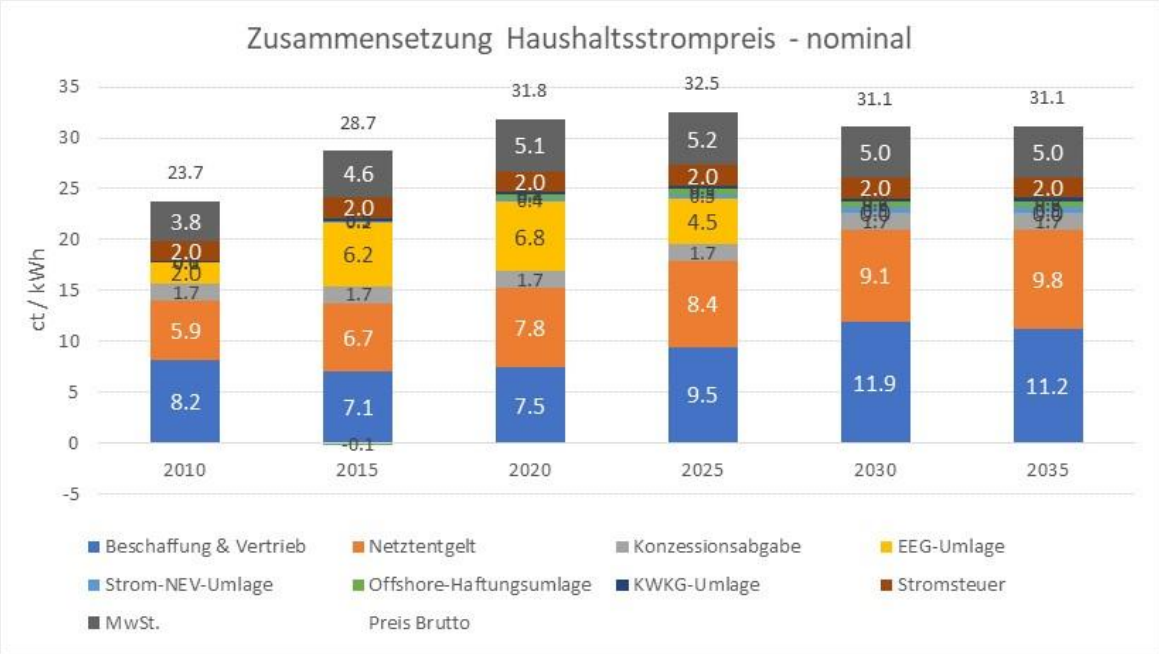
Ob der Strom für BEV oder OH-LKW aus einem Tarif für industrielle Klein- oder Großverbraucher stammt, ist nicht unerheblich, da allein die EEG-Umlage aktuell einen Preisunterschied von 4-5 ct/kWh ausmachen kann.[5] Ähnliches gilt für die Erzeugung von grünem Wasserstoff (H_2) über Elektrolyse.

Die Novelle des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG), welche die Festlegung der EEG-Umlage (EEG-2021) neu regelt, wurde am 23.9.2021 vom Kabinett beschlossen und ist damit nicht Bestandteil von REF-2020. Die Novelle ermöglicht zahlreiche Entlastungen z.B. zur Produktion von grünem H_2, welche auch für den Verkehrssektor wichtig werden können. Diese Entlastungen sollen in Szenarien bzw. Politikprogrammen (KSPr+), die auf REF-2020 aufbauen, vertieft werden.

4.5.2 Haushaltsstrompreis

Der Haushaltsstrompreis ist für den Verkehr von Bedeutung, weil (1) PKW, die zu Hause geladen werden, und (2) auch kleine gewerbliche Nutzer und viele Ladestationen am Arbeitsplatz zu diesen Strompreisen laden. Abbildung 16 zeigt die Zusammensetzung des Haushaltsstrompreises und die Entwicklung bis 2035. Dabei wird auf die historischen Daten des BDEW zurückgegriffen (BDEW, 2021). Die Fortschreibung basiert auf in der NPM AG1 abgestimmten Entwicklungen bis 2030 (NPM, 2020). Die EEG-Umlage stellt in den letzten 5 Jahren einen zentralen Kostenblock dar, wird aber, wie im vorigen Kapitel beschrieben, bis 2030 kontinuierlich abgeschmolzen. Hier wird bewusst von der Stichtagsregelung zur Definition von REF-2020 abgewichen, da in 08/2020 noch kein Beschluss dazu erfolgt ist. Durch das Abschmelzen der EEG-Umlage sinkt nach 2026 der Strompreis sogar nominal.

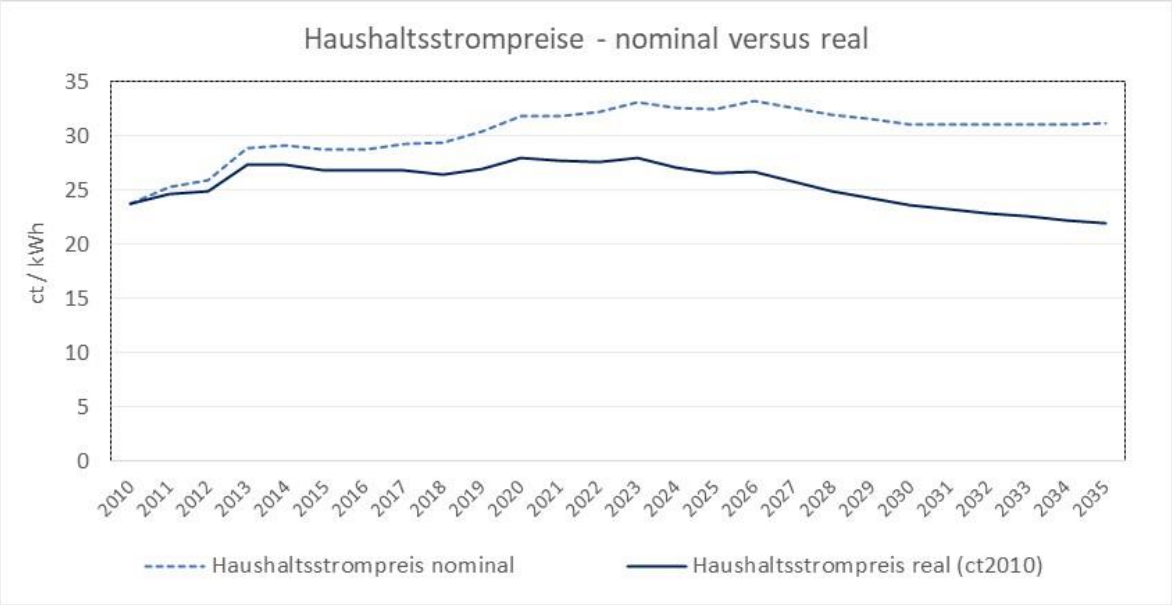
[5] Die EEG-Regulierung erlaubt unter bestimmten Bedingungen auch niedrigere Umlagesätze für Großverbraucher als in Abbildung 15 dargestellt bis in die Größenordnung von 0,1 ct/kWh (BDEW, 2021).



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 16 Entwicklung des Haushaltsstrompreises - nominal

Während der nominale Strompreis für Haushalte in REF-2020 den höchsten Stand in 2026 erreicht, sind die realen Strompreise seit etwa 2013 stabil geblieben und beginnen ab etwa 2023 zu sinken. Damit sinken auch die realen Energiekosten für die Besitzer von E-PKW, die im Wesentlichen zu Hause laden, ab 2023.



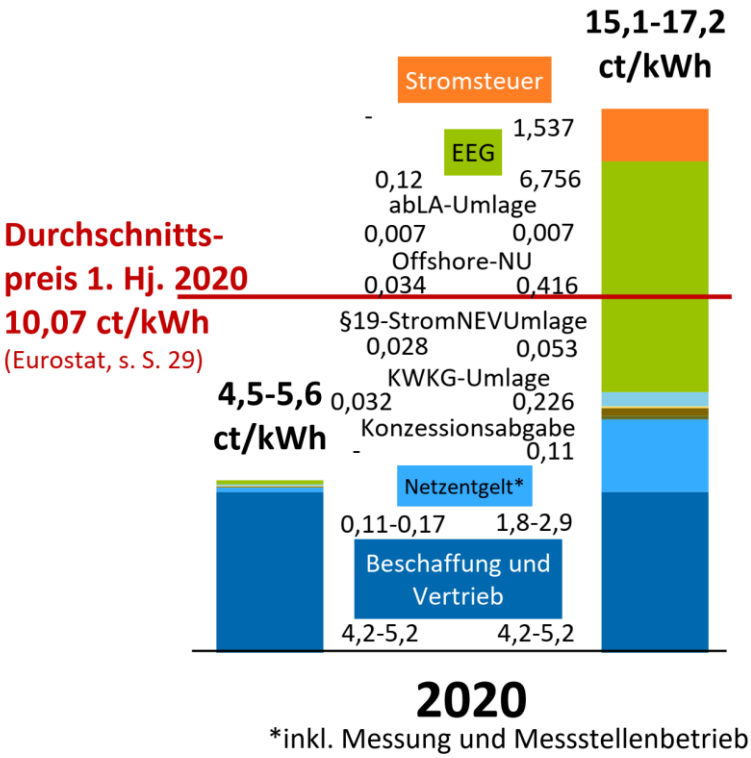
Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 17 Entwicklung des Haushaltsstrompreises – nominal versus real

4.5.3 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

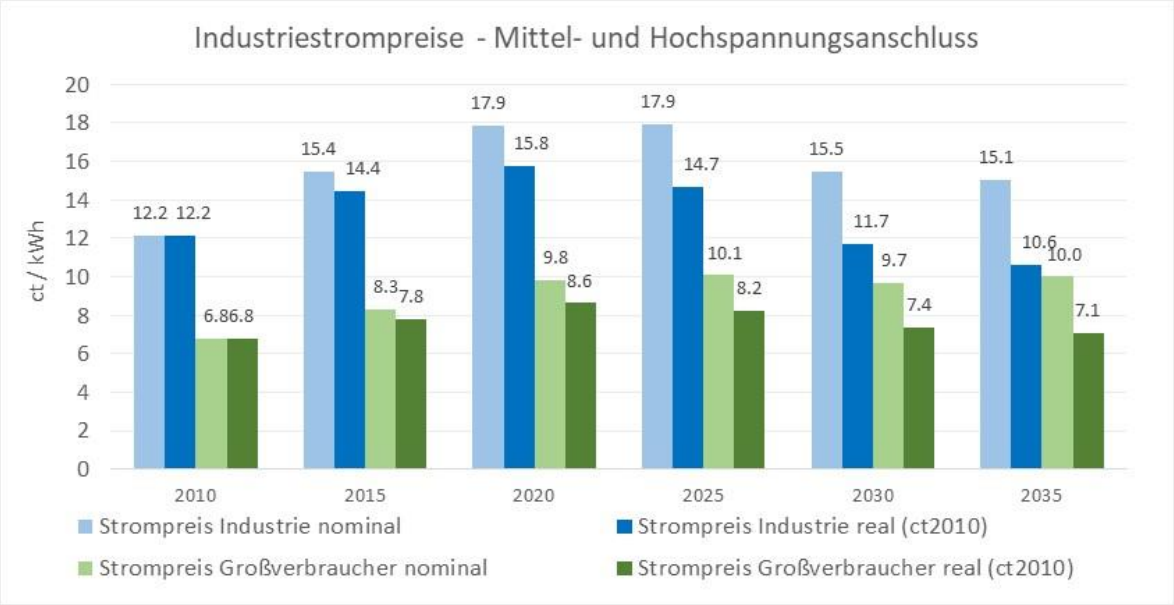
kleinere Industriebetriebe, die an der Mittelspannung angeschlossen sind, von größeren Industriebetrieben, die entweder an der Mittel- oder der Hochspannung angeschlossen sein können. Neben der Anschlussleistung hängt der tatsächliche Strompreis auch von der Höhe der Stromnachfrage ab, der Steuerbarkeit bzw. Netzdienlichkeit und weiteren Faktoren. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) zeigt auf, dass die Preise für Großverbraucher in 2020 dadurch zwischen 4,5 ct/kWh und 17,2 ct/kWh liegen können (siehe Abbildung 18). Beispielsweise kann die Stromsteuer komplett entfallen und auch die EEG-Umlage auf bis zu 0,12 ct/kWh reduziert werden anstatt 6,756 ct/kWh, was der Höhe der durch Haushalte zu entrichtenden EEG-Umlage entspricht.

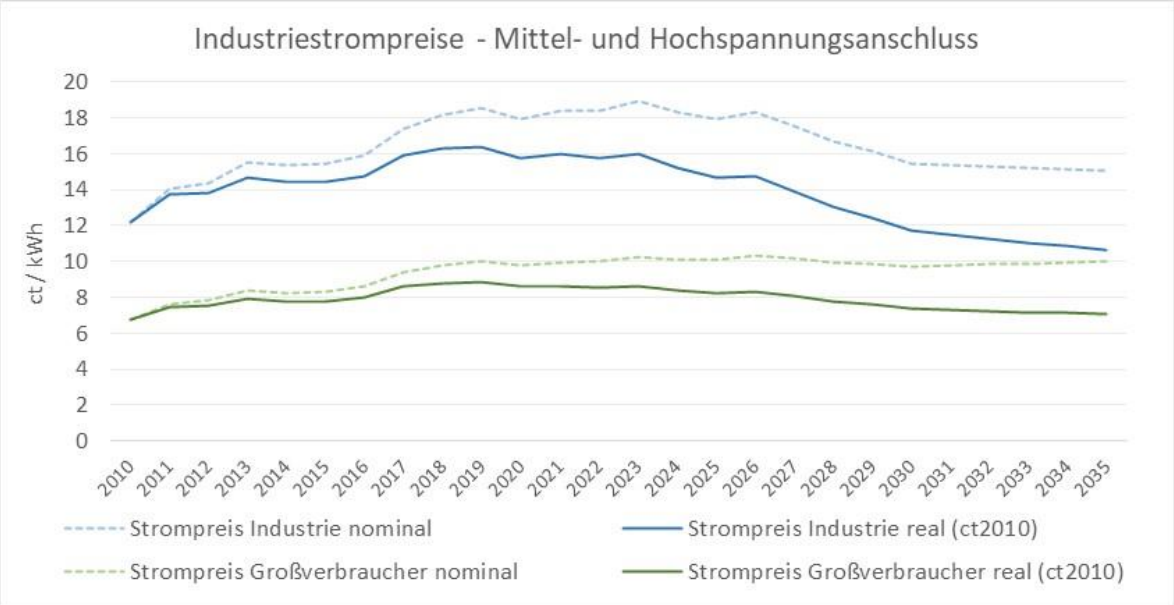


Quelle: BDEW (2021).

Abbildung 18 Varianz der Industriestrompreise für Großverbraucher in 2020

In ASTRA-M werden industrielle Strompreise für den Anschluss an die Mittelspannung von mittleren bis großen Verbrauchern bestimmt sowie für Großverbraucher, die an die Hochspannung angeschlossen sind. Bisher wird für elektrifizierte SNF unterstellt, dass diese an der Mittelspannung laden und damit in 2020 einen realen Preis von 15,8 ct_{2010}/kWh bezahlen (nominal dann 17,9 ct/kWh) (siehe Abbildung 19). Zukünftig wäre in KSPr+ Szenarien 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. Bei industriellen Verbrauchern an der Mittelspannung sinken die realen Strompreise ab etwa 2020. Bei Großverbrauchern ebenfalls, aber die Effekte sind kleiner, da sich in diesem Fall nicht die nominalen Preisminderungen mit den realen durch Entfall oder Absenkung von Preisbestandteilen überlagern.

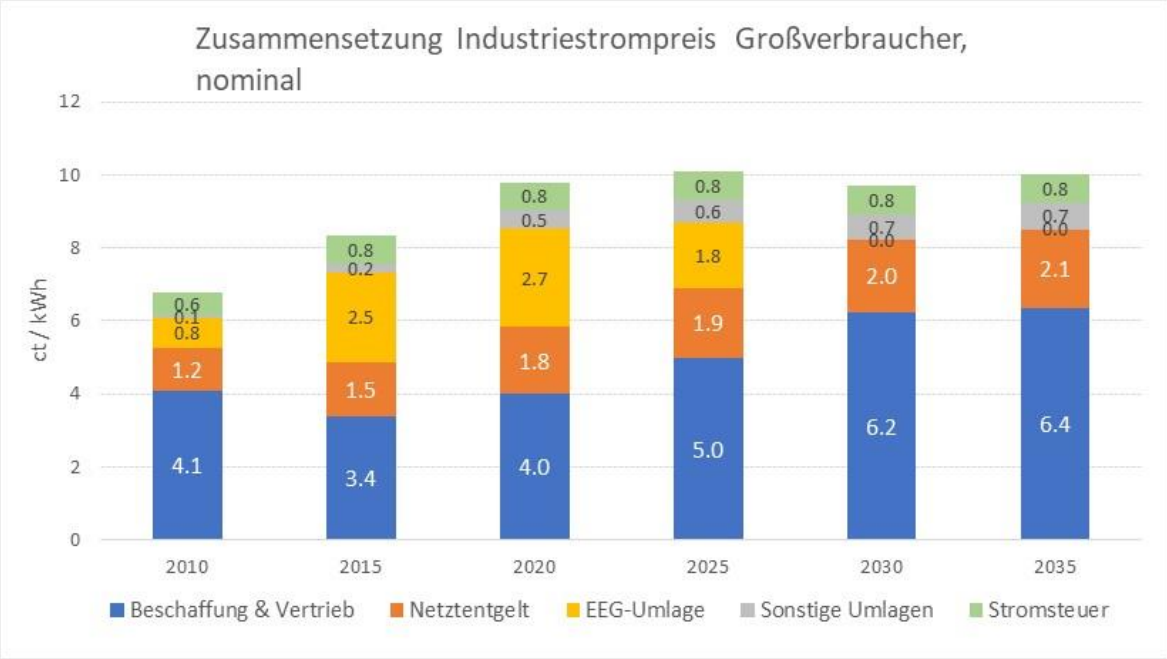




Quelle: M-Five, NPM (2020), eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 19 Industriestrompreise für Nutzung im Verkehr (REF-2020)

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 auch von der Reduktion der EEG-Umlage in der nächsten Dekade. Beschaffungskosten liegen etwa bei der Hälfte des Haushaltsstroms, Netzentgelte bei etwa einem Viertel. Damit liegt der Strompreis für Großverbraucher bei etwa 10 ct/kWh. Sollten BEV-SNF in begünstigten Industrieanlagen laden können oder das Oberleitungssystem für OH-LKW als Großverbraucher ausgerollt werden, dann könnte der Strompreis von den knapp 18 ct/kWh auf eher 10 ct/kWh (Preisstand 2020) sinken.



Quelle: M-Five, NPM (2020), eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 20 Struktur der Industriestrompreise für Großverbraucher (REF-2020)

Wir gehen für REF-2020 davon aus, dass Oberleitungs-LKW oder -Busse mit Industriestrom fahren, d.h. Industriestrompreise bei Abnahme aus dem Mittelspannungsnetz bezahlen werden. Diese lagen 2020 bei rund 17,9 ct/kWh und damit bei etwa 55 Prozent des Haushaltsstrompreises. 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.

4.6 Wasserstoffpreise

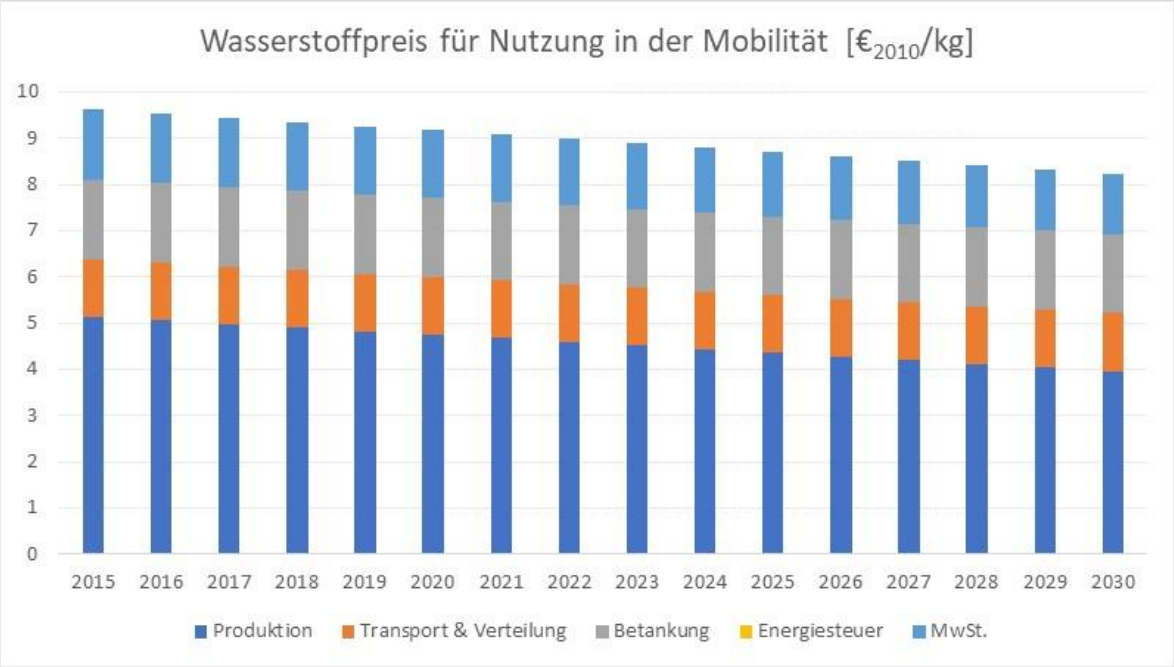
Wasserstoff hat auch 2020 noch keinen Markt in der Mobilitätswirtschaft und deshalb keinen Marktpreis. Aktuell wird der Wasserstoff an Tankstellen der Clean Energy Partnership (CEP) für 0,95 €/100 g (ca. 32 ct/kWh) abgegeben. Dies ist ein erster, politisch motivierter Preis. Erst wenn die Zahl an Fahrzeugen 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.

Der Preis für Wasserstoff, aufbereitet zur unmittelbaren Nutzung, wurde in der MKS aus drei Komponenten zusammengestellt: Gestehungskosten, 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 H_2-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 Komprimierung weniger kostenintensiv ausfällt, obwohl die nötige Komprimierung Zusatzkosten erzeugt (Robinius et al., 2018).

Somit ergibt sich für national produzierten H_2 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. Abbildung 21 stellt die Preisentwicklung unter diesen Randbedingungen dar.

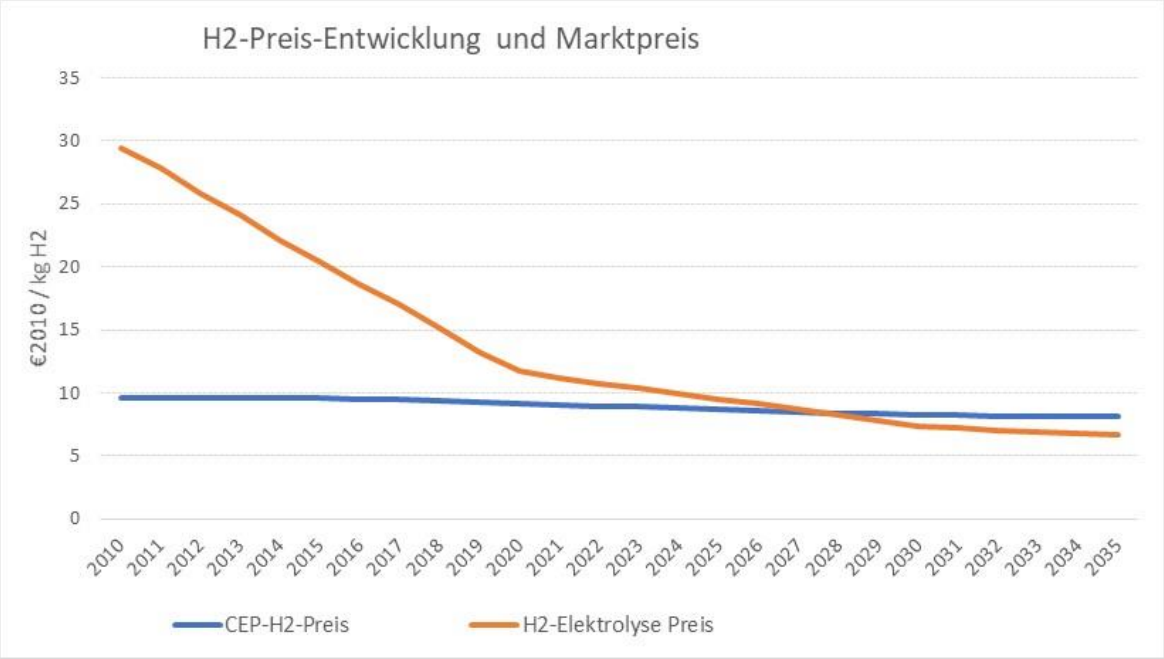


Quelle: MKS Importstudie, eigene Berechnungen.

Abbildung 21 Entwicklung des Wasserstoffpreises in der Mobilität bis 2030

Die Darstellung des BDEW zeigt, dass aber auch deutlich niedrigere Strompreise in Deutschland möglich sind in der Größenordnung von 5 ct/kWh (siehe Abbildung 18), mit denen die H_2-Erzeugung in großem Maßstab kostengünstiger als bisher in REF-2017 erfolgen könnte. Der Preispfad für H_2 in REF-2020 berücksichtigt diese Option.

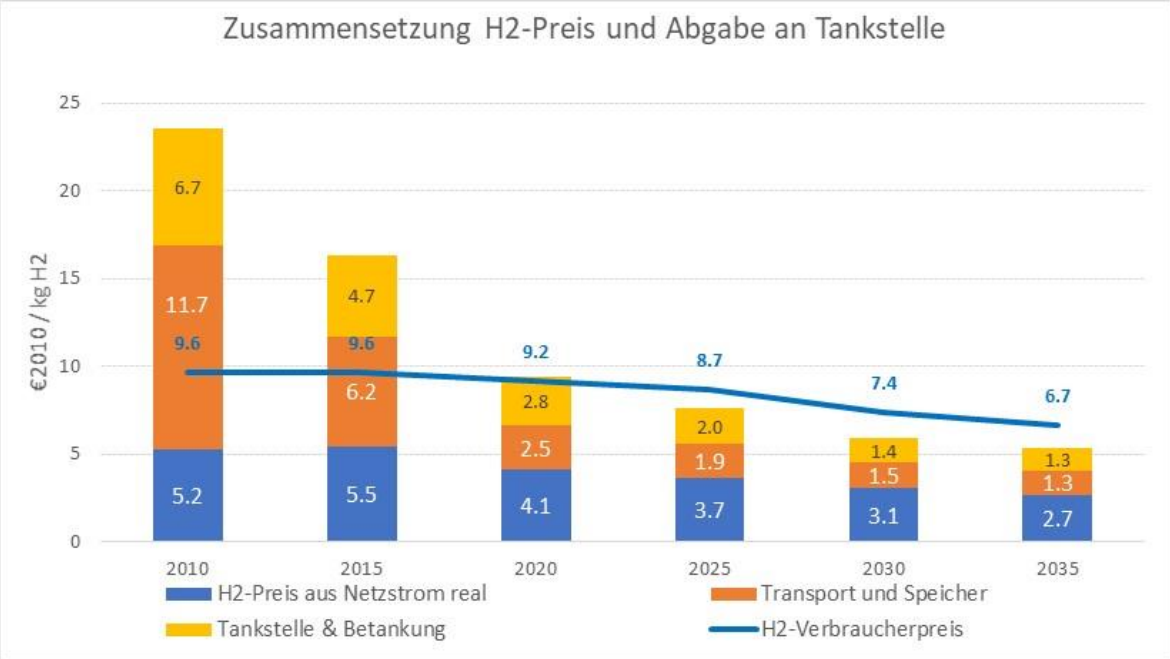
Abbildung 22 zeigt die hinterlegte Entwicklung des H_2-Preises in REF-2020. Etwa in 2028 sinken die Herstellkosten von H_2 aus Netzstrom in Deutschland unter den subventionierten Preis der CEP. Damit wird dieser Preispfad genutzt. In einem KSPr+ Szenario sind auch niedrigere Preispfade durch Veränderung der Marktbedingungen zur Strom-Nutzung in der Elektrolyse einstellbar.



Quelle: M-Five, NPM (2020), eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 22 Entwicklung des CEP-Preises und des H_2-Elektrolyse Preises aus Netzstrom

Abbildung 23 zeigt die Struktur des H_2-Preises und den Verbraucherpreispfad. Der H_2-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). Bis 2025 reicht die Kostensenkung unter Berücksichtigung der Marge und der MwSt. nicht aus, um den Marktpreis unter den subventionierten Preis sinken zu lassen.



Quelle: M-Five, NPM (2020), eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 23 Entwicklung des Wasserstoffpreises in der Mobilität bis 2030

4.7 Anteil Biokraftstoffe und Preiseffekte

Der Einsatz von Biokraftstoffen in REF-2020 wird aus den regulatorischen Rahmenbedingungen abgeleitet. Auf europäischer Ebene ist dieser Rahmen durch die Renewable Energy Directive (auch „RED II“, EU RL 2018/2001) gegeben, die auch für die nationale Gesetzgebung die Mindestanforderungen festlegt. National werden die zu erreichenden Vorgaben für den Verkehr im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sowie in den zugehörigen Verordnungen (37. Und 38. BImSchV) bestimmt. Die jeweils gültigen Fassungen, die für das REF-2020 berücksichtigt werden (nachfolgend „BImSchG/V“ genannt), sind dabei:

- BImSchG (Letzte Änderung: 19.06.2020),
- 37. BImSchV (Letzte Änderung: 15.05.2017),
- 38. BImSchV (Letzte Änderung: 21.05.2019).

Für das Jahr 2020 müssen Kraftstoff-Inverkehrbringer eine THG-Minderungsquote in Höhe von 6 % gegenüber einer fossilen Referenz erreichen. 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.

Zum Stichtag des REF-2020 (31.08.2020) gab es noch keine finale Neufassung des BImSchG/V, die den Zeitraum von 2020 bis 2030 reguliert und die Vorgaben der RED II in nationales Recht überführt. Da diese Änderungen jedoch erforderlich sind, wird im Weiteren angenommen, dass die in der RED II festgelegten Randbedingungen auch für die nationale Gesetzgebung genutzt werden.

Zum Zeitpunkt der Ausfertigung der RED II war der schnelle Hochlauf der Elektromobilität, wie er sich heute (Stand Januar 2022) anzudeuten scheint, noch nicht zweifelsfrei zu erwarten. Innerhalb der Methodik der RED II ist erneuerbarer Strom in Straßenfahrzeugen mit dem Vierfachen seines Energiegehalts auf den Mindestanteil erneuerbarer Energien anrechenbar. Dies führt dazu, dass bei steigender Elektrifizierung im Straßenverkehr ein immer größerer Anteil des Mindestanteils erneuerbarer Energien alleine durch Elektromobilität gedeckt werden kann. Zusätzlich ergibt sich durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung, dass auch ohne steigende Elektrifizierung im Verkehr die bestehende Stromnachfrage der Straßenfahrzeuge mit entsprechend größeren Energiemengen innerhalb der RED II angerechnet werden kann. Zusammen führt dies dazu, dass der notwendige Beitrag von Biokraftstoffen am Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr sinkt und bis 2030 deutlich weniger Biokraftstoffe eingesetzt werden müssten, als noch im Jahr 2020 genutzt wurden, um die europäischen Vorgaben zu erfüllen.

Es wird angenommen, dass sowohl das europäische als auch das nationale Ambitionsniveau innerhalb einer neuen Ausgestaltung des Gesetzesrahmens so angehoben werden würden, dass Biokraftstoffe (energiebezogen) weiterhin auf dem heutigen Niveau eingesetzt werden und die Elektromobilität einen zusätzlichen Beitrag leistet, ohne die bereits genutzten Mengen an erneuerbaren Kraftstoffen zu verdrängen.

Für das Jahr 2020 werden die historischen Daten aus dem „Evaluations- und Erfahrungsbericht 2020“ (BLE 2020) der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung ausgewiesen. Innerhalb des verwendeten Flottengerüsts gibt es eine Abweichung zwischen der modellierten Nachfrage nach Anwendung der Vorgaben des BImSchG/V und der historisch nachgefragten Energiemenge. Es kann daher für dieses Jahr kein Anteil der Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln bestimmt werden. Werden die Vorgaben des BImSchG/V auf das Jahr 2021 angewendet, ergibt sich ein Anteil von rund 4,3 % bzw. absolut 90 PJ. Dieser Anteil dient im Weiteren als Oberquote für die folgenden Jahre.

Biokraftstoffe nach RED II Anhang IX Teil B werden im BImSchG/V nicht in der Nutzung eingeschränkt. Jedoch wird die Oberquote der RED II in Höhe von 1,7 % auch für das Jahr 2021 angesetzt und als Maximalwert für die nachfolgenden Jahre festgelegt. Für das Jahr 2021 ergibt sich eine Nachfrage von rund 35 PJ nach Biokraftstoffen nach RED II Anhang IX Teil B.

Im Rahmen der nationalen Quote für fortschrittliche Kraftstoffe wird angenommen, dass diese über fortschrittliche Biokraftstoffe gedeckt wird. Im Jahr 2021 müssen zur Erfüllung der Quote 2,1 PJ fortschrittliche Biokraftstoffe in Verkehr gebracht werden. Ab dem Jahr 2022 wird die Unterquote der RED II angesetzt. Es wird festgelegt, dass die Unterquote ausschließlich über fortschrittliches Biomethan gedeckt wird und die entsprechende Nachfrage in der Flotte bereits vorhanden ist oder entsprechend aufgebaut wird.[6] Eine Übererfüllung der Unterquote wird nicht unterstellt.

Absolut werden somit im Jahr 2021 92 PJ in Form von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermitteln, 35 PJ von Biokraftstoffen nach RED II Anhang IX Teil B und 2,1 PJ von Biokraftstoffen nach RED II Anhang IX Teil A nachgefragt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht der 2021 eingesetzten Biokraftstoffmengen

Kraftstoffoption	Energiemenge 2021 (in PJ)
Biokraftstoffe aus N-&FM	92
IX B	35
IX A	2,1

Quelle: DeStatis 2017, 2019.

Zur Erfüllung der BImSchG/V-Vorgaben zur Ermittlung der Oberquote für Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln (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).

Unter Berücksichtigung der festgelegten Ober- und Unterquoten ergeben sich die in Tabelle 7 dargestellten Anteile für Biokraftstoffe. Die resultierenden absoluten Biokraftstoffmengen sind Abbildung 25 zu entnehmen.

[6] Die Nachfrage nach Gas als Kraftstoff ergibt sich in der Modellierung von REF-2020 vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen in Form von CNG und LNG (siehe Kapitel 8).

Tabelle 7: Übersicht der angenommenen Anteile für Biokraftstoffe für die Jahre 2020, 2025 und 2030

	2021	2025	2030
Biokraftstoffe aus N-&FM	4,30 %	4,30 %	4,30 %
IX B	1,70 %	1,70 %	1,70 %
IX A	0,05 %	0,50 %	1,75 %

Quelle: DeStatis 2017, 2019.

Angaben für 2020 entsprechen Vorgaben des BImSchG/V (Prozentangaben bezogen auf Endenergieverbrauch im Straßen- und Schienenverkehr) (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).

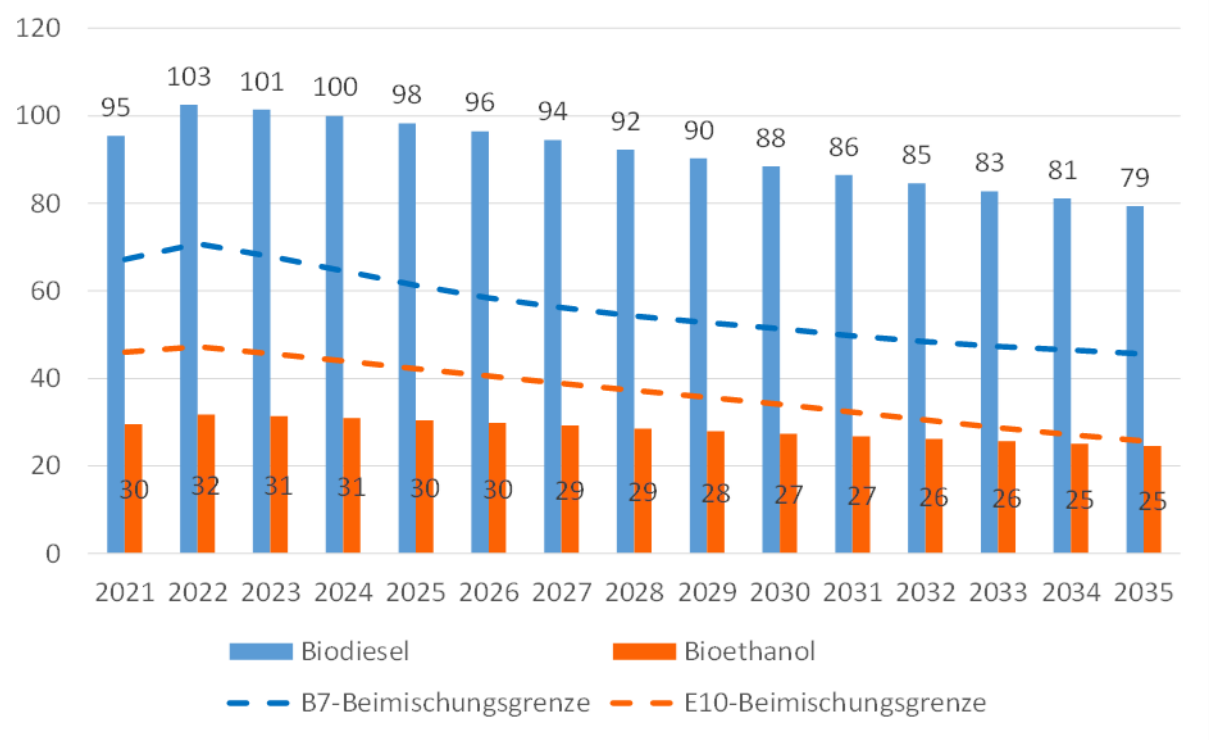
Neben dem Gesetzesrahmen können flottenseitige und technische Restriktionen zu Einschränkungen bei der Beimischung von Biokraftstoffen führen. So ist die maximal in Verkehr zu bringende Menge an fortschrittlichem Biomethan im Rahmen der Unterquote über die insgesamt im Flottengerüst auftretende Nachfrage nach methanbasierten Kraftstoffen begrenzt. Wie in Kapiteln 8 und 13 dargestellt, übersteigt die Nachfrage nach gasförmigen Kraftstoffen in Form von CNG und LNG insbesondere aus dem Bereich der SNF die zur Erfüllung der Unterquote erforderliche Menge jedoch deutlich und in REF-2020 liegen keine flottenseitigen Einschränkungen vor.[7]

Für die Beimischung von Bioethanol und Biodiesel zu fossilem Otto- bzw. Dieselkraftstoff 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. Für Biodiesel gilt nach DIN EN 590:2013+A1:2017 eine Beimischungsgrenze von 7 %-v/v. In Abbildung 24 sind diese Anteile über den nach obiger Methodik anfallenden absoluten Biokraftstoffmengen für Bioethanol und Biodiesel dargestellt. Es zeigt sich, dass die Beimischungsgrenze für Bioethanol unter den gegebenen Annahmen nicht ausgereizt wird und eine Beimischung der entsprechenden Mengen möglich ist.

Für Biodiesel kann beobachtet werden, dass im Zeitverlauf steigende Mengen über die Beimischungsgrenze hinaus in Verkehr gebracht werden (siehe Abbildung 25). Diese Mengen können jedoch 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.[8] Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung kann die dargestellte Menge an Biodiesel jedoch grundsätzlich in Verkehr gebracht werden.

[7] Die massive Erhöhung des Gaspreises Ende 2021 liegt außerhalb des Abschneidezeitpunkts von REF-2020 und schlägt sich daher nicht in der Flottenmodellierung der SNF nieder.

[8] Siehe Hinweis des BMU: https://www.bmu.de/faqs/alternative-kraftstoffe/

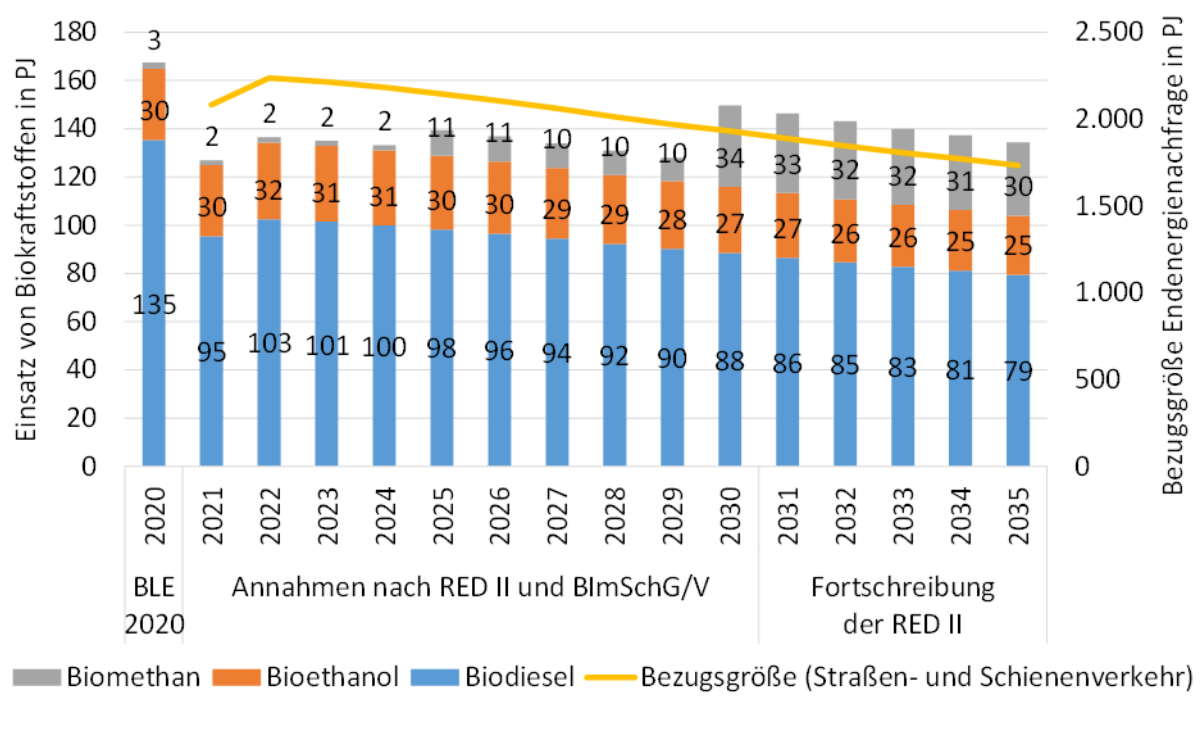


Quelle: IUE, eigene Berechnungen.

Abbildung 24: Darstellung der eingesetzten Mengen an Biodiesel (N-&FM und IX B) und Bioethanol (N-&FM) sowie Beimischungsgrenzen nach DIN EN:228:2012+A1:2017 und DIN EN 590:2013+A1:2017 (N- & FM – Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln; IX B – Biokraftstoffe nach RED II Anhang IX Teil B)

Sowohl für Bioethanol als auch für Biodiesel lässt sich beobachten, dass die absolute Energiemenge im Zeitverlauf sinkt. Dies ist bei konstantem energetischem Anteil auf die sinkende Energienachfrage im Straßen- und Schienenverkehr zurückzuführen (siehe Kapitel 13]). Bei der Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe lassen sich zwei sprunghafte Anstiege der Nachfrage erkennen. Dies ist durch das Ansteigen der Unterquote von 0,1 % auf 0,5 % im Jahr 2025 bzw. von 0,5 % auf 1,75 % im Jahr 2030 begründet.

Der Einsatz von Biokraftstoffen liegt im Jahr 2030 mit den unterstellten Randbedingungen bei insgesamt 150 PJ. Davon entfallen 56 PJ auf Biodiesel bzw. 27 PJ auf Bioethanol aus Nahrungs- und Futtermitteln, 33 PJ auf Biodiesel aus Rohstoffen nach RED II Anhang IX Teil B und 34 PJ auf Biomethan aus Rohstoffen nach RED II Anhang IX Teil A. Unter Berücksichtigung der restlichen erneuerbaren Kraftstoffe und Energieträger im Straßen- und Schienenverkehr (siehe Kapitel 13) ergibt sich nach der RED II somit ein Anteil von 20 % erneuerbarer Energien im Verkehr. Der Zeitraum nach 2030 ist im BImSchG/V und in der RED II nicht abgedeckt. Für die Jahre 2031 bis 2035 werden die Vorgaben der RED II sowie die festgelegten Oberquoten des Jahres 2030 konstant gehalten.



Quelle: IUE, eigene Berechnungen, basierend auf Energie-Mengengerüst aus ASTRA-M.

Abbildung 25: Einsatz von Biokraftstoffen zwischen den Jahren 2020 und 2030 aufgeteilt nach Kraftstoffart und Ausgangsrohstoffen (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)

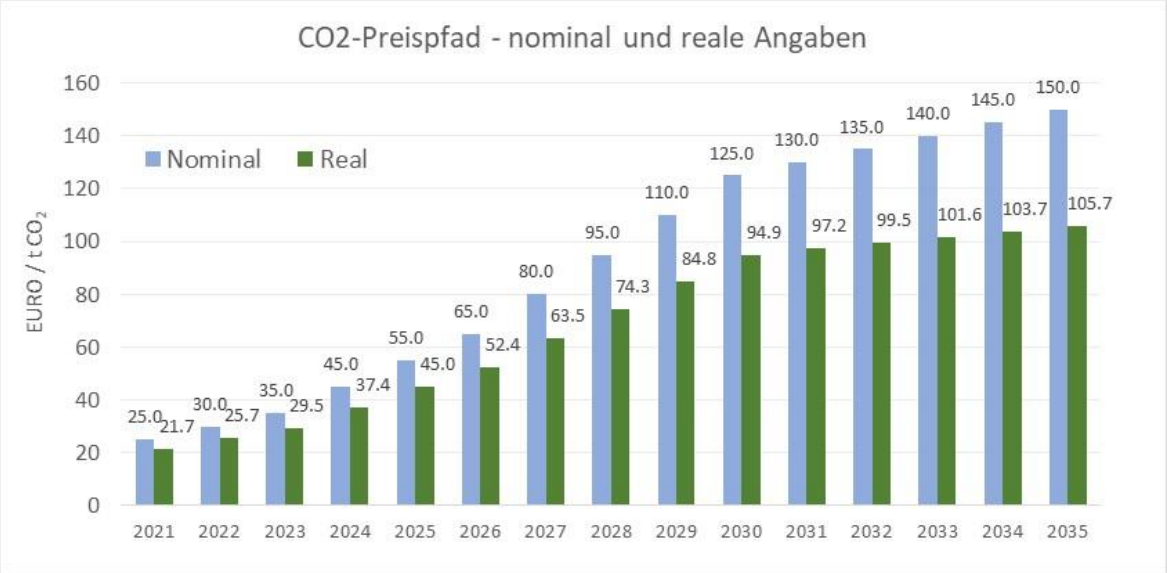
Da die eingesetzten Mengen an Biokraftstoffen – mit Ausnahme von Biomethan – von heute bis 2030 zurückgehen, ist für den Einsatz von Bioethanol und Biodiesel kein Preisaufschlag in den Kraftstoffpreisen von Benzin und Diesel berücksichtigt worden. Auch die begrenzten Mengen von Biogas, die bis 2029 eingesetzt werden, führen zu keinem Preisaufschlag bei fossilen Kraftstoffen. Für den Zuwachs an Biogas in 2030 wird von einem Bedarf an Anlagenkapazität in der Größe von 6 PJ mit einem Investitionsvolumen von etwa 170 Mio. $€_{2010}$ ausgegangen. Anhand von Analysen im Rahmen der NPM (2019) ist hier ebenfalls davon ausgegangen worden, dass der Aufbau von Produktionsanlagen und die Beschaffung der Rohstoffe nicht zu höheren Kosten führen wird als für die Beschaffung von fossilem Erdgas in 2030, so dass auch für Biogas kein Preisaufschlag auf die fossilen Kraftstoffe kalkuliert wurde.

4.8 CO_2-Preispfad

Mit dem Beschluss zum Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) wurde Ende 2019 der CO_2-Preis für die Sektoren Gebäude und Verkehr neu eingeführt. Dabei müssen die Inverkehrbringer der Kraftstoffe (z.B. Mineralölkonzerne) CO_2-Zertifikate in der Höhe ihres in CO_2-äquivalenten ausgedrückten Marktabsatzes an Kraftstoffen nachweisen. Der Preispfad sollte zunächst bei 10 € pro t CO_2-Emission in 2021 beginnen, wurde dann aber in Verhandlungen mit dem Bundesrat auf 25 €/t CO_2 erhöht. Anschließend setzt sich bis 2025 ein fest vorgegebener Preispfad fort (siehe Abbildung 26). Für 2026 ist ein Preis-Korridor

zwischen 55 und 65 €/t CO_2 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 CO_2-Preis bildet. Für die Phase ab 2027 wurden Annahmen getroffen, so dass in 2030 der CO_2-Preis bei 125 €/t CO_2 liegt und in 2035 bei 150 €/t CO_2 (siehe Abbildung 26, jeweils nominale Preise).

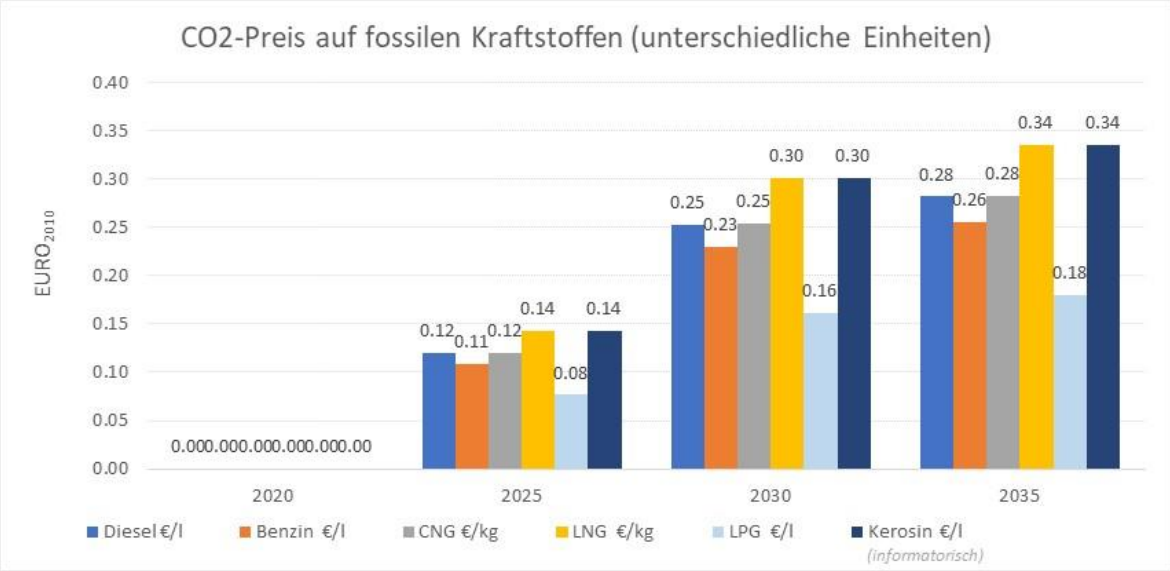
In realen Preisen zur Basis 2010 gerechnet, d.h. unter Berücksichtigung der Inflation und Kaufkraftentwicklung, liegt der Preis in 2025 bei 45 €/t CO_2, in 2030 bei knapp 95 €/t CO_2 und in 2035 bei knapp 106 €/t CO_2. Verschiedene Akteure gehen von deutlich höheren Preisen in 2030 aus (z.B. BDI mit BCG (2021): nominal 180 €/t CO_2). Die Modellierung mit ASTRA-M ermöglicht es, die Wirkungen von alternativen Preispfaden im Verkehrssektor zu testen. Die Preispfade können dabei nach ihren nominalen CO_2-Preisen zu wichtigen Zeitpunkten charakterisiert werden. Der gewählte Pfad ist 25-65-125-150 mit den korrespondierenden Zeitpunkten 2021-2026-2030-2035.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 26 CO_2-Preispfad in REF-2020 – 25-65-125-150

Zwischen der Verbrennung einer Einheit Kraftstoff und der dadurch entstehenden CO_2-Emission liegt ein festes Verhältnis vor. Beispielsweise werden bei der Verbrennung von einem Liter 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 27 stellt die sich für den Preispfad 25-65-125-150 ergebenden Preisaufschläge für die verschiedenen fossilen Kraftstoffe bezogen auf ihre üblichen Mengeneinheiten (Liter oder Kilogramm) dar. Für Kerosin ist ebenfalls ein informatorischer Wert angegeben, auch wenn der CO_2-Preis des BEHG nicht auf Kerosin erhoben wird. Bei einer Gleichbehandlung aller fossilen Kraftstoffe wäre dieser Betrag als Aufschlag auf Kerosin zu erheben.

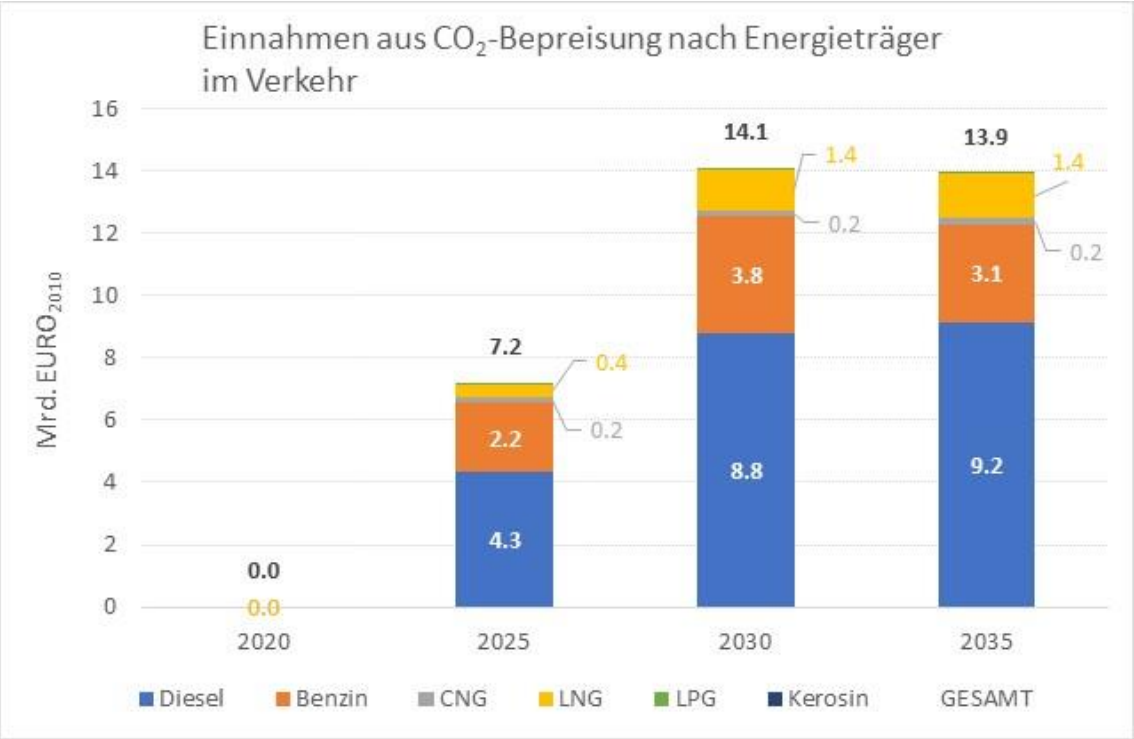


Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 27 CO_2-Preisaufschlag für verschiedene Kraftstoffe in REF-2020 (real)9

Die Einnahmen aus dem Verkehr aus der CO_2-Bepreisung steigen bis 2030 an, stagnieren dann ein Jahr und fallen anschließend trotz weiter steigendem CO_2-Preis leicht ab. D.h. die jährliche Verringerung der CO_2-Emissionen des Verkehrs übersteigt den Anstieg des CO_2-Preises. Der größte Einnahme-Beitrag ergibt sich aus der Nutzung von Diesel-Kraftstoffen mit bis etwa 9 Mrd. $€_{2010}$ (siehe Abbildung 28). Eine Kompensation des CO_2-Preises für mautpflichtige Nutzfahrzeuge ist in REF-2020 nicht vorgesehen, da die CO_2-differenzierte Maut in dem Szenario noch nicht greift, weil sowohl der Beschluss auf EU-Seite als auch die nationale Umsetzung nicht vorliegen.

[9] Zur Umrechnung auf nominale Preisaufschläge müsste der spezifische CO_2-Aufschlag eines Kraftstoffes im Jahr 2025 mit 1,22 multipliziert werden. Für Diesel beträgt der nominale CO_2-Aufschlag dann knapp 15 ct/l.

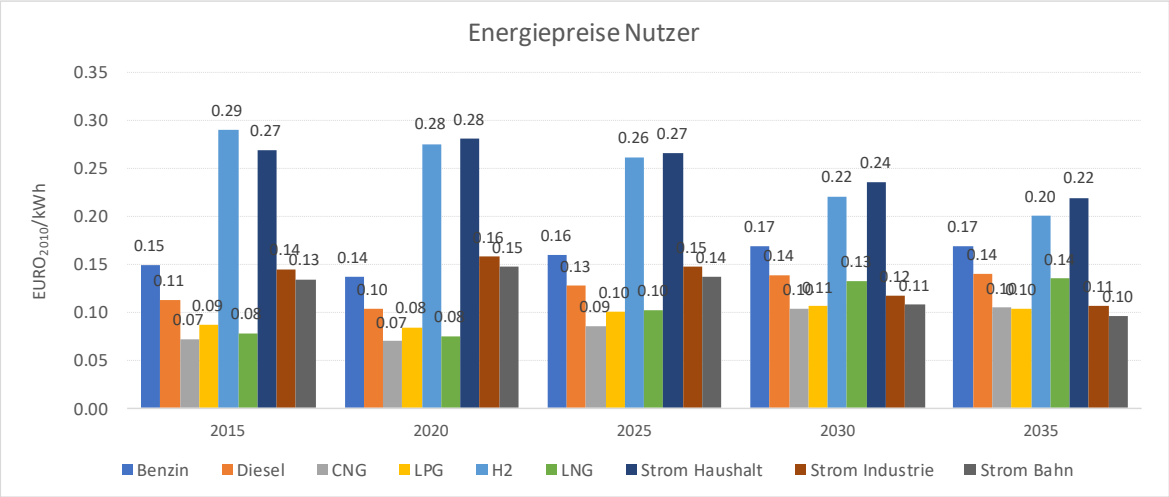


Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 28 Entwicklung der Einnahmen aus der CO_2-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 29 dargestellt. Es wird deutlich, dass Haushaltsstrom und H_2 die teuersten Energieformen darstellen, auch wenn deren Preise zukünftig sinken, während Preise für alle fossilen Flüssig- (Diesel, Benzin, LPG) und Gas-Kraftstoffe (CNG, LNG) zukünftig steigen. Damit nähern sich die Preise zwischen fossilen und erneuerbaren Energieträgern an. Industriestrom und Strom im Schienenverkehr liegen in 2035 im Vergleich der Energieträger sogar mit am niedrigsten. Der H_2-Preis verbessert sich am deutlichsten von 2015 bis 2035.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 29 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 deutlich reduziert und kam teilweise weitgehend zum Erliegen – insbesondere Pendelwege und Dienstreisen. Neben dieser Schockwirkung und den kurzfristigen Veränderungen hat die Pandemie einige langfristige Entwicklungen angestoßen.

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

1. Rückgang der Fahrleistungen im Personen- und Güterverkehr.
2. Langfristig mehr Homeoffice und weniger Dienstreisen.
3. Verschiebungen in der Modalwahl.
4. Einbruch des Konsums in mehreren kontaktbezogenen Sektoren (insb. Gastronomie, Kultur, Einzelhandel) und eine gewisse Zunahme einiger anderer Dienstleistungen, insbesondere IT- und Logistik-Dienstleistungen.
5. Rückgang der Neuzulassungen von PKW.
6. Deutlicher Rückgang des nationalen Luftverkehrs in den Jahren 2020 und 2021.
7. 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).
8. Rückgang des Außenhandels in den Jahren 2020 bis Mitte 2021 mit Effekten auf die Verkehrserzeugung im Güterverkehr.

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.

Die Modalwahl wurde im Sinne des Infektionsschutzes vielfach geändert. Trotz des absoluten Rückgangs aller Verkehrsträger kam es zu höheren Modalanteilen von PKW, Fahrrad sowie Micro-Sharing (z.B. Elektro-Roller).

PKW-Neuzulassungen sind in ASTRA-M im Jahr 2020 um etwa 500.000 zurückgegangen. 2021 erholen sie sich in der aktuellen Modellversion wieder weitgehend. Hier, wie auch an einigen anderen Stellen, stammt die konkrete Modellierung der Effekte aus einem relativ frühen Zeitabschnitt der Pandemie, in dem noch nicht absehbar war, wie lange sich die Pandemie hinziehen würde. Effekte auf den Gebrauchtwagenmarkt wurden nicht berücksichtigt.

Der Umstieg von Präsenzarbeit hin zu Homeoffice und Web-Meetings (die Dienstreisen ersetzen) kann in ASTRA-M differenziert nach Altersgruppen implementiert werden. Um eine Vergleichbarkeit mit dem PjB zu gewährleisten, wurde im Referenzszenario davon abgesehen einen langfristigen Rückgang der Pendel- und Dienstwege anzusetzen. Alternativ hätte ein konservativer Rückgang von etwa 4-6% der Pendel- und Dienstreisen angesetzt werden können, was einer relativ niedrigen Schätzung der verstetigten Effekte entspricht bereits aber zu einer substanziellen zusätzlichen THG-Minderung in REF-2020 gegenüber PjB führen würde. Wir halten Reduktionen von 10-20% der Wege für realistischer – diese sollten dann in der Modellierung mit weiteren Instrumenten, wie Recht auf eine bestimmte Anzahl Home-Office-Tage, verknüpft werden.

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. Die Effekte möglicher Verstetigungseffekte bis 2030 wurden in ASTRA-M simuliert, aber nicht als Bestandteil in REF-2020 integriert. Änderungen bei der Verkehrsmittelwahl haben sich vor allem im Jahr 2020 gerade im öffentlichen Verkehr deutlich bemerkbar gemacht. Faktoren wie Sicherheit oder Sorgen um die eigene Gesundheit lassen sich üblicherweise in Verkehrssimulationsmodellen nicht adäquat darstellen. 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.

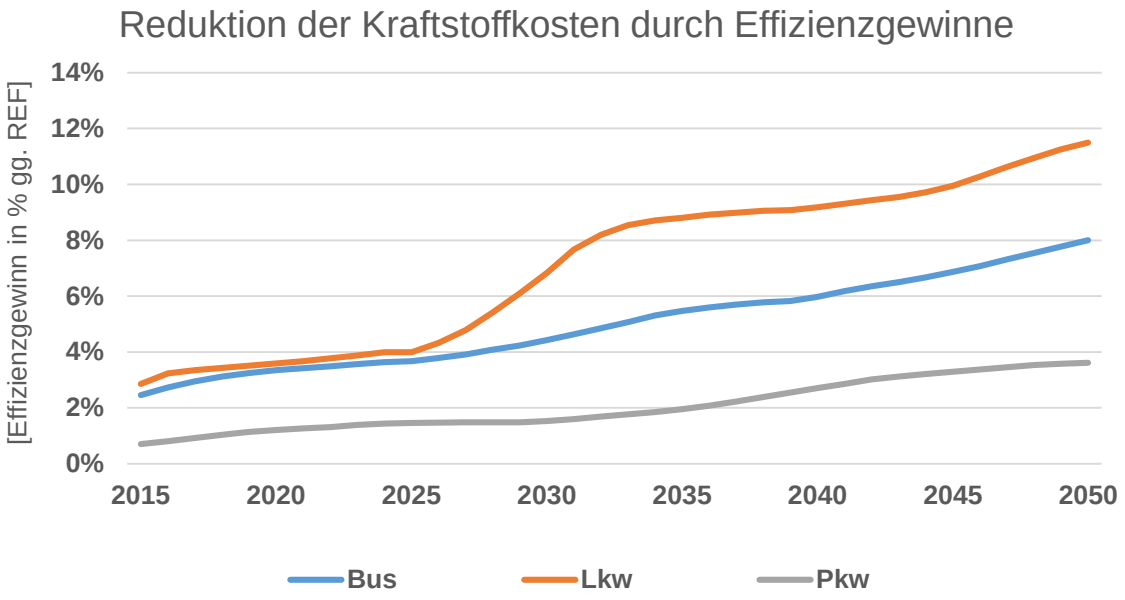
4.11 Die Effekte der Automatisierung im Verkehr

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). Sie sind im REF-2020 jedoch nicht berücksichtigt, weil bis zum Stichtag des REF-2020 zum Teil die Instrumentierung noch nicht vorlag, die für die Realisierung der Potenziale notwendig sind. So ist beispielsweise die Einführung der Automatisierungsstufe 4 zum Stichtag gesetzlich geregelt, aber die Nutzung der elektronischen Deichsel (Platooning) beim Lkw zur Verbesserung der Energieeffizienz bei Lkw durch verbesserte Aerodynamik durch die Abstandsregelung in der StVO noch nicht im nötigen Umfang erlaubt. Gerade Platooning ist bei den Anteilen des Lkw an den Potenzialen der Automatisierung und Vernetzung ein wichtiger Bestandteil. Die weiteren Potenziale der Automatisierung und Vernetzung sind in diesem Kapitel zwar aufgeführt, aber auch aus Gründen der Unsicherheit über die Wirkungen der Corona-Pandemie noch nicht im REF-2020 berücksichtigt. Der Corona-bedingte Halbleitermangel kann sich auch auf die Einführung der Automatisierungsstufen auswirken, was zum Zeitpunkt der Erstellung des REF-2020 jedoch noch nicht absehbar war. Daher wurden die Potenziale nicht berücksichtigt, sollen aber zum Verdeutlichen der Optionen bei Umsetzung der erwähnten Instrumente und falls die Technologieeinführung auf den Zeitpfad aus der zugrundeliegenden Studie zurückgeht, zumindest im vorliegenden Kapitel beschrieben sein.

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 Markthochlaufszenarien aus der 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.

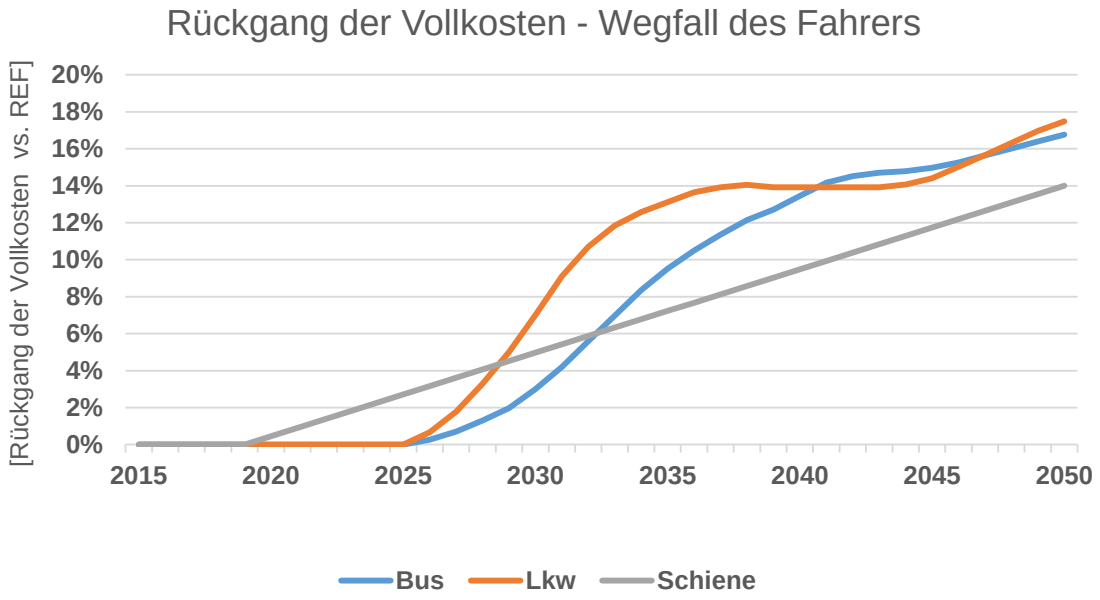
Die Transport- bzw. Reisekosten im Straßenverkehr ändern sich durch die Automatisierung und Vernetzung zum einen durch die Effizienzpotenziale des automatisierten und vernetzten Fahrens anhand des prognostizierten Markthochlaufs. Abbildung 30 zeigt die für die Berechnung der verkehrlichen Wirkungen verwendete Reduktion der Kraftstoffkosten für PKW, LKW und Busse. Für alle anderen Verkehrsträger (Schiene und Binnenschiff) neben der Straße wurden ebenfalls identische Effizienzpotenziale bis zum Jahr 2050 angenommen.



Quelle: Krail et al. (2018).

Abbildung 30 Reduktion der Kraftstoffkosten durch primäre Effekte in beiden Szenarien gegenüber REF

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 mit dem Jahr 2025 angenommen. Die resultierende prozentuale Abnahme der Vollkosten bei Einführung der Automatisierungs-Technologie ist in Abbildung 31 dargestellt. Hier wird bei der Berechnung der verkehrlichen Wirkung durch Automatisierung im Vergleich zu REF-2017 ein Rückgang der Vollkosten auf der Schiene durch eine zunehmende Automatisierung angenommen.



Quelle: Krail et al. (2018).

Abbildung 31 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.

Der Bewertung des Zeitverlusts 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 eine resultierende Steigerung des Beladungsfaktors bei SNF und LNF bis maximal 2,5% im Jahr 2050 berücksichtigt.

5 Berücksichtigung von Instrumenten in REF-2020

REF-2020 baut auf REF-2017 auf (Schade et al. 2018). D.h. Instrumente aus REF-2017 sind in REF-2020 auch enthalten. Teilweise wurden die Instrumente zwischen 2017 und 2020 modifiziert oder in ihrer Laufzeit verlängert, wie z.B. die Kaufprämie für E-PKW, die durch die Innovationsprämie 2020 und 2021 erhöht und bis 2024 gegenüber dem Status des ersten Beschlusses von 2017 verlängert wurde.

Der Stichtag für das neue Referenzszenario ist 31. August 2020. D.h. alle bis zu diesem Datum beschlossenen und nicht nur als flankierend eingestuften Instrumente wurden in der Modellierung mit ASTRA-M implementiert.

5.1 Liste der Instrumente im Referenzszenario (REF-2020)

Tabelle 8 listet alle Instrumente auf, die Bestandteil des Referenzszenarios sind.

Tabelle 8: Maßnahmen des MKS-Referenzszenarios (REF-2020)

			Wirkung		
No.	**Maßnahme**	**Verkehrs-träger/-mittel**	**Start**	**Ende**	**Ursprung / Erläuterung**
1	CO_2-Standards für PKW-Neuwagen (37,5% Reduktion ggü. 95g(NEFZ))	PKW	2021		EU VO 2019/631, Diffusion auch nach 2030, Umstel. NEFZ auf WLTP
2	CO_2-Standards leichte Nutzfahrzeuge (31% Reduktion ggü. 147g(NEFZ))	LNF	2021		EU VO 2019/631, Diffusion effizienterer LNF auch nach 2030
3	CO_2-Standards für LKW (30% Reduktion bis 2030)	SNF	2021		EU VO 2019/1242, Diffusion effizienterer LKW auch nach 2030+
4	BEHG CO_2-Preis	Alle	2021		Pfad 25-65-125-150 €/t
5	Erhöhung Entfernungspauschale auf 35 ct/km bis 2023, dann 38 ct/km	PV	2021	2026	KSPr-2019
6	Bundesverkehrswegeplanung (BVWP)	Alle	2016	2030	Auch Maßnahmen nach 2030 (Scheine nur teilweise), Erhaltung vollständig umgesetzt
7	Steuerermäßigung von Erdgas (CNG, LNG) bis 2026, von LPG bis 2019	Straße	2018	2026	Ermäßigung ohne Unterbrechung bis 2024, dann abschmelzen
8	Sonderabschreibungen E-Fahrzeuge	PKW, LNF	2019		50% des Kaufpreises im ersten Jahr (LNF erst ab 2020)
9	Förderung E-Mob (Kaufprämie plus flankierende Maßnahmen)	PKW	2016	2026	Prämie für PHEV nur bis 2024, maximal für PKW bis 60 k€ Basispreis, Innovationsprämie 2020 & 2021
10	Differenzierung KFZ-Steuer (mit zwei Schwellenwerten und Kostensätzen)	PKW	2021		KSPr-2019, verankert 06/2020 im Konjunkturprogramm (bis plus 2€/g)
11	Verlängerung der KFZ-Steuerbefreiung für E-PKW	PKW	2016	2030	KSPr-2019, Jahressteuergesetz 2019
12	Absenkung Dienstwagenbesteuerung nach Listenpreis von i = 1% p.M.	PKW	2019		In 2019 Senkung auf i = 0,5% (BEV, PHEV, FCEV), in 2020 auf i=0,25% (BEV, FCEV), KSPr-2019
13	Gesetz zur Bevorrechtigung des Carsharing (Carsharinggesetz - CsgG)	PKW	2017		Reservierung von Stellplätzen für CS
14	LNF-Förderung: 40% der Mehrkosten für E-Fahrzeuge	LNF	2020	2024	KSPr-2019, EEN-Förderung (80% Förderquote noch nicht notifiziert)
15	LKW-Förderung: 40% der Mehrkosten für E-LKW, Gas-LKW bis 2022	SNF	2018	2022	KSPr-2019, EEN-Förderung (80% Förderquote noch nicht notifiziert)
16	LKW-Maut mit Tarifen von 2019	SNF	2019		Dauerhaft eingestellt – CO_2-differenzierte Maut nicht Teil von Ref-2020

17	LKW-Maut-Befreiung für Nullemissions-LKW, sowie Gas-LKW, danach 1,1 Ct/km Rabatt für Gas-LKW	SNF	2019	2022	Gas-LKW offiziell befreit bis 2023, wegen EU-Einschränkungen aber 2022 als Ende angenommen
18	Lang-LKW/Giga-Liner: Ausweitung des Positiv-Netzes	SNF	2017		In mehreren Stufen, in Summe 1% Verbesserung Beladungsfaktor
19	Weiterentwicklung/Erprobung elektrischer Antriebe bei NFz (Förderung von Forschungs- bzw. Demo-Vorhaben)	SNF	2017	2022	KSPr-2019, NPM/BMVI NFz-Fahrplan (daraus Innovationskorridor, z.B. 300km OH-LKW Pendelstrecke)
20	Förderung privater Ladesäulen 20% in 2020, 30% in 2021 & 2022	SNF	2020	2022	KSPr-2019. Angenommen etwa 0,9 Mrd € von 1,6 Mrd. €
21	Einführung Deutschlandtakt mit erster Etappierung	Schiene PV	2025		Zeitersparnis 5% gegen BVWP-Bezugsfall, Erweiterung auf 10% möglich bei vollständiger Umsetzung
22	Mehrwertsteuersenkung im Schienenpersonenfernverkehr von 19% auf 7%	Schiene PV	2021		Entspricht einer Preisreduktion von etwa 10%
23	Senkung der EEG-Umlage und Stromsteuer für den Schienenverkehr	Schiene	2022		Reduktion der Gesamtkosten um 4,4% im Fernv., 3% im Nahverkehr
24	Senkung der EEG-Umlage in 2020 und 2021, und Abschmelzen bis 2030	Alle	2020	2030	Abweichend von politischer Beschlusslage (diese hätte nur Deckel 2020 und 2021 beinhaltet)
25	Weitere Elektrifizierung des Schienennetzes	Schiene	2020	2030	2030: 3-5% Traktionsleistung mit Diesel (PV), 2-3% im GV
26	Investitionsmittel des Bundes in die Fahrradinfrastruktur	Fahrrad	2020	2022	KSPr-2019, 900 Mio. € inkl. Sonderprogrammen
27	Verstärkte Nutzung Pedelecs	Fahrrad	2020	2030	Zusammen mit Ausbau Infrastruktur verkürzte Fahrzeiten (bis 10km: 2025 -12%, 2030: -20%)
28	Elektrifizierung der Linien-Busflotte	ÖPNV	2021	2030	KSPr-2019, 40% E-Busse in 2030, 1,6 Mrd. €
29	Maßnahmenbündel ÖPNV	ÖPNV	2020	2030	Fahrzeitverbesserung um -1 bis -3% für Bus und SPNV
30	Bereitstellung von Regionalisierungsmitteln (8,2 Mrd. € 2016, +1,8% p.a. ab 2017)	ÖPNV / SPNV	2016	2031	Ein Impuls für Zuwachs Schiene
31	Reduktion der Trassenpreise	Schiene GV	2019		Fixer Betrag zur Reduktion. Effektive Reduktion der Tarife -40%
32	ETCS teilweise Implementierung bis 2030	Schiene GV	2021		Graduelle Kostenreduktion
33	740m-Gleise	Schiene GV	2021		Graduelle Verbesserung der Zugbehängung und damit der Zugbeladung
34	Verstärkte Förderung des Kombinierten Verkehrs	Schiene GV	2022	2024	Graduelle Kostenreduktion bis -3%, erweiterte Märkte => höhere Beladungsfaktoren
35	Aufbau Schnellladesäulen-Infrastruktur (300 Mio. € Programm, mindestens 15.000 Schnell- und Normalladesäulen zusätzlich)	PKW, LNF	2017	2020	Beinhaltet auch Infrastruktur an BAB
36	Sofortprogramm Seehafenhinterlandverkehr II	Schiene GV	2017	2021	124 Mio € Investition in SGV-Anlagen (auch Inland)
37	Abschaffung der Kanalgebühren für die Binnenschifffahrt	BiSchi	2021		KSPr-2019, 45 Mio. € Kostenersparnis
38	Erneuerbaren Direktive von 2018 (EU RL 2018/2001)	Alle	2021	2030	Erfüllung aller Ober- und Unterquoten ohne nationale Umsetzung
39	Biogas: zusätzliche Produktion und Nutzung in 2030	SNF, PKW	2028	2030	Zusätzlicher Aufbau von 6 PJ zur Befriedigung Quote in 2030

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

Die Vereinfachung der EEG-Umlage 2021 z.B. zur Herstellung von grünem H_2 ist nicht Teil des Referenzszenarios, da diese nach dem Stichtag beschlossen wurden.

5.2 Reisezeitreduktion in ÖPNV und Fahrrad-Verkehr

Die Inputdaten zur Reduktion der ÖPNV-Reisezeiten basiert auf Herleitungen zur Wirkungsermittlung im damaligen Bereich Nahmobilität 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 Netzmodel von PTV Validate umgelegt.

Die den einzelnen Instrumenten zugeordneten Auswirkungen auf nachfragbeeinflussende 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 wurden[10]. Die Reisezeitersparnis im ÖPNV setzte sich zusammen aus der Überlagerung verschiedener Maßnahmen, die aus den Instrumenten abgeleitet wurden und Angebotserweiterung (neue Linien), betriebliche Maßnahmen (Taktverdichtungen), Beschleunigungen im Betrieb (u.a. durch Automatisierung und Bevorrechtigung) und verbesserte Anbindung (Zubringerverkehrs, P+R) enthalten.

Die (empfundenen) 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 Schienenverkehrssystem positiver wahrgenommen wird („Schienenbonus“).

Die Abschätzung der durch die Instrumente ausgelösten mittleren Zeitersparnis 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 Ausbau des Netzes zu einer starken Fahrtzeitreduktion auf einzelnen Relationen sowie zu einem ergänzenden Effekt durch den Schienenbonus.

[10] Vgl. u.a. https://www.region-stuttgart.org/aufgaben-und-projekte/verkehrsplanung/regional-verkehrsplan/?noMobile=1

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. Zusammen mit der verbesserten Infrastruktur führt die „Pedelecisierung“ zu deutlich verringerten Fahrzeiten auf Distanzen bis 10km Entfernung.

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 als Maximalwerte anzusehenden Reisezeitreduktionen entsprechend der jeweiligen Betrachtungsfälle in geringerem Umfang angesetzt. Tabelle 9 fasst die Veränderungen im urbanen und regionalen Verkehr mit ÖPNV und aktiven Verkehrsmitteln zusammen.

Tabelle 9: Verbesserung der Fahrzeiten durch die Instrumente im Personennah- und -regionalverkehr (REF-2020)[11]

Verkehrs-mittel	Wege-Distanz	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Bus	<2k	0.0%	-0.4%	-0.7%	-1.1%	-1.5%	-1.8%	-2.1%	-2.4%	-2.7%	-3.0%
	2-10km	0.0%	-0.4%	-0.7%	-1.1%	-1.5%	-1.8%	-2.1%	-2.4%	-2.7%	-3.0%
	10-50km	0.0%	-0.1%	-0.2%	-0.3%	-0.4%	-0.5%	-0.6%	-0.7%	-0.8%	-0.9%
Tram, S-/U-Bahn, Regional-zug	<2k	0.0%	-0.4%	-0.7%	-1.1%	-1.5%	-1.8%	-2.1%	-2.4%	-2.7%	-3.0%
	2-10km	0.0%	-0.4%	-0.7%	-1.1%	-1.5%	-1.8%	-2.1%	-2.4%	-2.7%	-3.0%
	10-50km	0.0%	-0.1%	-0.2%	-0.3%	-0.4%	-0.5%	-0.6%	-0.7%	-0.8%	-0.9%
Fahrrad	<2k	-4.6%	-6.4%	-8.2%	-9.9%	-11.7%	-13.2%	-14.7%	-16.1%	-17.6%	-19.0%
	2-10km	-4.6%	-6.4%	-8.2%	-9.9%	-11.7%	-13.2%	-14.7%	-16.1%	-17.6%	-19.0%
	10-50km	-1.4%	-1.9%	-2.5%	-3.0%	-3.5%	-4.0%	-4.4%	-4.8%	-5.3%	-5.7%
Zu Fuß	<2k	-1.0%	-1.5%	-2.0%	-2.5%	-3.0%	-3.4%	-3.8%	-4.2%	-4.6%	-5.0%
	2-10km	-1.0%	-1.5%	-2.0%	-2.5%	-3.0%	-3.4%	-3.8%	-4.2%	-4.6%	-5.0%

Quelle: M-Five, PTV, ISI

5.3 Hinweis auf Maßnahmen in Ergänzung zum Referenzszenario

Seit dem Stichtag August 2020 sind bis heute einige ergänzende Maßnahmen beschlossen worden, so auch die Zielverschärfung für den Verkehr durch das KSG-neu. Diese Maßnah-

[11] Die Instrumentierung stammt teilweise aus den Expertendiskussionen in der NPM während der Entwicklung des KSPr-2019 (NPM 2019). Allerdings fallen die seither beschlossenen Instrumente weniger ambitioniert aus, so dass in REF-2020 nur ein Teil der Zeit und Kosten-Verbesserungen hinterlegt wurde.

men sollten als ein erstes Instrumentenpaket oder Zwischenbündel (ZB) definiert und bewertet werden. Die Untersuchung von weiteren Klimaschutzmaßnahmen für den KSPr+ sollte auf dem Referenzszenario zuzüglich der Ergänzungen aus dem ZB aufbauen.

Beispiele für solche Maßnahmen sind die Förderung für alternative Nutzfahrzeuge in Höhe von 80% anstatt 40% der Mehrkosten für Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben gegenüber einem dieselbetriebenen Fahrzeug, die Verlängerung der Innovationsprämie bis Ende 2022 bei gleichzeitiger Deckelung der Umweltprämie auf 4,96 Mrd. € und damit Auslaufen der Prämie spätestens Ende 2022 und die Erhöhung der Fördermittel für den Aus- und Aufbau der Tank- und Ladeinfrastruktur von alternativen PKW und LKW auf 5,6 Mrd. €.

6 Referenzszenario PKW-Flotte

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung (Kapitel 6.3) und die Entwicklung der PKW-Flotte nach Segmenten und Antriebsarten (Kapitel 6.4). PKW unterliegen den im REF-2020 berücksichtigten Instrumenten, die dem vorherigen Kapitel zu entnehmen sind. Insbesondere die CO_2-Standards für PKW-Neuwagen für das Zieljahr 2030, die Kaufprämie für elektrifizierte PKW und die Anpassungen bei der Dienstwagensteuer sind zu erwähnen. Weitere zentrale Bausteine für die Antriebsstruktur der PKW-Flotte sind der Modellhochlauf von E-PKW, d.h. insbesondere die Verfügbarkeit eines vielfältigen Modellangebots rein batterieelektrischer PKW (BEV) und hybrider PKW mit externer Stromzuführung (PHEV) in den verschiedenen Segmenten, und die Entwicklung der Batteriekosten und -technologie (Kapitel 6.1). 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, 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 aber 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, 2021) hat vier Bauteile von E-PKW identifiziert, die Potentiale zur Kostensenkung aufweisen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: 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 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 Generationen befinden sich heutige Batterien im Entwicklungsprozess hin zu einem höheren Zellvolumen und -gewicht pro Batteriepack[12], einer erhöhten Energiedichte[13] und geringerem Stromverbrauch, höherer kontinuierlicher spezifischer Leistung und Spitzenleistungsdichte[14], 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.

---

[12] 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 Zellengewicht pro Akkupackgewicht, desto höher ist die spezifische Energie des Akkus. Innovationen in Leichtbau und Funktionsintegration können diesen Wert verbessern.

[13] „*Die Energiedichte ist eine relative Energiegröße, 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.

[14] Kontinuierliche spezifische Leistung bezieht sich auf eine Dauerfahrsituation 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.

Zylindrische Zellen mit NCA-Kathoden und Silizium/Graphit-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 chinesischen Unternehmens Contemporary Amperex Technology Ltd (CATL) gemeldet wurde, beträgt 304 Wh/kg. Dieser Akku soll ein flaches prismatisches Design besitzen, im Gegensatz zu den von Tesla verwendeten zylindrischen Modellen (Faraday Institution, 2020).

Tabelle 11 zeigt eine Übersicht über Batterie- und Fahrzeugparameter zum Zeitpunkt der Entwicklung von REF-2020 sowie deren anvisierte Entwicklung bis 2030.[15]

[15] Die seit dem 2.Quartal 2022 sich abzeichnenden Rohstoffknappheiten bei Batterierohstoffen sind in den dargestellten Kostenentwicklungen und den Fahrzeugpreisen in REF-2020 noch nicht berücksichtigt, da zum Abschneidezeitpunkt 31.8.2020 und während der Finalisierung der Modellierung Ende 2021, die durch den Russland-Ukraine Krieg ausgelösten Entwicklungen noch nicht absehbar waren.

Tabelle 11: Entwicklung von Batterie- und Fahrzeugcharakteristika von BEV

Zellebene	Einheit	Durchschnitts-wert 2019	Zielwert 2030 (400km Reich-weite)	Zielwert 2030 (>600km Reich-weite)	Quelle
Energiedichte	Wh/kg	250	450	450	eucar (2019), Tabelle 1
Energiedichte	Wh/l	500	1000	1000	
Kontinuierliche spe-zifische Leistungs-dichte	W/kg	750	1000	1000	
	W/l	1500	2200	2200	
Spitzenleistungs-dichte	W/kg	500 | 1500 (-25°C | +25°C)	600 | 1800 (-25°C | +25°C)	600 | 1800 (-25°C | +25°C)	
	W/l	1000 | 3000 (-25°C | +25°C)	1300 | 4000 (-25°C | +25°C)	1300 | 4000 (-25°C | +25°C)220	
Kosten	€/kWh	220	70	70	
Batteriepaket	**Einheit**	**Durchschnitts-wert 2019**	**Zielwert 2030 (400km Reich-weite)**	**Zielwert 2030 (>600km Reich-weite)**	**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 Zellkos-ten	+20% der Zellkos-ten	+15% der Zellkos-ten	

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	BloombergNEF (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[16] 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

[16] 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.

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).

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
- Batteriepaket aus mehreren Modulen mit Steuerung und ggf. Kühlung

Eine Zusammenstellung über die mögliche Entwicklung von Batteriekosten verschiedener Studien ist Tabelle 12 zu entnehmen. Der Break-Even Point eines Lithium-Ionen-Akkus ist etwa ab etwa 100 $/kWh bzw. knapp 80 $€_{2010}$ /kWh erreicht (ICCT, 2019).

Tabelle 12: Entwicklung von Batteriekosten 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 bietet schon heute Batterien mit 100 kWh an (Model S). 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. 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-2020 im Jahr 2025. Diese Einschätzung wird von verschiedenen Studien geteilt (BlombergNEF, 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 in 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 massiv verstärkt werden. Auf europäischer Ebene bildet die Richtlinie „Alternative Fuels Infrastructure Directive“ (AFID) den Rechtsrahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (EU-Richtlinie 2014/94).

Sowohl die öffentliche Ladeinfrastruktur als auch nichtöffentliche 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 nichtöffentlicher 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 (2019) nimmt je nach Entwicklung ein Verhältnis von privater zu öffentlicher Ladeinfrastruktur von 60:40 bis 85:15 Prozent 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-2030 beim Energie nachladen/-tanken noch besser als bei E-PKW.

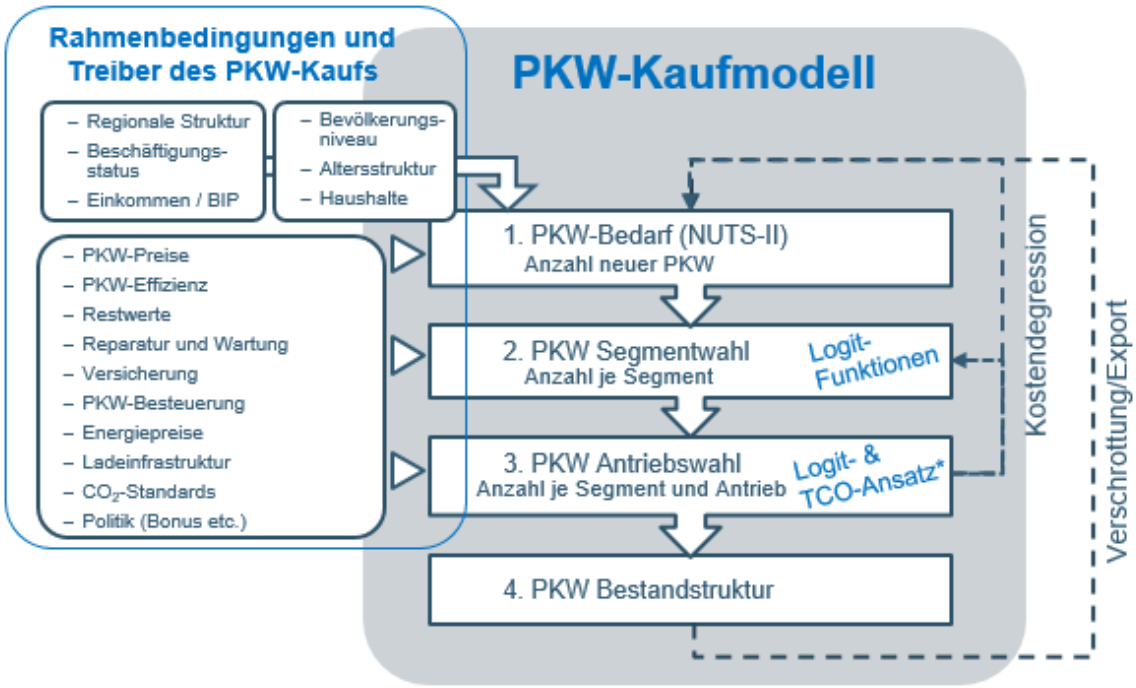
Wir erwarten für REF-2020 durch politische Beschlüsse und monetäre Mittel abgesichert einen dynamischen Hochlauf der Ladeinfrastruktur. Durch die Attraktivität der Ladung zu Hause oder am Arbeitsplatz wird das Gesamtsystem wenig von öffentlichen Ladepunkten abhängig sein. Ist die Wirtschaftlichkeit der Ladeinfrastruktur durch signifikante Bestände an E-PKW gewährleistet, übernimmt die Industrie ihren Aufbau überwiegend. 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 CO_2-Zertifikaten im Rahmen der Erfüllung der THG-Quoten bei fossilen Kraftstoffen erzielen (Co-Benefit). Aus diesen Gründen setzt REF-2020 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, 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), 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 32) und die Bestandsmodellierung (siehe Abbildung 33).

Die Nachfrage nach Neuwagen (Abbildung 32) 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 6.3.4 beschriebenen Gesamtbetriebskosten (TCO) ein. Die Modellierung in REF-2020 wurde für die Antriebswahl gewerblicher PKW-Käufer um einen TCO-Ansatz erweitert. Auf diese Weise wird Käufern Rechnung getragen, die rein ökonomischen Interessen folgen. Darüber hinaus bestimmen Verfügbarkeit von Tank- und Ladestationsinfrastruktur und die weitere Förderung die Attraktivität einzelner Antriebe. Dadurch ergeben sich im Zeitverlauf Diffusions- bzw. aus Sicht der Elektromobilität Markthochlaufszenarien für die verschiedenen Technologien.



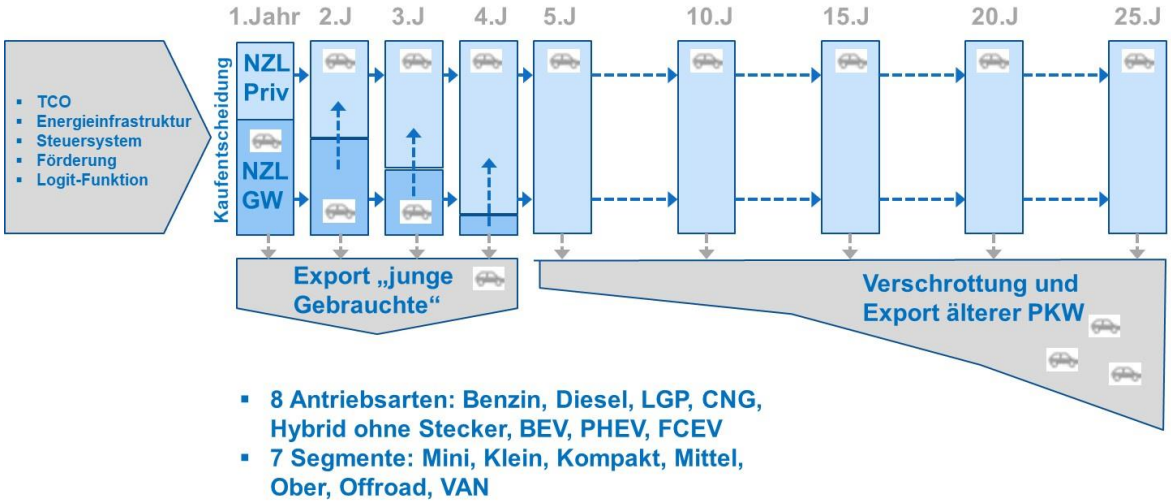
* TCO-Ansatz nur bei gewerblichen Nutzern

Quelle: M-Five.

Abbildung 32 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 33): (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 der 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.

Abbildung 33 Aufbau des PKW-Kohortenmodells in REF-2020

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 McFadden[17]) 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 des REF-2020 wurde die Modellierung der Antriebsart für gewerbliche Käufer um einen reinen TCO-Ansatz ergänzt. Die Verteilung der Neuzulassungen auf die Antriebsarten erfolgt bei gewerblich beschafften PKW demnach mittels eines zweiteiligen Kaufentscheidungsmodells:

- 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.

[17] 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, unterschiedliche Käuferverhalten abzubilden. TCO- und Logit-Modell nutzen weitgehend identische Eingangsgrößen, die im späteren Verlauf dieses Kapitels erläutert werden. Der größte Unterschied 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 alleinig Anschaffungs-, Betriebs- und Kraftstoffkosten hinzu. Zu Grunde liegt die Annahme eines rationalen Entscheidungsprozesses bei einem Teil der gewerblichen PKW-Käufern, 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 Inputgrößen wurden in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben. Die Logitfunktion für die Wahrscheinlichkeit P, dass ein PKW vom Typ i zum Zeitpunkt t gekauft wird, lautet wie folgt:

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

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

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

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 aus Matrix Segment X 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. Die Modellierung der PKW-Kosten wird in Kapitel 6.3.4 detailliert erläutert. 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 bestimmt 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 bestimmter Segment-Antriebsstrangkombinationen.

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 der Logit-Funktion abgebildet.

6.3.3 Dekompositionsanalyse der Treiber des Hochlaufs von E-PKW

Durch eine Dekompositionsanalyse lässt sich der Absatz von elektrifizierten PKW bis 2030 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 CO_2-Standards für 2030 stattgefunden hätte (d.h. wie in REF-2017 in Schade et al., 2018), aber unter Berücksichtigung der in den letzten drei 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.
- Der Absatz, der durch **Instrumente auf der Angebotsseite** (insbesondere CO_2-Standards für 2030 von -37,5%) angereizt wird sowie 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 CO_2-Standards Regulierung.

Für die Dekompositionsanalyse werden in ASTRA-M die jeweiligen Instrumente ein- bzw. ausgeschaltet und die von 2022 bis 2030 kumulierte Differenz des Bestandes der E-PKW zwischen Mit- und Ohne-Fall gebildet. Es zeigt sich, dass bei einem Zielwert der CO_2-Standards von -37,5% die autonome Entwicklung aufgrund der sinkenden E-PKW-Preise und der moderaten Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur mit dem Absatz von 3,6 Millionen E-PKW den größten Beitrag leistet (siehe Abbildung 34).[18]

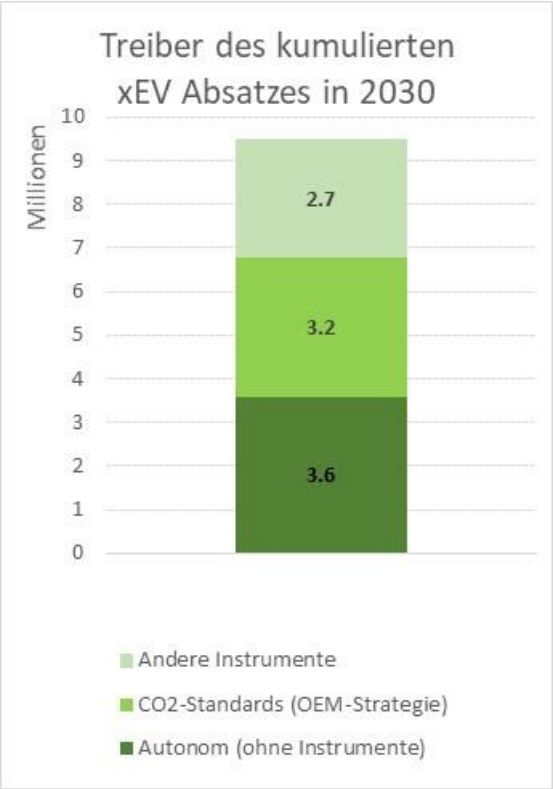
Auf die CO_2-Standards, welche die Angebotspolitik der OEM bestimmen und, sollte der Modellhochlauf in allen Segmenten (siehe Haug/Schade, 2021; NPM, 2021) nicht ausreichen, ggf. auch spezifische Marketing- und Rabatt-Strategien der OEM zum Zeitpunkt der Zielerreichung in 2030, entfällt mit 3,2 Millionen E-PKW der zweitgrößte Beitrag. Hier ist anzumerken, dass bei ambitionierteren Zielwerten für die CO_2-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 2,7 Millionen E-PKW, Damit lässt sich in REF-2020 der drittgrößte Anteil der Neuzulassungen von 2021 bis 2030 durch die ergriffenen Instrumente erklären. Die Instrumente beinhalten die CO_2-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 CO_2-emittierende PKW und die Kaufprämie für E-PKW bis Ende 2024[19] (siehe auch Kapitel 5).

---

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

[19] Die Gestaltung der Kaufprämie wurde gemäß Klimaschutzprogramm 2019 (KSPr-2019) festgelegt. Die Gestaltung der Kaufprämie wurde seither zwei Mal verändert, zum einen durch Einziehen einer Obergrenze von 4,96 Mrd. €, welches im Prinzip zum Auslaufen der Prämie in 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-2020 werden diese Anpassungen der Kauf- und Innovationsprämie berücksichtigt.



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

Abbildung 34 Dekompositionsanalyse des E-PKW Absatzes bis 2030

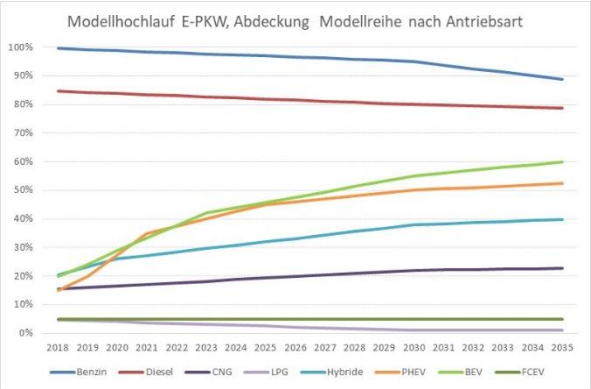
Der Modellhochlauf, d.h. die Abdeckung der verschiedenen Modellreihen mit einem Angebot an E-PKW, ist von den Experten der Nationalen Plattform Mobilität der Zukunft (NPM) als zentraler Faktor für steigende Absatzzahlen elektrifizierter PKW identifiziert worden (NPM 2021). Solange während der 2010er Jahre in wichtigen Segmenten des deutschen PKW-Marktes kein Angebot an E-PKW verfügbar war, konnte ein substanzieller Markthochlauf nicht stattfinden. In 2020 stieg der Absatz von E-PKW in Deutschland auf 394,940 eine Vervierfachung von 108,837 in 2019. In 2021 erreichten die Neuzulassungen von E-PKW dann 700,440 (Zahlen nach KBA FZ28, 2021). 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.

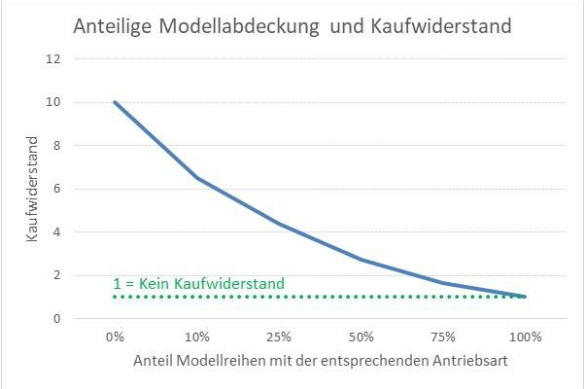
Abbildung 35 (linke Seite) zeigt die Heuristik der Verfügbarkeit nach Antriebsarten über alle Modellreihen und Segmente in ASTRA-M. PKW mit Benzinantrieb waren 2018 noch in allen Modellreihen vertreten und liegen daher bei 100%. Dieselantriebe wurden im Mini-Segment und in Sportwagen nicht eingesetzt und erreichen deshalb keine 100%. Ab 2019 treten Modellreihen auf, die nur noch mit E-Antrieben ausgestattet sind (z.B. VW ID-Reihen, auch Folgen der steigende Absatzzahlen von Tesla), so dass auch Benzin keine 100% Abdeckung aller Modellreihen mehr aufweist und auch hier die Abdeckung bis 2030 kontinuierlich 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 hö-

heren Zielwerten als -37,5% in REF-2020 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 ihres Beitrags zur Erreichung der CO_2-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 35 ist die Funktion für den Kaufwiderstand dargestellt mit der die Verfügbarkeit einer Antriebsart im PKW-Angebot in die Kaufentscheidung eingeht. Der beste Wert (=1 in grün) hat keinen dämpfenden Einfluss auf die Kaufentscheidung. Markt-Abdeckungen über 80% wirken sich ebenfalls nur 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 CO_2-Standards lässt sich auf die Anreizung der OEM, ein zusätzliches Modellangebot anzubieten, zurückführen.

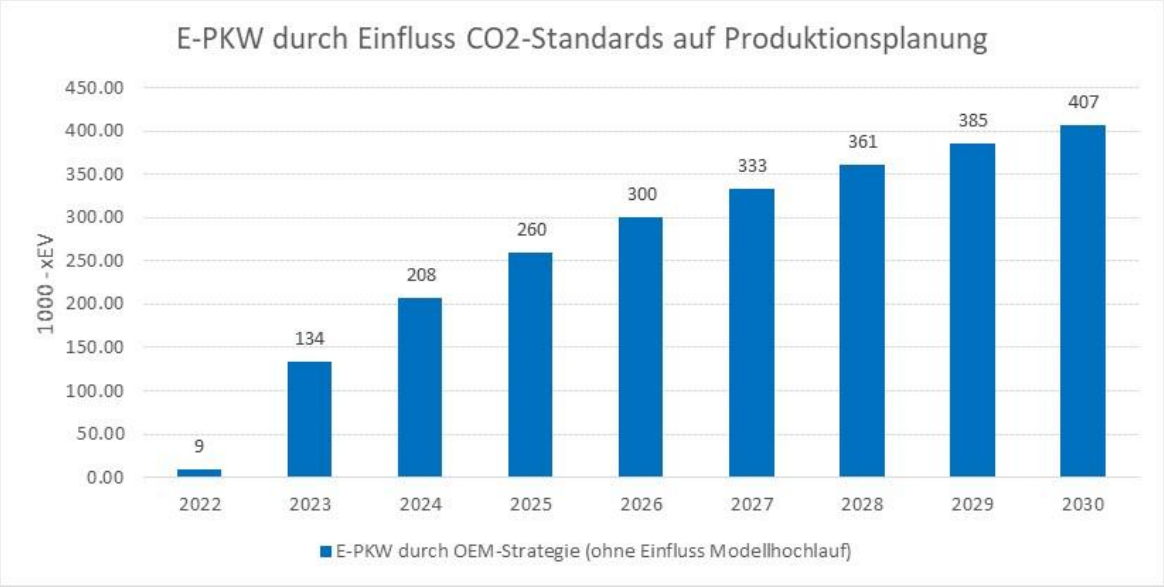




Quelle: M-Five, ASTRA-M, eigene Analysen basierend auf (NPM 2021, Haug et al. 2021).

Abbildung 35 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 abgeleitet für den Einfluss der Höhe der CO_2-Standards auf den Absatz an E-PKW in Deutschland in Verbindung mit E-PKW-Bestandszielen für 2030. CO_2-Standards in der Höhe von -40% und E-PKW-Bestände in 2030 von etwa 10 Millionen wie in REF-2020 lassen sich noch mit linearen Hochläufen aus dem Beitrag der OEM-Strategie erreichen. Darüber hinausgehende CO_2-Standards und Bestands-Ziele erfordern logarithmische Hochläufe mit frühzeitigem Aufwuchs der E-PKW Neuzulassungen. Abbildung 36 zeigt den mit der Heuristik ermittelten Beitrag des CO_2-Standards von -37,5% zum Hochlauf der E-PKW.



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

Abbildung 36 Einfluss CO_2-Standards auf Produktionsplanung und E-PKW-Absatz

Die Dekompositionsanalyse zeigt die Bedeutung der einzelnen Komponenten (autonomer Absatz, Instrumente, Modellpolitik, CO_2-Standards) für den Bestand an E-PKW in Deutschland in 2030. Jede Komponente kann sich in weiteren Politik-Szenarien deutlich verändern durch ambitioniertere Instrumente, schnellere Hochläufe mit zusätzlichen Skalen- und damit Kostensenkungseffekte, ein weiter verbessertes Modellangebot (oder auch weiter verschlechterte Modellangebote an Verbrennern) oder ambitioniertere Zielsetzungen der CO_2-Standards.

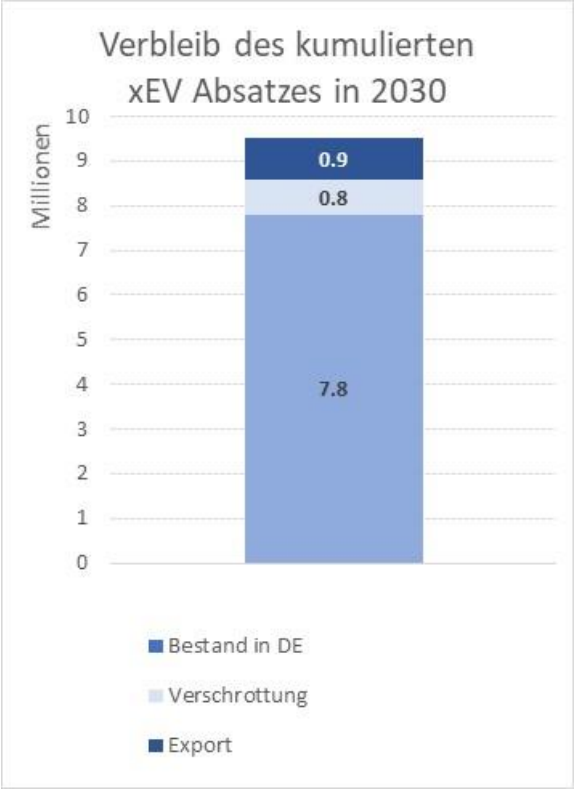
Bis 2030 werden in Deutschland etwa 9,5 Mio. E-PKW abgesetzt. Im Bestand in 2030 verbleiben aber nur knapp 7,8 Mio. E-PKW. Zur Beantwortung der Frage über den Verbleib der fehlenden 1,7 Mio. (etwa 18%) soll eine weitere modellgestützte Dekompositionsanalyse Aufschluss geben. Diese unterscheidet drei Größen:

- Den Bestand an E-PKW in 2030 (knapp 7,8 Mio. E-PKW).
- Den Export von E-PKW als junge Gebrauchte (d.h. bis zu 4 Jahre nach Neuzulassung) im Zeitraum 2022 bis 2030.
- Die Verschrottung von E-PKW im Zeitraum 2022 bis 2030.

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 0,9 Mio. in Deutschland erstmalig neu zugelassener E-PKW wieder als junge Gebrauchte (1-4 Jahre alt) exportiert worden sein, sowie 0,8 Mio. bereits verschrottet worden sein (siehe Abbildung 37). Trotz Neuzulassungen von fast 9,5 Mio. E-PKW von 2022 bis 2030 ergibt sich unter Berücksichtigung von Export und Verschrottungen dann ein Bestand von 7,8 Mio. E-PKW.



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

Abbildung 37 Dekompositionsanalyse des Verbleibs des E-PKW Absatzes von 2022 – 2030 im Jahr 2030

6.3.4 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 und der Jahresfahrleistung.

(3) **Beschaffungskosten**, d.h. den Fahrzeugpreisen inklusive finanzieller Anreize, Finanzierungskosten und der Mehrwertsteuer im Falle privater PKW und unter Berücksichtigung des Restwerts des Fahrzeugs und des zugrundeliegenden Kalkulationszeitraums.

Tabelle 13 zeigt 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 14 werden durch den Energieverbrauch und die Energiepreise (siehe aktualisierte Rahmendaten) bestimmt. Der spezifische Energieverbrauch stammt ebenfalls aus der Auswertung der KBA-Daten von 2007 bis 2016. Für REF-2020 wurde ein Abgleich des statistischen Energieverbrauchs mit dem berechneten Endenergieverbrauch (EEV) vorgenommen, der zu einer leichten Anpassung in Form einer Verringerung zwischen Realverbrauch und Verbrauch nach Typ-Prüfwert im Vergleich mit REF-2017 geführt hat.

Die Beschaffungskosten in Tabelle 15 werden durch die Fahrzeugpreise inklusive der Mehrwertsteuer für private PKW und der erwarteten Restwerte bei gewerblich beschafften PKW bestimmt.

Die Fahrzeugpreise wurden 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 CO_2-Gesetzgebung bei neuen PKW genutzt wurden (Ricardo-AEA, 2015), ab und passten sie auf die Verhältnisse des deutschen PKW-Marktes (z.B. Sonderausstattung) an. 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 unterstellten Batterie- und PKW-Kosten sind an die jüngsten Entwicklungen und Studien (s.u.) angepasst. REF-2020 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 Ver-

gleich zum Stand der Produktion heute. REF-2020 baut auf diesen Annahmen auf und realisiert eine Kostensenkung von 20% bis 45% je nach Segment bis zum Jahr 2030. Der Preispfad der BEV folgt per Annahme einer exponentiellen Abnahme. Einer deutlichen Kostensenkung in den kommenden Jahren folgt ein gedämpfter Rückgang nach 2030. Eine Kostenparität zwischen BEV und ICE wird in REF-2020 im Jahr 2025 erreicht. Diese Einschätzung wird von verschiedenen Studien geteilt (BloombergNEF, 2021; ICCT, 2019; McKinsey, 2019).

In Tabelle 15 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 anteilsmäßig zu einer größeren Reduktion des Kaufpreises führt.

Tabelle 13: Entwicklung der jährlich anfallenden Kosten (ohne Energie) von neuen PKW

In €2010/Fzg-km		Gewerbliche Nutzung				Private Nutzung			
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2020	2025	2030	2035
MINI	Benzin	0,0392	0,0383	0,0389	0,0390	0,0457	0,0425	0,0417	0,0406
MINI	Diesel	0,0404	0,0389	0,0391	0,0388	0,0460	0,0426	0,0415	0,0401
MINI	CNG	0,0397	0,0389	0,0382	0,0377	0,0239	0,0234	0,0230	0,0223
MINI	LPG	0,0313	0,0308	0,0303	0,0297	0,0184	0,0177	0,0174	0,0169
MINI	Hybrid	0,0330	0,0328	0,0322	0,0316	0,0342	0,0336	0,0329	0,0320
MINI	PHEV	0,0260	0,0254	0,0247	0,0249	0,0186	0,0183	0,0180	0,0182
MINI	BEV	0,0399	0,0340	0,0327	0,0386	0,0233	0,0229	0,0225	0,0261
MINI	H2-BZ	0,0204	0,0177	0,0168	0,0189	0,0150	0,0148	0,0145	0,0165
KLEIN	Benzin	0,0508	0,0499	0,0509	0,0513	0,0490	0,0453	0,0440	0,0428
KLEIN	Diesel	0,0377	0,0379	0,0384	0,0384	0,0336	0,0327	0,0318	0,0307
KLEIN	CNG	0,0918	0,0892	0,0877	0,0865	0,0199	0,0191	0,0188	0,0182
KLEIN	LPG	0,0352	0,0339	0,0331	0,0325	0,0232	0,0213	0,0204	0,0198
KLEIN	Hybrid	0,0315	0,0311	0,0306	0,0300	0,0260	0,0252	0,0247	0,0240
KLEIN	PHEV	0,0574	0,0562	0,0542	0,0547	0,0153	0,0150	0,0147	0,0150
KLEIN	BEV	0,0399	0,0337	0,0313	0,0373	0,0202	0,0199	0,0195	0,0231
KLEIN	H2-BZ	0,0168	0,0145	0,0134	0,0152	0,0163	0,0160	0,0157	0,0183
KOMPAKT	Benzin	0,0764	0,0764	0,0775	0,0785	0,0516	0,0476	0,0448	0,0436
KOMPAKT	Diesel	0,0463	0,0462	0,0471	0,0474	0,0388	0,0365	0,0355	0,0343
KOMPAKT	CNG	0,1302	0,1282	0,1263	0,1250	0,0325	0,0319	0,0312	0,0303
KOMPAKT	LPG	0,0497	0,0495	0,0492	0,0484	0,0309	0,0299	0,0293	0,0285
KOMPAKT	Hybrid	0,0704	0,0684	0,0673	0,0664	0,0210	0,0194	0,0189	0,0184
KOMPAKT	PHEV	0,0257	0,0252	0,0243	0,0244	0,0223	0,0220	0,0216	0,0221
KOMPAKT	BEV	0,0534	0,0403	0,0371	0,0455	0,0280	0,0276	0,0271	0,0321
KOMPAKT	H2-BZ	0,0195	0,0163	0,0152	0,0167	0,0184	0,0181	0,0178	0,0205
MITTELKLASSE	Benzin	0,1044	0,1050	0,1068	0,1080	0,0692	0,0644	0,0612	0,0593
MITTELKLASSE	Diesel	0,0660	0,0664	0,0679	0,0683	0,0505	0,0481	0,0467	0,0451
MITTELKLASSE	CNG	0,0767	0,0751	0,0729	0,0714	0,0382	0,0367	0,0343	0,0324
MITTELKLASSE	LPG	0,0694	0,0691	0,0691	0,0681	0,0366	0,0349	0,0341	0,0330
MITTELKLASSE	Hybrid	0,0865	0,0845	0,0816	0,0804	0,0344	0,0321	0,0301	0,0292
MITTELKLASSE	PHEV	0,0343	0,0337	0,0326	0,0327	0,0296	0,0291	0,0286	0,0292
MITTELKLASSE	BEV	0,0226	0,0169	0,0151	0,0180	0,0189	0,0186	0,0183	0,0217
MITTELKLASSE	H2-BZ	0,0260	0,0215	0,0195	0,0213	0,0251	0,0247	0,0242	0,0281
OBERKLASSE	Benzin	0,2072	0,2116	0,2145	0,2173	0,0917	0,0871	0,0795	0,0767
OBERKLASSE	Diesel	0,1066	0,1094	0,1105	0,1112	0,0721	0,0721	0,0671	0,0643
OBERKLASSE	CNG	0,0657	0,0649	0,0642	0,0634	0,0421	0,0412	0,0403	0,0390
OBERKLASSE	LPG	0,2655	0,2722	0,2625	0,2576	0,0564	0,0596	0,0510	0,0488
OBERKLASSE	Hybrid	0,2030	0,1993	0,1936	0,1905	0,0858	0,0804	0,0752	0,0729
OBERKLASSE	PHEV	0,0562	0,0554	0,0536	0,0535	0,0382	0,0376	0,0369	0,0380
OBERKLASSE	BEV	0,0354	0,0287	0,0279	0,0322	0,0310	0,0305	0,0299	0,0352
OBERKLASSE	H2-BZ	0,0962	0,0846	0,0806	0,0858	0,0348	0,0342	0,0336	0,0386
OFFROAD	Benzin	0,0845	0,0837	0,0844	0,0845	0,0743	0,0695	0,0670	0,0649
OFFROAD	Diesel	0,0696	0,0705	0,0690	0,0682	0,0752	0,0747	0,0697	0,0669
OFFROAD	CNG	0,1061	0,1090	0,1027	0,0987	0,1942	0,2033	0,1861	0,1729
OFFROAD	LPG	0,0906	0,0907	0,0903	0,0884	0,0503	0,0493	0,0481	0,0465
OFFROAD	Hybrid	0,0816	0,0780	0,0750	0,0734	0,0715	0,0668	0,0637	0,0618
OFFROAD	PHEV	0,0325	0,0313	0,0299	0,0305	0,0348	0,0342	0,0336	0,0348
OFFROAD	BEV	0,0137	0,0135	0,0133	0,0169	0,0253	0,0248	0,0244	0,0303
OFFROAD	H2-BZ	0,0385	0,0354	0,0334	0,0388	0,0298	0,0293	0,0288	0,0347
MPV	Benzin	0,1130	0,1127	0,1148	0,1154	0,0735	0,0688	0,0669	0,0649
MPV	Diesel	0,0724	0,0714	0,0714	0,0713	0,0626	0,0588	0,0560	0,0540
MPV	CNG	0,0826	0,0819	0,0802	0,0791	0,0437	0,0428	0,0418	0,0406
MPV	LPG	0,0925	0,0920	0,0921	0,0904	0,0445	0,0427	0,0417	0,0404
MPV	Hybrid	0,0297	0,0285	0,0275	0,0270	0,0231	0,0219	0,0215	0,0208
MPV	PHEV	0,0390	0,0374	0,0356	0,0359	0,0341	0,0335	0,0330	0,0337
MPV	BEV	0,1361	0,1086	0,1020	0,1222	0,0399	0,0393	0,0386	0,0454
MPV	H2-BZ	0,0392	0,0336	0,0317	0,0350	0,0285	0,0281	0,0276	0,0317

Quelle: eigene Berechnung M-Five, ASTRA-2020.

Tabelle 14: Entwicklung der Energiekosten von neuen PKW

In €2010 / Fzg-km		Gewerbliche Nutzung				Private Nutzung			
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2020	2025	2030	2035
MINI	Benzin	0,0403	0,0411	0,0434	0,0434	0,0479	0,0489	0,0517	0,0516
MINI	Diesel	0,0313	0,0332	0,0336	0,0339	0,0373	0,0395	0,0399	0,0403
MINI	CNG	0,0191	0,0235	0,0284	0,0286	0,0227	0,0279	0,0338	0,0341
MINI	LPG	0,0253	0,0276	0,0292	0,0283	0,0302	0,0329	0,0348	0,0337
MINI	Hybrid	0,0327	0,0375	0,0396	0,0395	0,0389	0,0446	0,0471	0,0470
MINI	PHEV	0,0463	0,0401	0,0328	0,0290	0,0551	0,0477	0,0391	0,0345
MINI	BEV	0,0219	0,0190	0,0155	0,0137	0,0261	0,0226	0,0185	0,0163
MINI	H2-BZ	0,0393	0,0341	0,0266	0,0229	0,0468	0,0405	0,0316	0,0272
KLEIN	Benzin	0,0421	0,0423	0,0434	0,0434	0,0501	0,0504	0,0517	0,0516
KLEIN	Diesel	0,0259	0,0319	0,0347	0,0350	0,0308	0,0379	0,0413	0,0417
KLEIN	CNG	0,0288	0,0323	0,0361	0,0345	0,0342	0,0384	0,0430	0,0410
KLEIN	LPG	0,0303	0,0307	0,0311	0,0301	0,0360	0,0366	0,0370	0,0358
KLEIN	Hybrid	0,0380	0,0387	0,0409	0,0408	0,0452	0,0460	0,0487	0,0486
KLEIN	PHEV	0,0474	0,0410	0,0336	0,0296	0,0564	0,0488	0,0400	0,0353
KLEIN	BEV	0,0255	0,0221	0,0181	0,0160	0,0304	0,0263	0,0215	0,0190
KLEIN	H2-BZ	0,0458	0,0396	0,0309	0,0266	0,0545	0,0472	0,0368	0,0317
KOMPAKT	Benzin	0,0469	0,0472	0,0447	0,0446	0,0558	0,0561	0,0532	0,0531
KOMPAKT	Diesel	0,0303	0,0321	0,0347	0,0350	0,0360	0,0382	0,0413	0,0417
KOMPAKT	CNG	0,0249	0,0307	0,0372	0,0374	0,0297	0,0365	0,0442	0,0445
KOMPAKT	LPG	0,0268	0,0312	0,0329	0,0319	0,0319	0,0371	0,0392	0,0380
KOMPAKT	Hybrid	0,0442	0,0442	0,0434	0,0434	0,0526	0,0526	0,0517	0,0516
KOMPAKT	PHEV	0,0544	0,0471	0,0386	0,0340	0,0647	0,0560	0,0459	0,0405
KOMPAKT	BEV	0,0297	0,0257	0,0210	0,0186	0,0353	0,0305	0,0250	0,0221
KOMPAKT	H2-BZ	0,0532	0,0461	0,0360	0,0309	0,0633	0,0548	0,0428	0,0368
MITTELKLASSE	Benzin	0,0539	0,0542	0,0524	0,0523	0,0641	0,0645	0,0623	0,0622
MITTELKLASSE	Diesel	0,0334	0,0383	0,0417	0,0420	0,0398	0,0455	0,0496	0,0500
MITTELKLASSE	CNG	0,0538	0,0604	0,0676	0,0646	0,0640	0,0719	0,0805	0,0768
MITTELKLASSE	LPG	0,0315	0,0347	0,0367	0,0355	0,0375	0,0413	0,0436	0,0423
MITTELKLASSE	Hybrid	0,0522	0,0522	0,0473	0,0472	0,0621	0,0621	0,0563	0,0562
MITTELKLASSE	PHEV	0,0626	0,0542	0,0444	0,0392	0,0745	0,0645	0,0529	0,0466
MITTELKLASSE	BEV	0,0350	0,0303	0,0249	0,0219	0,0417	0,0361	0,0296	0,0261
MITTELKLASSE	H2-BZ	0,0629	0,0544	0,0425	0,0365	0,0748	0,0648	0,0506	0,0435
OBERKLASSE	Benzin	0,0749	0,0753	0,0671	0,0674	0,0891	0,0896	0,0799	0,0802
OBERKLASSE	Diesel	0,0583	0,0697	0,0697	0,0707	0,0693	0,0830	0,0830	0,0842
OBERKLASSE	CNG	0,0359	0,0442	0,0535	0,0539	0,0427	0,0526	0,0637	0,0642
OBERKLASSE	LPG	0,0694	0,0742	0,0662	0,0645	0,0826	0,0883	0,0788	0,0768
OBERKLASSE	Hybrid	0,0637	0,0637	0,0575	0,0574	0,0758	0,0758	0,0684	0,0683
OBERKLASSE	PHEV	0,0846	0,0732	0,0600	0,0529	0,1007	0,0872	0,0714	0,0630
OBERKLASSE	BEV	0,0473	0,0409	0,0335	0,0296	0,0563	0,0487	0,0399	0,0352
OBERKLASSE	H2-BZ	0,0767	0,0664	0,0518	0,0446	0,0913	0,0790	0,0617	0,0530
OFFROAD	Benzin	0,0550	0,0553	0,0562	0,0561	0,0655	0,0659	0,0669	0,0668
OFFROAD	Diesel	0,0560	0,0672	0,0672	0,0682	0,0667	0,0800	0,0799	0,0811
OFFROAD	CNG	0,0662	0,0783	0,0876	0,0837	0,0788	0,0932	0,1043	0,0996
OFFROAD	LPG	0,0354	0,0417	0,0441	0,0427	0,0421	0,0497	0,0525	0,0509
OFFROAD	Hybrid	0,0566	0,0566	0,0549	0,0548	0,0674	0,0674	0,0654	0,0653
OFFROAD	PHEV	0,0726	0,0641	0,0525	0,0463	0,0864	0,0763	0,0625	0,0551
OFFROAD	BEV	0,0468	0,0427	0,0349	0,0308	0,0557	0,0508	0,0416	0,0367
OFFROAD	H2-BZ	0,0682	0,0591	0,0461	0,0396	0,0812	0,0703	0,0548	0,0472
MPV	Benzin	0,0506	0,0508	0,0524	0,0523	0,0602	0,0605	0,0623	0,0622
MPV	Diesel	0,0402	0,0426	0,0417	0,0420	0,0478	0,0507	0,0496	0,0500
MPV	CNG	0,0345	0,0424	0,0514	0,0517	0,0410	0,0504	0,0611	0,0616
MPV	LPG	0,0331	0,0364	0,0385	0,0373	0,0393	0,0434	0,0459	0,0444
MPV	Hybrid	0,0484	0,0508	0,0537	0,0536	0,0576	0,0604	0,0639	0,0637
MPV	PHEV	0,0614	0,0532	0,0436	0,0384	0,0731	0,0633	0,0518	0,0457
MPV	BEV	0,0325	0,0281	0,0230	0,0203	0,0387	0,0335	0,0274	0,0242
MPV	H2-BZ	0,0583	0,0505	0,0394	0,0339	0,0694	0,0600	0,0469	0,0403

Quelle: eigene Berechnung M-Five, ASTRA-2020.

Tabelle 15: Entwicklung der Beschaffungskosten von neuen PKW

In €2010		Gewerbliche Nutzung				Private Nutzung			
Segment	Antrieb	2020	2025	2030	2035	2020	2025	2030	2035
MINI	Benzin	7.850	8.400	8.950	9.350	10.900	11.650	12.400	12.950
MINI	Diesel	8.700	9.150	9.750	10.150	12.100	12.700	13.550	14.050
MINI	CNG	10.450	10.250	10.050	10.150	14.450	14.150	13.900	13.900
MINI	LPG	12.650	12.700	12.600	12.450	17.500	17.500	17.350	17.150
MINI	Hybrid	8.800	8.950	8.850	8.750	12.250	12.350	12.200	12.100
MINI	PHEV	10.650	10.300	9.750	9.550	14.750	14.250	13.500	13.250
MINI	BEV	12.750	7.350	6.250	6.000	17.700	10.200	8.650	8.300
MINI	H2-BZ	15.750	10.000	8.550	8.200	21.850	16.450	14.300	13.700
KLEIN	Benzin	11.000	11.800	12.650	13.200	15.450	16.550	17.750	18.550
KLEIN	Diesel	12.500	13.200	14.100	14.750	17.500	18.550	19.800	20.650
KLEIN	CNG	14.200	14.000	13.800	13.800	19.900	19.500	19.250	19.200
KLEIN	LPG	17.300	17.400	17.350	17.150	24.200	24.250	24.200	23.900
KLEIN	Hybrid	11.950	12.050	11.950	11.850	16.800	16.850	16.700	16.600
KLEIN	PHEV	14.200	13.850	12.950	12.700	19.900	19.350	18.100	17.750
KLEIN	BEV	17.350	10.650	8.300	7.950	24.300	14.950	11.250	10.800
KLEIN	H2-BZ	20.650	14.000	10.950	10.450	28.950	22.600	18.650	17.850
KOMPAKT	Benzin	17.750	18.750	19.850	20.500	23.200	24.500	25.900	26.750
KOMPAKT	Diesel	18.800	19.650	20.750	21.400	24.700	25.800	27.200	28.100
KOMPAKT	CNG	20.700	20.400	20.150	20.150	27.200	26.800	26.500	26.400
KOMPAKT	LPG	23.350	23.550	23.600	23.350	30.700	30.900	30.950	30.600
KOMPAKT	Hybrid	18.600	18.650	18.500	18.400	24.400	24.400	24.200	24.050
KOMPAKT	PHEV	21.000	20.550	19.450	19.100	27.650	27.000	25.600	25.100
KOMPAKT	BEV	24.000	15.100	12.900	12.400	31.550	19.900	17.000	16.300
KOMPAKT	H2-BZ	27.350	18.950	16.300	15.600	36.050	28.600	25.150	24.050
MITTELKLASSE	Benzin	24.000	25.200	26.500	27.250	32.550	34.200	35.950	36.950
MITTELKLASSE	Diesel	27.700	28.750	30.200	31.000	37.650	39.100	41.050	42.150
MITTELKLASSE	CNG	29.150	28.850	28.600	28.450	39.650	39.150	38.800	38.600
MITTELKLASSE	LPG	35.200	35.600	35.900	35.500	47.850	48.300	48.700	48.150
MITTELKLASSE	Hybrid	25.200	25.250	24.800	24.600	34.250	34.250	33.650	33.350
MITTELKLASSE	PHEV	27.550	27.050	25.900	25.400	37.500	36.750	35.200	34.500
MITTELKLASSE	BEV	34.050	21.800	18.000	17.250	46.300	29.650	24.450	23.450
MITTELKLASSE	H2-BZ	38.550	27.150	22.550	21.550	52.400	42.250	36.700	35.100
OBERKLASSE	Benzin	43.950	46.150	48.500	49.800	57.450	60.300	63.350	65.050
OBERKLASSE	Diesel	42.750	44.350	46.600	47.850	56.000	58.100	61.050	62.700
OBERKLASSE	CNG	49.650	49.100	48.750	48.400	65.100	64.300	63.900	63.400
OBERKLASSE	LPG	48.400	48.950	49.400	48.900	63.450	64.100	64.750	64.050
OBERKLASSE	Hybrid	43.950	43.900	43.250	42.800	57.550	57.450	56.600	55.950
OBERKLASSE	PHEV	46.350	45.650	43.950	43.100	60.800	59.900	57.600	56.500
OBERKLASSE	BEV	50.900	37.250	34.350	32.950	66.800	48.900	45.100	43.250
OBERKLASSE	H2-BZ	55.300	44.500	41.300	39.500	72.500	62.650	58.050	55.550
OFFROAD	Benzin	17.850	18.750	19.750	20.300	20.400	21.450	22.550	23.150
OFFROAD	Diesel	19.000	19.700	20.700	21.250	21.950	22.800	23.900	24.550
OFFROAD	CNG	21.450	21.450	21.000	20.950	24.950	24.900	24.400	24.300
OFFROAD	LPG	19.650	20.000	20.250	20.000	22.800	23.200	23.500	23.250
OFFROAD	Hybrid	17.900	17.650	17.150	16.950	20.650	20.300	19.750	19.500
OFFROAD	PHEV	19.450	18.250	16.850	16.500	22.600	21.200	19.550	19.200
OFFROAD	BEV	20.450	15.150	13.100	12.600	23.800	17.600	15.250	14.650
OFFROAD	H2-BZ	23.250	18.900	16.500	15.800	27.050	23.600	21.500	20.550
MPV	Benzin	21.600	22.700	23.900	24.550	27.600	29.000	30.500	31.350
MPV	Diesel	22.600	23.500	24.650	25.300	29.100	30.200	31.700	32.550
MPV	CNG	31.300	31.250	30.650	30.550	40.400	40.300	39.550	39.300
MPV	LPG	27.050	27.550	27.950	27.600	34.850	35.450	35.950	35.550
MPV	Hybrid	22.200	21.550	20.700	20.500	28.550	27.650	26.550	26.250
MPV	PHEV	25.150	23.550	21.750	21.350	32.400	30.400	28.050	27.500
MPV	BEV	28.300	18.200	15.950	15.300	36.550	23.500	20.550	19.700
MPV	H2-BZ	32.950	23.300	20.500	19.600	42.500	34.750	31.800	30.450

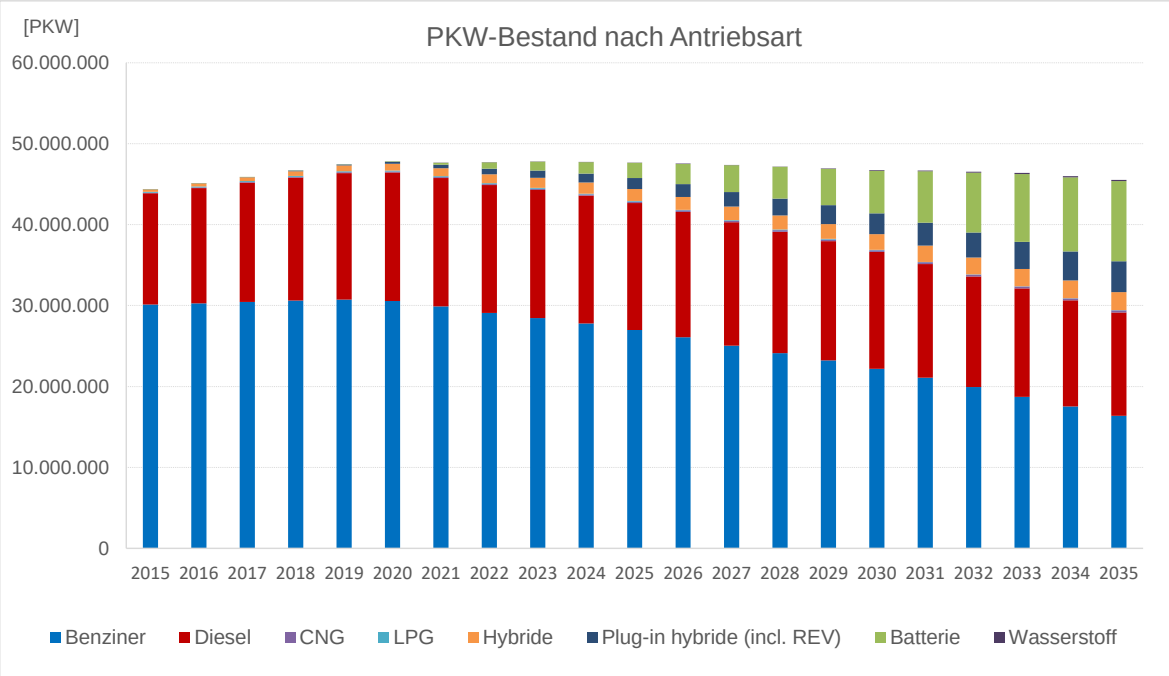
Quelle: eigene Berechnung M-Five, ASTRA-2020.

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. Unter gewerbliche PKW fallen beispielsweise Firmenwagen, Fahrzeughandel und Autovermietungen. Allerdings sind gewerbliche Halter für den Großteil der Neuzulassungen verantwortlich. Die Zahl der neuzugelassenen PKW ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen, jedoch aufgrund der Corona-Pandemie und ihren wirtschaftlichen Folgen eingebrochen.

6.4.1 Kauf und Bestand der PKW

Der PKW-Bestand stieg seit 2010 stetig an und erreichte im vergangenen Jahr trotz der Corona-Pandemie einen neuen (vorläufigen) Höchststand. Für den Gesamtbestand an PKW weist REF-2020 eine Abweichung von ca. 1% gegenüber den jüngsten KBA-Daten der letzten Jahre auf (KBA-Daten (2020) mit 47,7 Millionen PKW gegenüber REF-2020 (2020) mit 47,8 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-2020 aus der Entwicklung von Bevölkerung, verfügbarem Einkommen, der rückläufigen Zahl der Erwerbspersonen und der Altersstruktur der Flotte.

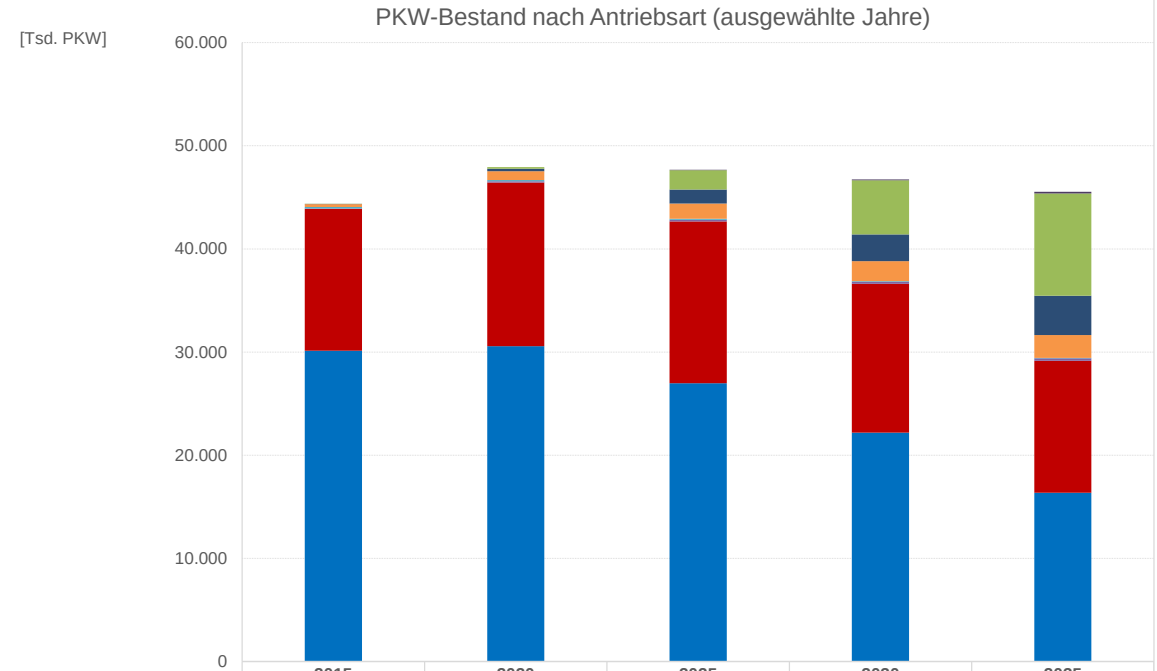


Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 38 Entwicklung des PKW-Bestandes bis 2035

Die Zahl der Diesel-PKW erreicht mit knapp 16 Millionen in den Jahren 2020 bis 2023 ein hohes Plateau und nimmt dann ab. Der Anteil an Diesel-PKW sinkt von 33% im Jahr 2020 auf unter 31% im Jahr 2030 und 28% im Jahr 2035. Benziner verringern ihren Anteil von 64% in 2020 auf nur noch 47,5% in 2030 (36% in 2035). 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 in 2030 zusammen einen Anteil von 17% mit 2,6 Millionen Plug-in Hybriden und 5,3 Millionen BEVs. Im Jahr 2035 beträgt der Anteil 30% mit 3,8 Millionen Plug-in Hybriden und 9,9 Millionen BEVs. Hybride, die in der Lage sind, elektrisch anzufahren bzw. zu unterstützen aber über keinen Stecker zur externen Nachladung verfügen, machen in 2030 ebenfalls 4% (2035: 5%) aus (1,9 Millionen bzw. 2,2 Millionen).



	2015	2020	2025	2030	2035
Wasserstoff			36	73	165
Batterie	1	147	1.875	5.261	9.906
Plug-in hybride (incl. REV)	11	250	1.356	2.583	3.811
Hybride	292	857	1.476	1.932	2.227
LPG	121	113	86	58	34
CNG	44	116	167	213	248
Diesel	13.760	15.879	15.677	14.420	12.783
Benziner	30.130	30.566	26.992	22.195	16.366

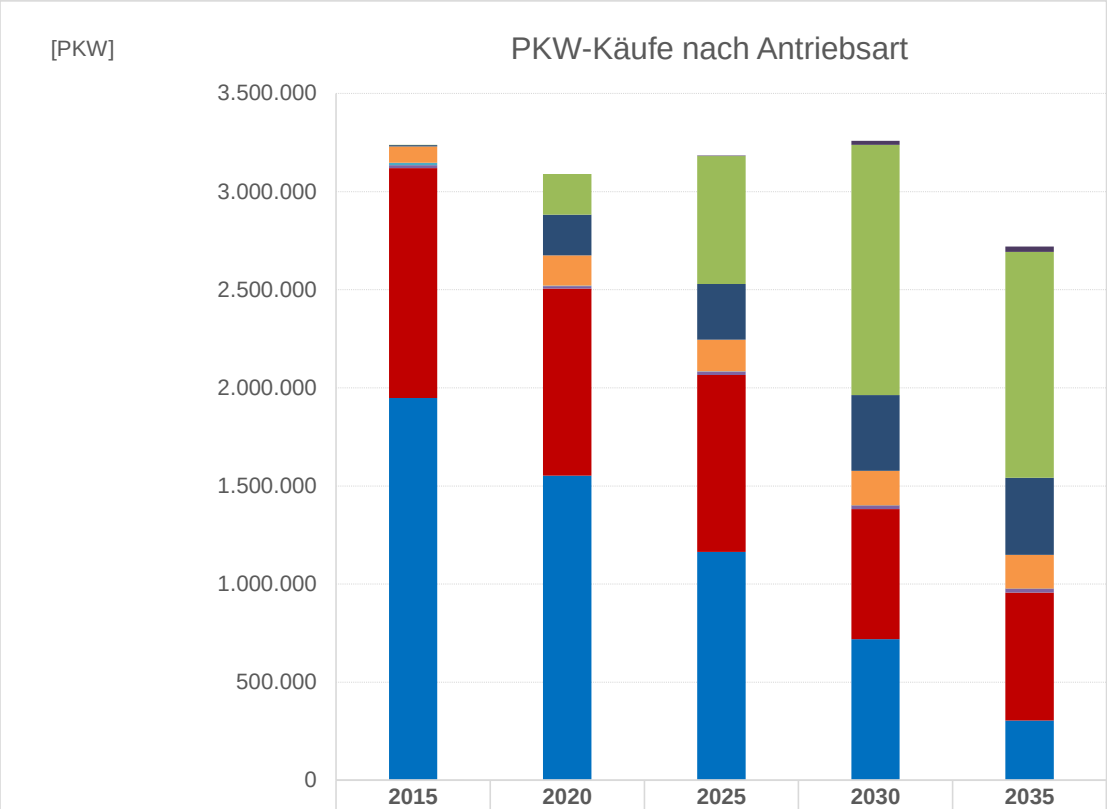
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 39 Entwicklung des PKW-Bestandes bis 2035 nach Antriebsart

Die Zahl der in REF-2020 gekauften PKW pro Jahr hat ihren Höchststand von grob 3,7 Millionen neu zugelassener PKW im Jahr 2019, also vor der Corona-Pandemie, erreicht. Im Jahr 2020 zeigt REF-2020 einen Einbruch bei den NZL auf knapp 3 Millionen PKW. Dies entspricht einer Abweichung von ca. 1% im Vergleich zu KBA-Daten (2,918 Millionen neuzugelassene PKW). Bis 2030 bleiben die PKW-Neuzulassungen in REF-2020 mit etwa 3,3 Millionen PKW stabil, bevor sie kontinuierlich zurückgehen.[20]

[20] In den Jahren 2021 und 2022 erfolgte ein weiterer Rückgang der PKW-Neuzulassungen aufgrund angebots- bzw. produktionsseitiger Verknappung (z.B. Halbleiter, Kabelbäume), welcher in den Rahmenbedingungen von REF-2020 nicht abgebildet ist. Daher liegen auch die modellierten Neuzulassungen deutlich höher als die in den Jahren bzw. Quartalen bis heute berichteten Werte.

Insbesondere Diesel- und Benzin-PKW sind von einem Rückgang der Neuzulassungen (NZL) betroffen (siehe Abbildung 40). Sind im Jahr 2015 noch 60% bzw. 36% der neuzugelassenen PKW mit Benzin- bzw. Dieselmotor angetrieben, sinkt ihr Anteil im Jahr 2030 auf etwa 22% bzw. 20% der PKW-Neuzulassungen ab. Die Diesel-Zulassungen gehen von 2015 bis 2030 um gut 510.000 und die Benzin-Zulassungen um gut 1,2 Millionen neu zugelassene PKW/Jahr zurück. Dieser Rückgang wird befördert durch die Verbesserung der Kostenseite von PKW mit alternativen Antrieben (z.B. sinkende Batteriekosten, vgl. Kapitel 6.1) sowie durch die Installation eines Grundaufbaus an 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 in 2030 12%; der Anteil der rein batterieelektrischen PKW (BEV) knapp 40%. Nach 2030 setzt sich die beobachtete Entwicklung fort, jedoch ohne an Dynamik zu gewinnen. Die Preisentwicklung konventioneller Antriebe folgt dem aktuellen Trend. Die hinterlegte Verteuerung reicht nicht aus, um die konventionellen Antriebe komplett aus dem Markt zu verdrängen. Eine Änderung der Präferenzen per se bei zukünftigen PKW-Käufen hin zu E-Mobilität ist in ASTRA-M für REF-2020 nicht hinterlegt, sodass sich die angestoßenen Entwicklungen noch nicht ausreichend verselbständigen.

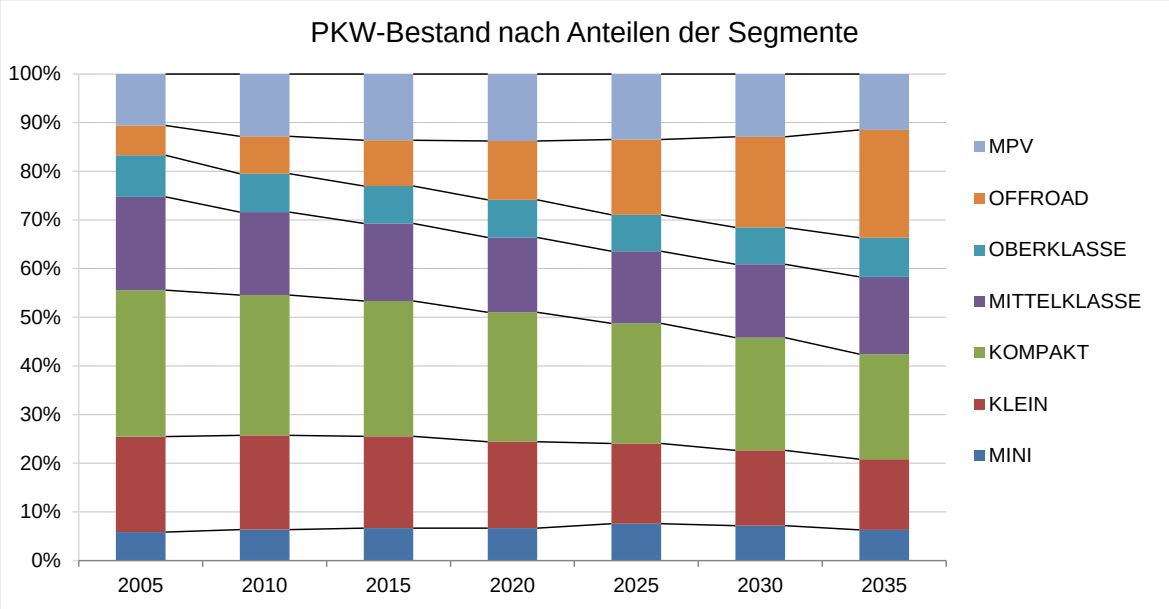


	2015	2020	2025	2030	2035
Wasserstoff	0	0	3.135	20.089	26.938
Batterie	647	207.431	652.136	1.275.287	1.151.325
Plug-in hybride (incl. REV)	7.064	207.290	282.831	386.159	393.671
Hybride	84.171	154.652	161.473	175.633	171.260
LPG	11.539	2.467	1.170	248	249
CNG	15.491	12.408	16.980	19.544	20.332
Diesel	1.171.674	953.335	901.891	661.724	651.894
Beziner	1.947.737	1.552.428	1.164.205	719.720	304.652

Quelle: M-Five, ASTRA-2020, eigene Berechnungen.

Abbildung 40 Entwicklung der jährlichen PKW-NZL nach Antriebsart bis 2035

Im Bestand haben in den letzten Jahren Fahrzeuge aus den Segmenten SUV (Sports-Utility-Vehicle), Geländewagen, Van und Mini-Van deutlich zugenommen. In der Klassifikation von ASTRA fallen diese in die Segmente MPV (Multi-Purpose Vehicle) und Offroad (siehe Abbildung 41). Für die Zukunft wird erwartet, dass das Marktwachstum der größeren Segmente, insbesondere des SUV-Marktes, weiter anhält. Der Anteil der beiden Segmente MPV und Offroad steigt bis 2030 auf 32%, unter anderem bedingt durch die alternde Bevölkerung und das steigende Angebot kompakter und günstiger Fahrzeuge in den beiden Segmenten. 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.



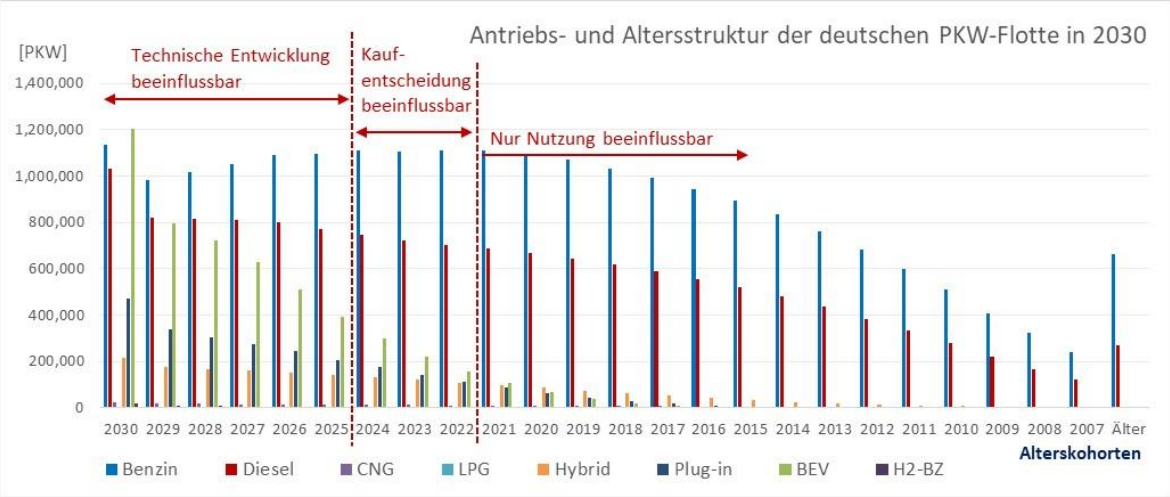
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 41 Entwicklung der Segmente im PKW-Bestand bis 2035

Abbildung 42 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 in 2030 besteht dabei noch aus Fahrzeugen der Kohorten von 2020 und früher. Diese machen in 2030 40% oder etwa 18 Millionen PKW aus. Ihre THG-Emissionen in 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 CO_2-Flottenstandards für Neuwagen ab 2021 können also nur die THG-Effizienz von 60% der PKW-Flotte in 2030 verändern. Der Anteil der konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen und durch Standards ab 2021 beeinflussbaren PKW beträgt 40% der PKW-Flotte im Jahr 2030 (18,5 Millionen PKW). Die Effizienzentwicklung der PKW wird im nächsten Kapitel erläutert.

Die technische Konfiguration eines bis 2025 gekauften PKW liegt heute schon fest, weil die Konstruktion und die Produktionsplanung abgeschlossen sind. D.h. im Zeitraum 2022 bis

2024 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 2025 eine Wirkung auf die angebotene PKW-Technologie und damit nur auf die neuesten 6 der 25 PKW-Jahrgänge im Bestand in 2030.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 42 PKW-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur in 2030

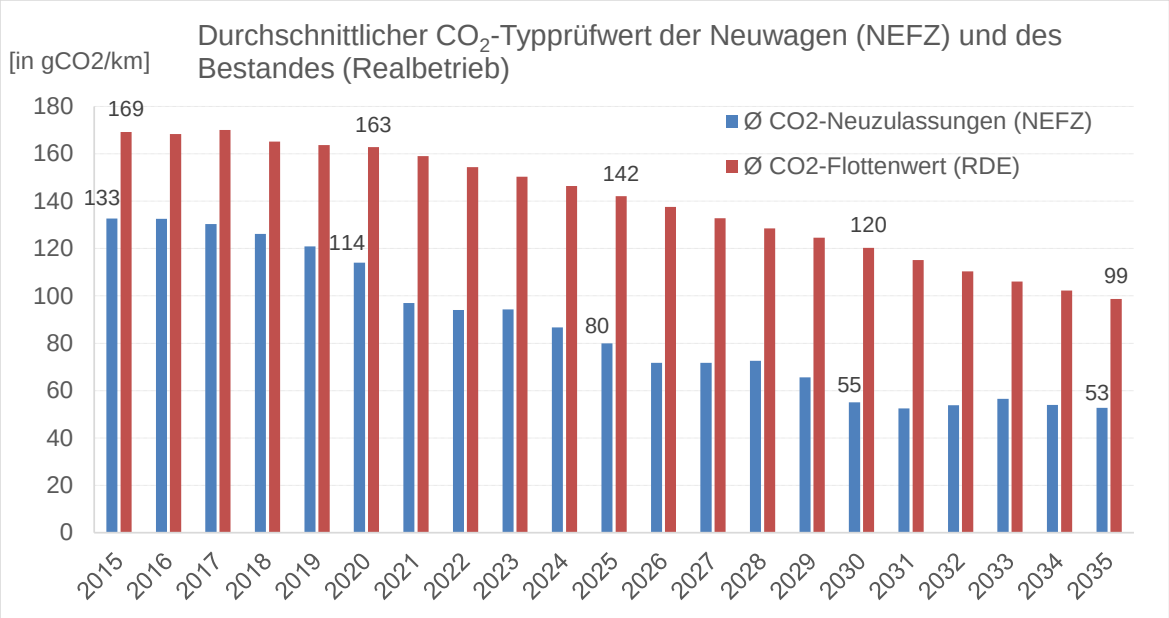
6.4.2 Effizienzentwicklung der PKW

EU-Verordnung 2019/631 legt die CO_2-Flottengrenzwerte in g CO_2/km für PKW und LNF fest. Seit 2012 (vollumfänglich 2015) gilt ein Flottengrenzwert von 130 g CO_2/km für PKW ((EG) Nr. 443/2009); seit 2020 (vollumfänglich 2021) gilt ein Flottengrenzwert von 95 g CO_2/km. 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 CO_2-Flottenwerte entstehen. EU-Verordnung 2019/631 verschärft in zwei Verminderungsschritten die CO_2-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. 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 Anforderungen an konventionelle Verbrenner abschwächen.

Ab 2018 werden neue Fahrzeuge anhand eines neuen global harmonisierten Fahrzyklus bewertet und 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 wird aber weiterhin durch die Emissionen im Realbetrieb (RDE = Real-Driving Emissions) bestimmt. Die realen Verbräuche auf der Straße sind anhängig von individuellen Faktoren wie Fahrstil, Verkehrsfluss, Topografie und Wetter.

In REF-2020 beziehen sich weiterhin alle Angaben zu Typprüfwerten von Neuzulassungen auf NEFZ. Eine Umstellung auf WLTP wird in Zukunft erfolgen. Zu beachten ist, dass der Durchschnitt der CO_2-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. CO_2-Emissionswerte von Neuzulassungen werden nach NEFZ angeben, da diese (bzw. WLTP-Werte) für Steuer und Effizienzlabel und somit beim Kauf entscheidend sind. Dagegen sind für den Bestand Emissionswerte im Realbetrieb (RDE) entscheidend, die den realen EEV und die THG-Emissionen bestimmen. 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 CO_2/km für die Berechnung der Durchschnittsemissionen angesetzt. Für Plug-in Hybride wird ein CO_2-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-2020 liegen in 2020 segmentspezifisch zwischen 20 und 40% und steigen bis 2030 leicht an.

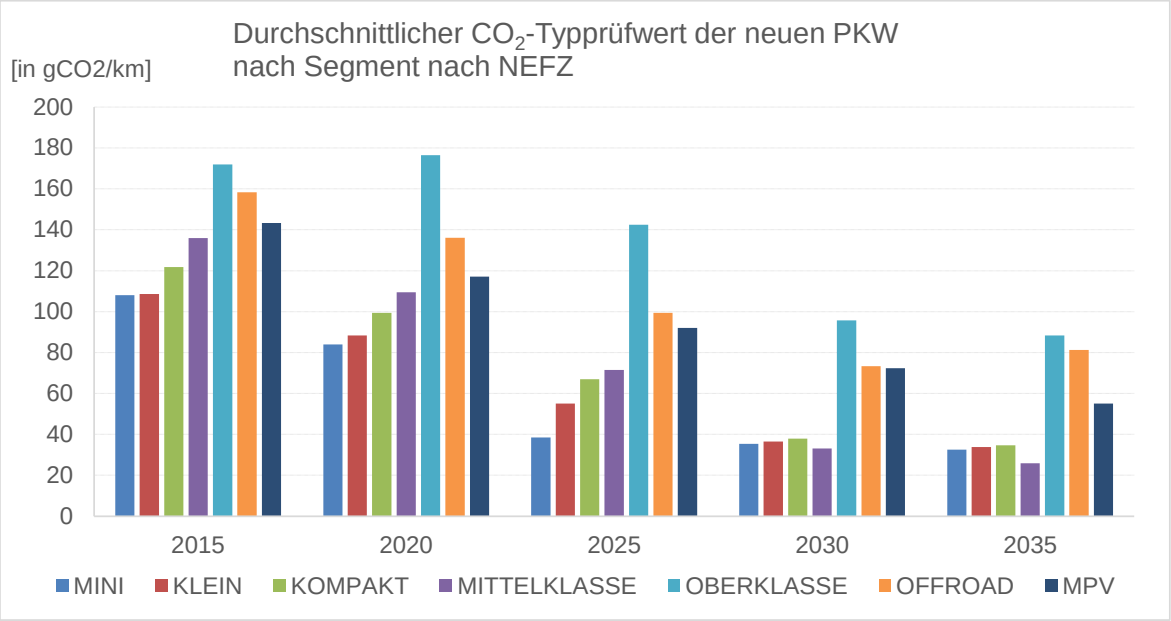
Abbildung 43 stellt die modellierten durchschnittlichen Emissionen der Neuzulassungen (blaue Balken), ausgedrückt als Typprüfwerte nach NEFZ, und des Bestandes im Realbetrieb (rote Balken) in Deutschland von 2015 bis 2035 dar. Der Durchschnittswert der PKW-Neuzulassungen liegt in der Modellierung in 2021 bei 97 g CO_2/km, in 2025 bei 80 g CO_2/km und sinkt bis 2030 auf 55 g CO_2/km deutlich ab. Der durchschnittliche Emissions-Wert der Neuwagen unterscheidet sich vom Durchschnitt der CO_2-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. In 2005 betrug diese Lücke 6%, in 2015 dann 28%, und in 2030 wird der Höchststand mit 119% erreicht (jeweils gemessen vom Wert der Neuzulassungen aus).



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnungen M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 43 Entwicklung des CO_2-Flottenwertes der Neuzulassungen (nach NEFZ) und des Bestandes an PKW (Realbetrieb, RDE)

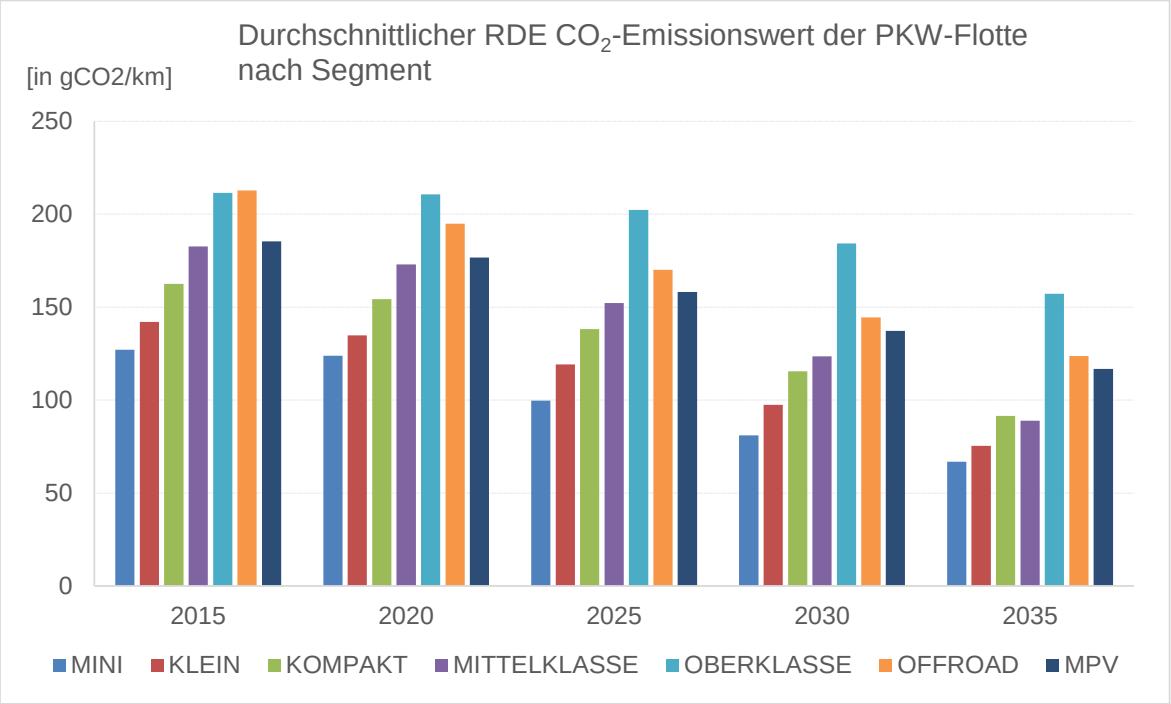
Abbildung 44 zeigt die durchschnittlichen Typprüfwerte der Neuzulassungen nach PKW-Segmenten. In 2015 liegen zwischen den beiden sparsamen Segmenten Mini und Klein und den Segmenten der weniger effizienten Fahrzeuge zwischen 35 und 64 g CO_2/km. Die Differenz verringert sich bis 2030 nur leicht auf 36 bis 60 g CO_2/km. Alle Segmente profitieren vom technologischen Fortschritt und der Durchdringung mit elektrifizierten PKW.



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnungen M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 44 CO_2-Typprüfwerte nach Segmenten von PKW-Neuzulassungen (NEFZ)

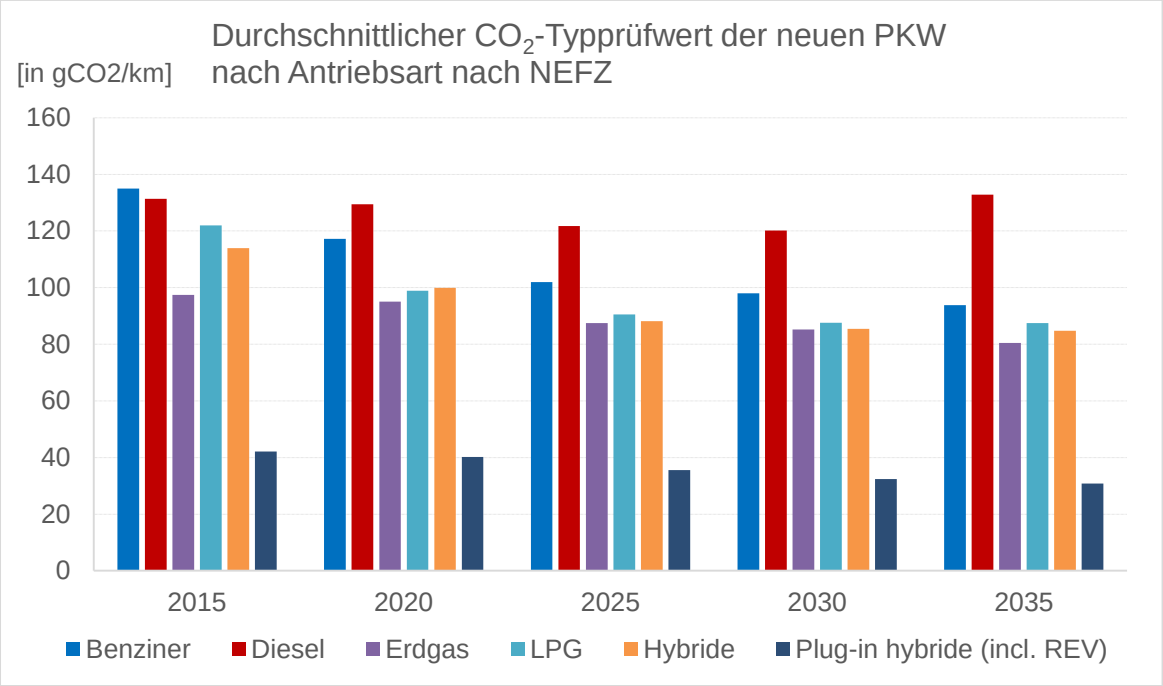
Die CO_2-Emissionswerte im Realbetrieb der Flotte liegen deutlich höher als die der Neuzulassungen, genauso wie die Spreizung zwischen den Segmenten. In 2015 liegen teilweise fast 90 g CO_2/km Differenz zwischen den CO_2-effzientesten Segmenten und den hochemittierenden Segmenten (siehe Abbildung 45). Diese Differenz bleibt bis im Jahr 2035 etwa stabil.



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnungen M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 45 CO_2-Emissionswerte nach Segmenten der PKW-Flotte (RDE)

Für das Jahr 2015 zeigen sich je nach Antriebsart in den Daten des KBA sehr deutliche Unterschiede der CO_2-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-2020 vorgenommenen Fortschreibung erhalten (siehe Abbildung 46).



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnungen M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 46 CO_2-Typprüfwerte nach Antriebsart von PKW-Neuzulassungen (NEFZ)

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 16 stellt die Effizienzentwicklung für die Neuzulassungen gemessen nach NEFZ 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 in 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. Danach stagniert die Effizienzverbesserung bzw. verzeichnet sogar leichte Zuwächse in der Periode 2030 bis 2035. Über die Gesamtperiode werden im Trend des REF-2020 bis 2035 jährliche Verbesserungen von 2,2-4,8% erfolgen.

Tabelle 16: Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Neuzulassung (NEFZ)

	Energieverbrauch in kWh/km					Durchschnittliche jährliche Verbesserung in %				
Segment	2015	2020	2025	2030	2035	20 vs 15	25 vs 20	30 vs 25	35 vs 30	35 vs 15
Mini	0,40	0,32	0,19	0,18	0,17	-4,4%	-9,9%	-1,2%	-1,0%	-4,2%
Klein	0,40	0,34	0,24	0,19	0,18	-3,5%	-6,4%	-4,6%	-0,9%	-3,9%
Kompakt	0,45	0,38	0,28	0,21	0,20	-3,7%	-5,6%	-6,1%	-1,0%	-4,1%
Mittelklasse	0,51	0,42	0,31	0,21	0,19	-3,8%	-5,7%	-7,5%	-2,1%	-4,8%
Oberklasse	0,64	0,66	0,56	0,42	0,40	0,6%	-3,1%	-5,5%	-1,0%	-2,3%
Offroad	0,59	0,52	0,41	0,34	0,38	-2,5%	-4,3%	-3,7%	1,8%	-2,2%
MPV	0,53	0,44	0,36	0,31	0,26	-3,7%	-3,8%	-3,2%	-3,1%	-3,5%

Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnungen M-Five, ASTRA-2020.

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 2035 werden bei den Trends des REF-2020 1,0% bis 2,7% jährliche Verbesserungen erfolgen.

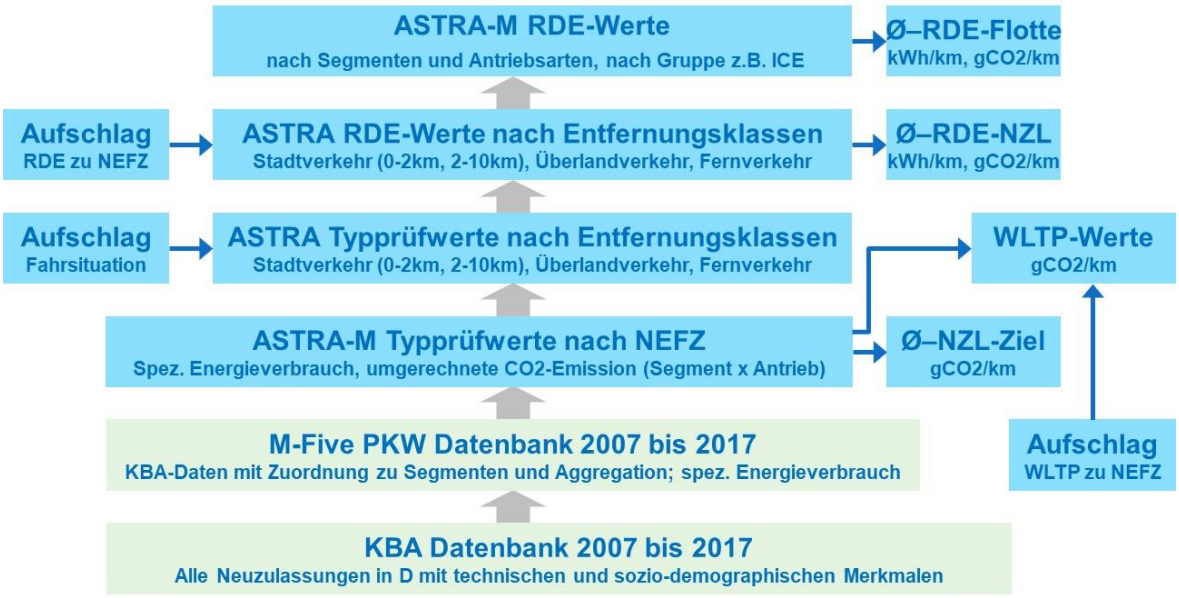
Tabelle 17: Entwicklung der Energieeffizienz nach Segmenten – Bestandsflotte (RDE)

	Energieverbrauch in kWh/km					Durchschnittliche jährliche Verbesserung in %				
Segment	2015	2020	2025	2030	2035	20 vs 15	25 vs 20	30 vs 25	35 vs 30	35 vs 15
Mini	0,49	0,49	0,40	0,35	0,30	-0,1%	-3,9%	-3,0%	-2,7%	-2,4%
Klein	0,55	0,53	0,47	0,39	0,33	-0,7%	-2,5%	-3,4%	-3,7%	-2,6%
Kompakt	0,63	0,61	0,55	0,47	0,40	-0,6%	-2,2%	-3,0%	-3,3%	-2,3%
Mittelklasse	0,71	0,68	0,61	0,51	0,41	-0,7%	-2,4%	-3,4%	-4,4%	-2,7%
Oberklasse	0,83	0,85	0,82	0,76	0,67	0,4%	-0,7%	-1,5%	-2,2%	-1,0%
Offroad	0,82	0,77	0,68	0,60	0,55	-1,3%	-2,4%	-2,4%	-1,7%	-2,0%
MPV	0,72	0,70	0,63	0,56	0,49	-0,7%	-2,1%	-2,4%	-2,5%	-1,9%

Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnungen M-Five, ASTRA-2020.

Die Datenbasis der oben beschriebenen Effizienzwerte und der Übergang von Typprüfwerten nach NEFZ auf Energieverbrauch und Emissionen im Realbetrieb (RDE) ist in Abbildung 47 dargestellt. Ausgehend von Daten des KBA 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 CO_2-Emission aller NZL in Deutschland, (2) der Ermittlung der 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

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-(CO_2)-Effizienzwerte aller Fahrzeuge in der Flotte kann der durchschnittliche RDE-Wert für die Energieeffizienz und die CO_2-Emission bestimmt werden.



Quelle: M-Five.

Abbildung 47 Ableitung von NEFZ-, RDE- und WLTP-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-CO_2-Preis belastet (siehe Kapitel 4.8). Weitere zentrale Instrumente für einen forcierten Markthochlauf elektrifizierter LNF bilden eine Kaufprämie für LNF mit alternativen Antriebstechnologien, die CO_2-Standards für LNF sowie die Förderung des Aufbaus der Energieinfrastruktur für NFz insgesamt (siehe Kapitel 5.1).

Im Rahmen der Entwicklung des REF-2020 wurden die Modellierung der LNF-Flotte (Kapitel 7.1) sowie die der Kaufentscheidung (Kapitel 7.2) angepasst und insbesondere um die Einführung verschiedener Nutzungs-Segmente erweitert. 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).

Im Rahmen der Erweiterung von ASTRA-M für das MKS Referenzszenario REF-2020 wurden 4 verschiedene LNF-Segmente eingeführt. 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

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

Im Unterschied zum 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 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, unterschiedliche 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.

$$P_i(t) = \frac{e^{(-\beta_i * TCO_i(t) - \delta_i * AV_i(t))}}{\sum_{DRT=1}^{9} e^{(-\beta_i * TCO_i(t) - \delta_i * AV_i(t))}}$$

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 Markthochlaufszenarien 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

Im Rahmen der Erweiterung des Modells um LNF-Segmente wurden entsprechende Inputfaktoren des Kaufentscheidungsmodells differenziert nach Segment und Antriebstechnologie aktualisiert und das Modell mit Hilfe von KBA-Datensätzen neu kalibriert.

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 18 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 18: Fahrzeugkosten für LNF nach Antriebsart (in €$_{2010}$)

Antriebs-art	Jahr				Änderung 2020 bis 2030		Änderung 2020 bis 2035	
	2020	2025	2030	2035	% p.a.	% abs.	% p.a.	% abs.
Benzin	27.000	28.100	29.200	29.650	0,8%	8,1%	0,6%	9,8%
Diesel	26.550	27.650	28.700	29.150	0,8%	8,1%	0,6%	9,8%
CNG	29.850	29.350	28.800	28.800	-0,4%	-3,5%	-0,2%	-3,5%
LPG	26.550	27.450	28.300	28.850	0,6%	6,6%	0,6%	8,7%
Hybrid	30.400	30.150	29.850	29.850	-0,2%	-1,8%	-0,1%	-1,8%
PHEV	31.000	29.550	29.100	29.100	-0,6%	-6,1%	-0,4%	-6,1%
BEV	36.000	28.200	23.600	23.500	-4,1%	-34,4%	-2,8%	-34,7%
H2-BZ	53.100	43.600	34.050	33.200	-4,3%	-35,9%	-3,1%	-37,5%

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

LNF werden nach dem Kraftfahrzeugsteuergesetz gewichtsorientiert besteuert.[21] 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 gewichtsorientierten Besteuerung (§ 9 Abs. 2 KraftStG). Innerhalb dieser Rahmenbedingungen nutzt REF-2020 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.

Laut AfA-Tabelle des Bundesministeriums der Finanzen beträgt die Nutzungsdauer für LKW 9 Jahre. Eine Sonder-AfA wird für E-NFz in Höhe von 50% im ersten Jahr zusätzlich zur normalen Abschreibung gewährt.

[21] Die Sonderregelung § 18 Abs. 12 KraftStG, wonach LNF unter bestimmten Bedingungen wie PKW besteuert wurden, wird in ASTRA REF-2020 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.

Annahmen über die erwartete Jahresfahrleistung sind für die Kaufentscheidung relevant. Hierbei ist die Nutzungsart der LNF zu berücksichtigen, wodurch die erwartete Jahresfahrleistung in REF-2020 differenziert nach LNF-Segmenten hinterlegt ist. 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 relativ 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 gehaltene Fahrzeuge wird eine deutlich niedrigere erwartete Jahresfahrleistung von 9400 Fzg-km/ Jahr basierend auf Angaben des Statistischen Bundesamts (2011) angenommen.

Tabelle 19 zeigt exemplarisch die Fahrzeug- (Anschaffung und Betrieb) und Energiekosten pro km für das LNF-Segment „Gewerbe“, wie sie in die Kaufentscheidung eingehen.

Tabelle 19: Kosten im LNF-Kaufentscheidungsmodell (Gewerbe, in €$_{2010}$/km)

Kostenart	Antriebs-art	Jahr				Änderung 2020 bis 2030		Änderung 2020 bis 2035	
		2020	2025	2030	2035	% p.a.	% abs.	% p.a.	% abs.
Fahrzeug-kosten	Benzin	0,209	0,216	0,222	0,225	0,6%	6,5%	0,5%	7,7%
	Diesel	0,206	0,213	0,219	0,222	0,6%	6,3%	0,5%	7,5%
	CNG	0,233	0,232	0,231	0,231	-0,1%	-0,8%	0,0%	-0,7%
	LPG	0,211	0,217	0,222	0,224	0,5%	4,9%	0,4%	6,2%
	Hybrid	0,235	0,235	0,234	0,234	0,0%	-0,5%	0,0%	-0,4%
	PHEV	0,238	0,224	0,229	0,229	-0,4%	-3,8%	-0,3%	-3,8%
	BEV	0,228	0,191	0,169	0,173	-2,9%	-25,8%	-1,8%	-24,1%
	H_2-BZ	0,316	0,197	0,203	0,210	-4,3%	-35,7%	-2,7%	-33,5%
Energie-kosten	Benzin	0,074	0,082	0,081	0,080	0,9%	9,8%	0,5%	8,1%
	Diesel	0,056	0,065	0,066	0,066	1,6%	17,7%	1,1%	17,3%
	CNG	0,049	0,057	0,065	0,065	2,9%	33,4%	1,9%	32,7%
	LPG	0,069	0,067	0,056	0,055	-2,0%	-17,9%	-1,5%	-20,4%
	Hybrid	0,063	0,072	0,075	0,075	1,6%	17,7%	1,1%	17,5%
	PHEV	0,171	0,158	0,137	0,124	-2,2%	-19,9%	-2,1%	-27,3%
	BEV	0,068	0,063	0,055	0,050	-2,2%	-19,9%	-2,1%	-27,3%
	H_2-BZ	0,179	0,166	0,136	0,121	-2,7%	-23,7%	-2,6%	-32,5%

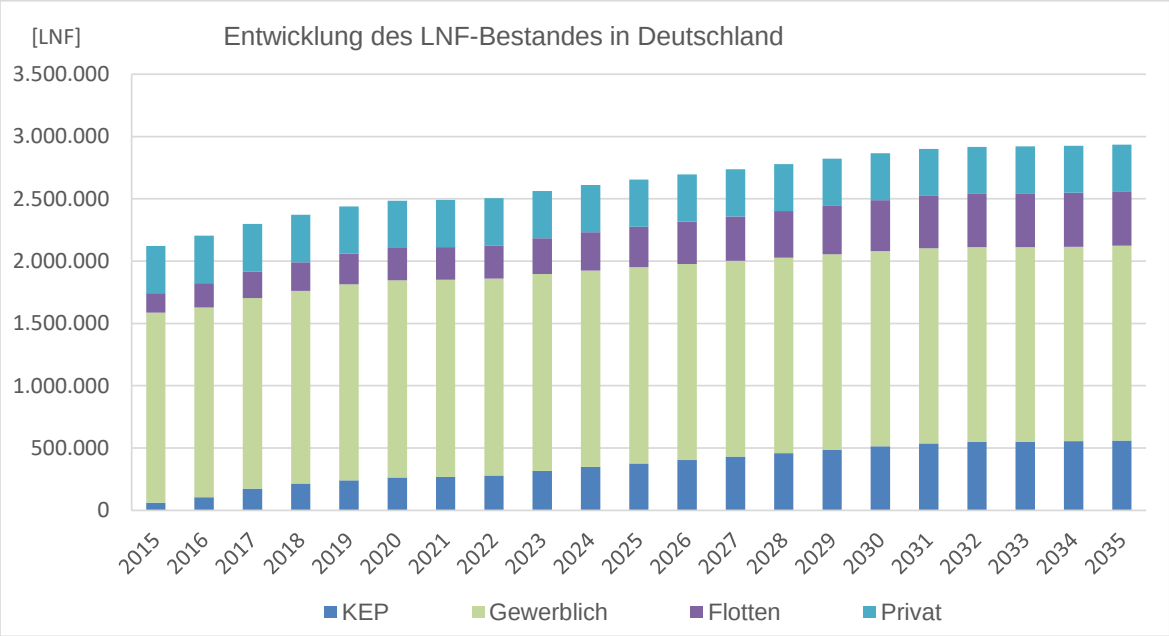
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

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, das Verschrottungsverhältnis sowie die jährliche Fahrleistung innerhalb statistischer Abweichungen kalibriert werden. Hierfür werden vorhandene Datensätze des Bestandes und der Neuzulassungen mit den in ASTRA-M für REF-2020 endogen berechneten Zahlen verglichen. Um die Technologiedifferenzierung richtig abzubilden, können darüber hinaus die Parameter des Kaufentscheidungsmodells aus Kapitel 7.2 kalibriert werden.[22]

7.4 Entwicklung der Flotte LNF

Abbildung 48 stellt die modellierte Bestandsentwicklung nach Segmenten bis 2035 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 (hellblaue Balken). Im Gegensatz dazu wird der Bestand an LNF im KEP-Dienst weiterhin wachsen (dunkelblaue Balken). Im Jahr 2018 betrug ihr Anteil am Gesamtbestand noch 3,5%. Von den 140.000 Fahrzeugen, die 2018 im KEP-Markt im Einsatz waren, ist mit 66% der überwiegende Teil den LNF zuzuordnen (BIEK, 2018). Das Wachstum des Sektors wird sich weiterhin in einer steigenden Nachfrage nach LNF niederschlagen.

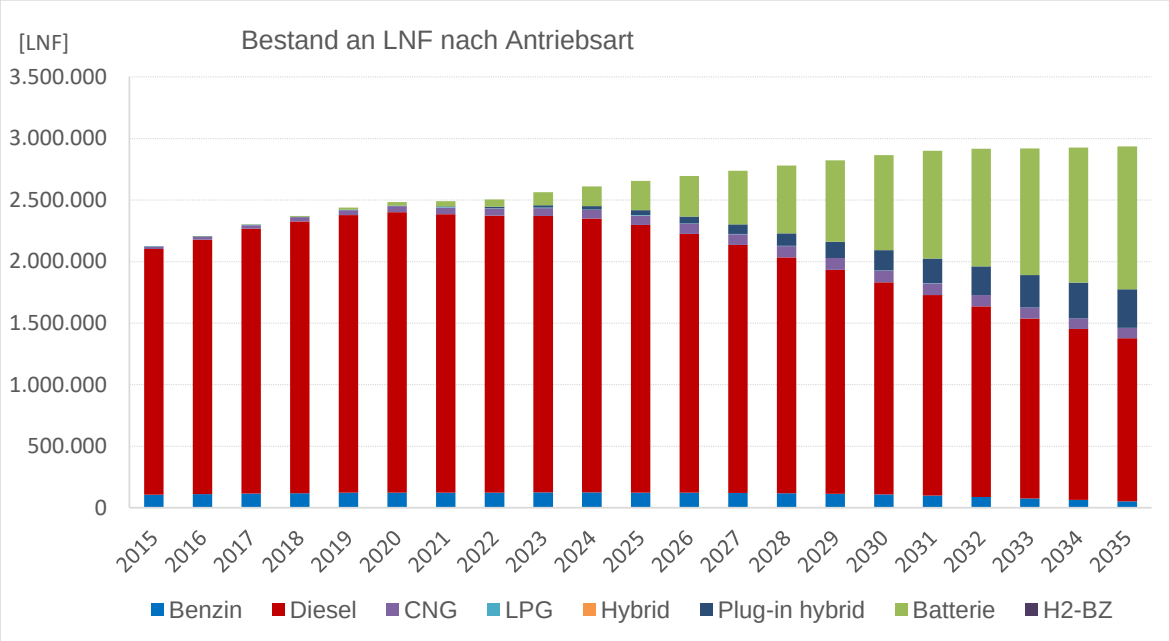
[22] Einschränkend wirkt die Tatsache, dass nicht hinreichend viele LNF der verschiedenen Technologien am Markt verfügbar sind. Eine valide Kalibrierung und Modellierung wird dennoch durch die Nutzung verschiedener Datenquellen, Studienergebnisse und stetige Prüfung von Annahmen sichergestellt.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 48 Entwicklung des LNF-Bestandes bis 2035 nach Segmenten

Im heutigen Bestand dominieren Fahrzeuge mit Benzin- oder Dieselantrieb (siehe Abbildung 49). Im Jahr 2020 werden knapp 98% der LNF mit Diesel oder Benzin angetrieben. Weniger als 1% der LNF im Bestand sind BEV (KBA, 2021). KEP-Dienste weisen bereits 2018 mit 3% elektrisch angetriebenen Fahrzeugen eine höhere Elektrifizierungsrate auf als die restlichen LNF-Segmente (BIEK, 2018). Diese Zahlen finden sich auch in REF-2020 wieder. In Zukunft wird der Anteil an elektrisch angetriebenen LNF im Bestand kontinuierlich steigen und im Jahr 2030 ca. 27% erreichen (2035: 39%).

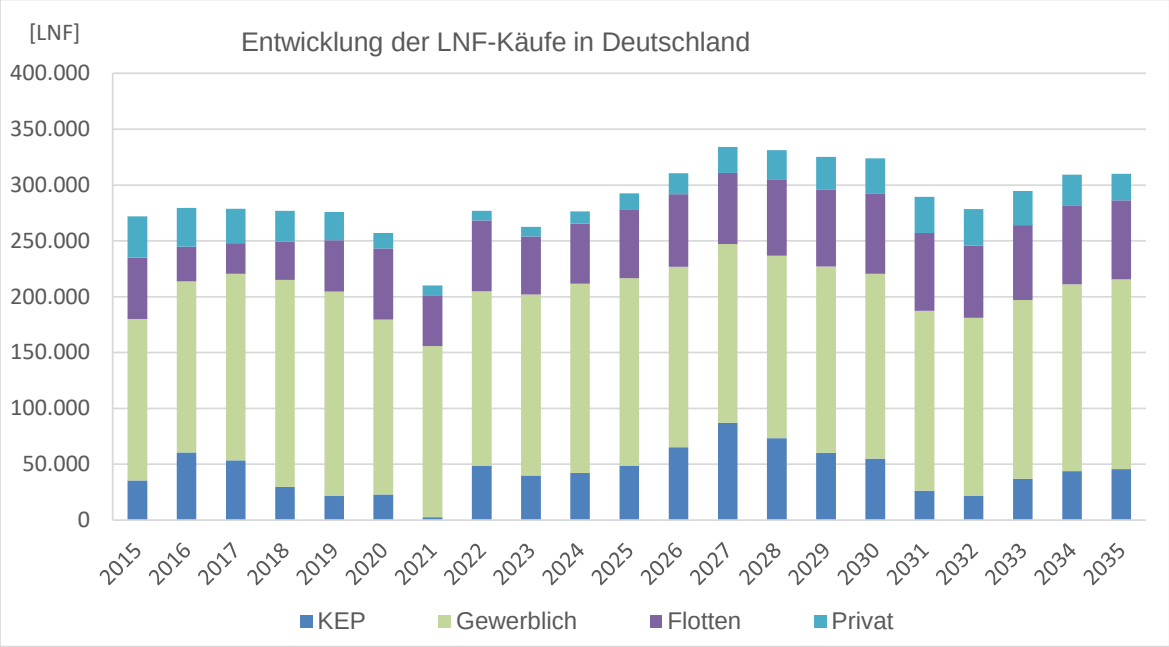


Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 49 Bestand an LNF nach Antriebsart bis 2035

7.5 Entwicklung der Neuzulassungen LNF

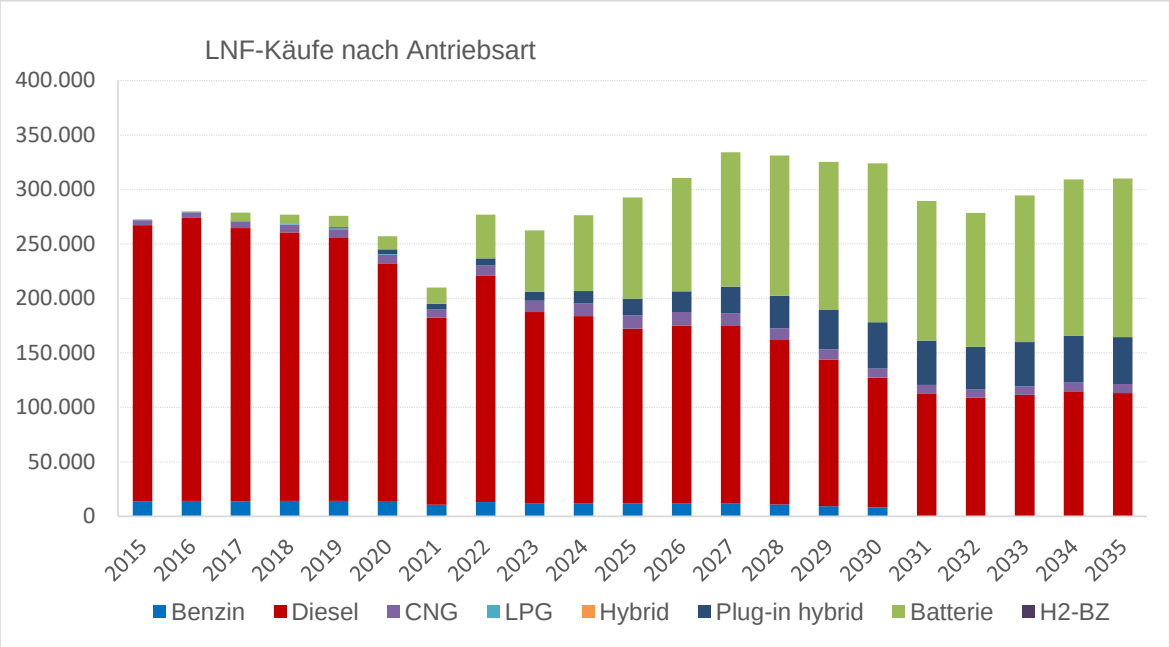
Abbildung 50 stellt die modellierten Neuzulassungen nach Segmenten bis 2035 dar. Im Jahr 2020 betrug die Neuzulassung in REF-2020 etwa 260.000 LNF. Laut VDA wurden 2020 tatsächlich gut 275.000 LNF zugelassen. Der deutsche Markt für LNF hat im Coronajahr 2020 einen vergleichsweise moderaten Rückgang verzeichnet. Treiber dieser robusten Entwicklung war das dynamische Wachstum des Online- und Versandhandels. In den nächsten Jahren wird die Zahl an LNF-Käufen weiter zunehmen. Dieser Anstieg betrifft (fast) alle Segmente. Einzig die Nachfrage nach privat zugelassenen LNF wird nicht die Höhe vergangener Jahre erreichen.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 50 Entwicklung der LNF-Käufe bis 2035 nach Segmenten

Der Anteil von Benzin- und Dieselfahrzeugen an den Neuzulassungen beträgt derzeit etwa 93%, während der Anteil BEV an den Neuzulassungen über 4,7% aufweist (KBA, 2021). Die Offenheit für alternative Antriebe beim Kauf von LNF wird in Zukunft weiter zunehmen (siehe Abbildung 51). Aufgrund von sinkenden Anschaffungskosten, geringeren Energie- sowie Wartungs- und Reparaturkosten entwickeln sich elektrisch angetriebene LNF zu einer echten Alternative gegenüber Dieselfahrzeugen. Auch CNG-Fahrzeuge stellen eine Alternative zu konventionell angetriebenen LNF dar, weil sie die geringsten TCO aufweisen. Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen kurz- bis mittelfristig dagegen über eine unattraktive Kostenstruktur (siehe Matt und Flämig, 2018). Aufgrund der Anforderungscharakteristik an die Fahrzeuge werden vor allem im KEP-Dienst verstärkt alternative Antriebe nachgefragt werden. Insgesamt werden bis 2030 mit 45% (2035: 47%) fast die Hälfte aller neu zugelassenen LNF einen batterieelektrischen Antrieb aufweisen.

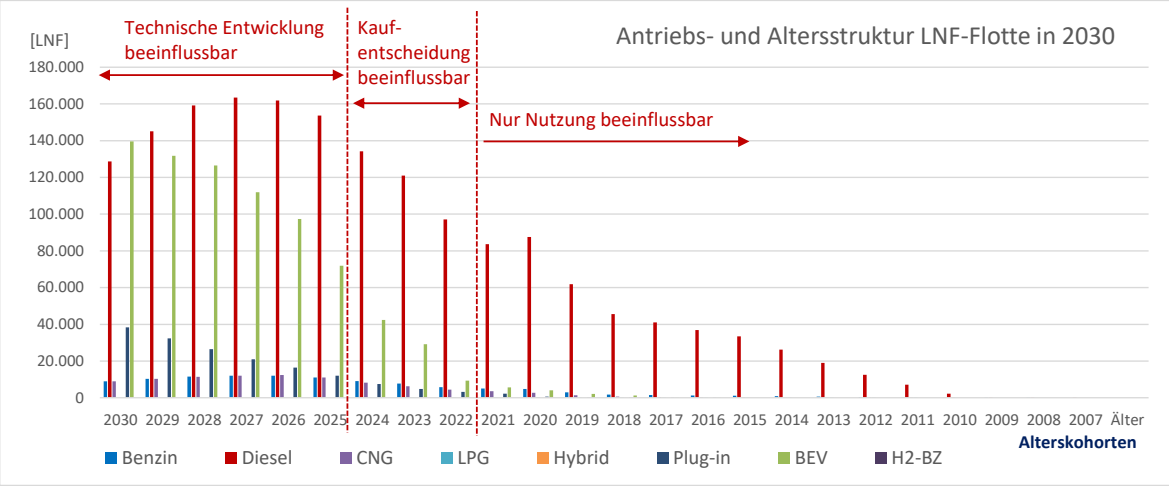


Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 51 Kauf von LNF nach Antriebsart bis 2035

Die derzeitigen Instrumente gekoppelt mit der Technologie- und Kostenentwicklung bei BEV führen demnach zu einer starken Elektrifizierung. Nach 2030 kann sich die Dynamik der Elektrifizierung aufgrund des Endes einiger Anreizinstrumente nicht halten und der Hochlauf an BEV weist einen geringeren Wachstumstrend auf. In Analogie zum Hochlauf der PKW-Neuzulassungen soll eine per se-Änderung der Präferenzen bei zukünftigen LNF-Käufen hin zu elektrischen Antrieben bis zum Jahr 2050 in kommenden Modellerweiterungen von ASTRA-M integriert werden.

Abbildung 52 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 in 2030 aus Fahrzeugen der Kohorten von 2020 und früher beträgt nur 14% (ca. 405.000 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 CO_2-Flottenstandards für Neuwagen ab 2021 können die THG-Effizienz von 86% der LNF-Flotte in 2030 verändern (2,5 Millionen LNF). Die Effizienzentwicklung der LNF wird im nächsten Kapitel erläutert.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 52 LNF-Bestand nach Antriebsart und Altersstruktur in 2030

7.6 Effizienzentwicklung LNF

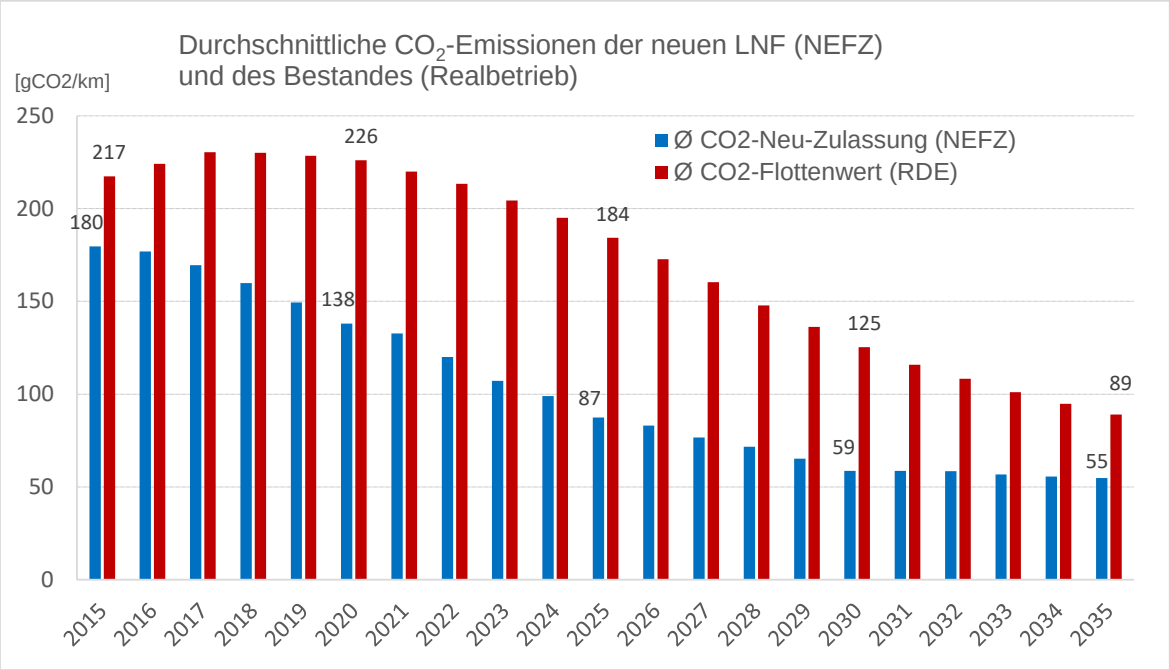
Auch für die LNF hat die EU-Kommission, ähnlich wie bei PKW, CO_2-Zielwerte für die Neuwagenflotte eines Jahres festgesetzt. Diese und weitere Maßnahmen führen dazu, dass sich die Effizienz der LNF verbessern wird und alternative Antriebe an Bedeutung gewinnen werden.

Laut EU-Verordnung 2019/631 ist von 2020 bis 2024 ein Flottenzielwert der Neuzulassungen von 147 gCO_2/km (gemessen in NEFZ)[23] für LNF zu erreichen. Ab dem Jahr 2025 legt die Verordnung ein strengeres flottenweites CO_2-Emissionsziel fest, das als 15% Reduzierung gegenüber 2021 definiert ist. Ab 2030 wird der Wert auf 31% gegenüber 2021 verschärft. Die jährlichen spezifischen Emissionsziele jedes Herstellers basieren auf diesen flottenweiten EU-Zielen unter Berücksichtigung der durchschnittlichen neu zugelassenen Fahrzeuge.

Abbildung 53 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 CO_2-Emissionen von 2016 bis 2020. Dies bedeutet eine Verbesserung der Effizienz um rund 2% bis 8% p.a. Mit einer Verzögerung wird dieser Effekt auch im Bestand sichtbar (roter Balken). Die jährliche Effizienzverbesserung im Bestand steigt ab 2024 auf über 4,5%. Es ergibt sich im Modell ein durchschnittlicher Wert der CO_2-Emissionen der neu registrierten LNF von 138 gCO_2/km in 2020 und von 87 gCO_2/km in 2025. In 2020 beträgt die Differenz zwischen den Neuzulassungen und dem Durchschnittswert im Bestand etwa 88 gCO_2/km oder 64%; bis im Jahr 2030 verändert sich die Differenz auf knapp 67 gCO_2/km oder 114% (2035: 34 gCO_2/km oder 63%). In 2030 liegt der Wert der neuzugelassenen LNF bei 59 gCO_2/km nach NEFZ bei Anteilen von 3% CNG-Antrieben, rund 13% Hybriden und 45% BEV. Der durchschnittliche Flottenwert liegt dann bei

[23] Ab 2021 basieren die Emissionsziele für Hersteller auf dem neuen WLTP-Emissionsprüfverfahren.

125 gCO_2/km. Bis im Jahr 2035 sinkt der Wert der CO_2-Emission für NZL auf 55 gCO_2/km und der durchschnittliche Flottenwert auf 89 gCO_2/km.



Quelle: Ausgangsdaten nach KBA, Berechnung, M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 53 Entwicklung des CO_2-Flottenwertes der Neuzulassungen (nach NEFZ) und des Bestandes an LNF (Realbetrieb)

Tabelle 20 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 ab 2015 folgenden 5-Jahresperioden, dann fällt für die Erreichung der Zielwerte die Effizienzverbesserung in der Periode 2020 bis 2025 am deutlichsten aus. 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 20: Entwicklung der Energieeffizienz im Realbetrieb der LNF-Flotte (in kWh/km)

	Energieverbrauch in kWh/km					Durchschnittliche jährliche Verbesserung in %				
Segment	2015	2020	2025	2030	2035	20 vs 15	25 vs 20	30 vs 25	35 vs 30	35 vs 15
Benzin	0,832	0,862	0,761	0,681	0,659	0,7%	-2,5%	-2,2%	-0,7%	-1,5%
Diesel	0,809	0,855	0,769	0,687	0,638	1,1%	-2,1%	-2,2%	-1,5%	-1,6%
CNG	0,930	0,874	0,773	0,712	0,683	-1,2%	-2,4%	-1,6%	-0,8%	-2,0%
LPG	1,132	1,170	1,129	1,109	1,112	0,7%	-0,7%	-0,4%	0,0%	-0,1%
Plug-in	0,646	0,648	0,637	0,624	0,613	0,1%	-0,3%	-0,4%	-0,4%	-0,3%
BEV	0,264	0,260	0,255	0,250	0,246	-0,3%	-0,4%	-0,4%	-0,3%	-0,5%
H_2-BZ	n.a.	0,697	0,684	0,669	0,657	n.a.	-0,4%	-0,4%	-0,4%	n.a.

n.a. zu diesem Zeitpunkt kein Fahrzeug mit diesem Antrieb in der Flotte

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf HB-EFA 3.1, ASTRA-2020.

8 Referenzszenario der Flotte schwerer Nutzfahrzeuge (SNF)

In ASTRA-M werden unter schweren Nutzfahrzeugen (SNF) alle LKW über > 3,5 Tonnen zulässigen Gesamtgewichtes (zGG.) verstanden.

Zentrale Instrumente für einen forcierten Markthochlauf alternativ betriebener SNF bilden die Straßenbenutzungsgebühr (*LKW-Maut*, derzeit >7,5t zGG, vergangene Entwicklung sowie weitere Ausnahmen siehe Kapitel 8.2); die CO_2-Standards für LKW über 16t zGG (EU VO 2019/1242) und auch das „Energieeffiziente und/oder CO2-arme schwere Nutzfahrzeuge“ ((EEN, >7,5t zGG, ≤40% der Mehrkosten alternativer LKW) sowie Förderung von privaten Ladesäulen für BEV-SNF den Rahmen wichtiger Instrumente. Zudem wirkt sich der durch das BEHG erhöhte Treibstoffpreis (Kapitel 4.8) auf die SNF-Zusammensetzung aus, auch wenn dieser keine exklusive SNF-Maßnahme darstellt.

Für SNF sind neben den CO_2-Standards (EU VO 2019/1242) auch die sogenannten Euro-Normen zur Begrenzung der Schadstoffemissionen der SNF (EU VO 582/2011) einzuhalten.

Alle in REF-2020 eingestellten Maßnahmen sowie die Jahre der Einführung und des Auslaufens sind in Tabelle 8, Kapitel 5.1 aufgeführt.

Im Rahmen der Entwicklung des REF-2020 wurde die Modellierung der SNF-Flotte verbessert und angepasst. Insbesondere wurde die Modellierung der Maut verfeinert, um die Veränderungen der Gesetzgebung genauer wiederzugeben, Verzerrungen der Verteilung der bemauteten Fahrleistung gegenüber der Flottenstruktur einzubeziehen sowie kommende Maut-Bestandteile aufzunehmen (siehe Kapitel 8.2). Zur technologie-gestützten Ableitung der Kaufpreise der SNF wurde ein Komponentenmodell entwickelt (Kapitel 8.3.4). Auch die

Berechnung der Vollkosten wurde verfeinert (Kapitel 8.3.3). Insgesamt wurde das Kaufentscheidungsmodell (Kapitel 8.3) um verschiedene Aspekte neben den TCO erweitert, für welche angenommen werden kann, dass sie in nennenswertem Maße ebenfalls die Kaufentscheidung beeinflussen: so etwa anfängliche Akzeptanzprobleme von wenig bekannten Antriebstechnologien oder auch die Auswirkungen der Präferenzen der Fahrzeughersteller auf die Kaufentscheidungen für verschiedene Antriebstechnologien und schließlich der Einfluss der Hinlänglichkeit der Energieversorgungsinfrastruktur auf das Kaufverhalten. Auch die Kosten für private Ladesäulen beim Umstieg von Diesel auf BEV-SNF sind nun Teil der Vollkosten abzüglich entsprechender Förderungen.

Des Weiteren bewirken unzureichende Hochläufe der Energieversorgungsinfrastruktur (Tankstellen, Ladestationen, Oberleitungen) einen verringerten Kauf der betroffenen Antriebstechnologien.

8.1 Übersicht über die Modellierung der SNF-Flotte

Das Fahrzeugflottenmodul beschreibt die Zusammensetzung der SNF-Flotten durch ein Kohortenmodell, welches eine detaillierte Abbildung der Altersstruktur ermöglicht: Jedes Vierteljahr (Länge eines Simulationsschritts von ASTRA-M) altern die Fahrzeuge um ein Vierteljahr, wobei durch 100 Kohorten somit 25 Jahre differenziert abgebildet werden. Die letzte Kohorte ist definiert als '*25 Jahre und älter*'.

Die SNF werden in ASTRA zusätzlich nach drei Dimensionen differenziert: Antriebstechnologie, Abgasnorm, Größen-/Gewichtsklasse. Dadurch kann die Diffusion neuer Technologien in der Flotte unter Berücksichtigung verschiedener Nutzungsformen adäquat abgebildet werden, wobei in den drei Dimensionen folgende Kategorien gelten:

<u>Antriebstechnologie:</u>

- Diesel[24]
- CNG (Compressed Natural Gas = Komprimiertes Erdgas)
- LNG (Liquified Natural Gas = Flüssiges Erdgas)
- Batterie-elektrisch (BEV = Battery-Electric-Vehicle)
- Oberleitungs-Diesel-Hybrid (Dieselmotor für nicht elektrifizierte Strecken[25])
- Wasserstoff-Brennstoffzelle (H2-BZ).

<u>Abgasnorm:</u>

- Prä-Euro
- Euro1
- Euro2
- Euro3
- Euro4
- Euro5 & EEV
- Euro6

[24] Einige wenige Benziner-LKW aus den kleinen Gewichtsklassen sind hier ebenfalls eingeordnet, da bei SNF aufgrund der kleinen Zahl keine separate Benziner-Kategorie modelliert ist.

[25] Prinzipiell ist Oberleitungstechnologie auch ohne Verbrennungsmotor möglich, durch größere Batterie, (O-BEV), jedoch durch mangelnden Infrastrukturaufbau nicht im REF-2020-Szenario.

Größen-/Gewichtsklasse:

- >3,5t ≤7.5t
- >7.5t ≤12t
- >12t≤20t
- >20t
- Sattelzugmaschinen (SZM)

Das heißt, ein maximal aufgelöstes Element dieser Differenzierung wäre beispielsweise der Bestand aller Dieselfahrzeuge mit Euro3 Norm, >7.5t ≤12t, zwischen 3.5 und 3.75 Jahren Alter.

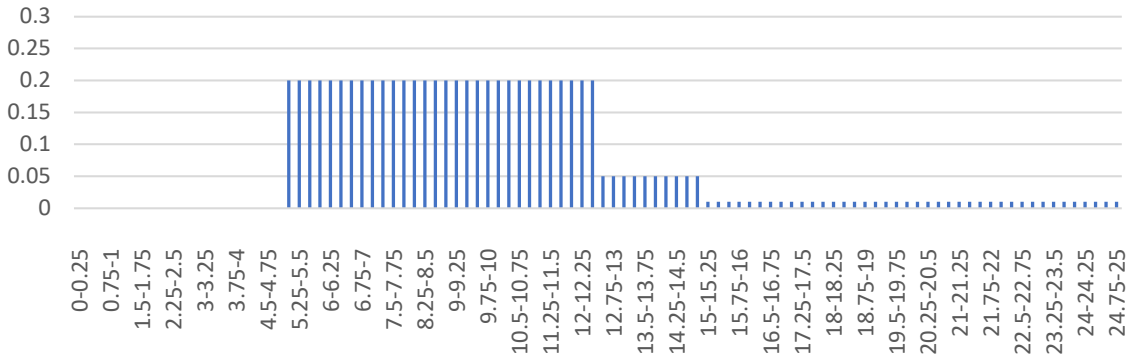
Der Bestand an SNF wird durch Zu- und Abgänge beeinflusst, d.h. Neuzulassungen respektive Außerbetriebnahme (Verschrottungen/Exporte), wobei der Zugang natürlich nur den Bestand der jüngsten Alterskohorte erhöht.

8.1.1 Modellierung der Raten der Außerbetriebnahme von SNF

Die Außerbetriebnahme wird durch anteilige Basisraten der Außerbetriebnahme ausgedrückt, welche anhand der Daten zu Neuzulassungen und Beständen kalibriert wurden. Diese werden jedoch anhand der Güterverkehrsnachfrage modifiziert, um die tatsächlichen Raten der Außerbetriebnahme zu ergeben.

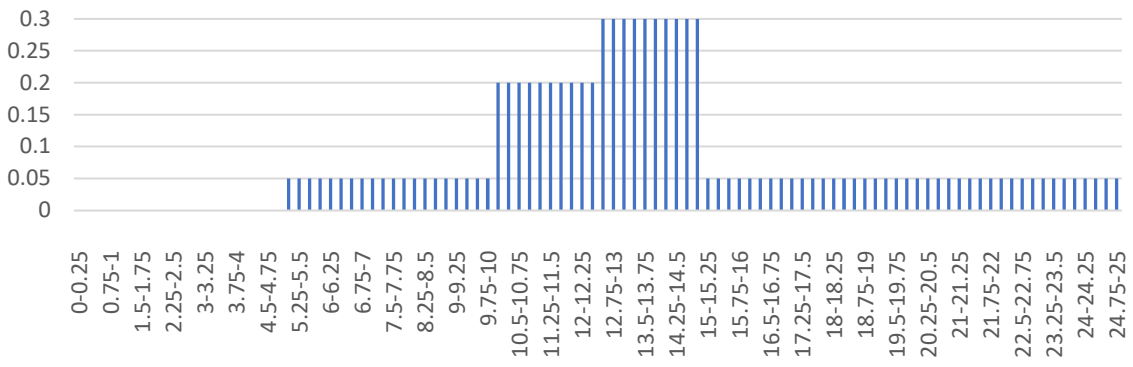
Für die Basisraten der Außerbetriebnahme wird zunächst angenommen, dass die ersten 5 Jahre gar keine Außerbetriebnahme stattfindet (die ersten 20 Vierteljahre in den untenstehenden Abbildungen auf der linken Seite).

Für ältere SNF werden die Basisraten der Außerbetriebnahme in folgende Altersklassen aufgeteilt, innerhalb derer die Rate als gleich angenommen wird: 6-10 Jahre, 10-12,5 Jahre; 12,5-15 Jahre; 15-20 Jahre; >20 Jahre.



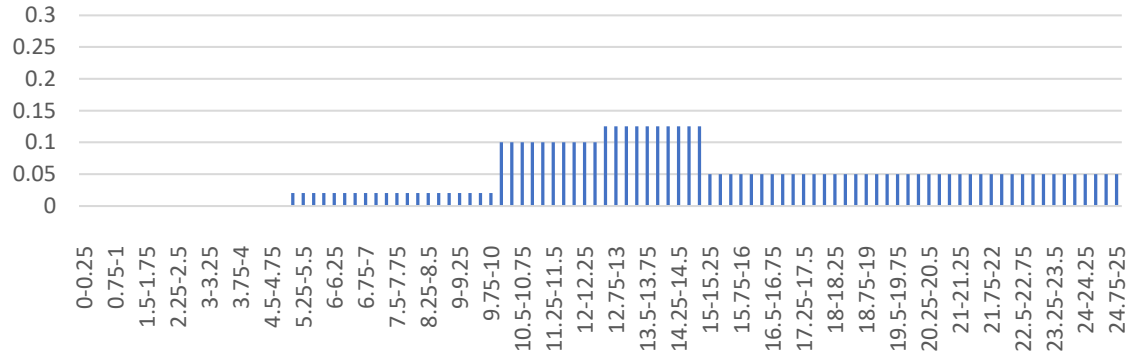
Quelle: M-Five ASTRA-2020.

Abbildung 54 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für Sattelzugmaschinen in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a].



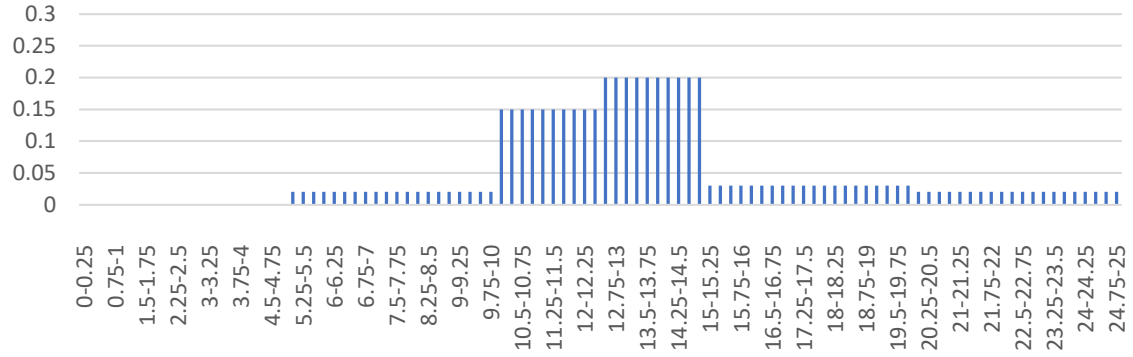
Quelle: M-Five ASTRA-2020.

Abbildung 55 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >20t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a]



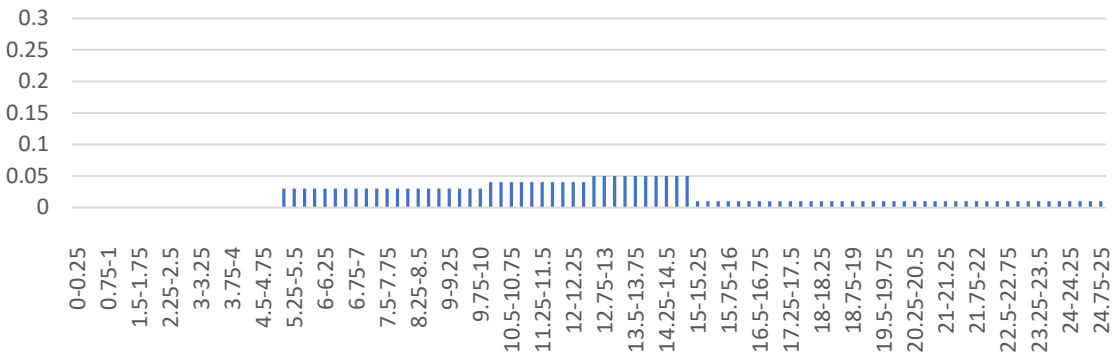
Quelle: M-Five ASTRA-2020.

Abbildung 56 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >12t ≤20t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a]



Quelle: M-Five ASTRA-2020.

Abbildung 57 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >7,5t ≤12t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a]

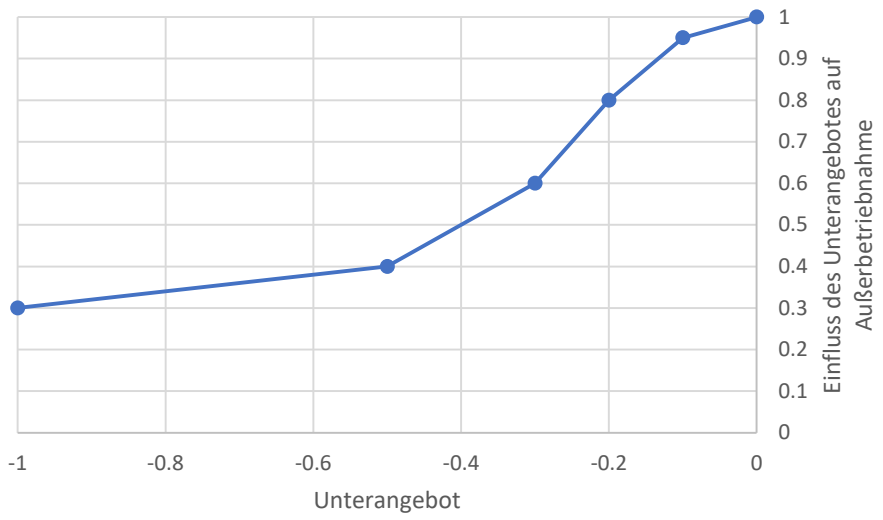


Quelle: M-Five ASTRA-2020.

Abbildung 58 Vierteiljährliche anteilige Basisrate der Außerbetriebnahme [Anteil/a] für SNF >3,5t ≤7,5t in Abhängigkeit des Fahrzeugalters [a]

Bei der Betrachtung der Grafiken fällt auf, dass die Verschrottungsraten für die meisten zGG (außer SZM) zunächst mit steigendem Alter ansteigen, dann aber wieder abfallen. Dies erklärt sich dadurch, dass zwei verschiedene Nutzungsstrategien angenommen werden: Viele Logistikunternehmen werden ihre Fahrzeuge genau dann veräußern, wenn wegen steigender Kosten für Wartung/Reparatur die Anschaffung eines Neufahrzeugs ökonomischer ist, was in Summe zu Exporten (und Verschrottungen) führt. Dadurch erklären sich die zunächst steigenden Basisraten der Außerbetriebnahme. Es wird jedoch auf Grund der Struktur des Bestandes und der Kalibrierung angenommen, dass es auch Nutzergruppen gibt, welche ältere Fahrzeuge bei geringer KM-Leistung bis zu deren Verschrottung nutzen, wodurch sich die geringeren Raten der älteren Fahrzeuge erklären. Sattelzugmaschinen werden hingegen aus ökonomischen Gründen in Deutschland meist nur wenige Jahre genutzt, bis die Wartungs- und Reparaturkosten so wie dadurch bedingte Ausfälle zu teuer werden. Daher sind die Raten der Außerbetriebnahme schon nach wenigen Jahren sehr hoch und nehmen danach stark ab.

Diese Basisraten gelten jedoch nur, wenn der Transportbedarf gedeckt oder überdeckt ist. Wenn jedoch der Transportbedarf höher als das Angebot ist, wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge länger genutzt werden. Die Raten der Außerbetriebnahme werden dann entsprechend dieser Unterdeckung reduziert: Wenn der Bedarf doppelt so hoch wie das Angebot an Transportleistung ist (oder höher) dann wird die Rate der Außerbetriebnahme auf 30% der Basisrate reduziert. Zwischen dem doppelten des Bedarfes und der Deckung des Bedarfes wird ein S-förmiger Verlauf angenommen, da ein weicher Schwellenwert als am wahrscheinlichsten eingestuft wird (siehe Abbildung 59).



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 59 Abhängigkeit der Reduktion der Rate der Außerbetriebnahme (Faktor) in Abhängigkeit der Deckung des Transportbedarfes: ganz links: Bedarf=2*Angebot, ganz rechts: Bedarf=Angebot.

8.1.2 Modellierung der SNF-Neuzulassungen

Die Neuzulassungen ergeben sich im Wesentlichen aus der Differenz zwischen der Flotte, die benötigt wird, um die Nachfrage zu befriedigen, unter Berücksichtigung der SNF-Außerbetriebnahmen. Der wichtigste Treiber der Neuzulassungen ist die durch LKW bereitgestellte bzw. abgewickelte Fahrleistung. Im Güterverkehrs-Sektor von ASTRA wird die *Inlands*fahrleistung aus Transportleistung (tkm) und Beladungsfaktoren, differenziert nach inländischen Transporten (*Domestic:* DE-DE), *Transit* (Grenze zu Grenze) und *Trade* (DE->Grenze, Grenze->DE)), berechnet. Da jedoch hier nur die Fahrzeugbestände der Inländer und damit die Neuzulassungen in Deutschland explizit modelliert werden, wird die *Inlands*fahrleistung zunächst in eine *Inländer*fahrleistung umgerechnet. Dazu werden die Anteile der Ausländer an der Inlandsfahrleistung herausgerechnet und die Strecken deutscher LKW im Ausland hinzugerechnet.

Für *Trade* und *Transit* sind die Gesamt-Strecken (In- und Ausland) für LKW ≤12t 1,5 mal so lang wie der Streckenanteil im Inland (welcher somit zwei Drittel der Gesamtstrecke beträgt), für LKW >12t wird hingegen die Gesamtstrecke 3 mal so lang wie der innerdeutsche Teil. Diese Faktoren wurden so gewählt, dass vorhandene Daten zur Inländerfahrleistung[26] hinreichend gut abgebildet werden. Da dieses Faktoren-System jedoch im mathematischen Sinne für eine Kalibrierung überbestimmt ist, es also mehrere Lösungskombinationen gibt, wurde manuell kalibriert unter Hinzunahme von Plausibilitätsgesichtspunkten. Beispielsweise wurde für Touren, die teilweise im In- und Ausland verlaufen, angenommen, dass für *Transit* der ausländische Anteil am höchsten ist, für *Domestic* am niedrigsten.

[26] *BASt 2017a*; *KBA 2020*; KBA *2019*

Interessant ist, dass die resultierenden Faktoren für Trade und Transit kleiner Fahrzeuge höhere ausländische Anteile erbracht hat als für große Fahrzeuge, obwohl man für letztere aus Kostengründen eher längere Strecken erwarten würde. Es könnte jedoch sein, dass deutsche Unternehmen für Kabotage im Ausland vor allem größere Fahrzeuge einsetzen, während ausländische Unternehmen evtl. stärker als deutsche auch auf kleinere Fahrzeuge für Kabotage in Deutschland setzen. Eine andere mögliche Erklärung ist, dass die weiter oben getroffene Annahme, dass die Gesamtstrecken 1,5-mal so lang sind wie deren innerdeutscher Teil, eine Unterschätzung darstellt. Die beiden Erklärungen führen jedoch zu gleichen Quantitäten, da die beiden betreffenden Faktoren multipliziert werden.

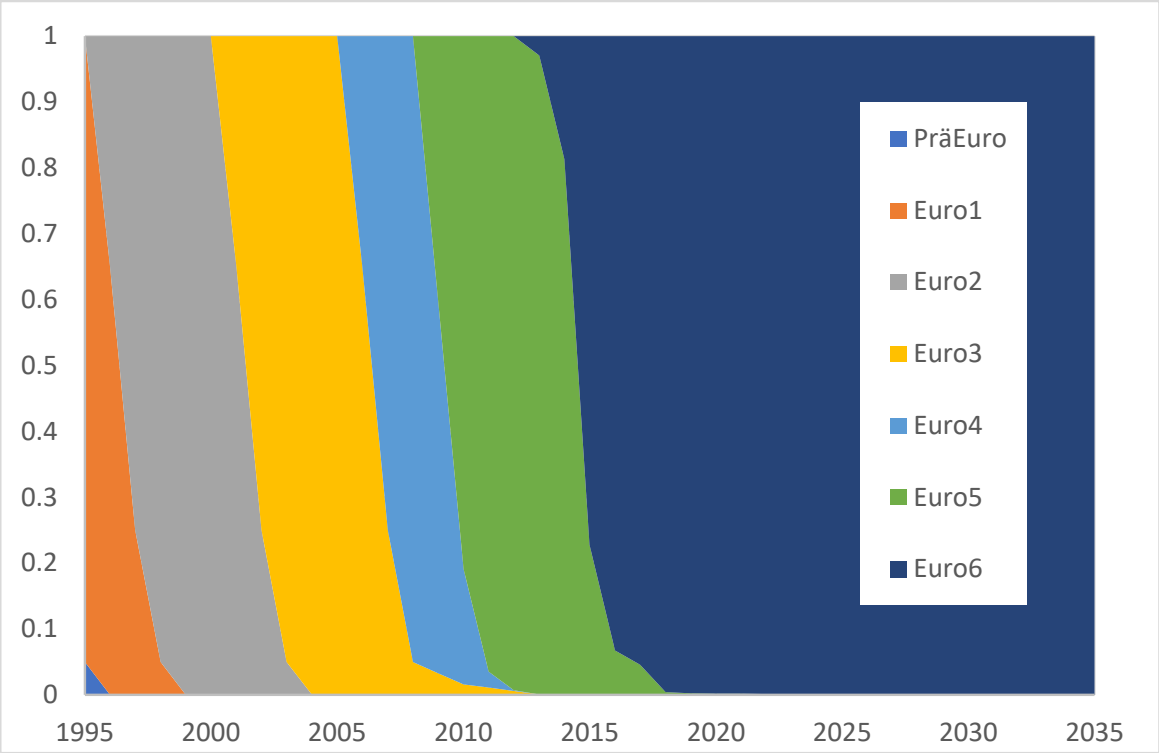
Tabelle 21: Anteile ausländischer LKW an der Fahrleistung von Strecken die teilweise auf deutschem Boden verlaufen

	≤12t	>12t
Trade (DE->Grenze-> Ausland, Ausland->Grenze->DE)	60%	50%
Transit (Ausland->DE>Ausland)	90%	80%
Domestic (innerdeutsch)	7%	30%

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

In Abbildung 60 ist die Verteilung neu zugelassener LKW auf die verschiedenen Abgasnormen dargestellt. Ab 2009 konnten exogene Daten des KBA genutzt werden, davor wurden die bekannten Zeitpunkte der Einführung einer neuen Abgasnorm genutzt wobei auch Übergangszeiträume berücksichtigt wurden in denen vorhandene Bestände von Fahrzeugen mit älteren Abgasnormen noch verkauft werden durften. Für die Geschwindigkeit der Einführung wurde für Euro1 bis Euro4 angenommen, dass die jeweils ein Quartal nach Einführung (also zu Beginn des Folgejahres) 35% Durchdringung, ein Jahr später 75% und ein weiteres Jahr später 95% und im letzten Jahr 100% erreicht würden, sofern dann nicht schon wieder der nächste Standard eingeführt worden ist (z.B. Überlappung von Euro1 und Euro2). Diese Annahmen wurden mittels manueller Kalibration so gewählt, das die nach ab 2009 verfügbaren KBA-Daten[27] zu den Anteilen der alten Emissionsstandards in der Flotte hinreichend gut abgebildet werden konnten. Diese Konsistenz war auch wichtig für die Konsistenz des REF-2020 in Bezug auf Mauteinnahmen mit den dazu verfügbaren Daten.

[27] KBA FZ-13



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 60 Anteil der Abgasnormen an den Neuzulassungen (gestapelt)

Die dargestellte Diffusion neuer Abgasnormen ergibt sich in der Realität aus den Einführungszeitpunkten neuer Abgasnormen sowie Übergangszeiträumen, in denen der Verkauf von bereits produzierten LKW älterer Abgasnormen noch möglich ist. Zu sehen ist u.a. die bekannte geringe Diffusion von Euro4, da damals schon die Euro5-Einführung absehbar war.

In Bezug auf die Zuordnung der Neuzulassungen zu den Größenklassen wurde für die ersetzten verschrotteten/exportierten LKW angenommen, dass wieder die gleichen Größenklassen gekauft werden, d.h. es wird hier eine unveränderte Nutzung unterstellt. Für jene LKW, welche zusätzlich bei gesteigerter Nachfrage gekauft werden, wurde die Unterteilung der Fahrleistung in zwei Größenklassen aus dem Güterverkehrssektor genutzt, jedoch dann jeweils noch einmal feiner unterteilt in insgesamt 5 Größenklassen. Die Aufteilungsfaktoren werden weiter unten erklärt (siehe 8.2.2, Tabelle 22, Abbildung 62). Es wird angenommen, dass die Aufteilungsfaktoren von 2 auf 5 Größenklassen für die Inlandsfahrleistung und Inländerfahrleistung gleich sind.

In Bezug auf die Aufteilung der Neuzulassungen auf verschiedene Antriebsarten nutzt ASTRA ein Kaufentscheidungsmodell, welches in Kapitel 8.3 beschrieben ist.

Für die Initialisierung der Anfangswerte der Bestände im Jahr 1995 konnten Daten des KBA differenziert nach Größenklassen genutzt werden[28]. Für die Antriebstechnologie wurde angenommen, dass damals ausschließlich Dieselfahrzeuge vorhanden waren. Da die Euro 2

[28] KBA FZ25 mit Rückwärtsextrapolation

Abgasnorm erst 1995 eingeführt wurde, ist davon auszugehen, dass die damaligen Fahrzeuge sich auf Euro 1 und Prä-Euro aufteilten. Für die entsprechenden Anteile wurde je 50% angenommen. Auf Grund der geringen derzeit und in Zukunft verbleibenden Anteile dieser Abgasnormen in der Flotte, sind Simulationsergebnisse nicht sehr sensitiv für diese Annahme. Die Aufteilung auf die Alterskohorten konnte für LKW (außer SZM) ebenfalls auf der Basis der o.g. KBA-Daten erfolgen. Für SZM wurde diese so eingestellt (d.h. manuell kalibriert), dass die resultierenden SZM-Bestandsentwicklungen bei gegebenen Annahmen zu den Außerbetriebnahmeraten (s.o.) zu den entsprechenden Daten passen. In diese manuelle Kalibration floss auch weiteres Wissen ein, welches die Freiheitsgrade bei dieser Kalibrierung einschränkt: da z.B. die Alters-Verteilung für SNF >20t bekannt ist und man auf Grund der größeren Breite von Einsatzzwecken in dieser Größenklasse davon ausgehen kann, dass sie ein höheres Durchschnittsalter haben als SZM, müssen die jüngeren Alterskohorten bei SZM stärker sein als bei SNF >20t und die älteren Alterskohorten entsprechend schwächer.

8.2 LKW-Maut

Die Berechnung der Maut ist einerseits wichtig als Teil der staatlichen Einnahmen und andererseits wegen der beabsichtigten Lenkungswirkung auf die Kaufentscheidung[29] und damit die Flottenstruktur für neue SNF und für die Nutzungsintensität existierender SNF.

8.2.1 Ausgestaltung der LKW-Maut

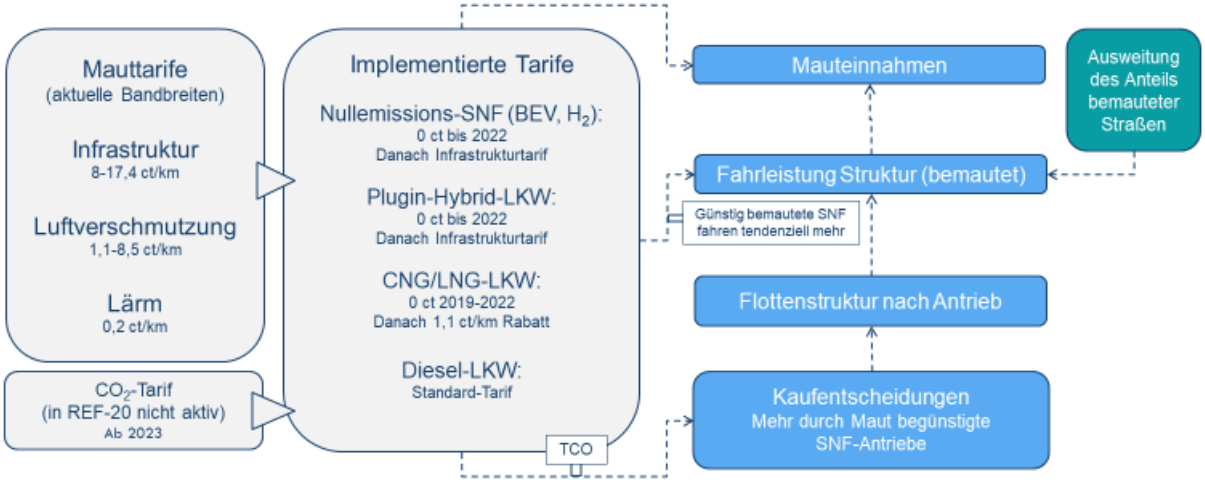
Für das Referenzszenario (REF-2020) sind die Mauttarife der Reform aus dem Jahr 2019 implementiert und bis 2035 nominal konstant gehalten. Mautbefreiungen für alternative Antriebe wurden bis 2022 implementiert. Außerdem wurde die Modellierung der Mauttarife grundlegend erneuert und desaggregiert, um deutlich genauere Ergebnisse zu erzielen.

Die Tarife sind in Abbildung 61 links dargestellt, wobei der CO_2-Tarif im Referenzszenario nicht aktiv ist. Die Mauttarife sind 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 daher ein gesamter Mauttarif von 18,7 ct/km (17,4 ct + 1,1 ct + 0,2 ct/km).

SNF ≤7,5t sind im REF-2020 komplett von der Maut ausgenommen und zwar bis zum Simulationsende in 2035. Ebenso ausgenommen sind Nullemissions- und Erdgas-SNF (CNG und LNG). Für Erdgas-SNF wurde diese Befreiung im Referenzszenario zunächst für die Zeit bis einschließlich 2022 angenommen: Diese Befreiung ist zwar offiziell bis 2023 beschlossen, aufgrund der Ablehnung der EU der Befreiung von Erdgas-SNF sowie der Novelle der Euro-Vignetten Richtlinie ab 2023 wird die Befreiung in REF-2020 nur bis 2022 gewährt. Ab 2023 sind die Tarife für Erdgas-SNF 1,1 ct/km niedriger als die Standard-Tarife

[29] Ein direkter Einfluss der Maut auf Verschrottung und Export ist nicht modelliert.

für Diesel-SNF. Die Befreiung für Elektro-SNF gilt in Anlehnung an die Elektromobilitätsdefinition im Elektromobilitätsgesetz (EmoG) für alle Elektro- und Hybrid-LKW, deren Batterie von außen aufladbar ist. Für Elektro-LKW gilt in REF-2020 ab 2023 nur der Infrastruktur-Tarif von 17,4 ct/km für Sattelzugmaschinen.



Quelle: eigene Darstellung, M-Five.

Abbildung 61 Mauttarife und deren Wirkung auf Flotten, Fahrleistung und Mauteinnahmen

Die Wirkung der differenzierten Maut-Tarife in der Modelldynamik ist in Abbildung 61 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. Die Fahrleistung reagiert stärker auf Flottenerneuerungen als die Flotten, da insbesondere für Speditionen mit besonders hoher Fahrleistung ein Umstieg auf LKW mit günstigeren Maut-Tarifen entsprechend attraktiv ist.

8.2.2 Modellierung der LKW-Maut

Der wichtigste Treiber des Mautaufkommens ist die Inlandsfahrleistung (km/a), welche im Güterverkehrs-Nachfragemodell von ASTRA berechnet wird (siehe Kapitel 11). Anders als für die Flottenmodellierung ist hier keine Umrechnung auf Inländerfahrleistung nötig, denn die Maut wird nur im Inland erhoben und ist auch von ausländischen SNF-Betreibern zu zahlen.

Die Inlandsfahrleistung wird im Nachfragemodell differenziert nach zwei Größen-Klassen berechnet (*Grobe Klassen* in Tabelle 22) (siehe auch Tabelle 39). Für die Berechnung der Maut ist jedoch eine feinere Differenzierung nötig: gegenwärtig betrifft die Maut beispielsweise Fahrzeuge unter 7,5t zGG nicht. Daher wird hier (wie auch für die Flottenmodellierung) nach 5 Größenklassen differenziert:

Tabelle 22: Einteilung von SNF in Klassen zulässigen Gesamtgewichtes (zGG.)

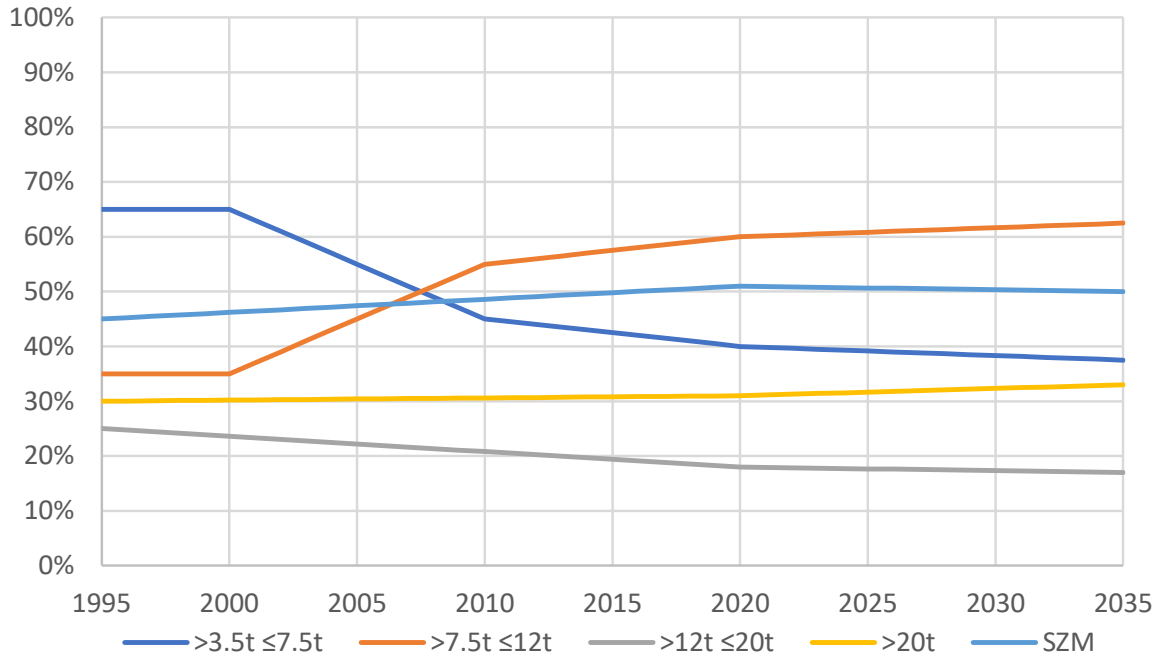
Grobe zGG.-Klassen (Verkehrsnachfragemodell)	Feine zGG.-Klassen (Kaufentscheidungsmodell, Mauteinnahme)
>3,5t ≤12t	>3,5t ≤7,5t
	>7,5t ≤12t
>12t oder Sattelzugmaschine (SZM)	>12t ≤20t
	>20t (ausgenommen Sattelzugmaschinen)
	Sattelzugmaschinen

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Für die Nutzung der Inlandsfahrleistung zur Berechnung der Maut muss somit die untere der zwei groben Gewichtsklassen auf zwei feinere Klassen aufgeteilt werden, die obere grobe auf 3 feinere Klassen (siehe Entsprechung der Zeilen in Tabelle 22).

Wie in Abbildung 62 zu sehen ist, wird angenommen, dass der Anteil, den die LKW ≤7,5t in der groben Größenklasse >3,5t ≤12t haben, nach anfänglicher Konstanz ab dem Jahr 2000 sinkt, wobei sich dieses Sinken im Laufe der Zeit abschwächt. Die LKW >7.5t ≤ 12t verhalten sich als Residual-Anteil definitionsgemäß reziprok.

Ebenso wird für den Anteil in der groben Klasse >12t für die Klasse >12t ≤20t eine Verringerung angenommen, die sich im Laufe der Zeit abschwächt, während die Klasse >20t mit einer gewissen Beschleunigung hinzugewinnt. Die SZM gewinnen jedoch anfangs Anteile hinzu, verlieren diese aber schließlich wieder leicht.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 62 Differenzierung von 2 zGG-Klassen auf 5 zGG-Klassen: Die % der unteren beiden und der oberen drei feineren Klassen ist in Summe je 100% (die gröberen 2 zGG-Klassen)

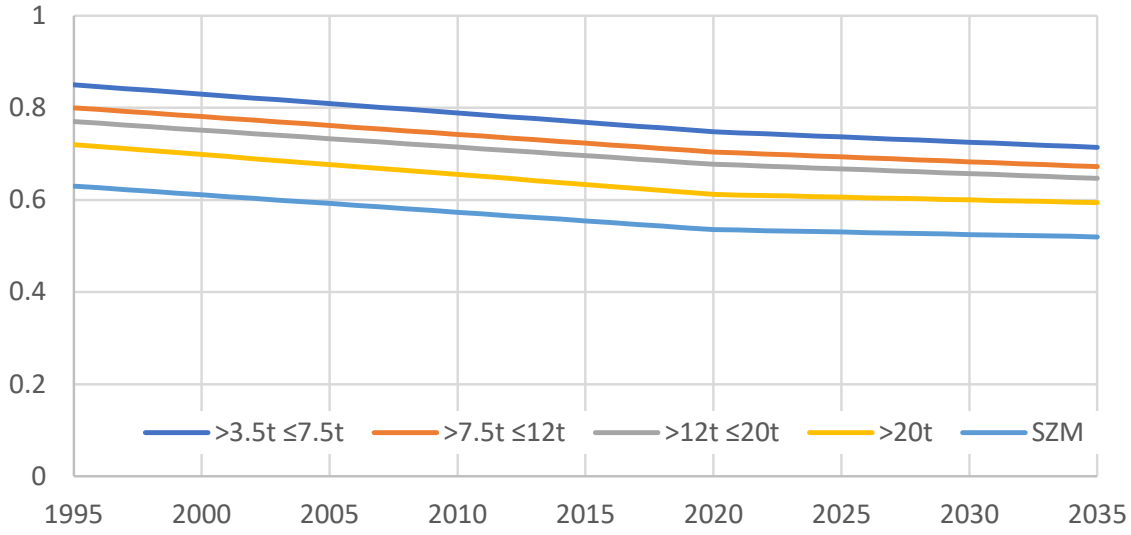
Es wird (ebenfalls in Ermangelung von Daten) angenommen, dass diese Aufteilung von zwei groben auf fünf feinere zGG-Klassen sich weder zwischen inländischer und ausländischer Inlandsfahrleistung noch von der entsprechenden Aufteilung in der Inländerfahrleistung unterscheidet (welche jedoch die Maut nur indirekt über die Treiber der Flottenentwicklung beeinflusst). Die Kalibrierung dieser Faktoren geschah anhand der Inländerfahrleistung, da hier belastbare Daten vorliegen (BASt 2017a).

Es wurde eine Unterscheidung der Inlandsfahrleistung bezüglich LKW in in- vs. Ausländischer Herkunft vorgenommen, da die entsprechenden Flotten sich (vermutlich[30]) in ihrer Zusammensetzung unterscheiden, aber auch weil (zumindest für den bemauteten Teil) hierzu differenzierte Daten vorliegen. Wiederum wegen fehlender Daten wurde auf Basis von Experteneinschätzungen ein fallender Anteil der inländischen Fahrleistung angenommen und auf Basis der bemauteten Inlandsfahrleistung kalibriert (BAG 2008 bis 2020), wobei sich dieser Anteil je nach zGG-Klasse auf unterschiedlichem Niveau befindet (siehe Abbildung 63). Wenngleich es in der Kabotage-Regulierung der EU und EWR Änderungsjahre gibt (2004, 2009 durch EU-Beitritte), wird dennoch angenommen, dass keine sprunghaften Änderungen auftraten, da zum Einen Übergangsfristen galten, und zum Anderen sich Technik, Bürokratie und Geschäftsmodelle der Unternehmen in den Beitrittsländern zunächst anpassen mussten.

Für die Zukunft wird im REF-2020 angenommen, dass die gegenwärtigen Kabotage-Regelungen weiter bestehen, also beispielsweise Bestrebungen der EU-Kommission zu erhöhter

[30] Für die Zusammensetzung der ausländischen Flotte im Kabotage-Verkehr keine Daten verfügbar.

Kabotagefreiheit keine Umsetzung finden. Andererseits muss selbst unter diesen Bedingungen eine weitere – allerdings moderatere – Steigerung der Kabotage in Deutschland angenommen werden, da die Potenziale, welche durch die gestiegene Kabotagefreiheit und das innereuropäische Lohngefälle entstanden sind, noch nicht ausgeschöpft sind (siehe Abbildung 63). Die weitere Steigerung des Auslandsanteils ist bei den beiden höheren zGG-Klassen weniger stark ausgeprägt, da dort angenommen wird, dass die Potenziale bereits stärker ausgeschöpft sind.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 63 Anteil[31] der Inlandsfahrleistung, welcher von inländischen LKW erbracht wird, differenziert nach Gewichtsklassen.

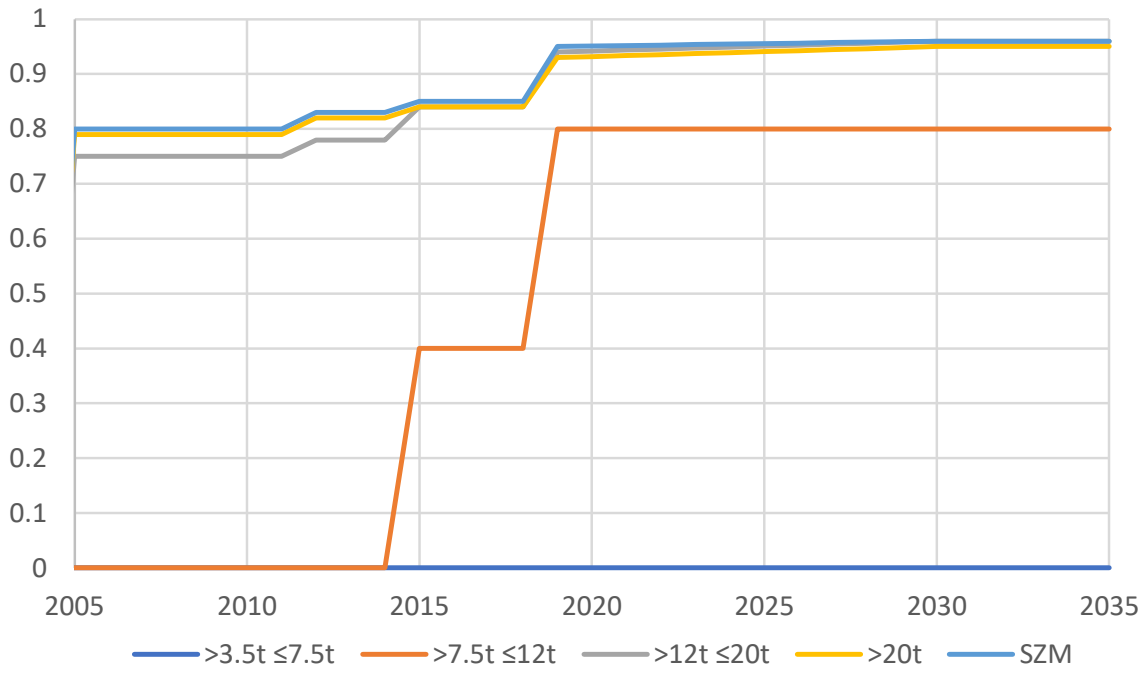
Der Anteil der Inlandsfahrleistung, welcher bemautet wird (Abbildung 64), hängt natürlich einerseits vom Anteil des Straßennetzes ab, welcher bemautet wird, ist jedoch nicht mit der Fahrleistung auf diesem gleichzusetzen, da LKW den bemauteten oder unbemauteten Anteil des Straßennetzes unterschiedlich stark nutzen können. Dennoch sollten zumindest die Zeitpunkte der Erweiterungen der Maut auf größere Anteile des Straßennetzes auch in den Anteilen der bemauteten Fahrleistung als Sprünge zu finden sein. Die Höhe dieser Sprünge wurde anhand der bemauteten Inlandsfahrleistung und der Mauteinnahmen manuell[32] kalibriert. Hierbei wurde als zusätzliche einschränkende Bedingungen berücksichtigt: Der Anteil der Fahrleistung der bemautet wird, steigt mit zGG., da längere Strecken meist auch höhere Anteile von Autobahnen und Bundesstraßen bedeuten. Dies bedeutet niedrigeres Ausgangsniveau aber auch höhere Sprünge für kleine zGG. Es erscheint zudem plausibel, dass SNF >20t im Durchschnitt anteilig an ihrer Fahrleistung mehr auf Bundesstraßen unterwegs sind als Sattelzugmaschinen. D.h. der Unterschied in dem bemauteten Anteil der Fahrleistung sollte sich mit Ausweitung der Maut auf die Bundesstraßen verringern.

[31] Anteile sind hier nicht als Prozentanteile angegeben, sondern als Bruchteil. Der Wert 1 entspräche dabei 100%.

[32] Software-gestützte Auto-Kalibrierung kann die hernach genannten einschränkenden Bedingungen nicht ausreichend berücksichtigen, und führt wegen des (u.a. daraus resultierenden) zu großen Umfangs an Freiheitsgraden tendenziell zu Kalibrierungen mit gutem Fit aber geringer Plausibilität.

Es wird erwartet, dass die Unsicherheit der tatsächlichen Höhe der bemauteten Inlandsfahrleistung mit steigenden bemauteten Anteilen des Straßennetzes sinkt, da dann immer weniger Ausweichmöglichkeiten auf unbemautete Strecken bestehen.

Für die Bemautungsanteile der Inlandsfahrleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge wurde angenommen, dass diesbezüglich kein Unterschied besteht.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 64 Entwicklung des Anteils der Inlandsfahrleistung (Bruchteil), welcher bemautet wird, nach zGG.

Da die Mautsätze sich in Bezug auf die Abgasnorm unterscheiden, ist es zur Berechnung der Maut nötig abzuschätzen, wie hoch die entsprechenden Anteile an der bemauteten Inlandsfahrleistung sind. Gleiches gilt für verschiedene Antriebsarten, da diese (z.T. zeitweise) von der Maut ausgenommen werden, so dass auch für diese eine Differenzierung der bemauteten Inlandsfahrleistung nötig ist. Für die inländischen LKW ist zu erwarten, dass die Zusammensetzung der Flotte in Bezug auf Abgasnormen und Antriebsarten auch Einfluss auf die entsprechenden Anteile der bemauteten Fahrleistung hat (siehe Pfeil von *Flottenstruktur nach Antrieb* auf *Fahrleistungsstruktur bemautet* in Abbildung 61). Die Anteile der bemauteten Fahrleistung sind jedoch im Vergleich zu den entsprechenden Flottenanteilen verzerrt, und zwar zu jenen Abgasnormen und Antriebsarten hin, welche eine geringere Maut zahlen (siehe Pfeil *günstig bemautete LKW fahren tendenziell mehr* in Abbildung 61). Der Modellierung dieser Verzerrung liegt folgender Gedanke zu Grunde: Da die LKW-Neuzulassungen die *gewünschten* Anteile an Abgasnormen und Antriebsarten widerspiegeln, sollten sich die Anteile der bemauteten Inlandsfahrleistung der Inländer zwischen den entsprechenden Anteilen der Flotte und den Anteilen der Neuzulassungen bewegen. Daher wurden die Anteile der bemauteten Inlandsfahrleistung der Inländer als ge-

wichtetes Mittel aus Flottenanteilen und Neuzulassungsanteilen modelliert, wobei der Gewichtungsfaktor anhand von Daten der bemauteten Inlandsfahrleistung der Inländer kalibriert werden konnte. Da für die bemautete Inlandsfahrleistung der Ausländer keine Daten für die Zusammensetzung der für die Kabotage genutzten LKW und der entsprechenden Neuzulassungen beschaffbar sind, wurde angenommen, dass Veränderungen in der inländischen Flotte sich verzögert auch in der ausländischen Flotte zeigen. Dies ist plausibel, da inländische LKW meist nach einiger Zeit exportiert und dann von ausländischen Fuhrunternehmen genutzt werden, u.a. auch für Kabotage in Deutschland. Die Zeitverzögerung der für die Kabotage in Deutschland genutzten LKW sollte jedoch wegen des Mautanreizes niedriger sein als für die gesamte LKW-Flotte eines beliebigen Auslandes. Es wurde hier eine Zeitverzögerung von einem Jahr angenommen. Ansonsten erfolgt die Berechnung der Anteile analog zu den Inländern, wobei der Gewichtungsfaktor für die ausländischen LKW separat manuell[33] kalibriert wurde anhand von Daten zur in- und ausländischen bemauteten Fahrleistung und den Mauteinnahmen.

Um die Mauteinnahmen zu berechnen, wird die bemautete Inlandsfahrleistung nach zGG, Abgasnormen und den Antriebsarten differenziert und mit den ebenso differenzierten Mautsätzen multipliziert, wobei dies nach in- und ausländischen LKW getrennt erfolgt.

Die Mautsätze werden zunächst nominal wie angegeben implementiert, dann aber mittels Inflationsindex in reale Beträge (Basisjahr 2010) umgerechnet, da die Simulation inflationsbereinigt berechnet wird. Die Mauteinnahmen werden somit zunächst real berechnet, können dann aber wiederum z.B. für Berichtszwecke in nominale Größen umgerechnet werden.

Die Mautsätze sind differenziert nach Infrastruktur, Lärm, Luftverschmutzung und zukünftig auch CO_2 und werden als Zeitreihen im Modell abgelegt, in welchen die Änderungen berücksichtigt sind.

Wichtig ist ferner der Einfluss, den die Mautsätze auf die Flottenstruktur haben: Da die Maut die TCO der Fahrzeuge verändert und diese wiederum ein wichtiger Einflussfaktor bei der Kaufentscheidung sind, wurde dies entsprechend modelliert (siehe Pfeil TCO in Abbildung 61 und nächster Abschnitt).

8.3 Das Kaufentscheidungsmodell

Die Verteilung der Neuzulassungen auf die Antriebsarten erfolgt ähnlich wie bei den LNF mittels eines Kaufentscheidungsmodells, welches stark von den Gesamtbetriebskosten (*Total Cost of Ownership*, TCO) getrieben wird. Folgende Kostenkomponenten werden für SNF berücksichtigt:

- Wartungs- und Reparaturkosten
- Versicherungskosten

[33] Auch hier gilt die Freiheitsgrade sind zu groß und einschränkende Bedingungen zu wichtig für reine Autokalibrierung (siehe hierzu auch Fußnote 32)

- Fahrerkosten
- Fahrzeuganschaffungskosten (d.h. Investitionskosten) – umgewandelt in jährliche Abschreibungen
- Wiederverkaufswert
- KFZ-Steuer
- Energiekosten
- Investition in private Ladesäule bei Erstbeschaffung eines BEV
- Erwartete Mautkosten für einen neuen LKW

Wie auch bei den LNF werden für die Kaufentscheidung zwei verschiedene Kaufentscheidungsansätze parallel für die Antriebswahl genutzt und zu einer gesamten Neuzulassung aggregiert. Das heißt ein Teil der berechneten Neuzulassungen zu jedem Zeitpunkt ergibt sich aus dem TCO-Modell und der übrige Teil aus dem Logit-Modell:

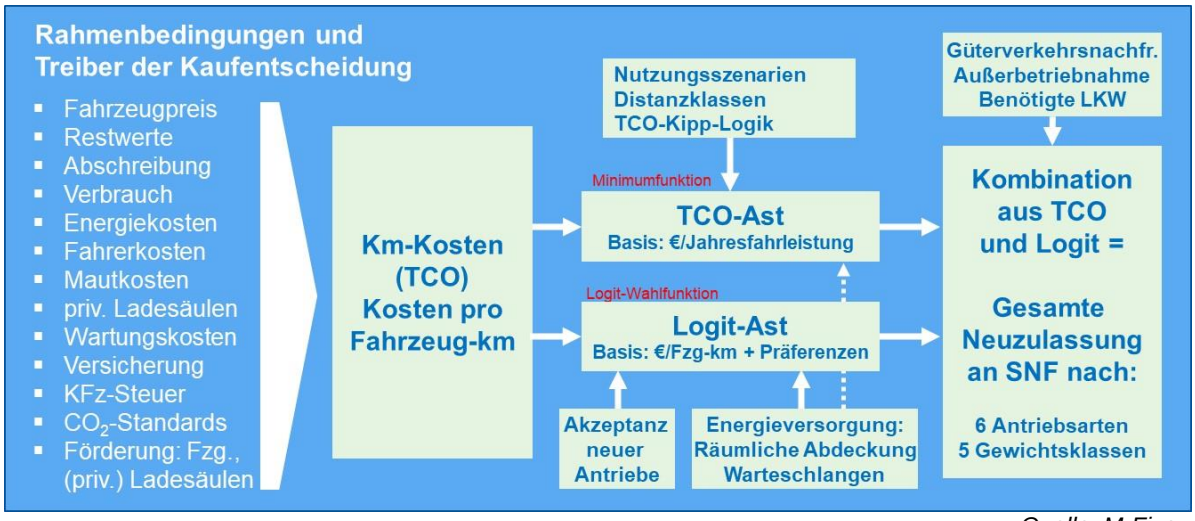
- **TCO-Modell**: Nur die zu einem Zeitpunkt günstigste Antriebsart (Vollkosten) für verschiedene Nutzungsszenarien, differenziert durch ihre spezifische Jahresfahrleistung, wird nachgefragt.
- **Logit-Modell**: Unter Verwendung einer Logit-Funktion (Discrete Choice), in welche neben der TCO auch andere Parametern eingehen wie Akzeptanz einer Antriebsart oder Verfügbarkeit der benötigten Tank- und Ladeinfastruktur, wird die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Antriebstechnologie beim Kauf von LNF bestimmt.

Vor allem im Logit-Ast in geringerem Maße auch im TCO-Ast werden jedoch weitere Aspekte berücksichtigt, welche die Kaufentscheidung zusätzlich beeinflussen (s.u.). Einen Überblick über den Einsatz der beiden Kaufentscheidungs-Modelle und ihre Einflussgrößen gibt Abbildung 65. Die beiden zentralen Eingangsgrößen für das Kaufentscheidungs-Modell und damit auch den Hochlauf alternativer Antriebe bei SNF sind (1) die km-Kosten und die gesamten monetären Eingangsgrößen zu ihrer Berechnung, sowie (2) die Anzahl der benötigten LKW unter Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage und der zu einem Zeitpunkt anstehenden Verschrottungen aus der Flotte.

Daneben bestimmen den TCO-Ast die Nutzungsszenarien, die durch unterschiedliche Jahresfahrleistungen in jeweils fünf Distanzklassen je Gewichtsklasse abgebildet sind, und die Kipp-Logik, d.h. die Berechnung der Kaufentscheidung zu dem Zeitpunkt in dem die TCO-basierte Logik von einer Winner-takes-it-all-Technologie zur nächsten kippt. In der ASTRA-M Modellierung kann die Kipp-Logik in einem Quartal oder in längeren Zeiträumen ablaufen. Die Verfügbarkeit der Energieinfrastruktur kann auch im TCO-Ast einen begrenzenden Einfluss ausüben.

Der Logit-Ast berücksichtigt dagegen neben den reinen km-Kosten zusätzliche Präferenz-Einflüsse. Dies sind insbesondere die Akzeptanz für eine neue Antriebsart (steigt überproportional, wenn andere Nutzer eine Antriebsart bevorzugen) und die generelle räumliche Abdeckung mit Tank- und Ladeinfrastruktur für einen alternativen Antrieb bzw. das Risiko

auch bei flächendeckender Abdeckung aufgrund von Kapazitätsengpässen wegen zu geringem mengenmäßigen Ausbau der Infrastruktur Verzögerungen bei der Energieversorgung in Kauf nehmen zu müssen.



Quelle: M-Five

Abbildung 65 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 Käuferverhalten abzubilden. Käufer, die rein TCO-basiert orientiert sind, entscheiden sich komplett und schneller für die ökonomischste Variante(n)[34], während der Logit-Ast eine unvollständigere langsamere Diffusion hin zu ökonomischeren Antriebsarten modelliert. Letzteres trägt zum einen der Tatsache Rechnung, dass sich die individuelle Wirtschaftlichkeitsrechnung zwischen Käufern unterscheiden kann und somit eine Bandbreite verschiedener Antriebsarten vorliegen kann, die für verschiedene Akteure jeweils am wirtschaftlichsten sind, und zum anderen der Tatsache, dass ein Teil der Käufer (teils auch scheinbar) nicht nur ökonomisch rational entscheidet (siehe unten z.B. Abbildung 66). Es wird ferner angenommen, dass die Nutzer größerer LKW tendenziell stärker ökonomisch entscheiden, so dass hier der stärker TCO-basierten Kaufentscheidung gegenüber dem Logit ein stärkeres Gewicht zugesprochen wurde. Die Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 23 zu sehen. Es wird aber auch im TCO-Ast die Hinlänglichkeit des Ausbaus der Energieversorgungsinfrastruktur berücksichtigt (s.u.).

[34] Nur bei sehr ähnlichen Kosten werden innerhalb einer Kombination aus zGG, und Distanzklasse zwei oder mehrere Varianten anteilig gewählt

Tabelle 23: Abbildung der Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeitsorientierung der Kaufentscheidungsfindung bei SNF von der Fahrzeuggröße als TCO-Anteil in ASTRA-M (Rest durch Logit-Ast bestimmt)

Größen-/Gewichts-Klassen	Anteil TCO an Entscheidung
>3,5t ≤7,5t	35%
>7,5t ≤12t	40%
>12t ≤20t	45%
>20t (ausgenommen Sattelzugmaschinen)	50%
Sattelzugmaschinen	50%

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Anders als bei den LNF wird bei den SNF angenommen, dass die für die LNF beschriebene psychologische Verzerrung der verringerten Gewichtung der Energiekosten bei der Kaufentscheidung bei den SNF keine Rolle spielt (d.h. bei Kaufentscheidungen für SNF sind die Energiekosten einer der drei wichtigsten Faktoren).

8.3.1 TCO-Ast

Das im TCO-Ast abgebildete Kaufverhalten nimmt an, dass im Gegensatz zum Logit-Ast nur die jeweils ökonomisch vorteilhafteste Antriebstechnologie für jede Kombination aus LKW-Gewichtsklasse und Nutzungsszenario, repräsentiert durch unterschiedliche Distanz-Klassen (s.u.), gekauft wird. Für den Wechsel von einer Antriebstechnologie auf eine andere wird eine Dauer von einem Jahr angenommen. Für jede LKW-Gewichtsklasse werden fünf Anwendungsfälle anhand der Jahresfahrleistung unterschieden (Distanzklassen). Diese Distanzklassen und deren Besatz mit SNF basieren auf Statistiken der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt 2017a) und beschreiben den Besatz mit LKW in jeder Distanzklasse. Die Jahresfahrleistung im TCO-Ast ist mithin abhängig von der jeweiligen Gewichts- und Distanzklasse (siehe Tabelle 24, Tabelle 25).

Tabelle 24: Jahresfahrleistung je Gewichts- und Distanzklasse (km/a)

Gewichtsklasse	Distanz-klasse 1	Distanz-klasse 2	Distanz-klasse 3	Distanz-klasse 4	Distanz-klasse 5
>3,5t ≤7,5t	10.000	15.000	20.000	30.000	40.000
>7,5t ≤12t	12.000	17.000	25.000	37.000	50.000
>12t ≤20t	25.000	35.000	45.000	60.000	75.000
>20t (ohne SZM)	25.000	40.000	60.000	85.000	120.000
Sattelzugmaschinen (SZM)	35.000	55.000	80.000	100.000	140.000

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Tabelle 25: Anteile der Fahrzeuge je Gewichts- und Distanzklasse

Gewichtsklasse	Distanz-klasse 1	Distanz-klasse 2	Distanz-klasse 3	Distanz-klasse 4	Distanz-klasse 5
>3,5t ≤7,5t	19%	21%	22%	20%	18%
>7,5t ≤12t	15%	20%	25%	25%	15%
>12t ≤20t	15%	20%	25%	25%	15%
>20t (ohne SZM)	18%	16%	24%	25%	17%
Sattelzugmaschinen (SZM)	13%	20%	22%	28%	17%

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Auch Käufer, deren Kaufverhalten über den TCO-Ast abgebildet wird, sind jedoch keine perfekten „Homo oeconomici“. Auch hier spielt, allerdings in geringerem Maße als im weiter unten beschrieben Logit-Ast, eine bestimmte Risikowahrnehmung für bestimmte Antriebsarten eine Rolle. Für CNG wird als Risiko berücksichtigt, dass auf manchen Strecken Probleme beim Finden einer Tankstelle auftauchen könnten und nur geringere Reichweiten als beim Diesel-LKW möglich sind. Die Oberleitungsinfrastruktur wird in REF-2020 nur im Rahmen der Pendelstrecken des SNF-Fahrplans aus der NPM aufgebaut (NPM 2020), da bisher keine weitergehenden Entscheidungen zu Förderung und Aufbau eines Kernnetzes erfolgt sind, aber durch den KSPr-2019 ausreichend Fördermittel für den Aufbau der Pendelstrecken verfügbar sind. Für LNG-SNF treten im REF-2020 keine derartigen Probleme auf, da auf Grund der höheren Reichweite als bei CNG eine niedrigere Tankstellendichte mit etwa 70 Tankstellen und steigender Tendenz bereits derzeit für eine flächendeckende Versorgung ausreicht. Bei BEV-SNF tritt das Problem ebenfalls weniger zu Tage, da davon auszugehen ist, dass Käufer der zunächst im Regionalverkehr eingesetzten BEV-SNF eine betriebseigene Ladesäule beschaffen, welche in der Kostenrechnung in ASTRA-M berücksichtigt wird.

In Tabelle 26 finden sich die entsprechenden Mali, welche in ASTRA-M als Aufschläge monetarisiert wurden. Dies ist so zu verstehen, dass sich die Käufer so verhalten, als wären die TCO um den entsprechenden jährlichen Betrag höher als sie es tatsächlich sind.

Tabelle 26: Verzerrungen im Kaufverhalten über den TCO-Ast, monetarisiert über TCO-Aufschläge

Gewichtsklasse	CNG
>3,5t ≤7,5t	4000
>7,5t ≤12t	5200
>12t ≤20t	7000
>20t (ohne SZM)	2500
Sattelzugmaschinen (SZM)	5000

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Zudem wird auch im TCO-Ast eine begrenzende Wirkung mangelnder Energieversorgungsinfrastruktur abgebildet. Diese ist jedoch als nur halb so stark angenommen wie im nachfolgend beschriebenen Logit-Ast da hier nur objektive Nachteile gegenüber den fossilen Alternativen (TCO-Ast) berücksichtigt werden, während diese Nachteile von jenen Akteuren überschätzt werden, welche durch den stärkeren Effekt im Logit-Ast abgebildet werden.

8.3.2 Logit-Ast

Die TCO je km stellen den negativen Nutzen (Utility) der folgenden Logit-Funktion dar:

$$P_i(t) = \frac{e^{(-\beta_i * TCO_i(t) - \delta_i)}}{\sum_{DRT=1}^{7} e^{(-\beta_i * TCO_i(t) - \delta_i)}}$$

Mit: P = Anteil der gewählten Antriebstechnologie Typ i

TCO_i = Vollkosten der Antriebstechnologie Typ i

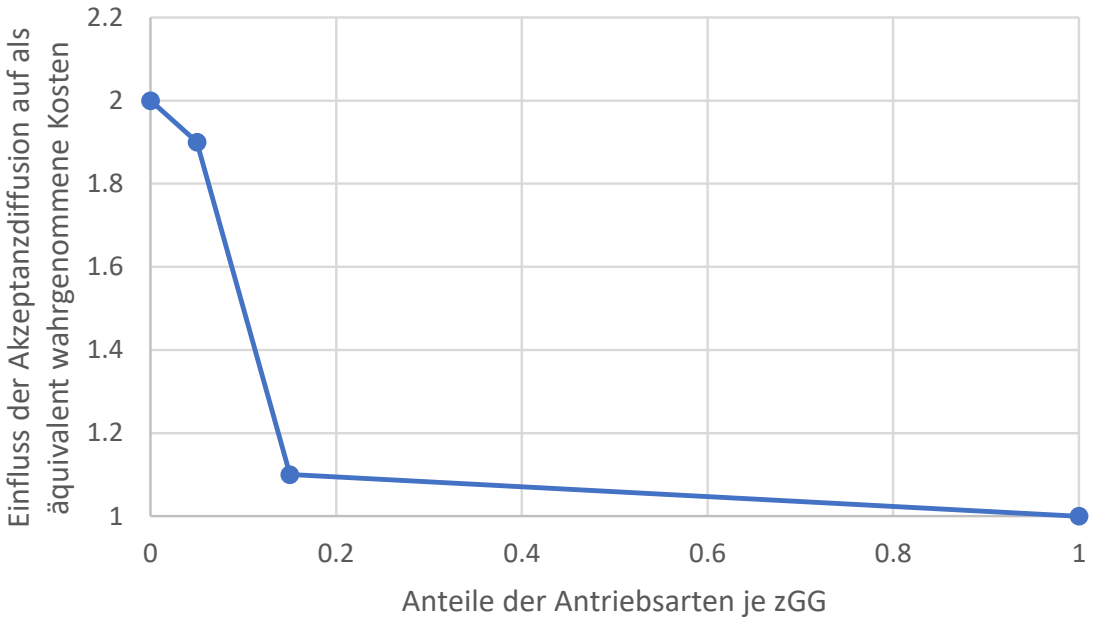
β = multiplikativer Logit-Parameter der gewählten Antriebstechnologie Typ i

δ = additiver Logit-Parameter der gewählten Antriebstechnologie Typ i

Wenn die Akteure Homo oeconomici wären, also nur auf Basis der Vollkosten entscheiden würden, würden sich die beiden letzten Parameter nicht zwischen Antriebstechnologien unterscheiden. D.h. Unterschiede in diesen Parametern stellen Verzerrungen des Verhaltens relativ zu einem rein TCO-basierten Verhalten dar. Es wird hierbei unterschieden zwischen verschiedenen Arten von Verzerrungen:

- Akzeptanzprobleme durch Unsicherheit/Risikowahrnehmung bei geringer Verbreitung von und daher mangelnder Erfahrung mit neuen Antriebstechnologien (abhängig vom Anteil am FZ-Bestand und daher zeitlich variabel)
- Grundsätzliche Verzerrungen durch Nutzen-Nachteile und Einfluss der OEMs auf die Kaufentscheidung (zeitlich konstant)
- Verzerrungen im Kaufverhalten durch mangelnde Verfügbarkeit von Energieversorgungsinfrastruktur (Oberleitungen, Tankstellen, Ladesäulen).

Es wird des Weiteren davon ausgegangen, dass wenig verbreitete Antriebstechnologien ein Akzeptanz-Problem haben, was bedeutet, dass die Käufer nicht alle Antriebsarten gleichbehandeln, also nicht nur auf Basis der Vollkosten beurteilen, sondern verbreitete Antriebsarten bevorzugen. Monetarisiert impliziert dies, dass wenig verbreitete Antriebsarten von den Käufern implizit so behandelt werden, als wären sie teurer als sie es in Wahrheit sind. Am stärksten ist diese Verzerrung der Preiswahrnehmung, wenn die entsprechende Antriebsart praktisch noch gar nicht in der Flotte vertreten ist (Faktor 2 teurer in Abbildung 66). Ab einem Schwellenwert an Flottenanteilen (zwischen 5% und 10% in Abbildung 66) nimmt die Verzerrung jedoch drastisch ab (z.B. nur noch Faktor 1.1 bei 15% Flottenanteilen.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 66 Einfluss der Verbreitung von Antriebsarten auf Verzerrungen in der Wahrnehmung des Nutzens (d.h. implizit des Preises)

Die abgebildete Akzeptanzfunktion geht in den beta-Parameter der Logit Funktion ein, durch welchen Wahrnehmungs- und damit Verhaltens-Verzerrungen relativ zu einem *Homo-Oekonomicus*-Verhalten abgebildet werden. Diese Akzeptanzfunktion stellt jedoch für sich genommen lediglich nur einen Teil dieser kognitiven Verzerrung dar, den Teil der abhänig von der Verbreitung der Antriebstechnologien ist. Hintergrund ist die Annahme, dass ein Teil der Käufer für bislang wenig bekannte Antriebstechnologien eine erhöhte Risikowahrnehmung haben und sich somit auf Heuristiken verlassen wird. Beispielsweise sorgt man sich darum, nicht rechtzeitig eine Ladesäule/Tankstelle zu erreichen, oder befürchtet eine geringere Verlässlichkeit der Technologie. Da die Käufe die Flottenanteile bestimmen und die Flottenanteile über die Akzeptanz wiederum die Käufe, stellt dies eine Rückkopplung im System dar. Das heißt, wenig bekannte Antriebstechnologien haben es anfangs durch niedrige Flottenanteile schwer, sich im Markt zu etablieren. Die gleiche Rückkopplung würde umgekehrt wirken, wenn Diesel-LKW irgendwann unter den Schwellenwert sinken. Die Akzeptanz sinkt dann nicht nur, weil man nicht mehr auf ein veraltete Technologie („Auslaufmodell“) setzen möchte, sondern z.B. auch, weil sich die Dichte der Tankstellen, welche noch Diesel anbieten, verringern könnte.

Eine starke grundsätzliche Verzerrung wird für CNG angenommen, wegen den geringeren Reichweiten und höheren Ausfallzeiten, welche im Logit-Ast übersteigert wahrgenommen werden. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass für die verschiedenen Antriebstechnologien weitere grundsätzliche Verzerrungen in der Wahrnehmung des Nutzens durch den Einfluss der OEMs bewirkt wird. Hier kommt zum Tragen, dass die Käufer indirekt nicht die einzigen Entscheidungsträger sind: Es wird angenommen, dass die OEMs durch Angebot,

Preisbildung und unterschiedliche Werbung ebenfalls eine Verzerrung im Kaufverhalten bewirken. Da die meisten OEMs über bereits amortisierte Produktionsinfrastrukturen für Dieselfahrzeuge verfügen, werden diese bevorzugt. Die aus der Überlagerung des Einflusses von OEMs und eigener Wahrnehmungsverzerrung der Käufer resultierenden Basis-Logit-beta Parameter für die verschiedenen Antriebstechnologien sind Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 27: Basis-Beta-Parameter der Logit-Funktion für die Antriebswahl von schweren Nutzfahrzeugen (ohne Akzeptanzrückkopplung)

Gewichtsklasse	Diesel	BEV	LNG	CNG	H2	OH
>3,5t ≤7,5t	0.88	1	1.7	3	1.4	1.2
>7,5t ≤12t	0.85	1	1.7	3	1.4	1.2
>12t ≤20t	0.78	1.05	1.7	2.9	1.4	1.2
>20t (ohne SZM)	0.7	1.1	1.7	3.2	1.4	1.2
Sattelzugmaschinen (SZM)	0.7	1.1	1.7	2.8	1.4	1.2

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Diese Basis-Beta-Parameter werden dann mit der weiter oben beschriebenen Akzeptanz-Funktion multipliziert, um die Beta-Parameter der Logit-Funktion zu erhalten.

In Bezug auf Verzerrungen in der Kaufentscheidung durch unzureichenden Ausbau von Energieversorgungsinfrastruktur werden im Wesentlichen zwei Effekte unterschieden:

a) Unzureichende geografische Abdeckung
b) Warteschlangen

Wenn Oberleitungen oder H2-Tankstellen oder Ladesäulen nur an wenigen ausgewählten besonders frequentierten Strecken zur Verfügung stehen, können bestimmte Transportziele schlicht nicht erreicht werden. Zusätzlich besteht bei Nutzern die Befürchtung, dass einem die Energie ausgeht bevor wieder eine Möglichkeit der Energieaufnahme besteht (auf offener Strecke liegen bleiben). Selbst wenn dies durch sorgfältige Strecken- und Zeitplanung vermieden werden kann, bedeutet die Notwendigkeit einer solchen Planung immer noch einen Wettbewerbsnachteil gegenüber Antriebstechnologien, bei denen dies nicht notwendig ist.

Wenn ein Nutzer befürchtet, vor einer Ladesäule oder H2-Tankstelle in einer Warteschlange zu stehen, ist von einem Negativanreiz zum Kauf der Antriebstechnologie auszugehen, da zusätzliche Wartezeiten ein ernstzunehmender Kostenfaktor sind.

Im Logit-Ast werden jene Käufer abgebildet, welche diese Effekte überschätzen (doppelt so hoch wie Käufer, die im TCO-Ast abgebildet werden).

Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass Anwendungsfälle existieren bei denen diese Energieversorgungsinfrastruktur-bedingten Verzerrungen kaum ins Gewicht fallen. Wenn beispielsweise ein Pendelverkehr zwischen zwei Produktionsstätten mit BEV-SNF elektrifiziert wird, und eine Batterieladung für die Strecke ausreichend ist, wird gar keine öffentliche

Ladeinfrastruktur benötigt, da die Energiezufuhr beim Be-/Entladen und über Nacht an der unternehmenseigenen Ladesäule geschehen kann. Solche Anwendungsfälle sind tendenziell die Pioniere der ersten Stunde, noch bevor es eine ausreichende öffentliche Ladeinfrastruktur existiert. Daher wird davon ausgegangen, dass die o.g. Verzerrungen durch mangelnde Energieversorgungsinfrastruktur ganz am Anfang der Diffusion einer neuen Antriebstechnologie (also bei sehr niedrigen Flottenanteilen) kaum zum Tragen kommen, sondern erst ab einem bestimmten Schwellenwert (Flottenanteil) stark an Einfluss gewinnen, wenn diese Pionier-Anwendungsfälle bereits implementiert und daher ausgereizt sind.

8.3.3 Berechnung der Vollkosten der SNF

Die Vollkosten berechnen sich wie folgt:

$$TCO_{GVW,DIST,ANT}(t) = \frac{lkwCOST_{GVW,ANT}(t) + privChargerCOST_{GVW}(t)}{LEB_{GVW}} + annualCOST_{GVW,ANT}(t) + kmCOST_{GVW,ANT}(t) * MIL_{GVW,DIST}$$

Die Formel berechnet die jährlichen Ausgaben für einen LKW, spezifiziert nach Gewichts- und Distanzklasse sowie Antriebsart, und berücksichtigt folgende Komponenten:

TCO = Jährliche LKW-Betriebs- & Unterhaltskosten (>3,5t zGG), Vollkosten

lkwCOSTb= Kosten des Besitzes eines LKW (€/LKW)

LEB = Nutzungsdauer eines LKW (a)

privChargerCOST = durchschnittliche Kosten für private Ladepunkte je Beschaffung eines BEV differenziert nach zGG und Leistungsklasse des Ladepunktes berechnet aus Kosten je Ladepunkt und durchschnittliche installierte Ladepunkte je neu zugelassenem LKW (siehe Tabelle 34)

annualCOST = jährlich anfallende Kosten (€/LKW/a)

kmCOST = Kosten zum Betrieb eines LKW pro km (ohne Anschaffung) (€/LKW/km)

MIL = Durchschnittliche Jahresfahrleistung eines LKW nach Distanzklasse (km/a)

(t) = Zeitpunkt der Berechnung (1995 <= t <= 2030)

GVW = Index der 5 LKW-Gewichtsklassen

ANT = Index der 7 LKW-Antriebstechnologien

DIST = Index der 5 für die TCO-Rechnung genutzten Distanzklassen

Die Kosten des Besitzes eines LKW berechnen sich aus den Anschaffungskosten minus dem Wiederverkaufswert:

$$lkwCOST_{GVW,ANT}(t) = BuyCOST_{GVW,ANT}(t) - ResaleValue_{GVW,ANT}(t)$$

Mit: BuyCost =Anschaffungskosten

ResaleValue =Wiederverkaufspreis

Die jährlichen Kosten setzten sich folgendermaßen zusammen:

$$annualCOST_{GVW,ANT}(t) = TAX_{GVW,ANT}(t) + INS_{GVW,ANT}(t) + REP_{GVW,ANT}(t) + DRI_{GVW}(t) - DepTax_{GVW,ANT}(t)$$

Mit: TAX = Steuerbelastung eines LKW

INS = Versicherungskosten eines LKW

REP = Wartungs- und Reparaturkosten eines LKW

DRI = Fahrerkosten (nur differenziert nach Gewichtsklasse)

DepTax = Steuerersparnis durch jährliche Abschreibung

Die variablen Kosten zum Betrieb eines LKW pro km gehen in die TCO-Berechnung ein und setzen sich wiederum aus mehreren Kosten-Komponenten zusammen:

$$kmCOST_{GVW,ANT}(t) = ENC_{GVW,ANT}(t) + \frac{RCH_{GVW,ANT}(t)}{\%kmTolled}$$

Mit: kmCOST = Kosten zum Betrieb eines LKW pro km (ohne Anschaffung) (€/km)

RCH = LKW-Mautkosten (engl. “road charge”) (€/km)

ENC = Energiekosten in Abhängigkeit von Energiepreisen und LKW-Effizienz (€/km) (engl. “energy cost”)

%kmTolled = Anteil der gesamten Fahrleistung, der bemautet wird

8.3.4 Komponentenmodell Anschaffungskosten SNF

Für LKW sind keine Zeitreihendaten zu Verkaufspreisen verfügbar. Daher wurde ein Modul in ASTRA aufgebaut, welches Fahrzeugpreise auf Basis der Fahrzeug-Komponenten sowie Annahmen zu den Margen bestimmt. Hierbei wurden, wo nötig, auch zeitliche Veränderungen der Komponentenpreise berücksichtigt.

Folgende Preisbestandteile werden berücksichtigt:

- Marge (zu Beginn einer Technologiediffusion mit hohen Anteilen F&E-Kosten)
- Chassis
- Verbrennungs-Motor
- Elektro-Motor
- Tank (Diesel-, CNG-, LNG-, H2-)
- Batterie
- Getriebe
- Ladegerät (alle Bauteile zwischen Stromzufluss und Batterie)
- H_2-Brennstoffzelle

- Pantograph (Stromabnehmer für Oberleitung)

Die Margen von Diesel-LKW sind auf Grund der Konkurrenzsituation, ausgereizten Lern- und Skaleneffekten sowie teils bereits amortisierter Produktionsinfrastruktur relativ niedrig und enthalten keinen ausgeprägten Anteil der F&E-Aufwendungen mehr, wie es aktuell der Fall bei den elektrifizierten SNF ist. Es wird angenommen, dass dies im Wesentlichen bereits heute auch für CNG- und LNG-getriebene SNF gilt. Als besonders hoch werden die Margen bei Technologien eingeschätzt, welche noch nicht ausgereift sind und daher beträchtliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit erfordern. Das gilt z.B. für Prototypen und Kleinserien im Rahmen von Forschungs- und Demovorhaben. Diese werden in geringen Stückzahlen mit viel Handarbeit und iterativer Experimentierarbeit spezial-angefertigt, was entsprechende Kosten verursacht. Auf dem Weg vom Prototypen zur Serienfertigung werden beträchtliche Investitionen in neue Produktionsinfrastrukturen nötig, welche ebenfalls durch anfangs höhere Margen refinanziert werden. Auf Grund dann einsetzender Lern- und Skaleneffekte ergibt sich, dass die Margen im Laufe der Zeit weiter sinken und sich denen heutiger Dieselfahrzeuge annähern. Der unterschiedliche technologische Reifegrad der verschiedenen Antriebstechnologien bedingt somit zum gleichen Zeitpunkt unterschiedlich hohe Margen.

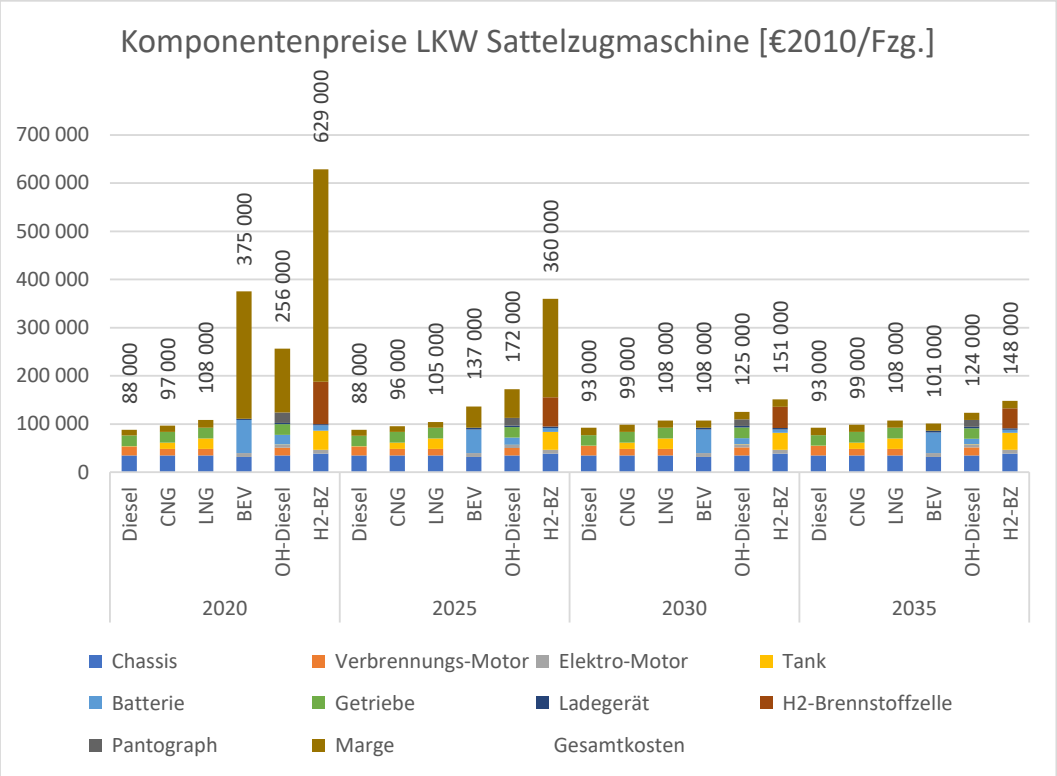
Für die Margen der verschiedenen Größen an SNF wurde angenommen, dass diese in erster Näherung proportional zur Summe der Komponentenkosten ähnlich wie bei Sattelzugmaschinen ausfallen.

Für SNF >20t wurden etwas (+10%) höhere Margen angenommen als für Sattelzugmaschinen, weil hier die Stückzahlen geringer sind und außerdem mehr Spezialanfertigungen für verschiedene Anwendungsfälle von Nöten sind. Diese Argumentation gilt in geringerem Maße auch für SNF >12t≤20t (+7%) und SNF >7,5t≤12t (+5%). Für SNF >3.5t≤7,5t wurde jedoch auf Grund der höheren Produktionsstückzahlen und hoher Standardisierung keine solche Erhöhung angenommen.

Die Preise für die Batterie bzw. die Brennstoffzelle wurden aus Annahmen zu den allgemeinen Preisentwicklungen je kWh bzw. je kW, multipliziert mit den Größen für Batterie bzw. Brennstoffzelle in kWh bzw. kW in den jeweiligen LKW, errechnet. Auch hier wurde neben den Antriebsarten auch zwischen den 5 Klassen zulässigen Gesamtgewichtes unterschieden. Eine Übersicht über die Entwicklung der Preise[35] der Fahrzeugkomponenten für verschiedene Antriebsoptionen finden sich in den untenstehenden Abbildungen. Hierbei wurde angenommen, dass Oberleitungs-SNF lediglich in den Größen >20t zGG und Sattelzugmaschinen gebaut werden, nicht aber für kleinere zGG. Zudem wird aufgrund des mangelnden Infrastrukturausbaus und der fehlenden permanenten Anreize (z.B. durch eine CO_2-differenzierte Maut) für das Referenzszenario angenommen, dass alle Oberleitungs-SNF Dieselhybride bleiben. Das dies bedeutet, dass in diesen Fahrzeugen sämtliche Komponenten mit Ausnahme der Brennstoffzelle verbaut werden, und erklärt deren verhältnismäßig hohe

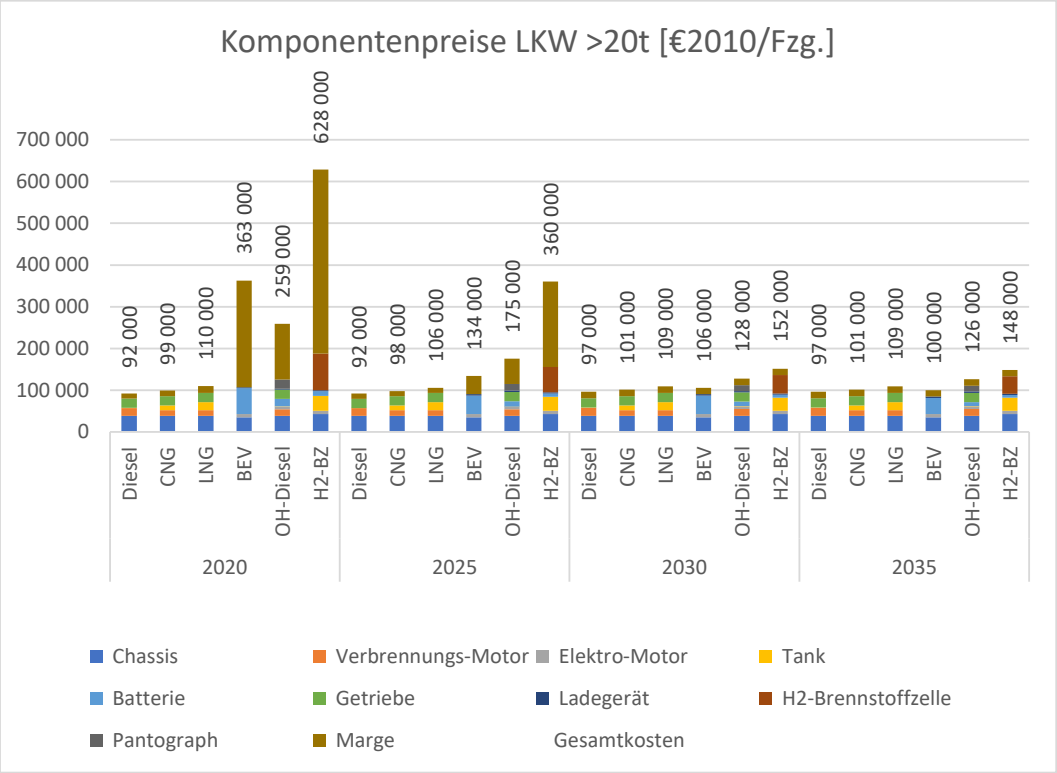
[35] Die Angaben sind in $€_{2010}$, für eine Umrechnung in $€_{2020}$ ist eine Multiplikation mit 1.135 durchzuführen.

Kosten (trotz der Tatsache, dass manche Komponenten natürlich kleiner ausfallen können als bei anderen Antriebsoptionen).



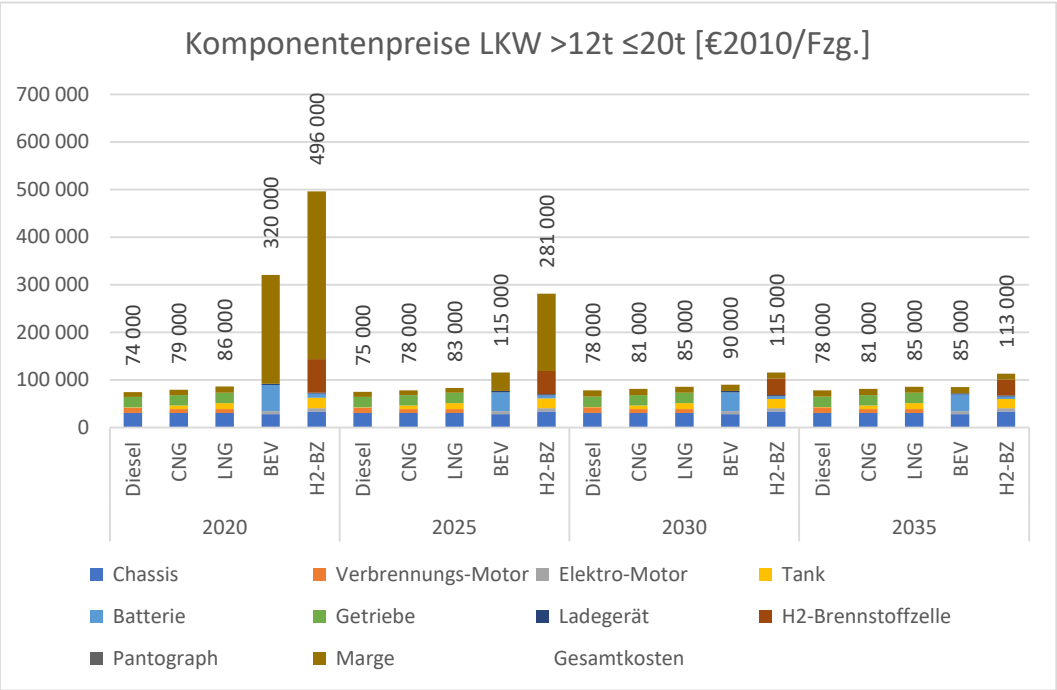
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 67 Entwicklung der Komponentenpreise für Sattelzugmaschinen für verschiedene Antriebsoptionen



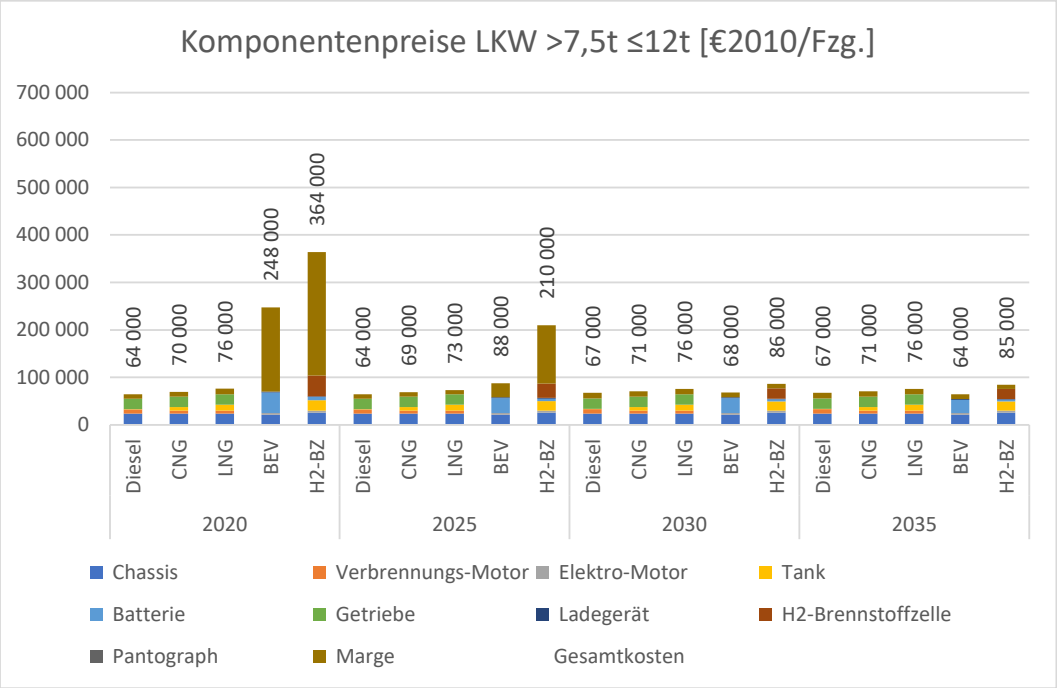
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 68 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >20t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen



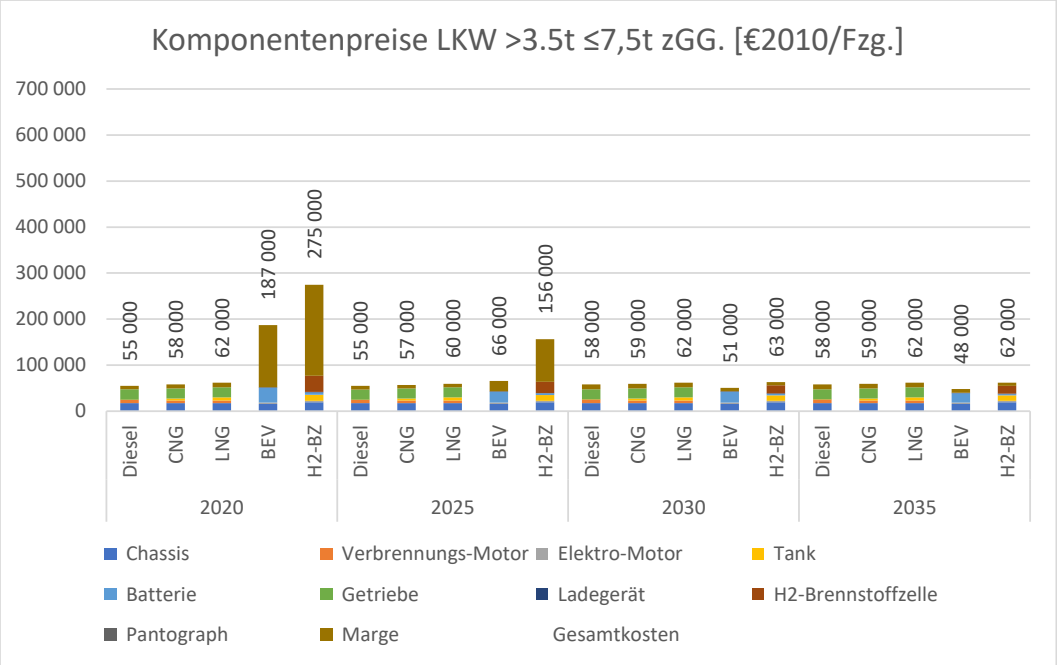
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 69 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >12t ≤20t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 70 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >7,5t ≤12t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen.

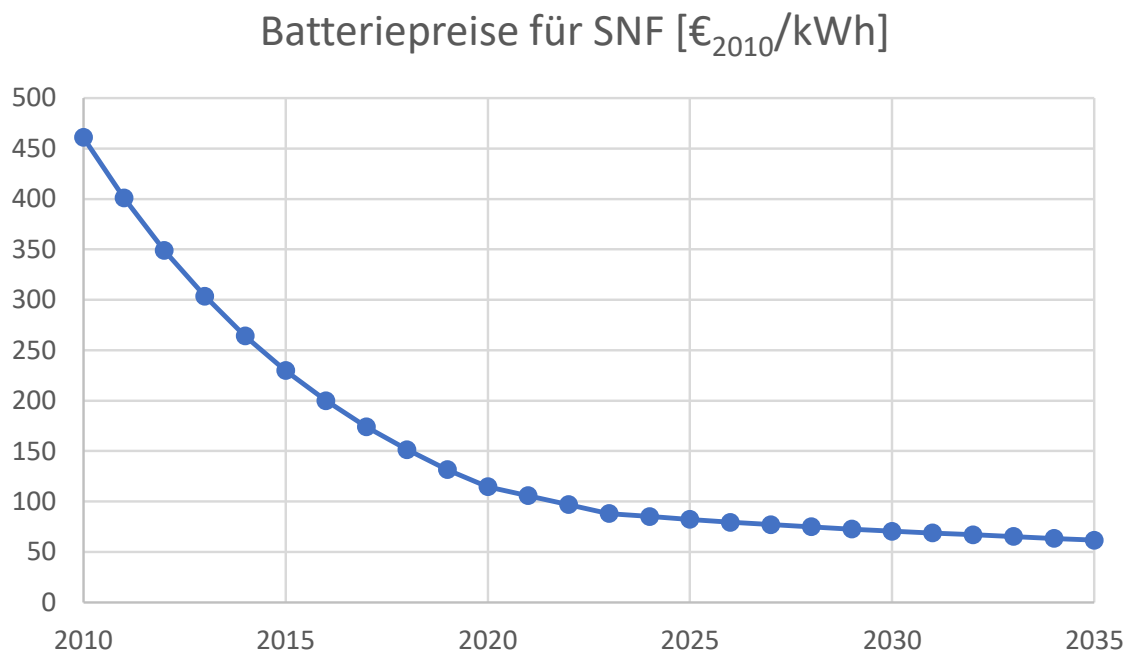


Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 71 Entwicklung der Komponentenpreise für SNF >3.5t ≤7,5t zGG. für verschiedene Antriebsoptionen

Die Hauptvorteile der batterieelektrischen SNF bestehen darin, dass diese kein teures Getriebe und zudem weder Tank noch Verbrennungsmotor benötigen. Anfangs sind jedoch sowohl Marge als auch Batteriekosten noch hoch, so dass diese Vorteile in Konkurrenz zu anderen Antriebstechnologien ohne weitere Förderung nicht zur Geltung kommen.

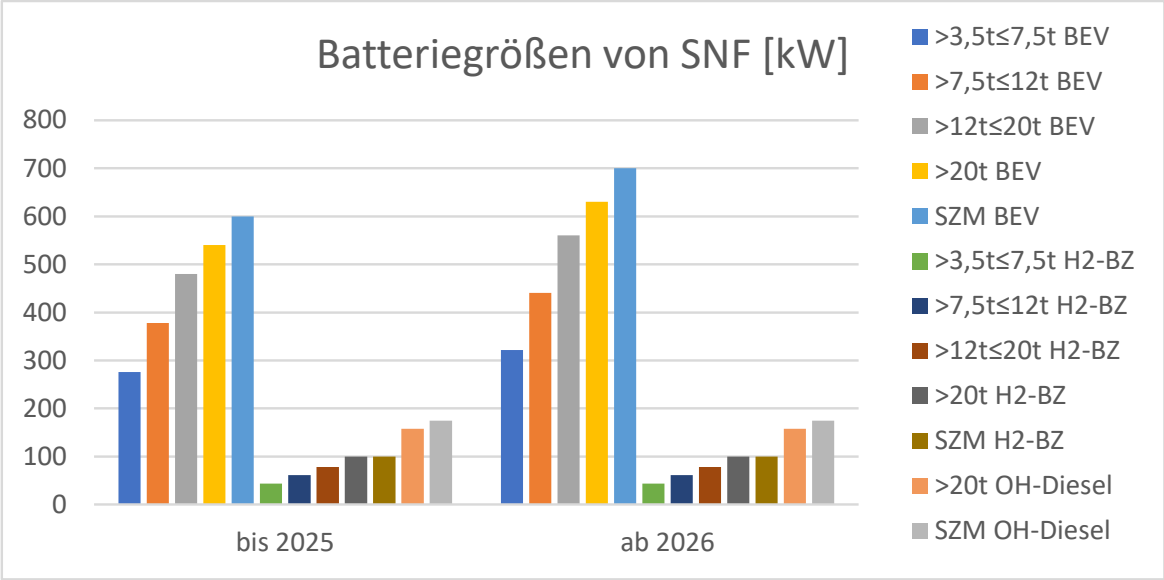
In Abbildung 72 ist die angenommene Entwicklung für Batteriepreise für SNF dargestellt. Es wird erwartet, dass es durch Lern- und Skaleneffekte zu weiteren Preissenkungen kommt, wobei sich die Geschwindigkeit dieser Senkung jedoch verlangsamen dürfte. Zur Ableitung der Preisentwicklung wurden verschiedene Studien herangezogen (historische Analyse nach Ziegler/Trankic (2021), Prognosen nach Haug et al. (2022)). Für die Vergangenheit wurde dabei von einer jährlichen Preissenkungsrate von 13% ausgegangen.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 72 Entwicklung der Preise für Batterien für SNF

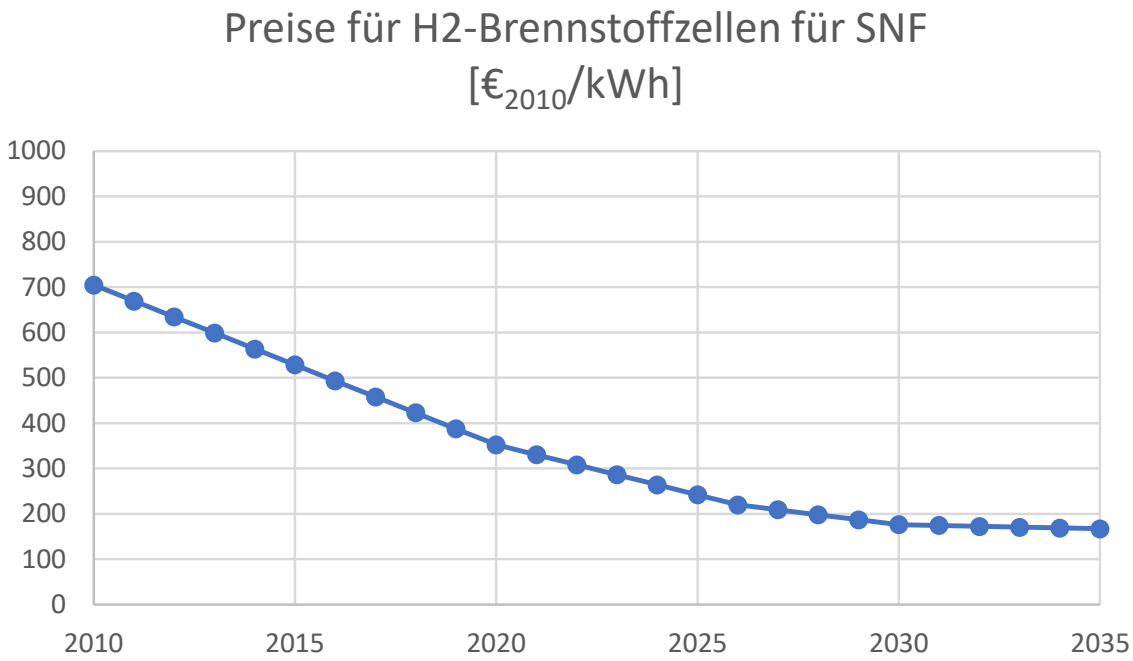
In Abbildung 73 ist die Größe der Batterien der SNF für die verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeuggrößen dargestellt. Für BEV wird aufgrund sinkender Batteriepreise und existierender Nachfrage nach mehr Reichweite für ab 2026 gekaufte SNF von größeren Batterien ausgegangen.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 73 Größe der Batterien für SNF

In Abbildung 74 ist die angenommene Preisentwicklung für H_2-Brennstoffzellen in SNF dargestellt. Während weitere deutliche Preissenkungen technologisch möglich sein sollten, werden auch hier gegen 2035 Sättigungseffekte erwartet.



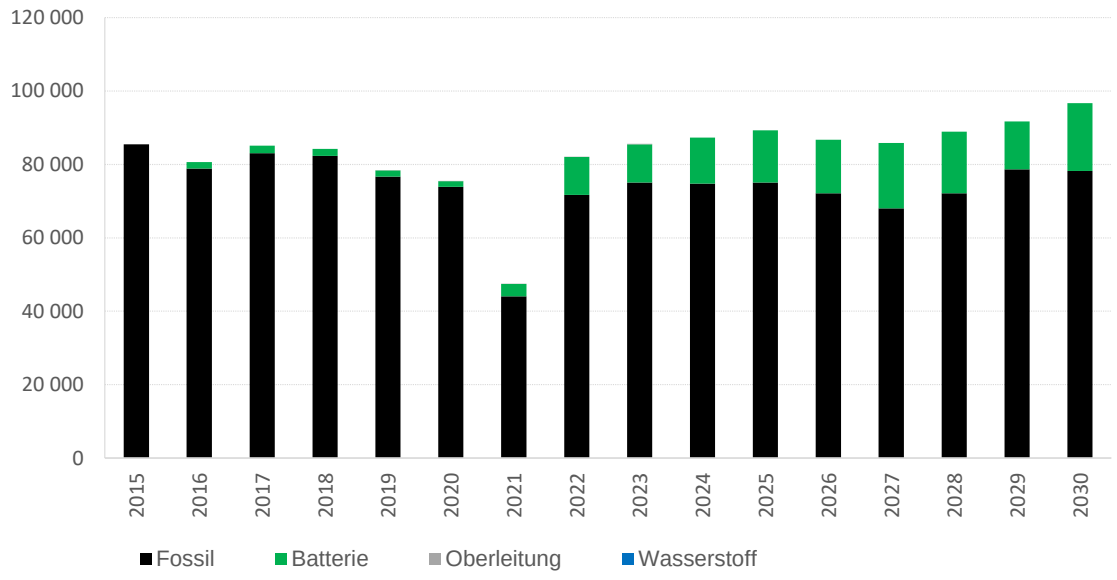
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 74 Entwicklung der Preise für H_2-Brennstoffzellen für SNF

Für die Größen der Brennstoffzelle wurde für Sattelzugmaschinen und SNF >20t von 250kW ausgegangen, für >12t≤20t: 200kW; >7,5t≤12t: 125kW und für >3,5t≤7,5t 100kW.

8.4 Entwicklung der Neuzulassungen SNF

Batterie-elektrische schwere Nutzfahrzeuge (BEV-SNF) gehen in den nächsten Jahren in die Serienproduktion und sind dann auch in hinreichenden Zahlen verfügbar um eine gesteigerte Nachfrage befriedigen zu können. Wie in Abbildung 75 zu sehen ist, erlangen BEV-SNF im REF-2020 jedoch keine Dominanz der Neuzulassungen, da in diesem Szenario angenommen wird, dass es keinen staatlich finanzierten Ausbau der Megacharger-Infrastruktur geben wird, denn Entscheidungen zu entsprechenden Ausschreibungen wurden erst nach dem Abschneide-Zeitpunkt des Referenzszenarios getroffen. Dieser Ausbau wird jedoch als Voraussetzung für einen nennenswerten Hochlauf von SNF auf der Langstrecke (v.a. >20t zGG. und insbesondere Sattelzugmaschinen) gesehen, so dass der batterieelektrische Antrieb dessen Preisvorteile nur in den kleineren Gewichtsklassen ausspielen kann.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 75 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen, aggregiert über alle Gewichtsklassen nach Antriebsart

Gleichermaßen tauchen auch Oberleitungsfahrzeuge (OH) in REF-2020 so gut wie gar nicht auf, wegen des begrenzten Infrastrukturaufbaus, der sich auf wenige Pendelstrecken konzentriert.

Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge bauen auf der batterie-elektrischen Technologie auf, die Entwicklung der Flüssig-Wasserstoff- und der Brennstoffzellentechnologie erfordert jedoch zusätzliche Entwicklungszeit bis zur Serienreife, weshalb diese erst später in nennenswerten Anteilen gekauft werden könnten. Die Technologie bleibt in REF-2020 jedoch teurer als alle anderen Antriebstechnologien und kann sich daher nicht durchsetzen.

Auffallend in Abbildung 75 ist zudem der Pandemieeffekt in 2020/2021, der sich modellseitig stärker in 2021 abbildet, während der Absatz bereits in 2020 eingebrochen ist. Hier erfolgen die Modellreaktionen in ASTRA-M leicht verzögert gegenüber der Realität.

Abbildung 76 zeigt eine Sensitivitäts-Analyse in REF-2020 zur Aufschlüsselung der NZL der fossilen Antriebsarten. Seit 2019 mit der Mautbefreiung von Gas-LKW besitzen diese in einigen Segmenten einen Kostenvorteil und werden deshalb substanziell beschafft. Mit der besseren Verfügbarkeit von LNG-Fahrzeugen und -Tankstellen würden LNG-LKW diese Rolle des kosten-günstigsten Antriebs in einigen Nutzungsprofilen ab 2022 übernehmen.

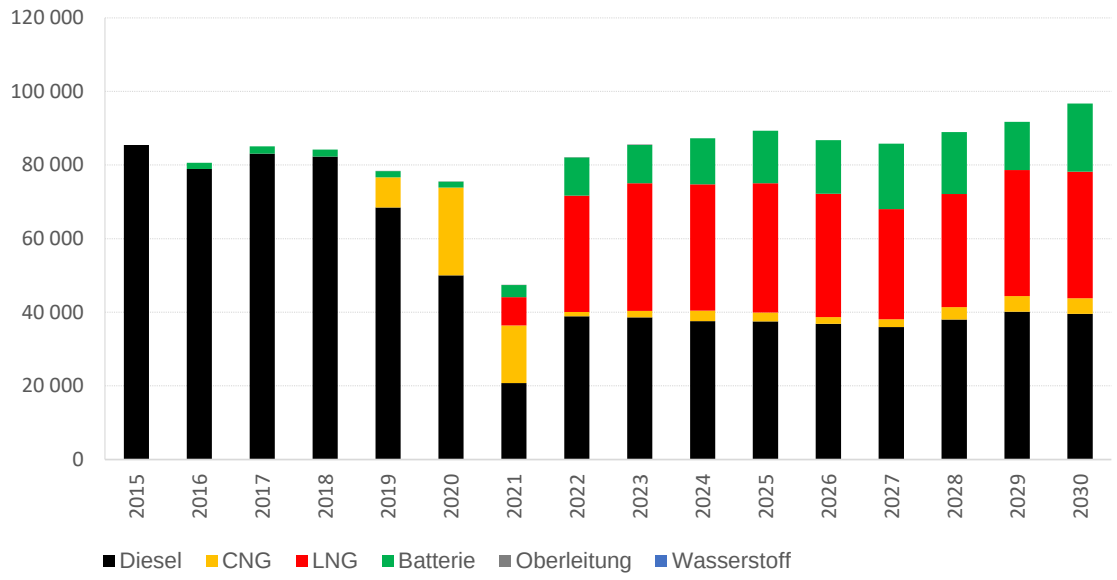


Abbildung 76: Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen, aggregiert über alle Gewichtsklassen nach Antriebsart, mit fossilen SNF desaggregiert nach Antriebsart

Wie in Abbildung 76 ersichtlich, werden im REF-2020 Szenario Erdgas-basierte Fahrzeuge vermehrt gekauft. Druck-Erdgas (CNG) bedeutet zwar geringere Reichweiten ist jedoch inklusive der Betankungsinfrastruktur bereits heute verfügbar und findet im REF-2020 durch die Mautbefreiung von 2019 bis 2022 vermehrt Anwendung.[36] Flüssig-Erdgas (LNG) wird im REF-2020 erst etwas später in nennenswerten Mengen gekauft als CNG[37]. Es sei hier

[36] Es sei hier darauf hingewiesen, dass nach dem Abschneidezeitpunkt 08/2020 durch die EU-Kritik an der Mautbefreiung eine unklare Situation entstanden ist, so dass die CNG-NZL im REF-2020 deutlich sensitiver auf die Mautbefreiung reagieren könnten, als die realen Käufer, weil die Akteure das Ende der Mautbefreiung auf Grund der Ankündigungen bereits antizipieren und ihre Investitionsentscheidungen aufgrund dieses Risikos anders ausrichten.

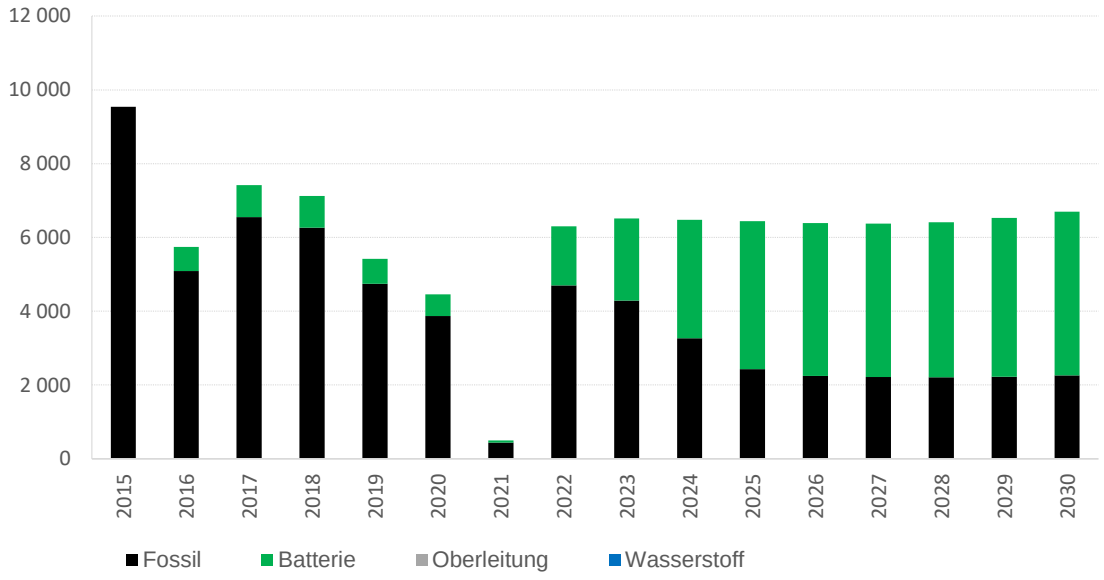
[37] Während auch die Daten des Kraftfahrtbundesamtes ebenfalls geringe Absatzzahlen an LNG-LKW nahelegen (in FZ14 nicht aufgelöst, sondern Teil der Kategorie „sonstige“), deuten die Förderzahlen an, dass diese sogar über denen der CNG-LKW gelegen haben könnten (LNG-LKW machten 87% der verkauften Erdgas-LKW aus, laut https://www.eurotransport.de/artikel/run-auf-foerderprogramm-interesse-an-gas-lkw-ungebrochen-11180994.html). Daher stellt sich die Frage, ob die KBA-Zahlen für CNG-LKW fälschlicherweise auch in größerem Umfang LNG-LKW enthalten. In diesem Fall müsste ASTRA/REF-2020 angepasst werden.

jedoch darauf hingewiesen, dass dies Ergebnis und insbesondere die Verteilung auf die verschiedenen fossilen Treibstoffe sensitiv auf die getroffenen Kostenannahmen ist. Beispielsweise könnten gestiegene Gaspreise (wie Ende 2021 zu beobachten) wieder weniger LNG und mittelfristig mehr Diesel-Zulassungen bedeuten.

In den fünf folgenden Abbildungen (Abbildung 77 bis Abbildung 81) sind die Neuzulassungen nach zulässigem Gesamtgewicht differenziert dargestellt. Hier wird deutlich: SNF mit einem zGG. unter 12t haben höhere Anteile an batterie-elektrische SNF da das für die größeren SNF nötige Netz an Megachargern im Wesentlichen fehlt.

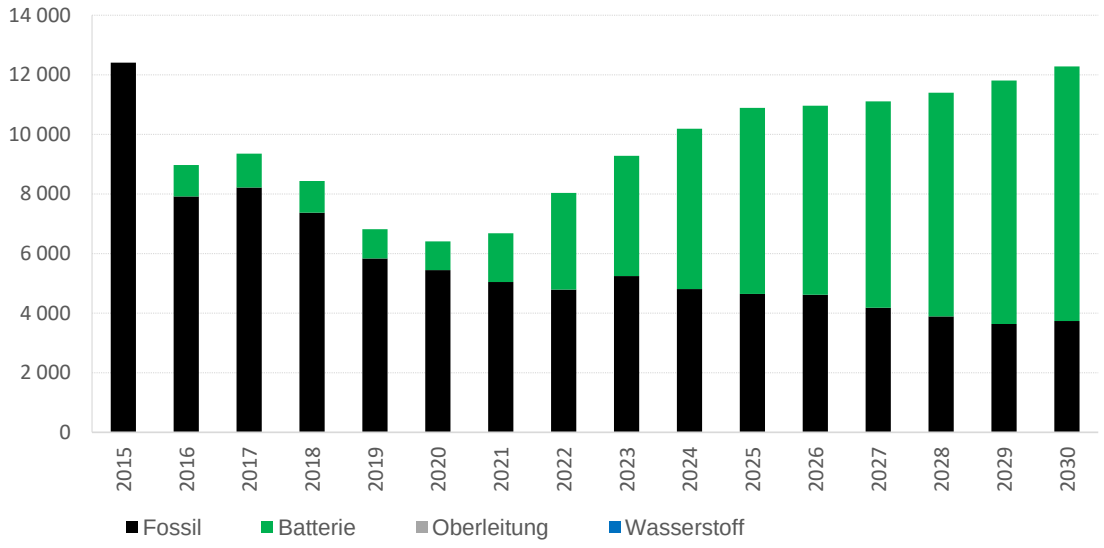
In der Gewichtsklasse 12 bis 20t genügt die 40% Förderung und die Mautbefreiung für BEV um in den Jahren 2021 bis 2023 einen substanziellen Marktanteil bei den NZL zu erreichen. Nach auslaufen dieser Anreize geht der Marktanteil wieder deutlich zurück.

Des Weiteren ist bei den Sattelzugmaschinen zu erkennen, dass die Pandemie buchstäblich langfristige Wellen schlägt: Wenn jene Fahrzeuge ausgemustert werden, welche während der Pandemie in reduzierten Mengen gekauft wurden, bricht die Nachfrage wiederum ein. Der Effekt dämpft sich zwar im Laufe der Zeit, aber auf Grund der kürzeren Nutzungsdauern und der geringeren Streuung nicht so stark wie bei den kleineren Fahrzeugen.



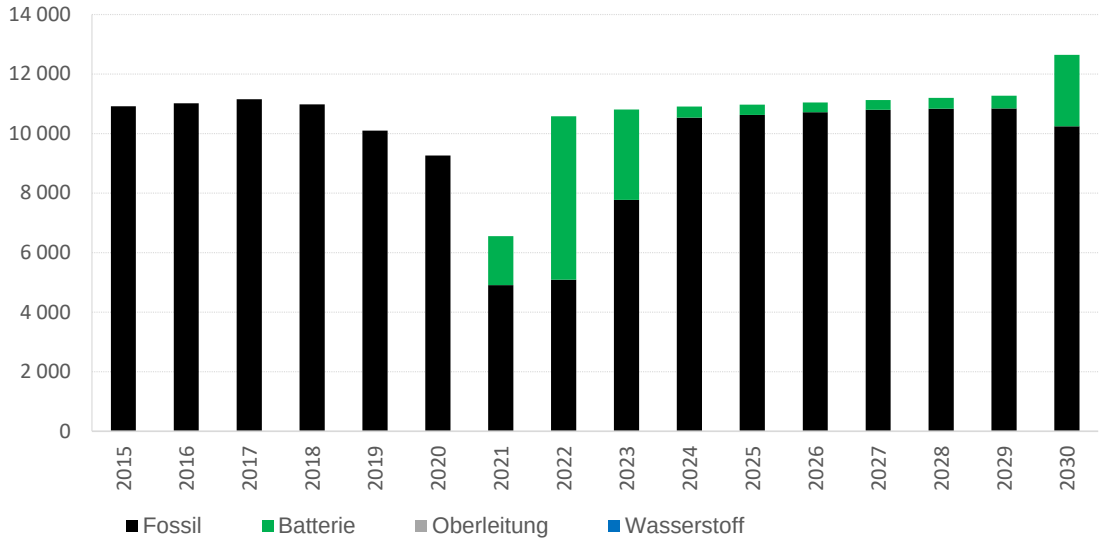
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 77 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >3,5t ≤7,5t nach Antriebsart



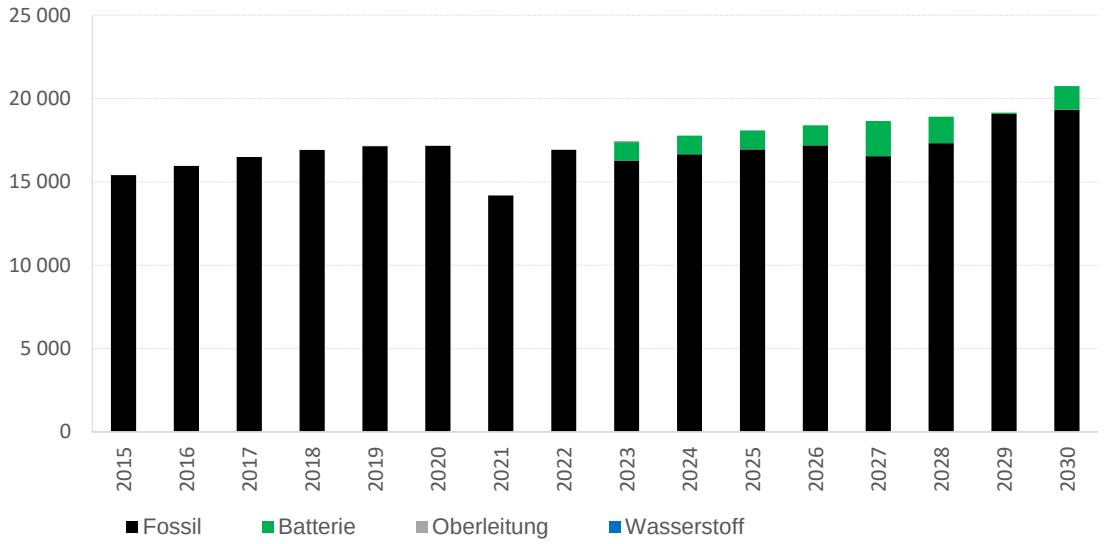
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 78 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >7,5t ≤12t nach Antriebsart



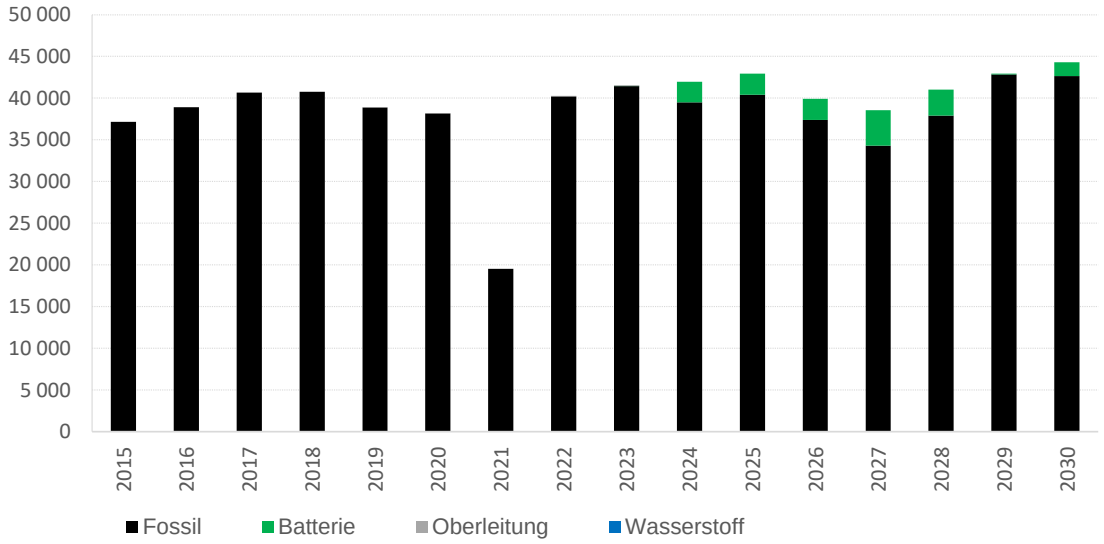
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 79 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >12t ≤20t nach Antriebsart



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 80 Entwicklung der Neuzulassungen an schweren Nutzfahrzeugen >20t nach Antriebsart



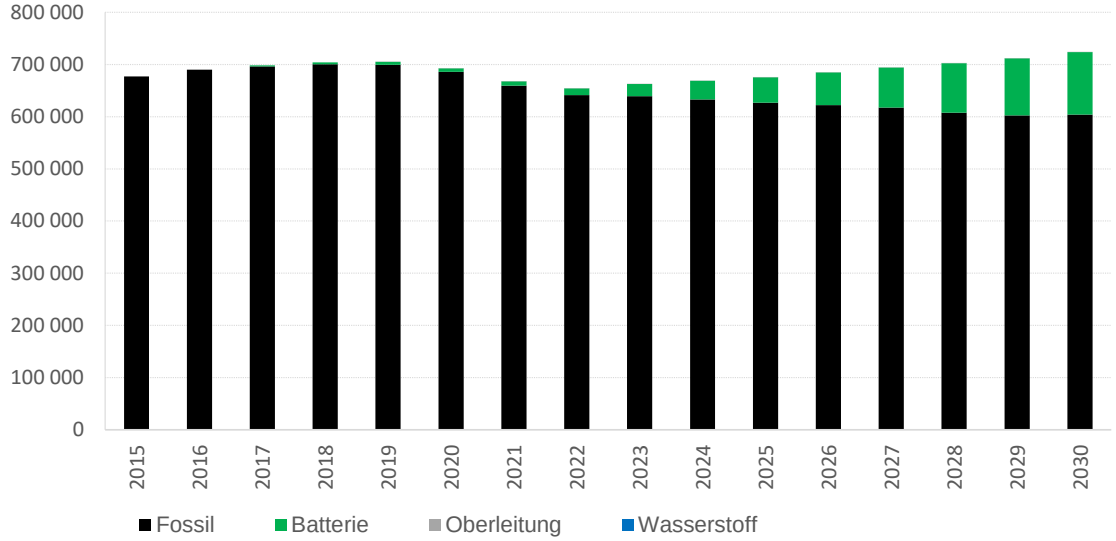
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 81 Entwicklung der Neuzulassungen an Sattelzugmaschinen nach Antriebsart

8.5 Entwicklung der Flotte SNF

Im REF-2020 haben auch in 2030 Dieselfahrzeuge noch den größten Flottenanteil inne, wenngleich BEV- Fahrzeuge steigende Anteile ausmachen (Abbildung 82). Oberleitungs- oder Wasserstoff-SNF treten (wie erwähnt auf Grund mangelnder Energieversorgungsinfrastruktur und bei H2 auch hoher Preise) nicht auf. Bei den fossil betriebenen SNF ist selbst

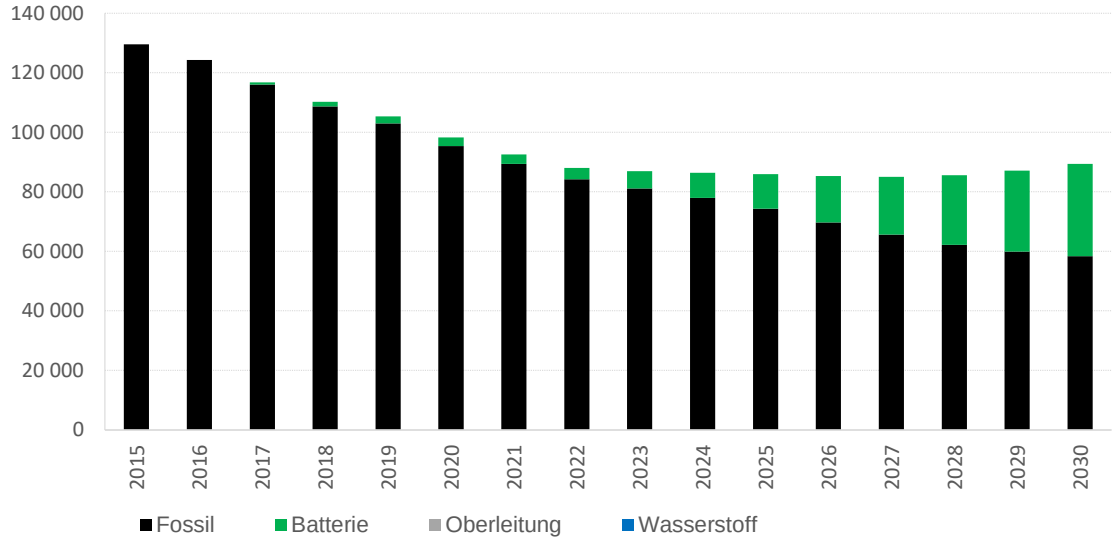
absolut betrachtet ein leicht abnehmender Trend zu erkennen, getrieben durch eine Abnahme bei Dieselfahrzeugen und Zunahme von BEV-SNF. Mit der Zeit wächst der SNF-Bestand insbesondere aufgrund der wachsenden Verkehrsleistung (siehe Kapitel 11.2), die wiederum maßgeblich getrieben wird durch das Wachstum der Wirtschaft und des Handels. Unterbrochen wird dieser Trend allerdings durch die Auswirkung der Pandemie.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

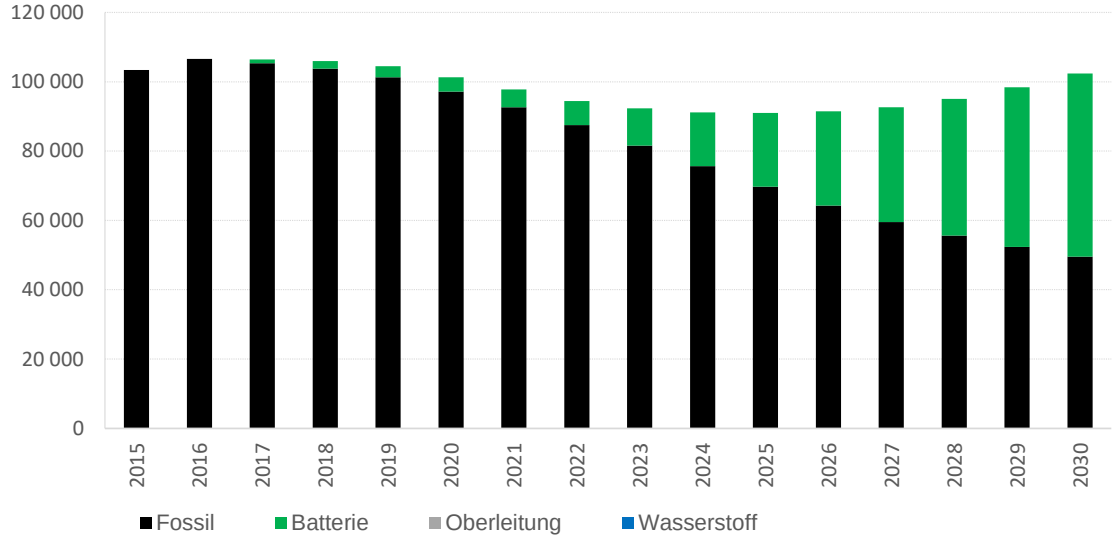
Abbildung 82 Entwicklung des Bestandes schwerer Nutzfahrzeuge aggregiert über alle Gewichtsklassen nach Antriebsart

In Abbildung 83 bis Abbildung 87 ist zu sehen, dass batterieelektrische Fahrzeuge in REF-2020 vor allem in den Gewichtsklassen ≤12t bis 2030 bereits bedeutende Anteile erreichen, was für die größeren zGG nicht der Fall ist. Hauptgrund ist wie erwähnt der mangelnde Ausbau der Megacharger-Infrastruktur.



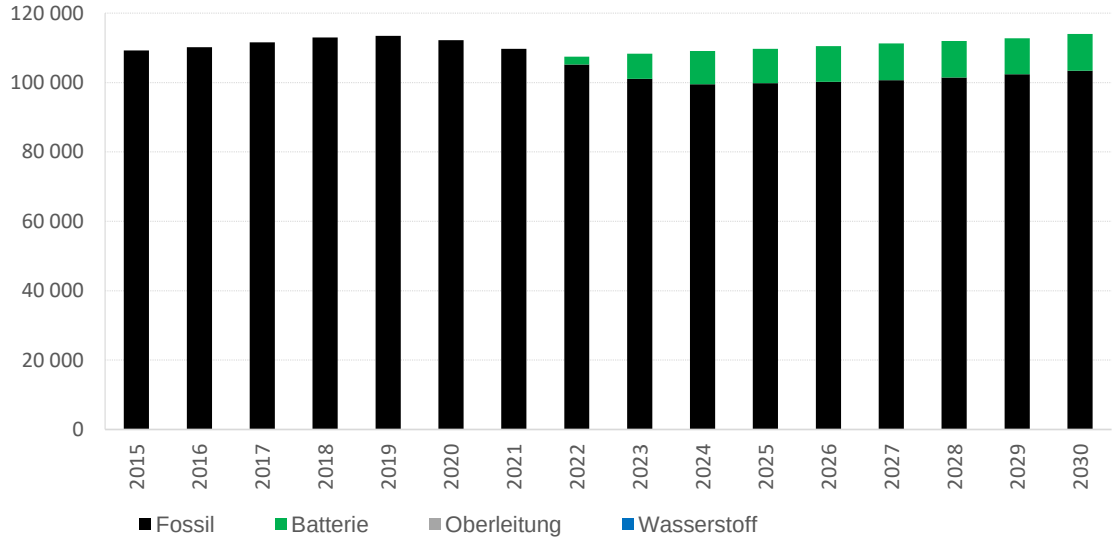
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 83 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >3,5t ≤7,5t nach Antriebsart



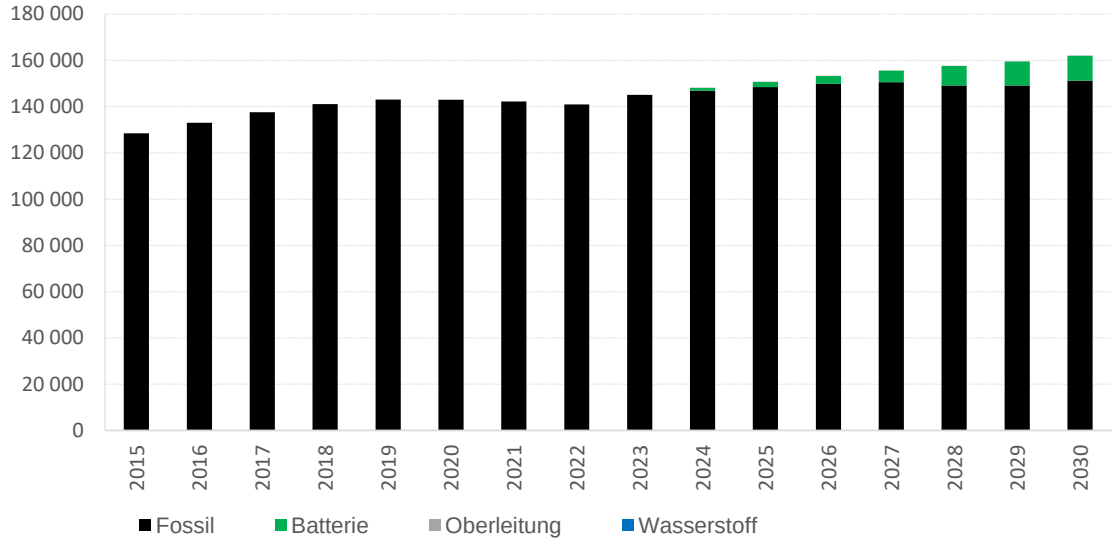
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 84 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >7,5t ≤12t nach Antriebsart



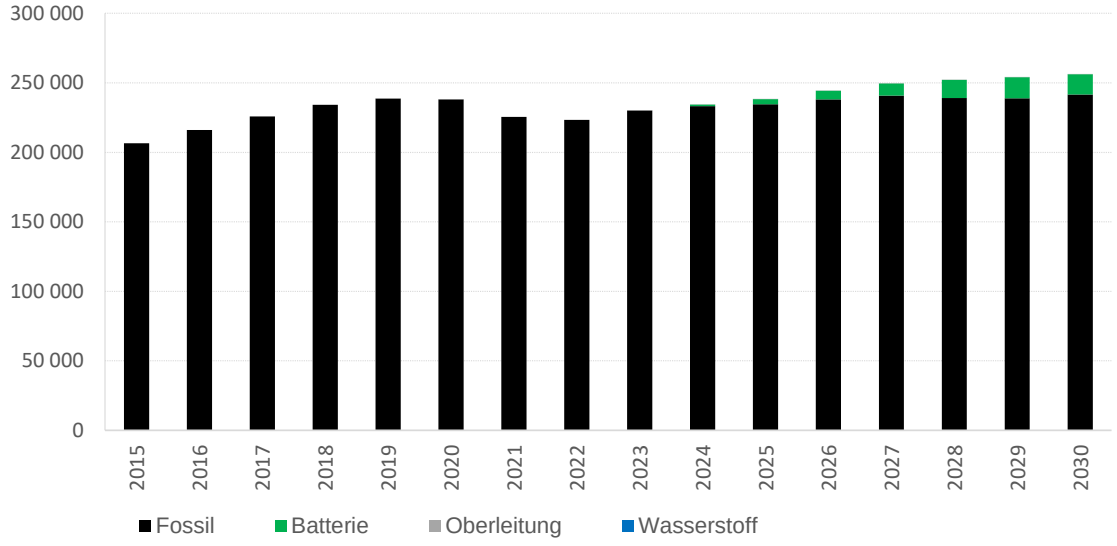
Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 85 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >12t ≤20t nach Antriebsart



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 86 Entwicklung der Flotte an schweren Nutzfahrzeugen >20t nach Antriebsart

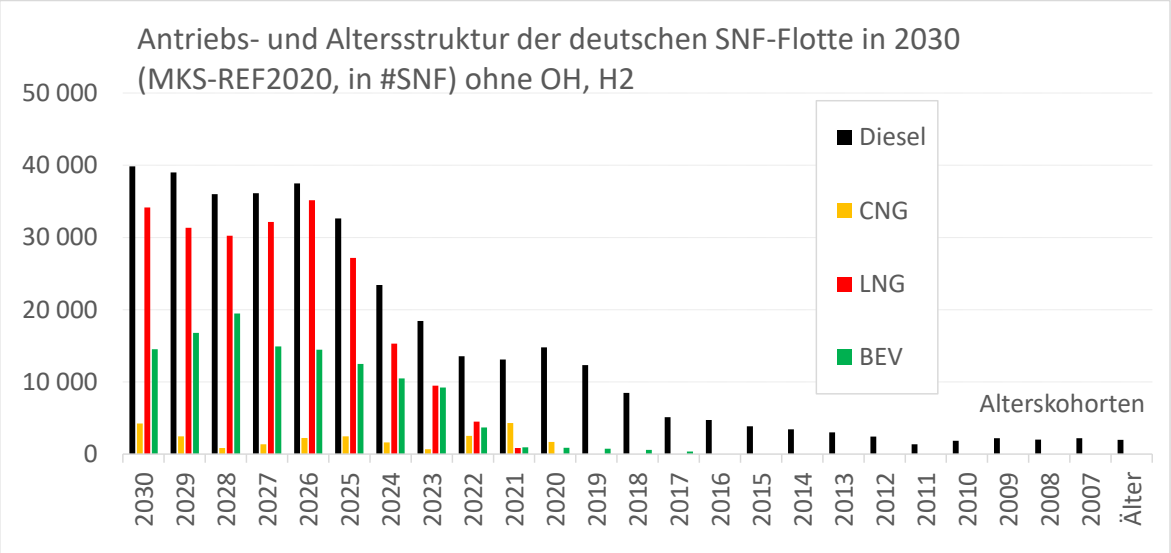


Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 87 Entwicklung der Flotte an Sattelzugmaschinen nach Antriebsart

8.6 Altersstruktur der SNF in 2030

Die Altersstruktur der SNF-Flotte im Jahre 2030 unter Berücksichtigung der Aufteilung aus der Sensitivität für Gas-LKW ist in Abbildung 88 dargestellt.



Quelle: M-Five ASTRA-2020.

Abbildung 88 Anzahl SNF in 2030 je Neuzulassungsjahr. Der Übersichtlichkeit halber wurden H2 und OH weggelassen, da diese im REF-2020 durch Geringfügigkeit ohnehin kaum darstellbar sind

Wie in Abbildung 88 zu sehen ist, sind in 2030 bei Diesel-SNF die Fahrzeug-stärksten Alterskohorten 1- 4 Jahre alt. Mit zunehmendem Kohorten-Alter nimmt die Fahrzeugstärke dann deutlich ab, da die SNF dann üblicherweise exportiert werden, sofern sie nicht bereits

verschrottet wurden, da ein Neukauf für die meisten Anwendungsfälle betriebswirtschaftlich günstiger ist. Das zweite niedrigere Maximum bei einer Alterskohorte von 10 Jahren erklärt sich durch Anwendungsfälle in denen durchschnittlich eine deutlich längere Nutzungsdauer besteht. Der lange Schwanz der Verteilung repräsentiert Anwendungsfälle mit sehr alten Fahrzeugen (z.B. Zirkusse, Sammlerstücke usw.) welche meist geringe Fahrleistungen aufweisen.

Dieses zweite Maximum existiert bei BEV und LNG SNF noch nicht, da diese erst seit kürzerem in nennenswerten Anteilen in den Neuzulassungen vorhanden sind (siehe Kapitel 8.4). Die Struktur der jüngeren Alterskohorten entspricht der von Diesel-SNF, wenn auch auf Grund der geringeren Anteile an den NZL auf niedrigerem Niveau.

Bei CNG sind die Alterskohorten mit 8-9 Jahren Alter sogar Fahrzeugstärker als die jüngsten Alterskohorten, was damit zusammenhängt, das die Neuzulassungen um diese Zeit am höchsten waren.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Modellierung annimmt, dass sich die Antriebsarten nicht prinzipiell in der Nutzungsdauer unterscheiden. Für BEV-SNF ist beispielsweis derzeit noch unklar, ob dies auch tatsächlich der Fall sein wird: beispielsweise haben Elektromotoren auf Grund ihrer höheren Lebensdauer als Verbrennungsmotoren das Potenzial höheren Nutzungsdauern, aber die Stabilität der Batterien könnte die Nutzungsdauer der Fahrzeuge andererseits jedoch auch stärker begrenzen.

8.7 Effizienzentwicklung SNF

Die CO_2-Effizenz der nach den CO_2-Standards regulierten SNF Neuzulassungen in Deutschland verbessert sich von 858 gCO_2/km in 2019 auf 599 gCO_2/km in 2030. Damit wird eine Reduktion um etwas über 30% erreicht.[38]

In Tabelle 28 und Abbildung 89 ist zu sehen, dass sich die Energieeffizienz von (fast) allen Antriebsarten im Laufe der Zeit verbessert. Die Effizienzgewinne der fossilen Antriebe werden getrieben von den Flottengrenzwerten, welche wegen begrenzter Durchdringungsgrade an elektro-basierten Antrieben z.T. über Effizienzgewinne bei den fossilen erreicht werden müssen. Lediglich BEV-SNF weisen scheinbar zunächst eine Verschlechterung der Energieeffizienz auf, die jedoch dadurch zustande kommt, dass sie sich im Zeitverlauf zunehmend stärker in den größeren Gewichtsklassen durchsetzen, welche naturgemäß höhere Energieverbräuche haben. Dennoch weisen BEV-SNF im Vergleich zu anderen Antriebsarten bei weitem den niedrigsten Energieverbrauch je km und damit die höchste Energieeffizienz auf.

Auch beim Vergleich LNG zu CNG spielt die Verteilung in den Größenklassen eine Rolle. LNG-SNF werden in der Klasse >20t zGG. und Sattelzugmaschinen eingesetzt, CNG auch

[38] Die Gewichtsklassen in ASTRA-M sind nicht deckungsgleich mit den VECTO-Klassen aus der CO_2-Regulierung. Zur Berechnung der CO_2-Werte der Neuzulassungen wurde die komplette Gewichtsklasse von 12 bis 20t aus ASTRA-M einbezogen. Die Regulierung bezieht nur SNF über 16t zGG. ein.

in den kleineren Gewichtsklassen. Daher liegt der durchschnittliche Verbrauch bei LNG-SNF höher als bei CNG. Lediglich in einer Anfangsphase werden CNG-SNF auch in größeren Gewichtsklassen eingesetzt, so dass sich diese hier von LNG nicht so stark unterscheiden.

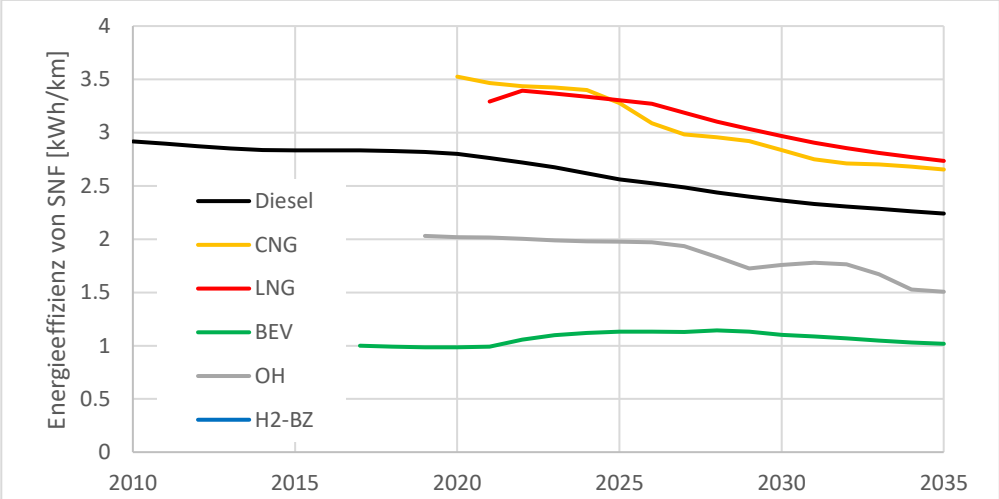
Da Wasserstoff-Brennstoffzellen-SNF es im REF-2020 gar nicht in den Markt schaffen, ist hier auch keine Energieeffizienz berechenbar.

Die Energieeffizienz von Oberleitungs-SNF ist geringer als die bei den BEV-SNF. Dies ist jedoch nur zu einem geringen Teil auf eine günstigere Energieeffizienz von BEV-SNF im Vergleich zu OH-SNF zurückzuführen. Entscheidender ist, dass die Energieeffizienz der BEV-SNF eine Mischung aus allen Größenklassen darstellt, während OH-SNF lediglich in den Klassen >20t zGG. und SZM zum Einsatz kommen, welche naturgemäß höhere Energieverbräuche je km aufweisen. Die Energieeffizienz von OH nähert sich im Laufe der Zeit der von BEV an.

Tabelle 28: Entwicklung der Energieeffizienz von SNF nach Antriebsart

Antriebsart	Einheit	2015	2020	2025	2030	2035
Diesel	kWh/km	2.835	2.800	2.562	2.362	2.240
CNG	kWh/km		3.525	3.279	2.838	2.655
LNG	kWh/km			3.305	2.969	2.734
BEV	kWh/km		0.985	1.131	1.103	1.020
OH	kWh/km		2.019	1.979	1.758	1.508
H_2-BZ	kWh/km					

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.



Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 89 Entwicklung der Energieeffizienz von SNF nach Antriebsart

9 Aufbau der Energieinfrastruktur für Verkehr

Hier sollen sowohl die direkt erforderlichen Infrastrukturbedarfe (wie Ladestationen, H_2-Tankstellen) als auch die Bedarfe an Infrastrukturen für die EE-Stromerzeugung abgeschätzt werden.

Für die Investitions- und Vermeidungskostenrechnung des KSPr wurde bereits in 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.

Die Modellierung der Infrastrukturen wurde weiter entwickelt in Schade et al. (2020) und nun nochmals für die Modellierung in REF-2020 erweitert.

Das ‚Henne-Ei-Problem' ist hier für PKW und LNF gelöst worden, indem die modellierten Flottenhochläufe (siehe Kapitel 6, 6.4) die Mengen an benötigter Infrastruktur bestimmt haben. Dabei wird vernachlässigt, dass eigentlich die Infrastruktur mit etwas Vorlauf geplant und aufgebaut werden muss. D.h., die dargestellten Hochläufe sollten als um etwa ein Jahr vorzuziehen interpretiert werden.

Für die SNF unterscheidet sich die Entscheidungs- und Aufbausituation des Infrastrukturaufbaus zwischen verschiedenen Antriebstechnologien deutlich (siehe 9.2).

9.1 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 davon ausgegangen, dass private Ladevorgänge den Großteil der Ladevorgänge bei PKW ausmachen, während LNF eher am Arbeitsplatz geladen werden.

Die folgende Tabelle 29 beschreibt die Parameter zur Abschätzung des Bedarfs an Ladestationen bei PKW und LNF.

Tabelle 29: 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	3,7kW	0.80	0.60	0.30	0.30	1.0
	7,5kW	0.20	0.40	0.10	0.20	1.0
Arbeitsplatz	7,5kW	0.05	0.10	0.50	0.50	1.5
	22kW	0.05	0.10	0.50	0.50	2.0
Öffentlich	7,5kW	0.05	0.05	0.01	0.02	1.5
	22kW	0.03	0.05	0.01	0.02	2.0
	100kW	0.00	0.00	0.00	0.00	2.0

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Es wird angenommen, dass bei einem konservativen Hochlauf von E-PKW (wie im REF-2020 hinterlegt) jeder Haushalt mit einem elektrisch angetriebenen PKW eine Lademöglichkeit besitzt. Aus den Annahmen ergibt sich im REF-2020 ein Verhältnis von E-PKW zu öffentlichen Ladepunkten von 11:1 im Jahr 2020 und 10:1 im Jahr 2030. Der Aufbau von E-PKW zu Ladeinfrastruktur wird somit in den kommenden Jahren weitestgehend parallel vollzogen.

Die Annahmen des REF-2020 für PKW werden im Folgenden mit den Ergebnissen der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020) verglichen. Diese schätzt je nach Entwicklungsszenario im Jahr 2030 einen Anteil privater Ladevorgänge von 76 bis 88 Prozent und dementsprechend einen Anteil öffentlicher Ladevorgänge von 12 bis 24 Prozent. Für Deutschland ermittelt die Studie ein Verhältnis von E-Fahrzeugen zu öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur von 11:1 im Jahr 2021. Dies entspricht exakt dem Verhältnis im REF-2020. Durch bessere Verfügbarkeit von privater Ladeinfrastruktur und die steigende Ladeleistung von E-Fahrzeugen steigt das Verhältnis der Nationalen Leitstellen Ladeinfrastruktur (2020) auf 20:1 im Jahr 2030. Dabei unterscheidet sich das Verhältnis im urbanen Raum (9:1 in 2021 und 14:1 in 2030) von dem im suburbanen (12:1, 23;1) und ländlichen Raum (11:1, 23:1). Es ist wichtig sich zu vergegenwärtigen, dass dieser Entwicklung eine Flotte von 14 Millionen E-PKW zu Grunde liegt. Bei einem solch ambitionierten Hochlauf ist es schwierig, das ursprüngliche Verhältnis aufrecht zu erhalten, wodurch sich die Zahlen im Jahr 2030 von REF-2020 unterscheiden.

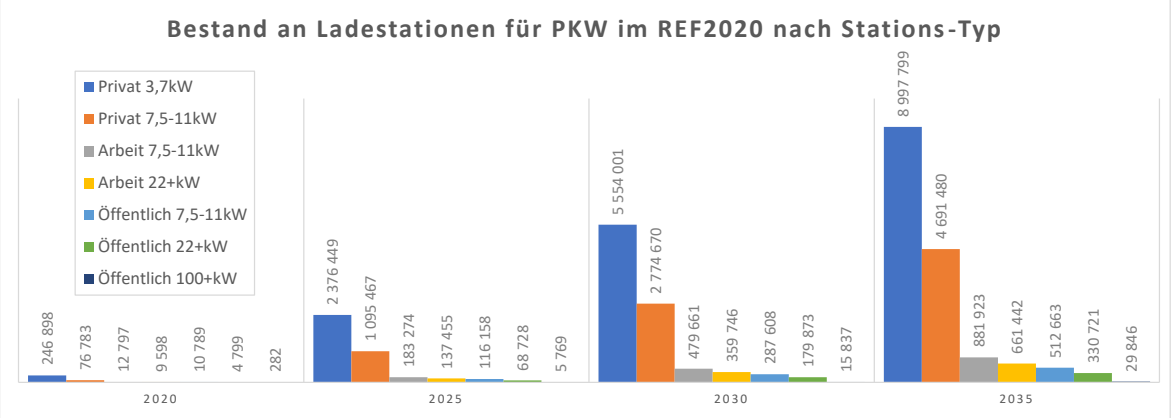
Tabelle 30 zeigt die Investitionskosten für Ladeinfrastruktur zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Investitionskosten werden dynamisch unter Nutzung von Lernkurven in Abhängigkeit von der Zahl der installierten Stationen berechnet.

Tabelle 30: Parameter für die Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei PKW und LNF

Investition pro PKW/LNF Ladestation in €2010			
Standort	**Stationstyp**	**2020**	**2030**
Haushalt	3,7kW	800	785
	7,5kW	1,677	1,456
Arbeitsplatz	7,5kW	2,050	1,780
	22kW	6,544	5,128
Öffentlich	7,5kW	2,329	2,022
	22kW	8,414	6,593
	100kW	45,000	33,419

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 90 gibt einen Überblick über den benötigten Hochlauf an Ladestationen für PKW. In 2030 besteht ein Bedarf von etwa 430.000 öffentlichen Ladestationen für PKW. Am Arbeitsplatz sollten 730.000 Stationen verfügbar sein. Die Stationen *Öffentlich 22+kW* beinhalten auch Stationen mit bis zu 100 kW (also auch 50 kW Stationen).



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-20201.

Abbildung 90: Bestand an PKW-Ladestationen (REF-2020)

Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020) schätzt einen Ladeinfrastruktur-Bedarf in 2030 von 2,5 bis 2,7 Mio. Ladepunkten am Arbeitsplatz, zwischen 5,4 und 8,7 Mio. privaten Ladepunkten und zwischen 440.000 und 843.000 öffentlichen Ladepunkten. Die Anzahl an privaten Ladepunkten des REF-2020 liegt aufgrund der oben erläuterten Annahme einer Ladestation pro Haushalt mit E-PKW im oberen Bereich der Bandbreite (7,6 Mio.). Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020) erlaubt auch Haushalte mit E-PKW ohne private Ladepunkte bzw. Haushalte mit mehreren E-PKW. Letzteres tritt in REF-2020 und einer deutlich geringeren E-PKW Flotte kaum auf. Aufgrund der geringeren Flotte an E-PKW in 2030 ist der Bedarf an Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz (730.000) und in der Öffentlichkeit (430.000) deutlich geringer als die Schätzungen der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020).

9.2 Alternative Lade- und Betankungsinfrastruktur für SNF

Für CNG-SNF wurde für die Nische in der es Anwendung findet analog zu PKW und LNF von einer ausreichenden Abdeckung an Betankungsinfrastruktur ausgegangen, insbesondere da LKW hier zur Not auf PKW-Tankstellen ausweichen können. Allerdings führen die mit PKW-Tankstellen verbundenen höheren Betankungszeiten (ca. eine halbe Stunde) dazu, dass CNG-SNF weniger attraktiv sind als Diesel-LKW, was im Modell dadurch abgebildet wird, dass sich Käufer verhalten, als wären CNG-LKW teurer als sie es tatsächlich sind (Aufschlag ‚gefühlter' Preis) und zwar insbesondere bei jenen Akteuren, welche tendenziell streng ökonomisch entscheiden, denn hierbei handelt es sich nicht um eine persönliche Präferenz sondern diese Betankungszeiten erzeugen echte ökonomische Nachteile (Lieferzeiten, Fahrerkosten usw.).

Für LNG-SNF konnte ebenfalls der gleiche Ansatz gewählt werden, wie bei PKW und LNF, da hier der Ausbau der Betankungsinfrastruktur und dessen weitere Planung eine ausreichende Versorgung sicherstellt. Derzeit sind beispielsweise knapp über 100 LNG Tankstellen in Betrieb (Mitte 2021 waren es noch 50[39]), während für die Flottenentwicklung nötige Anzahl im REF-2020 sich in einem sehr ähnlichen Bereich bewegt, wenn man o.g. Vorzug berücksichtigt (120 Tankstellen). Bis 2025 plant die LNG-Task-Force 200 LNG-Tankstellen bei 25,000 LNG-LKW.[40]

Bei OH-SNF ist eine ausreichende Oberleitungsinfrastruktur die Voraussetzung dafür, dass Käufer sich für diese Antriebstechnologie entscheiden. Es wird davon ausgegangen, dass dies nur über eine staatlich finanzierte Infrastruktur geschehen kann, sich also keine privatwirtschaftliche Finanzierung hierfür finden würde. OEMs setzen daher momentan eher auf andere Antriebstechnologien wie etwa H2 oder BEV. Im REF-2020-Szenario wird nicht davon ausgegangen, dass es zu einem umfassenden staatlich finanzierten Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur kommt, und es somit bei den bisherigen zu Forschungs- und Entwicklungszwecken errichteten bzw. geplanten Pendelstrecken bleibt (d.h. Maximalausbau von 330km in 2025 erreicht), wodurch der Hochlauf von OH-SNF außerhalb dieser Nische ausgeschlossen wird.

Bei BEV-SNF wird davon ausgegangen, dass der Ausbau der Megacharger Infrastruktur (>700 kW) für die Langstreckenanwendung und damit v.a. für die höheren Gewichtsklassen eine notwendige Bedingung für einen nennenswerten Hochlauf darstellt. Anders als bei OH-SNF ist dies keine Voraussetzung für *alle,* sondern lediglich *die meisten* Akteure, da für eine Reihe von Anwendungsfälle auf kürzeren Strecken (z.B. Pendelverkehr zwischen Werken) auch größere LKW eingesetzt werden können, die z.B. ausschließlich an der hofeigenen Ladesäule über Nacht und gelegentlich an der Rampe eines Logistikzentrums laden (siehe auch Abschnitt zu Verzerrungen des Kaufverhaltens durch mangelnde Energieversorgungsinfrastruktur in Kapitel 8.3.2). Bei den Megachargern wird davon ausgegangen,

[39] https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet/, besucht: 26.01.2021

[40] Die Verdreifachung der Gaspreise Ende 2021 ist nicht Teil von REF-2020, dürfte aber massiv den weiteren Markterfolg von Gas-LKW dämpfen oder sogar stoppen.

dass eine staatliche Ko-Finanzierung des Basis-Ausbaus notwendig ist; anders als bei Ladesäulen mit geringeren Ladeströmen für die ein privater Ausbau, welche den Bedarf der niedrigeren Gewichtsklassen befriedigt, möglich erscheint. Ein solcher staatlich finanzierter Ausbau der Megacharger-Infrastruktur geschient im REF-2020 nicht, da die relevanten Entscheidungen zur Bereitstellung von Fördermitteln erst nach dem Abschneidezeitpunkt (Ende Aug. 2020) getroffen werden würden.

Bei H2-SNF wird im REF-2020 davon ausgegangen, dass der Ausbau der Betankungsinfrastruktur zu langsam vonstattengeht, um ausreichende geografische Abdeckung in kurzer Zeit zu erreichen, so dass sich dies begrenzend auf den Hochlauf der Wasserstofftechnologie bei den SNF auswirkt, was zusammen mit den hohen H2-Kosten deren Markteintritt bis 2030 vollständig verhindert. Ohne die Infrastruktur-Restriktionen betrüge der Anteil der H2-SNF aber wegen der hohen H2-Kosten in 2030 auch nur 1%.

Die folgende Tabelle 31 beschreibt die Parameter zur Abschätzung des Bedarfs an Ladestationen für SNF.

Tabelle 31: Parameter für den Bedarf an öffentlichen Ladestationen je zusätzlichem SNF

Stationstyp	>3,5 – 7,5t	>7,5-12t	>12-20t	>20t	SZM
50kW	0.90	0.80	0.50	0.10	0.00
150kW	0.30	0.40	0.60	0.75	0.90
350kW	0.00	0.05	0.20	0.20	0.40
≥750kW (Megacharger)	0.00	0.00	0.00	0.10	0.15

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass für BEV-SNF auch private Ladepunkte installiert im Betriebshof werden. Da hier üblicherweise über Nacht geladen würde, wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um Ladesäulen der Leistungskategorien 50kW und 150kW handelt, und dass die Anteile der letzteren Kategorie mit dem zGG steigt (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Installation von privaten Ladepunkten je neu gekauftem BEV-SNF welcher andere Antriebsart ersetzt.

Stationstyp	>3,5 – 7,5t	>7,5-12t	>12-20t	>20t	SZM
50kW	1	0.8	0.5	0	0
150kW	0	0.2	0.5	1	1

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Sobald jedoch ein BEV-SNF Neukauf einen alten BEV-SNF ersetzt, welcher außer Betrieb geht, wird für diesen Kauf kein weiterer privater Ladepunkt installiert. In ASTRA werden daher nur jene Neuzulassungen von BEV-SNF zur Berechnung der Installation zusätzlicher privater Ladepunkte herangezogen, welche eine andere Antriebsart ersetzen (d.h. Neuzu-

lassungen BEV abzüglich Außerbetriebnahmen BEV je zGG). Dadurch sinken die durchschnittliche je Neuzugelassenem BEV-SNF installierten privaten Ladepunkte (hier alle Neuzulassungen) mit der Zeit ab, wenn immer mehr neu gekaufte BEV-SNF ältere BEV-SNF ersetzen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 33 weist die Schlüssel für den Bedarf an Tankstellen für SNF betrieben mit LNG oder H_2 aus.

Tabelle 33: Parameter für den Bedarf an Tankstellen bei SNF

Gewichtsklasse	LNG	H_2	Einheit
3,5 – 7,5t	0	400	LKW/Tankstelle
7,5-12t	0	300	LKW/Tankstelle
12-20t	120	250	LKW/Tankstelle
>20t	190	200	LKW/Tankstelle
SZM	180	200	LKW/Tankstelle
Investition	1.0	6.3	Mio*€$_{2010}$/Tankstelle

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

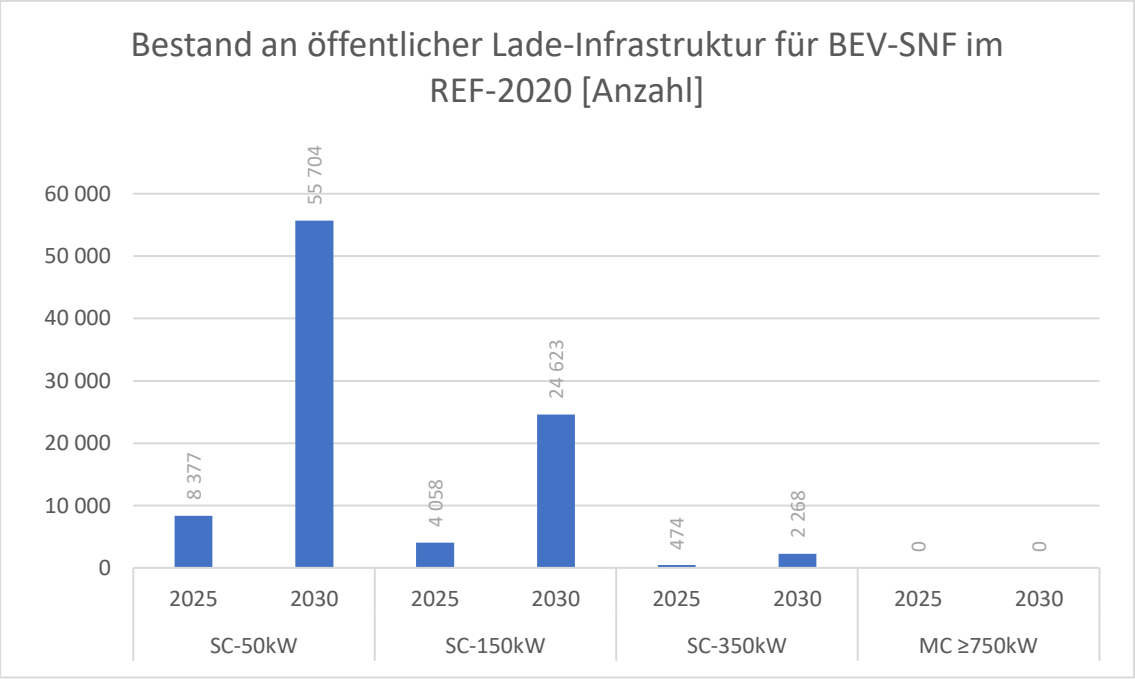
Tabelle 34 zeigt die Investitionskosten für Ladeinfrastruktur zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Investitionskosten werden dynamisch unter Nutzung von Lernkurven in Abhängigkeit von der Zahl der installierten Stationen berechnet.

Tabelle 34: Parameter für die Investitionskosten von Ladeinfrastrukturen bei SNF

Investition pro SNF Ladestation in €2010		
Stationstyp	**2020**	**2030**
50kW	36,750	33,250
150kW	88,000	80,000
350kW	216,000	180,000
750kW	585,000	450,000

Quelle: M-Five, ASTRA-2020.

Die Anzahl an Ladesäulen ist in Abbildung 91 dargestellt. Die Kategorien der Ladestationen geben Bandbreiten an: z.B. sind SC-350kW Super-Charger mit 250 bis 400 kW Ladeleistung; MC ≥750kW sind Mega-Charger mit Leistungen von 700 bis über 1000kW.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 91 Bestand an öffentlichen SNF-Ladesäulen (REF-2020)

Da zum 31.08.2020 zwar Fördergelder vorhanden aber noch über keine staatliche Finanzierung öffentlicher Megacharger entschieden war, wird diese Infrastruktur im REF-2020 entsprechend nicht implementiert. Dies wirkt sich begrenzend auf den Hochlauf der BEV-SNF >12t aus.

9.3 Erzeugungsinfrastruktur für erneuerbaren Energien

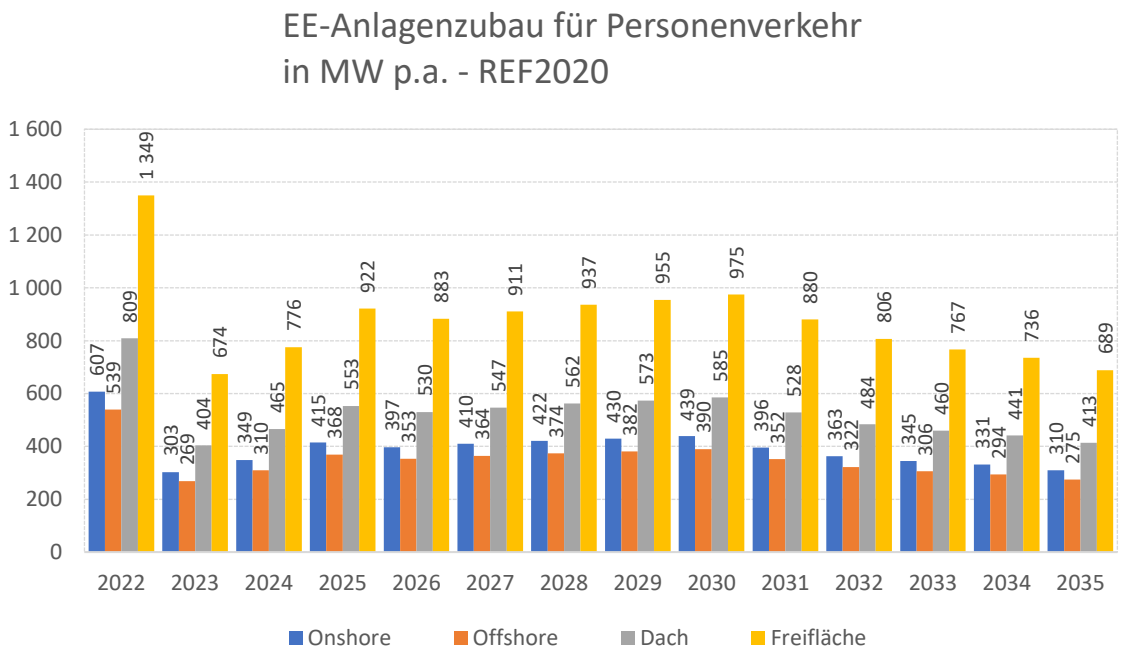
Eine zentrale Voraussetzung für die Klima-Neutralität der E-Mobilität und damit auch für die politische Unterstützung ist, dass die E-Fahrzeuge mit erneuerbarem Strom betrieben werden. Deswegen wurde parallel zur (Investitions-)Bedarfsermittlung der Ladeinfrastruktur auch der Bedarf an zusätzlichen EE-Strom-Erzeugungsanlagen ermittelt. Dabei wurden nur die vier wichtigsten EE-Technologien berücksichtigt: Wind (On- bzw. Offshore) und Photovoltaik (PV auf Dachflächen und PV auf Freiflächen). Tabelle 35 stellt zentrale Parameter der EE-Infrastrukturabschätzung dar.

Tabelle 35: 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-2020.

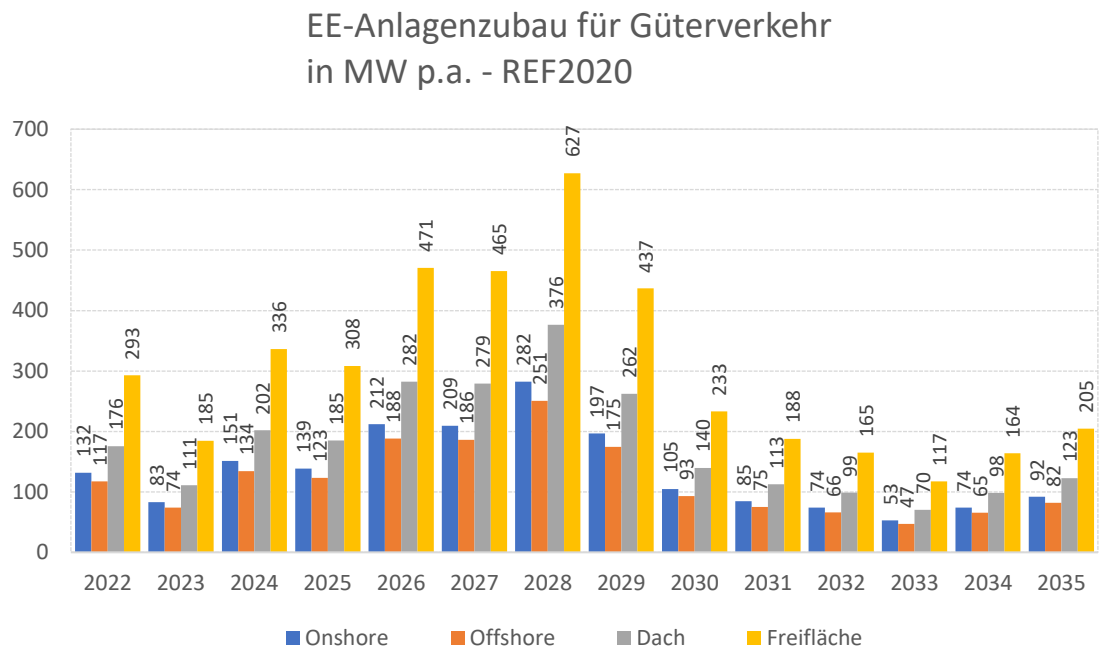
Abbildung 92 zeigt den notwendigen Zubau für den Personenverkehr, d.h. für die Nutzung in PKW, Krafträdern, Bussen und auf der Schiene. Der in REF-2020 maximal jährlich benötigte Zubau für die Elektrifizierung des Personenverkehrs liegt bei 3,3 GW Kapazität in 2022. Die benötigten Investitionen belaufen sich von 2022 bis 2035 auf etwa 34 Mrd. €$_{2010}$.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2022.

Abbildung 92 Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Personenverkehr (REF-2020)

Abbildung 93 gibt die EE-Infrastrukturbedarfe für den Güterverkehr wieder. Der maximal jährlich benötigte Zubau für die Elektrifizierung des Güterverkehrs in REF-2020 liegt bei gut 1,5 GW Kapazität in 2028. Die benötigten Investitionen von 2022 bis 2035 belaufen ich auf fast 12 Mrd. €$_{2010}$. Ein Ausbau der Übertragungs-Stromnetze ist in diesen Investitionen noch nicht berücksichtigt.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2022.

Abbildung 93 Zubau an EE-Stromerzeugungsanlagen zur Befriedigung des zusätzlichen Bedarfs an EE-Strom im Güterverkehr (REF-2020)

10 Modellierung und Referenzszenario Personenverkehr

10.1 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 kommen Start-Ziel-Matrizen zum Einsatz, 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

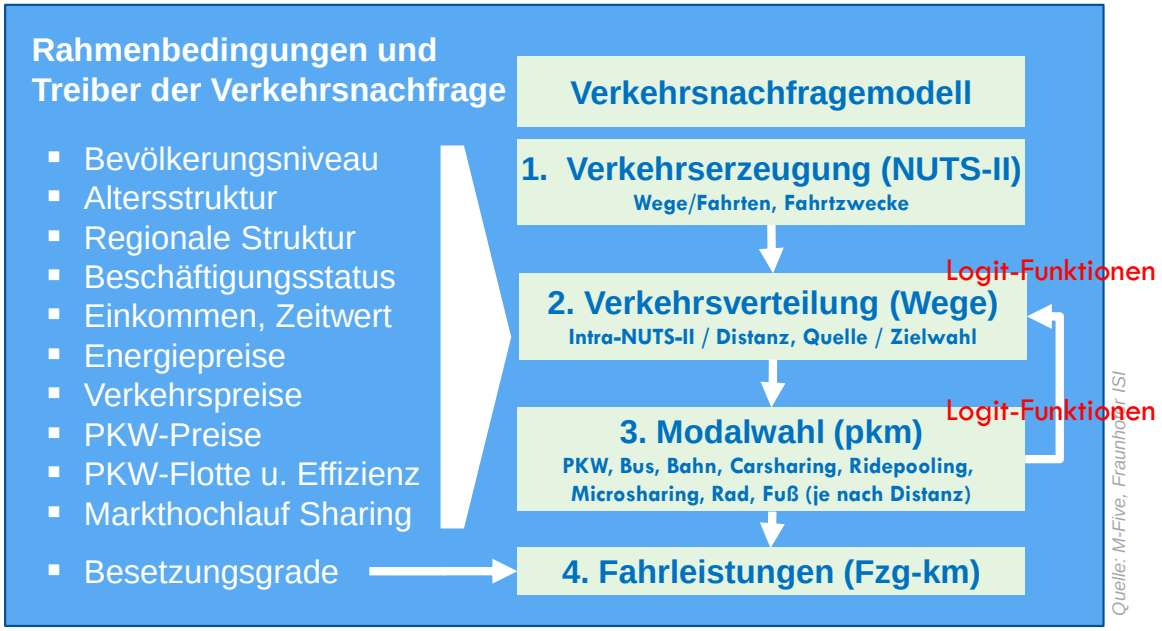
meisten Verkehrssimulationsmodelle simulieren die Verteilung entweder mittels Gravitationsansatz oder mit Hilfe von Logit-Funktionen auf dem Prinzip von diskreten Wahlentscheidungen.

In der dritten Stufe werden die Verkehrsströme auf die für die jeweilige Quell-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 Verkehrsaufkommen 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. die 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 auf Basis der Verkehrsverteilung und der Verkehrsaufteilung, um damit Aussagen über die Fahrzeugkilometer der einzelnen Verkehrsmittel treffen zu können. Abbildung 94 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Personenverkehr-Moduls in ASTRA-M in den vier oben beschriebenen Stufen.



Quelle: M-Five, Fraunhofer ISI.

Abbildung 94 Aufbau der Modellierung des Personenverkehr-Moduls in ASTRA-M

10.2 Verkehrsnachfrage im Personenverkehr

Die Verkehrserzeugung erfolgt im Personenverkehrsmodell von ASTRA-M anhand von Daten aus dem Mobilitätspanel und der 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 in vielen Logit-Funktionen, die Prinzipien von diskreten Wahlentscheidungen 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 monetarisiert mit Hilfe von wegezweckspezifischen Zeitwerten. 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.

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 Koste

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 (Value of Time) sowie Modusspezifischen 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 alleine 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 Wegeebene, 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 36), Distanz und Wegezweck. Diese Fahrzeugkilometer fließen im Weiteren in die Umweltbewertung des entstandenen Verkehrs ein.

Tabelle 36: 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, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Zur Übersicht der Modellergebnisse für das REF-2020 zeigt Tabelle 37 die Abschätzung der Entwicklung des Aufkommens (in Mrd. Fahrten/Wege), der Verkehrsleistung (in Mrd. Personen-km) und der Fahrleistungen im Personenverkehr anhand des ASTRA-M Modells. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen bzw. den berücksichtigen politischen Instrumenten aus dem REF-2020, der Entwicklung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotten und den sich ändernden Fahrtkosten und Zeitwerten auf Basis der Änderung der Verkehrsinfrastruktur ergibt sich die dargestellte Verkehrsnachfrage. Das REF-2020 berücksichtigt dabei bereits die während der Covid-19 Pandemie beobachteten Änderungen des Mobilitätsverhaltens während den Pandemiejahren 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 2030 um -1,5%. Dies spiegelt bei nahezu stabiler Bevölkerung eine leichte Abnahme der Mobilität wieder, beeinflusst durch Alterung, geringere Beschäftigung sowie einen sehr moderaten Trend zu mehr Home-Office und den Ersatz von dienstlichen Wegen durch die Möglichkeiten der Digitalisierung. Die Verkehrsleistung mit motorisierten Fahrzeugen (ohne innerdeutschen Luftverkehr) steigt um 5% bis 2030 im Vergleich zu 2019. Die erwünschte Lenkungswirkung des Zusammenspiels der berücksichtigten Instrumente zeigt sich beim Pkw aber nicht wie erhofft (+3,8%). Die Steigung 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 23,7% bzw. 24,3% bis 2030.

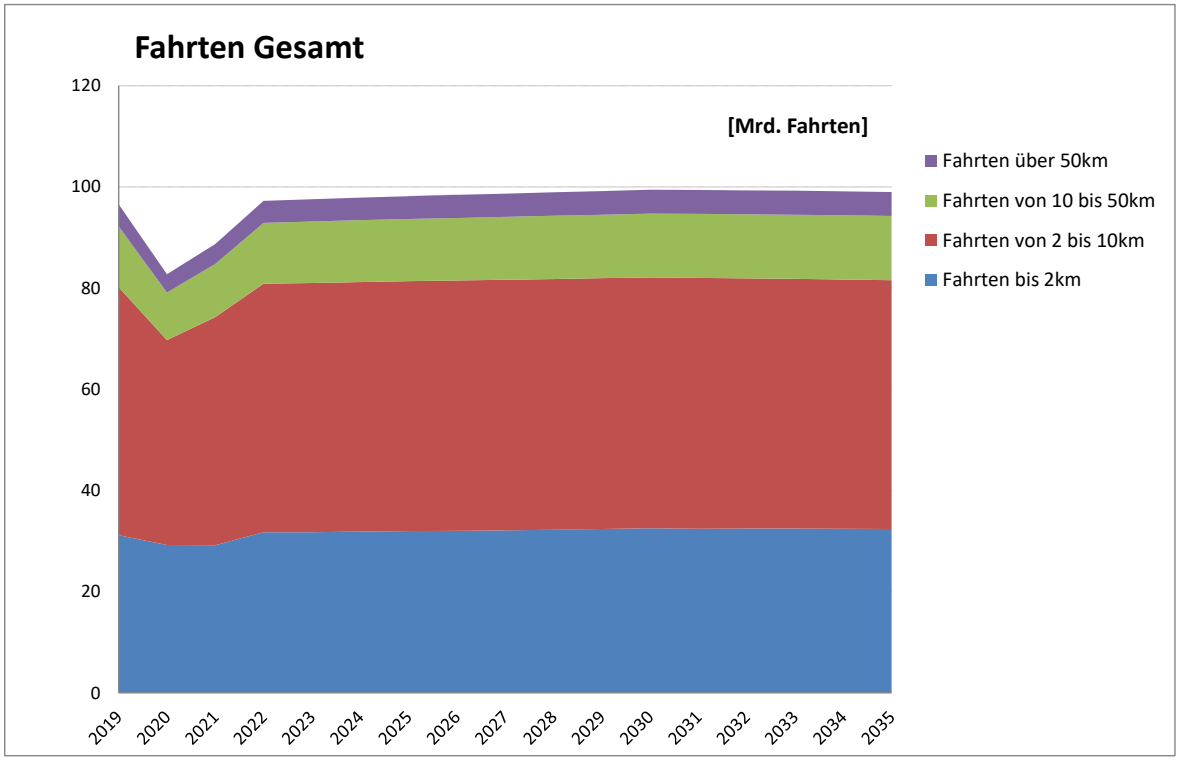
Tabelle 37: Entwicklung des Aufkommens, der Verkehrs- und Fahrleistung im Personenverkehr

Verkehrsmittel	Einheit	2019	2020	2025	2030	2035	Änderung 2019 bis 2030	
							p.a.	abs.
Aufkommen								
PKW	Mrd. Fahrten	57.1	46.5	56.3	55.9	55.4	-0.2%	-2.2%
Bus	Mrd. Fahrten	4.8	3.3	4.5	4.3	4.1	-1.1%	-11.4%
Bahn	Mrd. Fahrten	7.7	4.7	8.7	9.6	9.7	2.0%	23.7%
Carsharing	Mrd. Fahrten	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	4.3%	58.5%
Ridepooling	Mrd. Fahrten	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2%	75.1%
Microsharing	Mrd. Fahrten	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.1%	2216.3%
Rad	Mrd. Fahrten	8.1	10.6	9.4	10.2	10.2	2.0%	24.9%
Fuss	Mrd. Wege	18.6	17.5	18.8	19.0	18.8	0.2%	2.0%
Gesamt Motor.	***Mrd. Fahrten***	***69.8***	***54.7***	***69.8***	***70.0***	***69.4***	***0.0%***	***0.2%***
Verkehrsleistung								
PKW	Mrd. pkm	990	862	996	1027	1033	0.3%	3.8%
Bus	Mrd. pkm	72	41	68	64	61	-1.0%	-10.7%
Bahn	Mrd. pkm	104	53	120	130	131	2.0%	24.3%
Carsharing	Mrd. pkm	2.6	2.8	4.2	5.7	6.2	7.3%	117.8%
Ridepooling	Mrd. pkm	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	35.2%	1947.7%
Microsharing	Mrd. pkm	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	39.4%	2676.4%
Rad	Mrd. pkm	32	43	37	40	41	2.2%	26.9%
Gesamt Motor.	***Mrd. pkm***	***1169***	***959***	***1189***	***1227***	***1232***	***0.4%***	***5.0%***
Fahrleistung								
PKW	Mrd. Fzg-km	653.7	564.3	651.4	664.0	666.1	0.1%	1.0%
Bus	Mio. Fzg-km	2.9	1.7	2.8	2.6	2.5	-1.0%	-10.9%
Carsharing	Mio. Fzg-km	1.7	1.9	2.7	3.5	3.8	6.7%	104.5%
Ridepooling	Mio. Fzg-km	0.01	0.00	0.03	0.04	0.06	35.2%	1947.7%

Quelle: Fraunhofer-ISI, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Siehe Kapitel 10.3 und 16.3 zu Vergleichen mit der amtlichen Statistik.

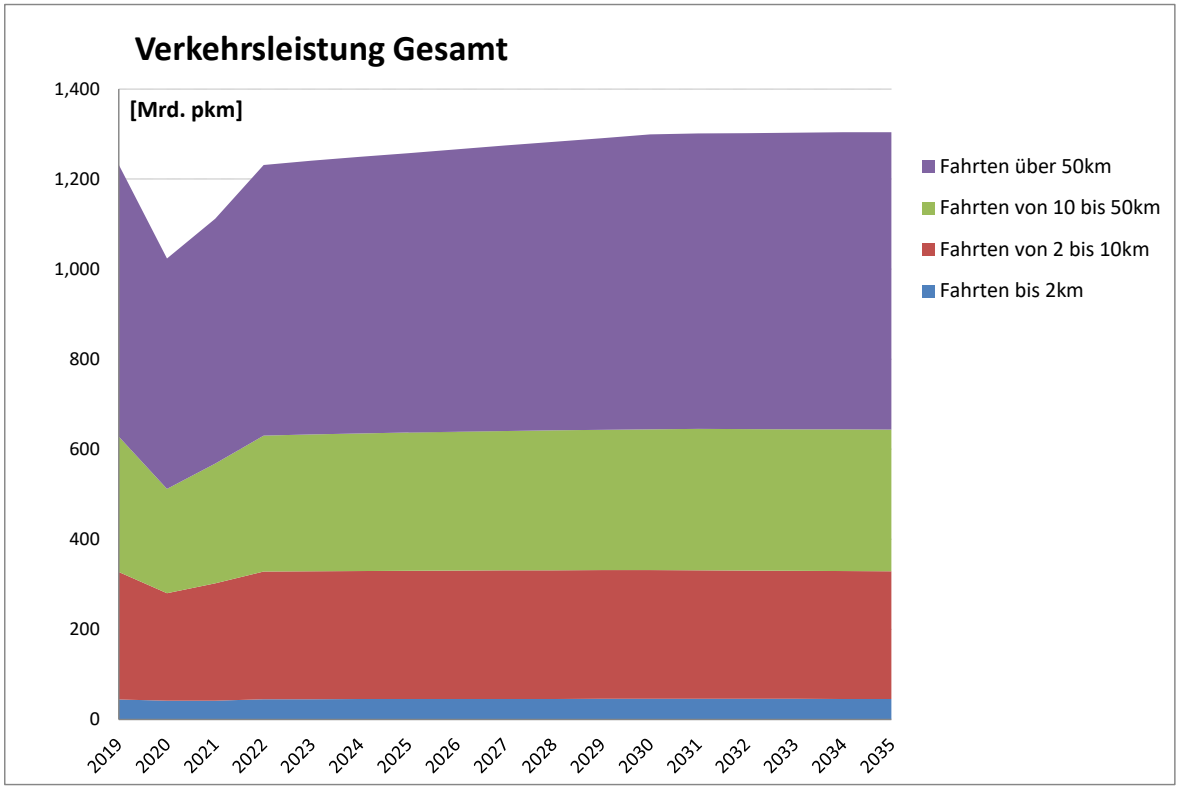
Die Nutzung der neuen Mobilitätsformen Carsharing, Ridepooling und die Mikromobilität (Bikesharing und E-Scootersharing) steigt im REF-2020 bis 2030. Trotz der Änderungen des PbefG spielen diese Mobilitätsformen im Alltag nach wie vor eine kleinere Rolle.



Quelle: Fraunhofer-ISI, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 95 Aufkommen im Personenverkehr nach Distanzbändern (in Mrd. Fahrten)

Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen die Verteilung der Verkehrsnachfrage für 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 über 50 km Länge haben, aber diese in der Verkehrsleistung einen Anteil an den gesamten Personen-km in Höhe von ca. 50% ausmachen. Dies verdeutlicht im Umkehrschluss auch die Bedeutung von Instrumenten, die das Mobilitätsverhalten auf den längeren Distanzen beeinflussen können.



Quelle: Fraunhofer-ISI, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 96 Verkehrsleistung im Personenverkehr nach Distanzbändern (in Mrd. pkm)

10.3 Kritische Würdigung der Ergebnisse und der Statistik

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.
- Modellierte 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 38 gibt einen Überblick über die verschiedenen verfügbaren Datenquellen, die für eine Quantifizierung und Modellierung des Verkehrssektors genutzt werden können.

Tabelle 38: Einordnung verschiedener Datenquellen im Verkehr (nicht vollständig)

	Generierung der Daten bzw. Datenquelle		
Häufigkeit bzw. Regelmäßigkeit	**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 Dieselverbrauch sich aufteilt auf PKW, LNF, SNF, Binnenschiff, Baumaschinen, Dieselloks, Busse und Seeschiffe. 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 97).

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 2019 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:

$$EEV = \frac{VLstg}{BelF} * EVF(A, NEFZ, \Delta RDE)$$

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

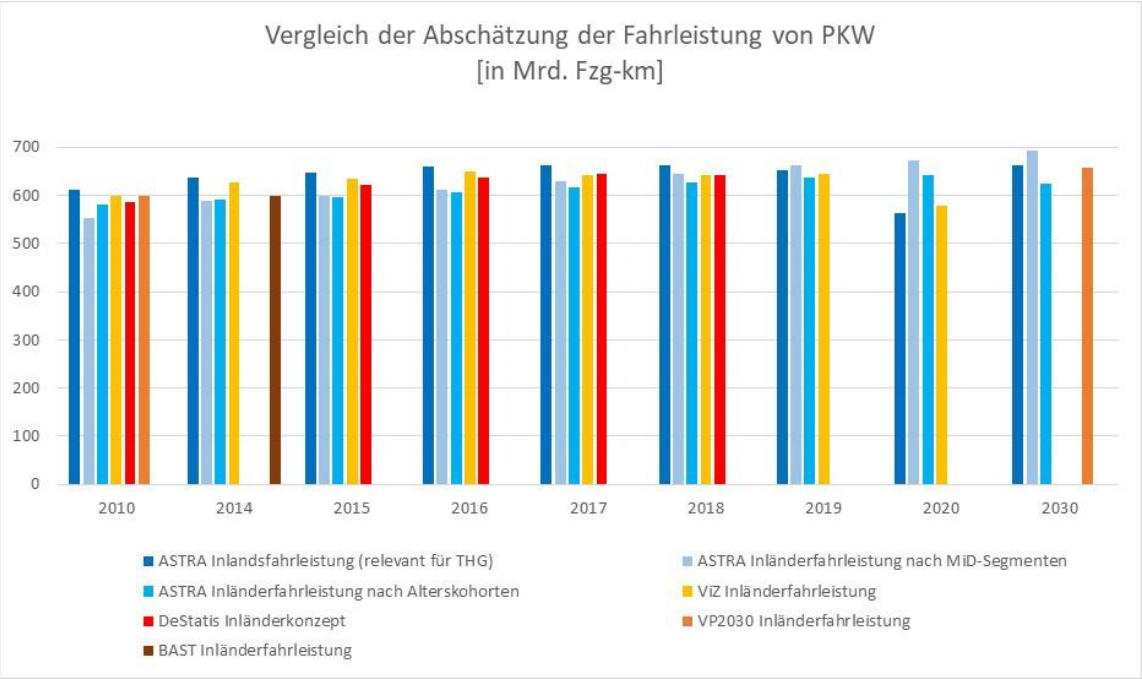
NEFZ = EVF gemessen nach NEFZ (Typprüfwert der PKW, statistisch abgesichert durch KBA verfügbar)

ΔRDE = Abweichung von RDE (tatsächlicher Verbrauch) zu NEFZ (Stichproben).

Zu den verlässlichen Statistiken in dieser Gleichung gehören die Zahlen zu den Antriebsarten der Fahrzeuge (A), die NEFZ-Typprüfwerte der zugelassenen PKW (NEFZ) und die Energieverbräuche nach Kraftstoff. 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 97). Die größte Unsicherheit besteht für die Abweichung zwischen NEFZ und RDE (ΔRDE). 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 soll hier die Fahrleistung sowie die Verkehrsleistung von PKW herangezogen werden,

die nicht vollständig erhoben werden kann.[41] 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 dunkelblauer Balken in Abbildung 97 dargestellt. Daneben sind die Ergebnisse verschiedener anderer Quellen abgebildet. Die Ergebnisse von ViZ (2021), BASt (2017a) und DeStatis (2020) sind nach dem Inländerkonzept berechnet, und auch in der VP2030 (ITP et al. 2014) sind die Fahrleistungen am Inländerkonzept kalibriert. 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. Beide Berechnungen sind ebenfalls als hellblaue Balken dargestellt. Die Ergebnisse der Vergleichsstatistiken liegen dabei zwischen den ASTRA-Ergebnissen nach Inlandsfahrleistung sowie nach der Inländerfahrleistung. In 2020 reagiert die Inlandsfahrleistung über das Verkehrsnachfragemodell auf den Einbruch insbesondere bei den Pendel- und Dienstreisefahrten aufgrund der Corona-Pandemie. Die Kontroll-Rechnungen für die Inländerfahrleistungen reagieren nicht, weil der PKW-Bestand nicht einbricht und keine von den PKW-Jahresfahrleistungen aus BASt bzw. MiD abweichenden Werte unterstellt wurden. Wir halten die ASTRA-Ergebnisse der Fahrleistungen für ausreichend robust um daraus den EEV zu berechnen.

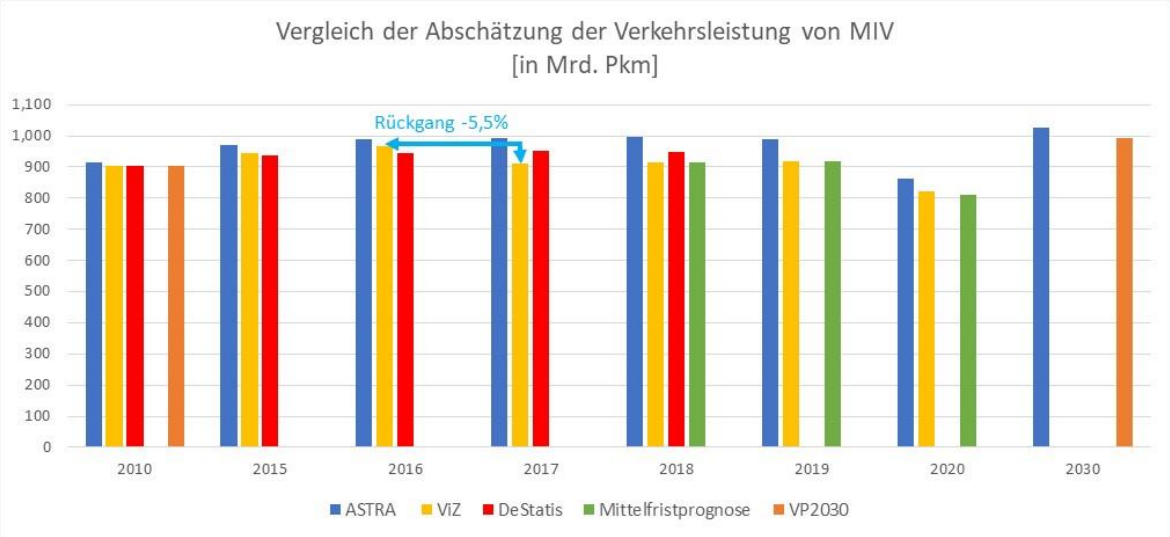


Quelle: ViZ (2021), DeStatis (2020), ITP et al. (2014), BASt (2017a), eigene Berechnung, M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 97 PKW-Fahrleistung berechnet nach verschiedenen Konzepten u. Quellen

[41] Die neuen Möglichkeiten der Digitalisierung im Verkehr könnten im Prinzip 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.

Abbildung 98 ergänzt einen Vergleich der Abschätzung der Verkehrsleistung des MIV. Die Verkehrsleistung des MIV liegt in 2015 in ASTRA leicht über den Berechnungen von ViZ (2,7%) und DeStatis (3,8%). Von 2016 auf 2017 ergibt sich für die nach ViZ ab dem Jahr 2017 durch eine Neuberechnung des Personenverkehrsmodells eine Reduktion von -5,5%. Diese Reduktion der Werte in der amtlichen Statistik beruht nicht auf Daten sondern einer geänderten Modellierung. Durch den Sprung in den modellierten Daten liegt ASTRA-M in den Folgejahren 9% über ViZ. Da die Mittelfristprognose in den Folgejahren an ViZ angepasst wurde, liegt ASTRA-M ebenfalls zunächst 9% entfernt von dieser. Die Differenz verringert sich durch die modell-endogenen Veränderungen in ASTRA-M bis auf 4% in 2020



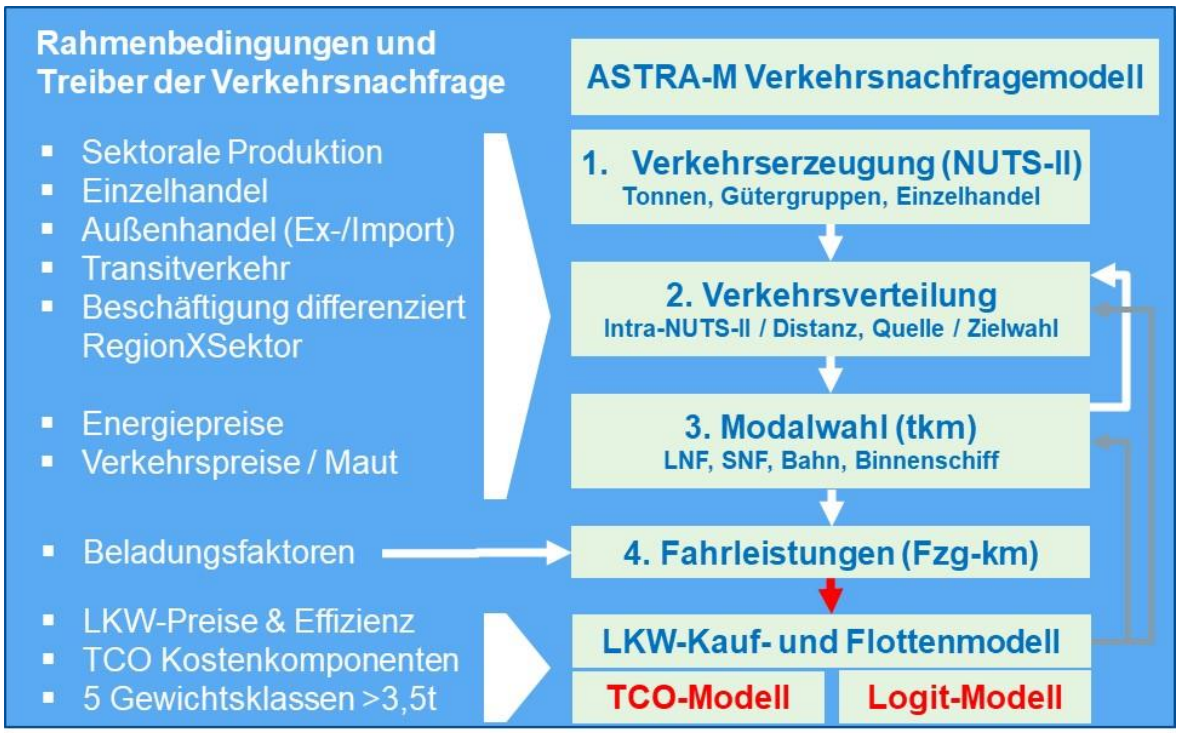
Quelle: ViZ (2021), DeStatis (2020), ITP (2021), ITP et al. (2014), eigene Berechnung, M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 98 Verkehrsleistung berechnet nach verschiedenen Konzepten u. Quellen

11 Modellierung und Referenzszenario Güterverkehr

11.1 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 (Handel, Güterproduktion, Verkauf an Endverbraucher) aufsetzt (siehe Abbildung 99). 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 Umlage-Politik bei Energieträgern (z.B. H_2, PtL) sofort wirksam auf die Verkehrsnachfrage.



Quelle: M-Five.

Abbildung 99 Modellierung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr und Kopplung mit Nutzfahrzeug-Flottenmodell

11.2 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.
- 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 Ex- und Importen abgeleitet.
- Den 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 2030 aufgrund der gestiegenen Wirtschaftsleistung und des wachsenden Handels trotz der Corona-Pandemie um 6%. Bis 2035 legt das Aufkommen gegenüber 2019 um 8,2% zu. Davon profitieren insbesondere mittelschwere LKW und die Bahn mit Zuwächsen von +45% bzw. +34,6% bis 2035. Die Verkehrsleistungen nehmen insgesamt um 21% und die Fahrleistungen im LKW-Verkehr um knapp 19% zu (siehe Tabelle 39).

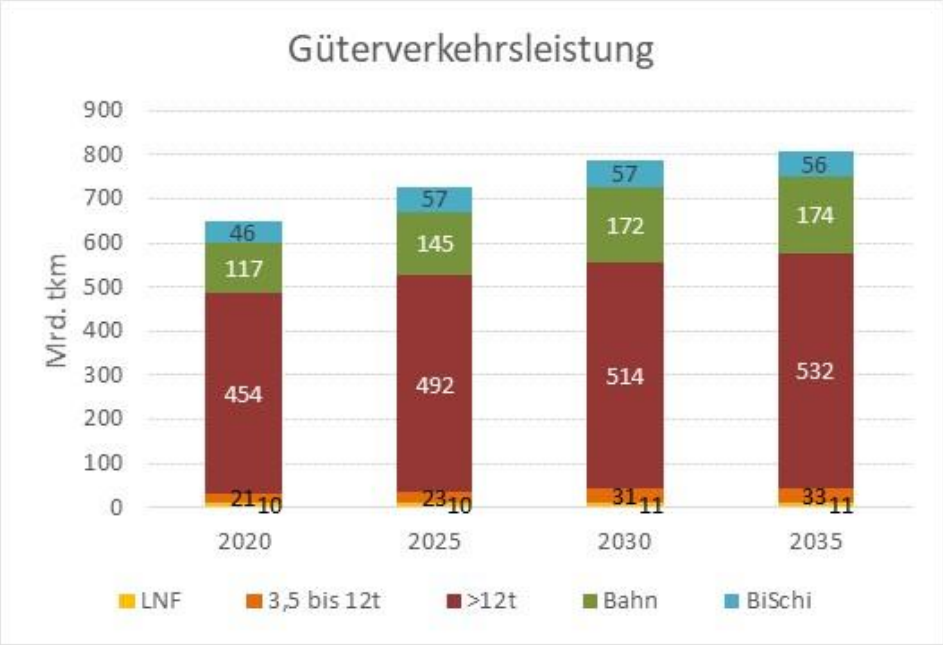
Tabelle 39: Entwicklung der Nachfrage im Güterverkehr

	Verkehrs-mittel	Einheit	Jahr					Änderung 2019 bis 2035	
			2019	2020	2025	2030	2035	% p.a.	% abs.
Aufkommen	L-NFz	Mio * t	245.2	243.9	251.2	262.4	268.0	0.6%	9.3%
	3,5t bis 12t	Mio * t	383.4	363.8	385.3	472.8	493.0	1.6%	28.6%
	Über 12t zGG	Mio * t	2,957.3	2,976.6	3,106.1	3,047.2	3,113.5	0.3%	5.3%
	LKW gesamt	Mio * t	3,585.9	3,584.3	3,742.6	3,782.4	3,874.5	0.5%	8.0%
	Bahn	Mio * t	343.1	328.9	364.2	391.8	394.4	0.9%	14.9%
	Binnenschiff	Mio * t	238.9	199.5	259.9	254.1	243.8	0.1%	2.0%
	Gesamt	Mio * t	4,168.0	4,112.8	4,366.6	4,428.4	4,512.6	0.5%	8.3%
Verkehrsleistung	L-NFz	Mrd. tkm	9.9	10.0	10.3	11.0	11.3	0.8%	14.1%
	3,5t bis 12t	Mrd. tkm	22.7	21.2	23.0	31.1	33.0	2.4%	45.0%
	Über 12t zGG	Mrd. tkm	449.2	453.5	492.4	514.5	532.3	1.1%	18.5%
	LKW gesamt	Mrd. tkm	481.9	484.7	525.7	556.6	576.6	1.1%	19.7%
	Bahn	Mrd. tkm	129.2	117.0	144.9	171.9	173.8	1.9%	34.6%
	Binnenschiff	Mrd. tkm	53.4	45.7	57.3	57.4	55.9	0.3%	4.8%
	Gesamt	Mrd. tkm	664.4	647.4	728.0	785.9	806.3	1.2%	21.4%
Fahrleistung	L-NFz	Mrd. Fzg-km	47.5	47.7	49.5	52.9	54.6	0.9%	14.9%
	3,5t bis 12t	Mrd. Fzg-km	7.9	7.4	8.1	10.9	11.6	2.4%	46.9%
	Über 12t zGG	Mrd. Fzg-km	35.6	36.0	38.7	40.3	41.8	1.0%	17.3%
	LKW gesamt	Mrd. Fzg-km	91.0	91.0	96.2	104.2	108.0	1.1%	18.6%

Quelle: M-Five, eigene Berechnung, ASTRA-2020.

Siehe Kapitel 10.3 und 16.3 zu Vergleichen mit der amtlichen Statistik.

Abbildung 100 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-2020.

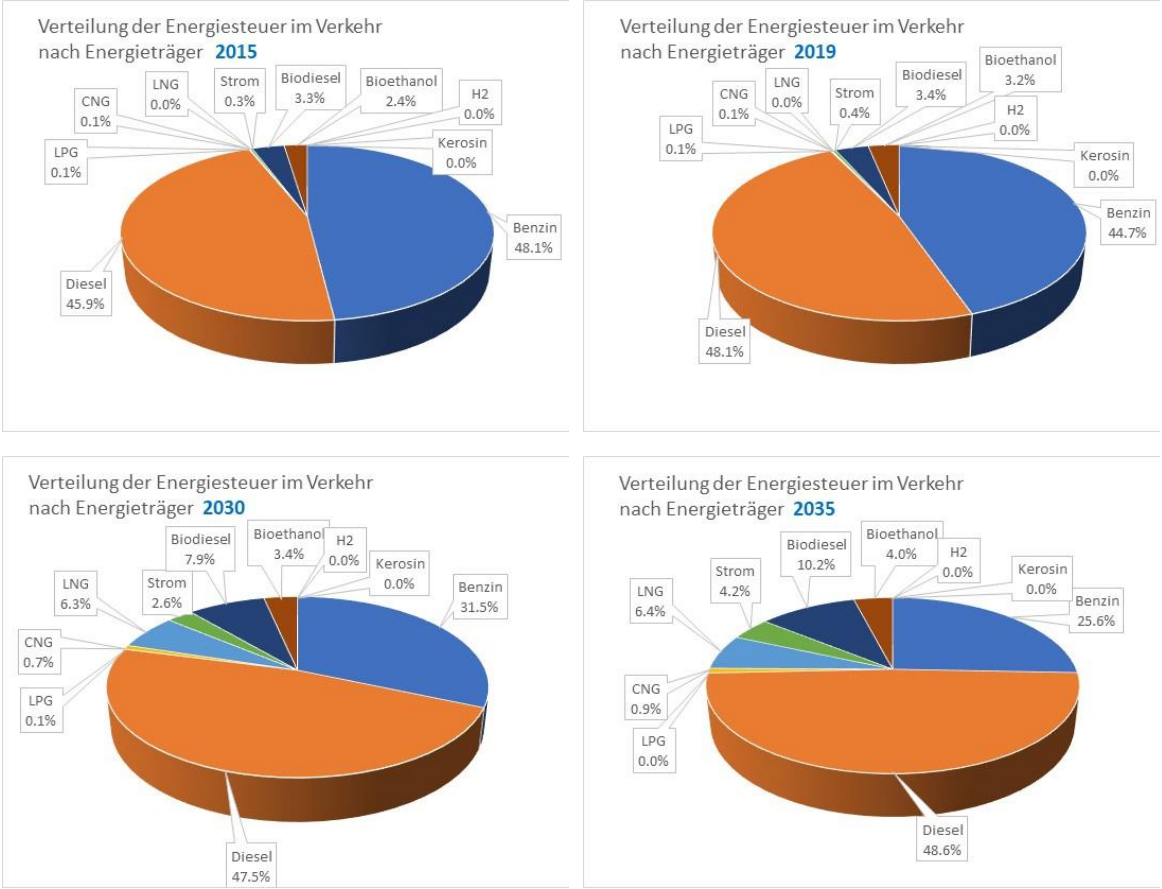
Abbildung 100 Verkehrsleistung im Güterverkehr (in Mrd. tkm)

In ASTRA wird die in Tabelle 39 beschriebene Inlandsfahrleistung genutzt, um den EEV und die THG-Emission des Güterverkehrs abzuschätzen. Vergleichend wird im Modell aber auch die Inländerfahrleistung abgeschätzt.

12 Einnahmen und Investitionen im Verkehr

Der Verkehr führt zu Einnahmen für den Staatshaushalt. Gleichzeitig erfordert er – teils öffentliche – Investitionen in Netz-Infrastrukturen, Fahrzeuge und die Energieversorgung. Dieses Kapitel soll keinen umfassenden und exakten Überblick über diese Einnahmen- und Ausgabenbereiche des Verkehrs geben, sondern eine Einordnung der Veränderungen der monetären Seite des Verkehrs ermöglichen sowie für die Größe der möglichen bzw. notwendigen Veränderungen in einem zukünftigen Klimaschutzprogramm sensibilisieren.

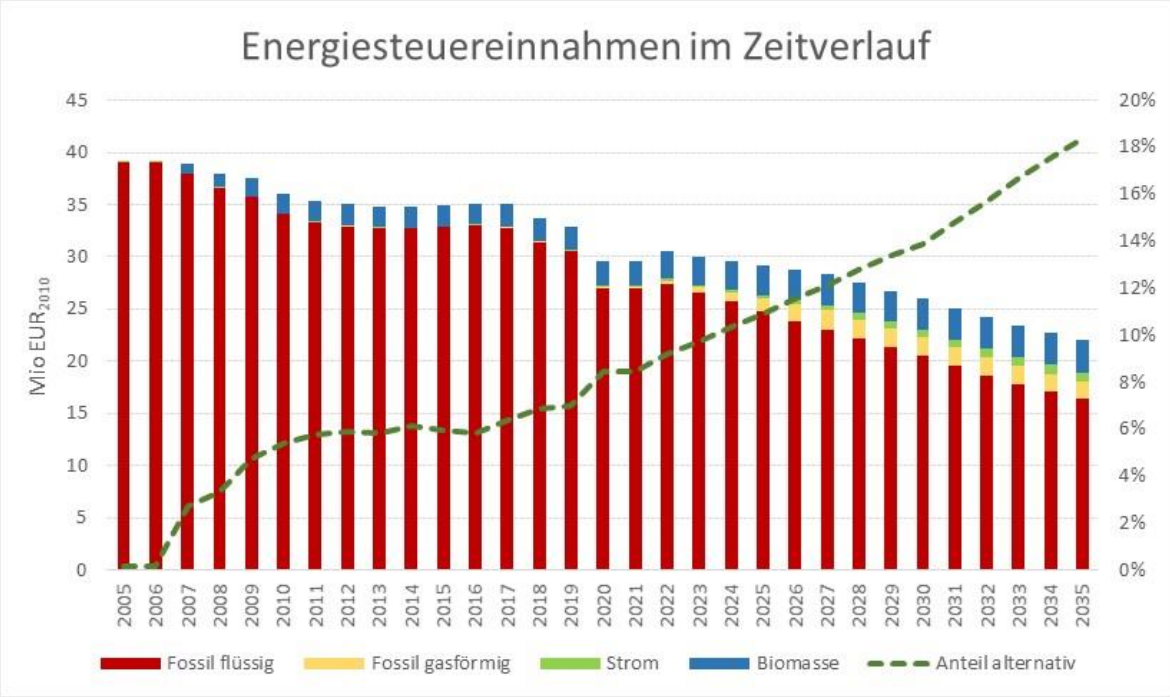
Historisch ist die wichtigste Einnahmequelle aus dem Verkehr die Energiesteuer. Abbildung 103 zeigt die Verteilung der Bestandteile der Energiesteuer im Zeitverlauf. Noch 2005 stammten zwei Drittel der Steuereinnahmen aus Benzin. 2019 entfällt fast die Hälfte auf Diesel und auch weitere Kraftstoffe leisten einen Beitrag zu den Einnahmen wie CNG, Bioethanol oder Biodiesel. Diesel- und Benzinabsatz steuern bis 2035 weiter den größten Teil des Aufkommens bei. Auf Strom und LNG entfallen in 2035 über 10% des Aufkommens, auf biomasse-basierte Kraftstoffe etwa 14%, während Wasserstoff (H_2) und Kerosin in REF-2020 noch von der Energiesteuer befreit sind.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 101 Verteilung der Einnahmen aus der Energiesteuer über die Zeit (REF-2020)

Die Höhe der Energiesteuereinnahme sinkt seit mindestens 2005 (siehe Abbildung 104). Hier ist eine Betrachtung in realen Preisen von großer Bedeutung, weil die Einnahmen zwar in den allgemeinen Steuertopf gehen, aber oft gegen die Ausgaben für Verkehr z.B. 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 102, dass die Energiesteuer einen immer kleineren Beitrag zur Finanzierung von Verkehrsinfrastrukturen leisten können wird. Die Verschiebung der Einnahmen von fossilen, flüssigen Kraftstoffen zu Gas, Strom und Biomasse wird ebenfalls sichtbar. Der Anteil der alternativen (und zunehmend erneuerbaren) Energieträger (Strom, Biomasse) steigt von 8,5% in 2020 auf knapp 14% in 2035.

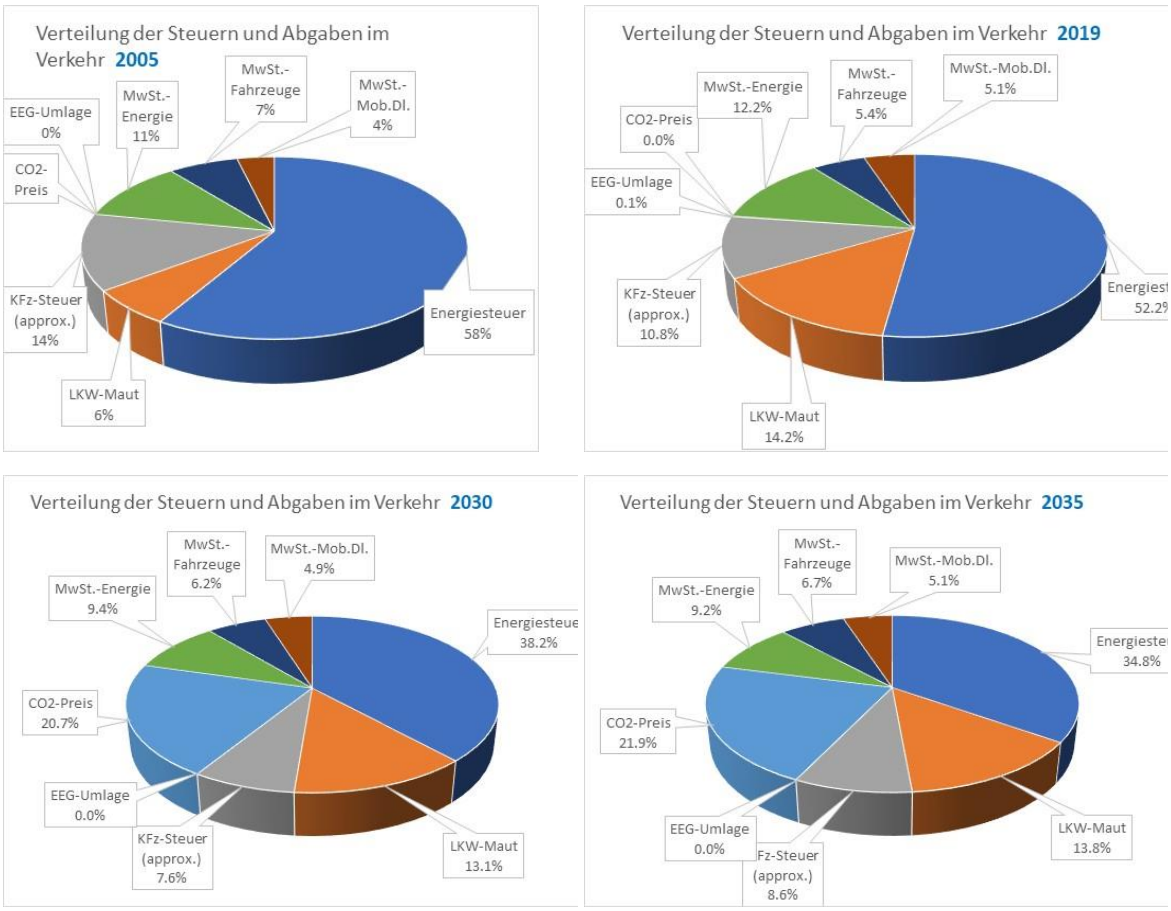


Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 102 Entwicklung der Einnahmen aus der Energiesteuer (REF-2020)

Die staatlichen Einnahmen aus dem Verkehrssektor entfallen auf verschiedene Steuern und Abgaben. In der Modellierung von REF-2020 und mit Fokus auf den nach KSG abgegrenzten Verkehrssektor lassen sich 8 wichtige Kategorien unterscheiden (siehe Abbildung 103). 2005 entfallen knapp drei Fünftel der Einnahmen auf die Energiesteuer. Bis 2035 schrumpft dieser Anteil auf gut ein Drittel. Auch die Anteile der MwSt. auf den privaten Kauf von Energie im Verkehr, Fahrzeuge und Verkehrsdienstleistungen (z.B. ÖV-Tickets, Carsharing) verringern sich leicht. LKW-Maut und KFz-Steuer, die aufgrund der komplizierten Berechnungsweise nur näherungsweise bestimmt werden kann, halten knapp ihre Anteile von 2019 bis 2035. An Bedeutung gewinnen die ab 2021 neu hinzukommenden Einnahmen aus dem CO_2-Preis, der 2030 gut ein Fünftel der hier betrachteten und modellierten Steuern und Abgaben aus dem Verkehr ausmacht. Die EEG-Umlage aus dem Verkehr erzeugt aufgrund der Abschmelzung bis 2030 auf null maximal etwa 900 Mio $€_{2010}$ im Jahr 2026. Danach nimmt zwar die Stromnachfrage zu, aber der Abgabesatz sinkt in REF-2020 auf null.[42]

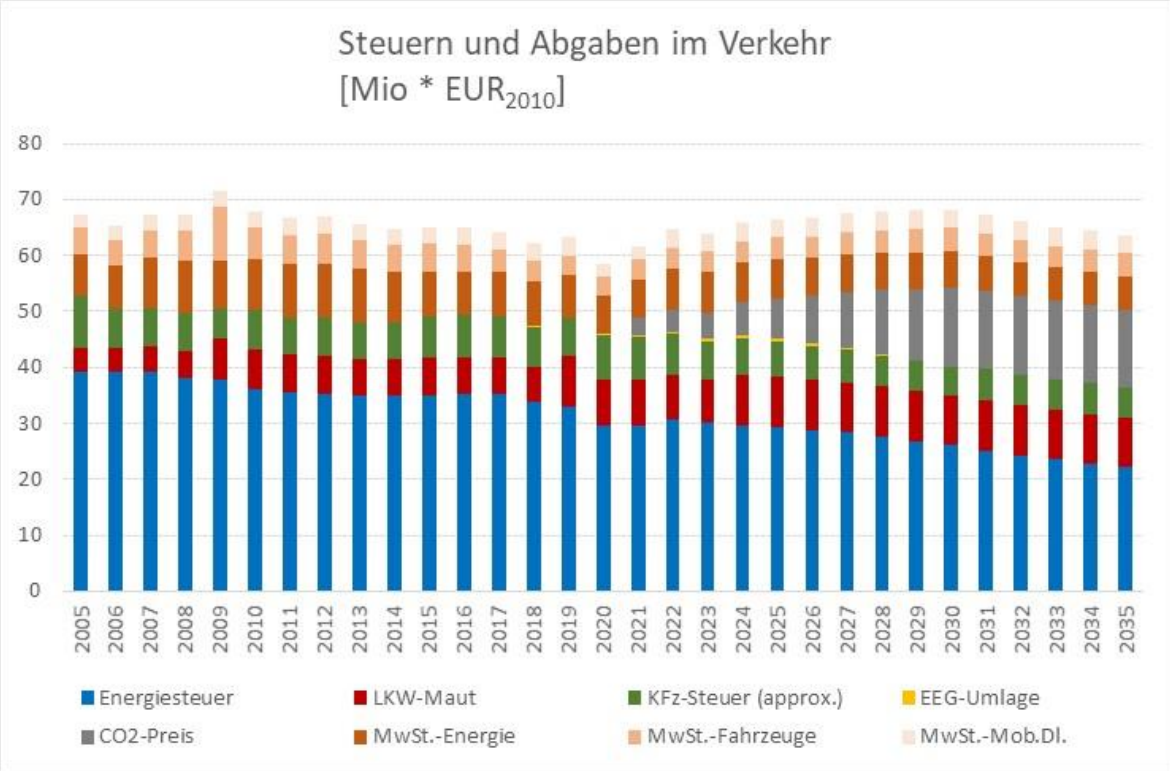
[42] Zur Entlastung der Stromnutzer von den hohen Energiepreisen wurde im April 2022 die EEG-Umlage ab 1. Juli 2022 auf null gesenkt. Diese Anpassung ist nicht Teil von REF-2020 und daher hier nicht berücksichtigt.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 103 Verteilung der modellierten Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2020)

Die Entwicklung der modellierten Steuern und Abgaben über die Zeit bleibt in realen Preisen von 2005 bis 2035 etwa auf stabilem Niveau von rund 65 Mrd. $€_{2010}$ pro Jahr (siehe Abbildung 104). Sichtbar wird der kontinuierliche Zuwachs bei der LKW-Maut, angetrieben durch die verschiedenen Maut-Anpassungen wie schrittweise Ausdehnung des bemauteten 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 CO_2-Bepreisung und der EEG-Umlage sichtbar. Hinsichtlich der Nutzfahrzeuge ist zu beachten, dass in REF-2020 noch kein CO_2-Preis in der LKW-Maut beschlossen ist, dafür aber auch LKW den CO_2-Preis im Diesel zu bezahlen haben.



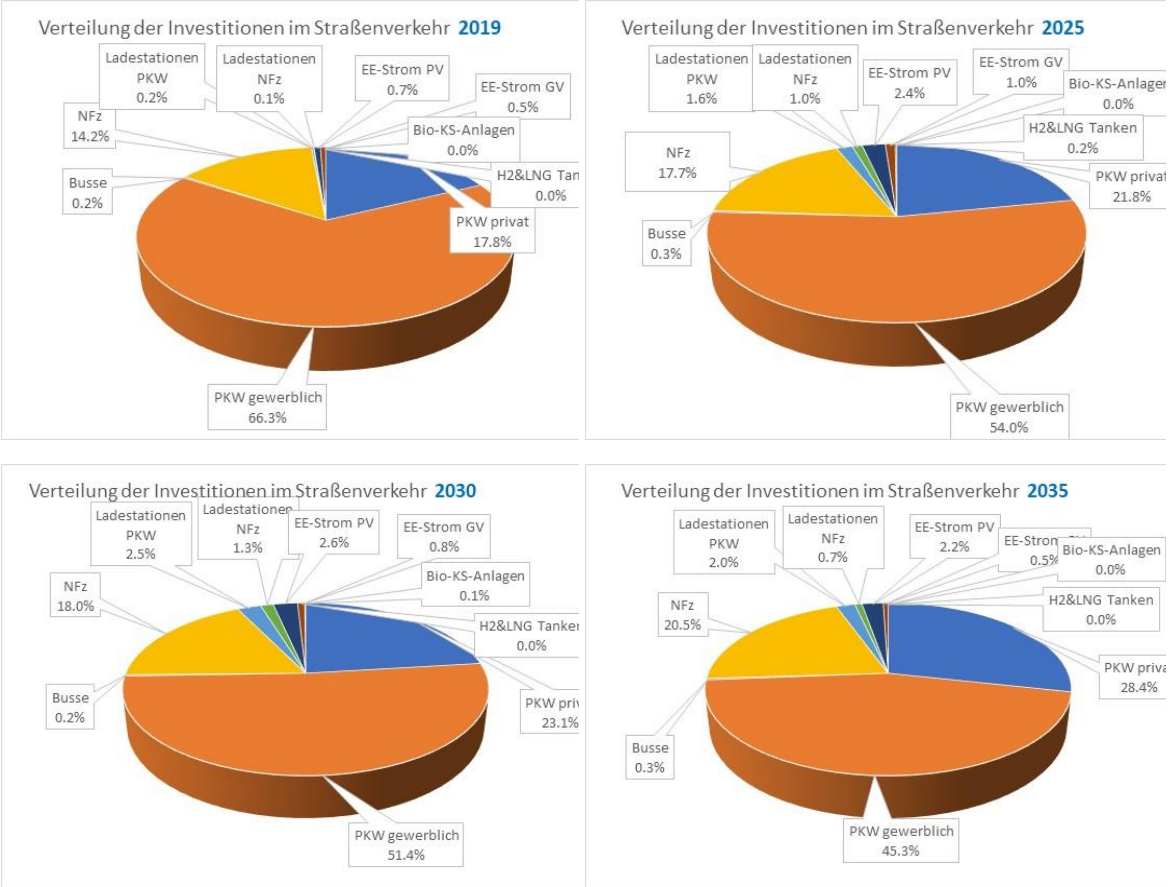
Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 104 Entwicklung verschiedener Steuern und Abgaben aus dem Verkehr (REF-2020)

Ein KSPr+ 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, und dies sind die Investitionen in Straßenfahrzeuge, während Investitionen in Verkehrs-Infrastrukturen erst mit weitem Abstand an zweiter Stelle folgen.[43] Abbildung 105 stellt die Verteilung der Investitionen in Fahrzeuge und zugehörige Energieinfrastrukturen im REF-2020 im Zeitverlauf dar sowie Abbildung 106 die Entwicklung des Niveaus der Investitionen. Etwa die Hälfte der Investitionen in 2019 entfällt auf gewerbliche PKW-Käufer, etwa ein Drittel auf private PKW-Käufer[44] und ein Sechstel auf Käufe von leichten und schweren LKW. Im Zeitverlauf verringert sich der Anteil der privaten PKW-Käufer deutlich, während 2025 und 2030 der Aufbau von Ladestationen und zusätzlichen Erzeugungsanlagen für elektrischen Fahrstrom aufgrund des Markthochlaufs an E-PKW und E-NFz an Bedeutung gewinnen. 2030 entfallen immerhin etwa 7% auf den Aufbau von Ladestationen für BEV-LKW. Der Aufbau von Tankstellen für LNG und H_2 sowie von Anlagen zur Erzeugung von zusätzlichen Biokraftstoffen fällt kaum ins Gewicht.

[43] Eine detailliertere Analyse des Verhältnisses von Infrastruktur- und Fahrzeug-Investitionen erfolgte in einer gesamtwirtschaftlichen Analyse des Verkehrssystems (Schade et al. 2020).

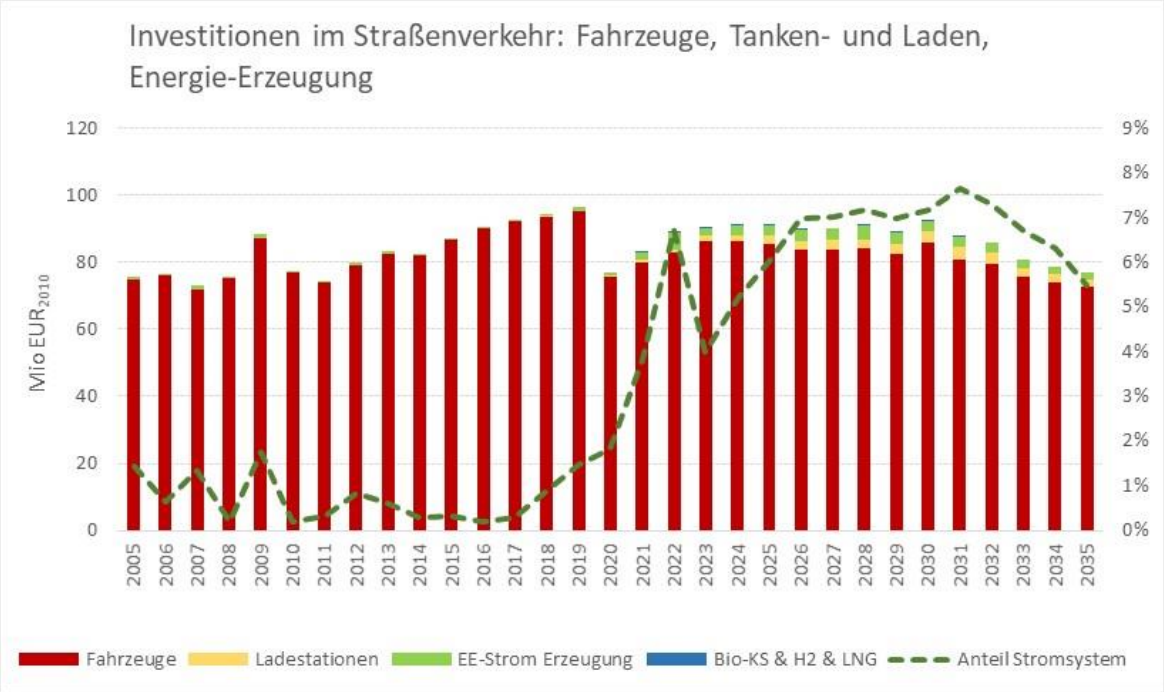
[44] Die Angabe der Investitionen privater Haushalte erfolgt hier ohne Berücksichtigung der MwSt. und damit aus der Einnahmesicht der Unternehmen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 105 Verteilung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2020)

Die jährlichen Investitionen in Straßenfahrzeuge in Deutschland liegen etwa bei 80 Mrd. €$_{2010}$ (Abbildung 106). Ab 2020 kommen Investitionen in Ladestationen und die notwendige EE-Stromerzeugung in größerem Umfang hinzu, die 2030 etwa 15 Mrd. €$_{2010}$ erreichen. Das bedeutet aber in REF-2020 weiterhin, dass die Investition in Fahrzeuge deutlich die Investition in die zugehörige Energieinfrastruktur (ohne Stromnetze) übersteigt (auch in 2030 noch um den Faktor 4).



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

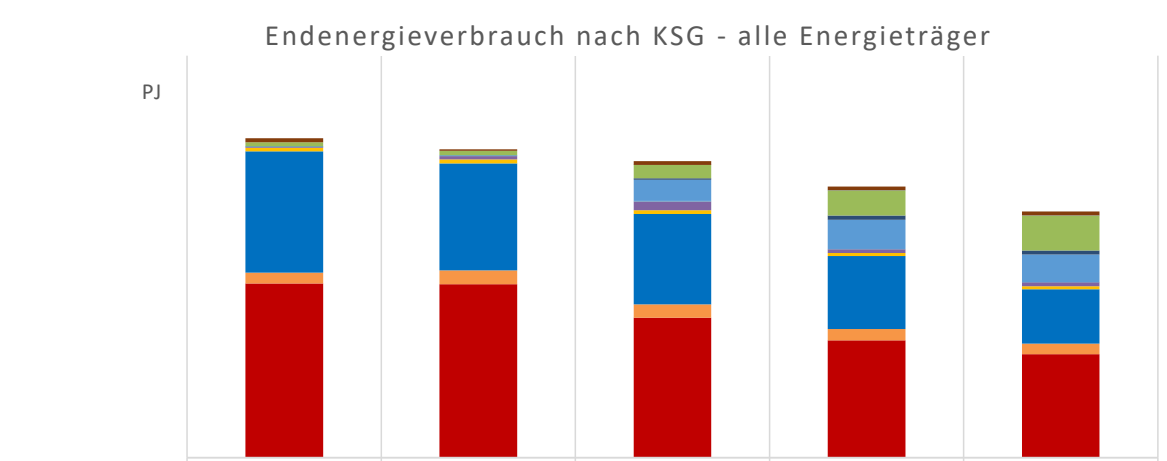
Abbildung 106 Entwicklung der Investitionen in Fahrzeuge und Energieinfrastruktur im Straßenverkehr (REF-2020)

13 Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehr

13.1 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 -12% ab. Bis 2035 beträgt die Abnahme sogar -20%.

Abbildung 107 zeigt die Entwicklungen nach Energieträger. In REF-2020 ergibt sich die stärkste Zunahme für die Stromnachfrage, die sich von 2020 bis 2035 versiebenfacht. Biokraftstoffe nehmen im Bereich Biogas zu, während fossile Kraftstoffe abnehmen. Der Anteil der fossilen Kraftstoffe am EEV des Verkehrs sinkt von 93% in 2020 auf 83% in 2030. Eine geringe Menge H_2 kommt ebenfalls in Straßenfahrzeugen zum Einsatz. Die Modellierung berücksichtigt dabei explizit die Vorgaben der RED-II (Stand 2018) ohne nationale Umsetzung. Dies führt zu einem leichten Rückgang des Einsatzes von Biodiesel und Bioethanol, während die Nutzung von Biogas leicht ansteigt (siehe auch Kapitel 4.7).

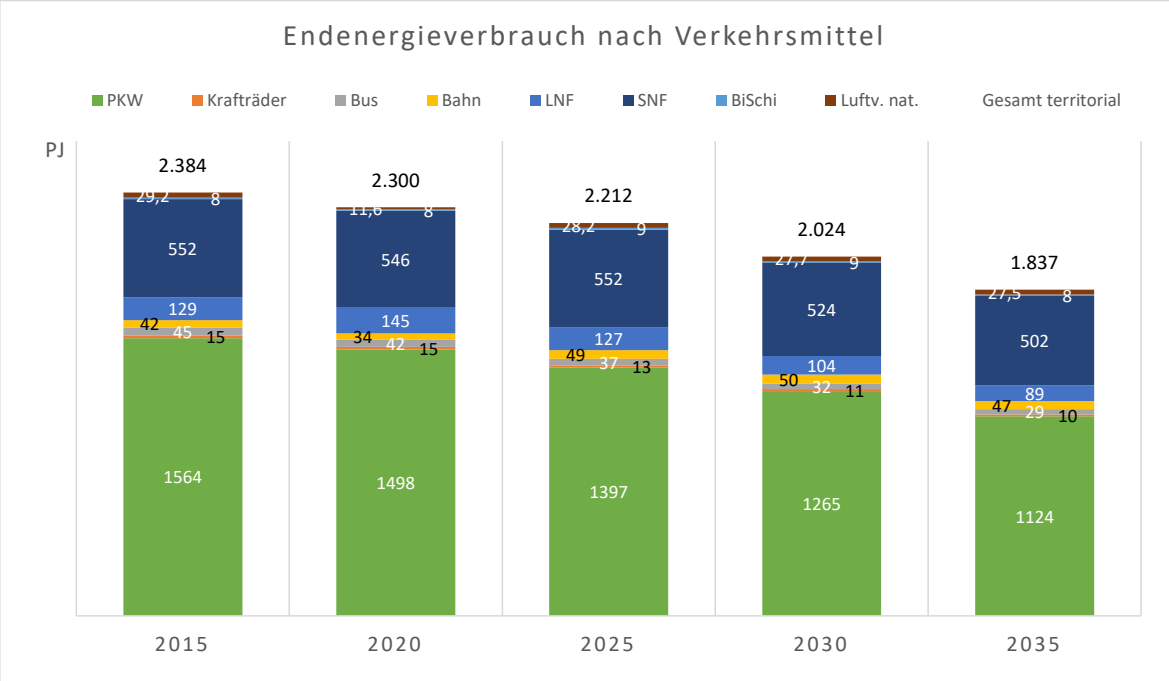


	2015	2020	2025	2030	2035
Kerosin national	29,2	11,6	28,2	27,7	27,5
PtL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H2	0,0	0,0	0,5	1,1	2,5
Strom	30,1	31,9	98,9	188,3	261,9
Biogas	0,1	1,3	11,7	31,0	28,5
LNG	0,0	0,0	157,7	218,5	207,1
LPG	6,2	5,2	3,8	2,4	1,3
CNG	5,6	24,4	65,4	27,3	29,5
Bioethanol	27,3	30,0	28,1	23,9	21,5
Benzin	904,3	799,6	674,7	544,3	407,1
Biodiesel	82,0	102,9	99,2	84,7	78,7
Diesel	1298,8	1293,5	1044,2	874,4	771,3
Gesamt territorial	2383,8	2300,4	2212,3	2023,5	1836,9

Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 107 Endenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2020)

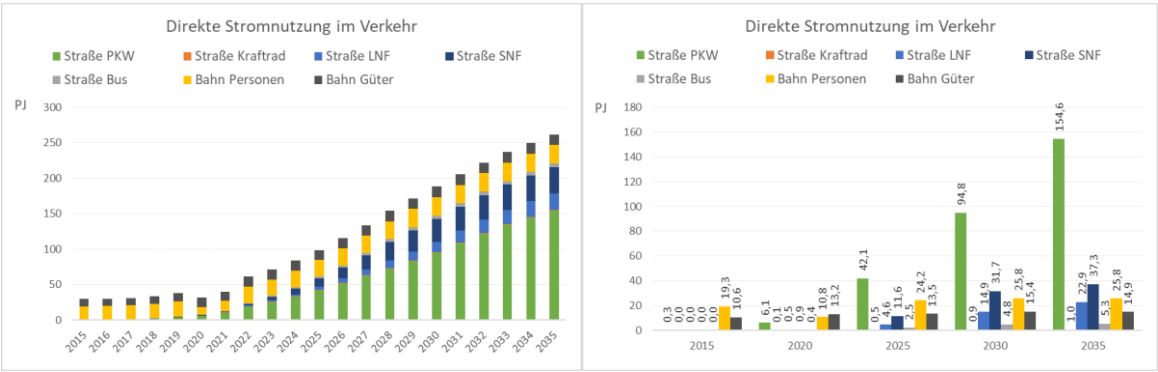
Abbildung 108 zeigt den Verlauf der Energienachfrage nach Verkehrsmittel. Bei PKW verringert sich die Nachfrage um etwa 233 PJ von 2020 bis 2030 (-16%). Auch im Güterverkehr mit LNF und SNF geht der EEV durch Elektrifizierung trotz Steigerung der Verkehrsleistung um etwa 62 PJ zurück (-9%).



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 108 Endenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2020)

Abbildung 109 zeigt den Hochlauf der Stromnachfrage der einzelnen Verkehrsmittel für die direkte Stromnutzung, d.h. ohne die Erzeugung von PtL oder H_2 sondern nur durch BEV, PHEV und E-LKW. PKW bleiben bis 2035 in REF-2020 der dominante Stromnachfrager aus dem Verkehr. Bei SNF wäre in einem KSPr+ Szenario unter Einschluss der CO_2-differenzierten Maut sogar eine deutlich höhere Nachfrage zu erwarten, die zur Strommenge der PKW aufschließen könnte.

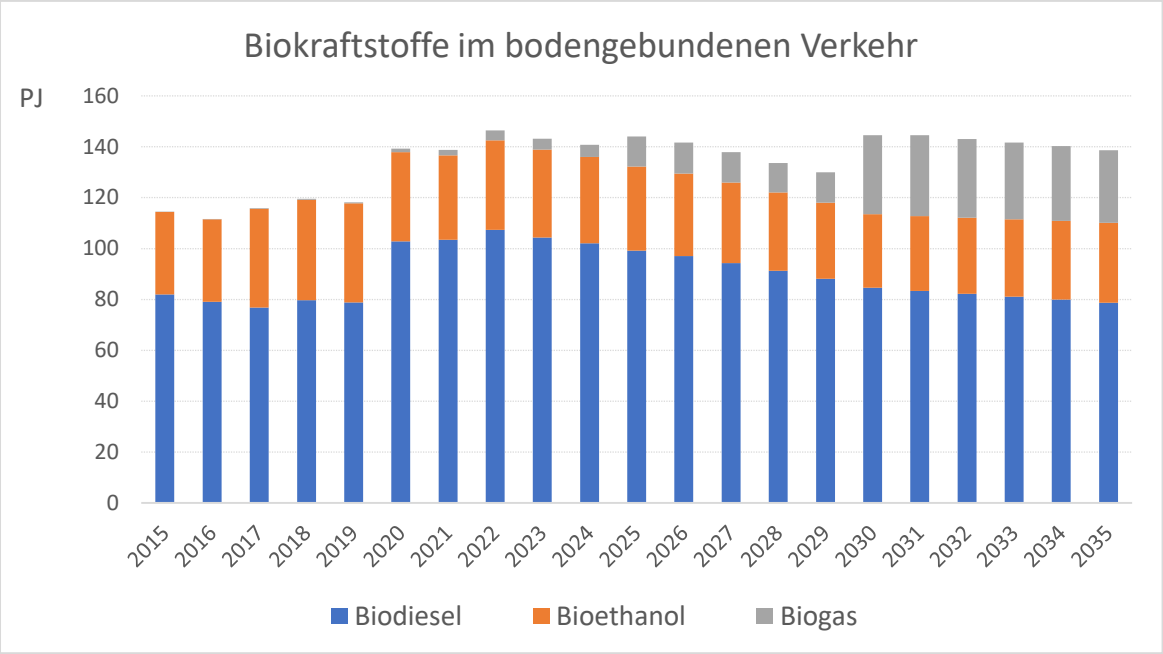


Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 109 Stromnachfrage der verschiedenen Verkehrsmittel (nur direkte Nutzung als Fahrstrom)

Abbildung 110 präsentiert den Hochlauf der biogenen Kraftstoffe, der sich insbesondere aus der Nutzung von Biogas speist, welches zum großen Teil in SNF verbraucht wird. Hier dürfte in einem KSPr+ Szenario die Gasnachfrage zurückgehen, da E-LKW die Gas-LKW

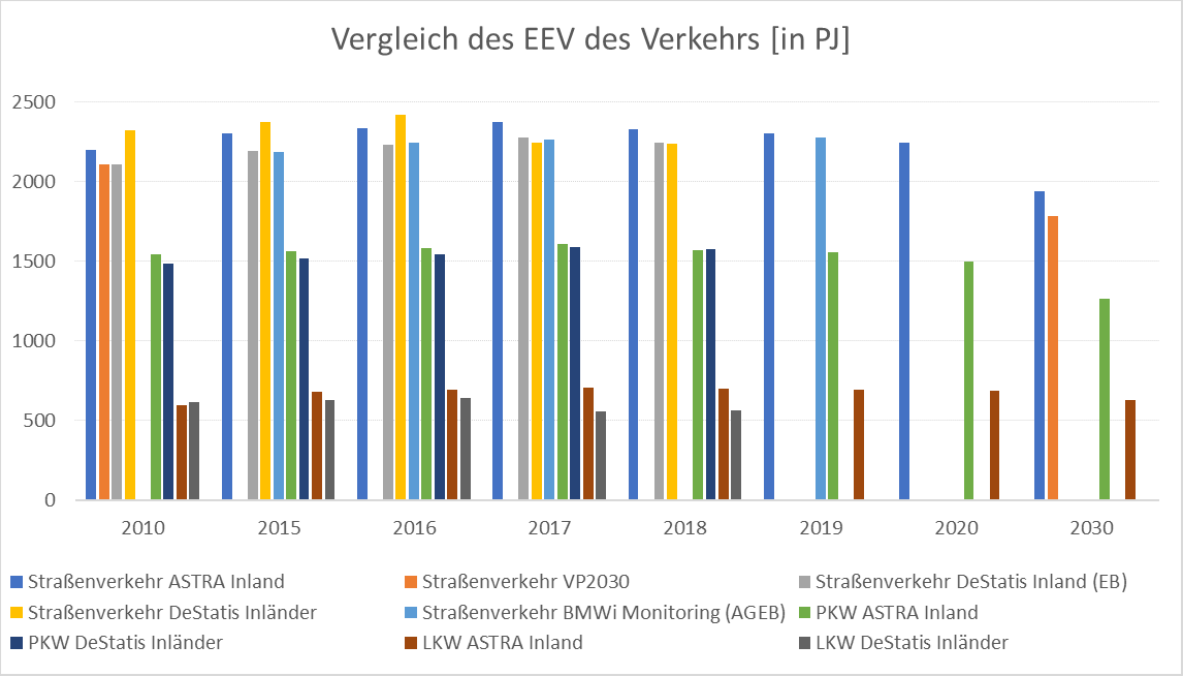
verdrängen. Dafür könnten aus Sicht der Verfügbarkeit größere Anteile an fortschrittlichem Bioethanol zu Benzin beigemischt werden, solange eine ausreichend hohe Zahl an Benzin-Verbrennern in der Flotte vorhanden ist. Hierfür müsste ein KSPr+ Programm aber auch Instrumente vorsehen, die die technische Machbarkeit höherer Bioethanol-Anteile bei PKW und LNF sicherstellen.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 110 Aufteilung des EEV von Bio-Kraftstoffen auf Energieträger (REF-2020)

Die folgende Abbildung 111 zeigt den EEV des Verkehrs mit Fokus auf den Straßenverkehr und nach verschiedenen Berechnungs-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 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 hat 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 in 2017. Bis zur Anpassung der Methodik von DeStatis liegt ASTRA etwa 4% höher als DeStatis. Für die Folgejahre liegt der in ASTRA berechnete Inlandsverbrauch etwa 7% höher als die von DeStatis abgeschätzten Werte für das Inlands- und das Inländer-Konzept, dabei aber konsistent zu den Vorjahren. Insbesondere bei der Bewertung des LKW-EEV unterscheiden sich die EEV-Ergebnisse von ASTRA und 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. Für PKW und LKW ist die Situation vergleichbar: beide ASTRA-Berechnungen liegen leicht über den DeStatis-Werten.



Quelle: ITP et al. (2014), DeStatis (2020), BMWi (2021), eigene Berechnungen, M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 111 Vergleich des EEV im Verkehr von REF-2020 mit anderen Quellen

13.2 Entwicklung des Primärenergieverbrauchs (PEV)

Die im vorherigen Kapitel dargestellte Endenergie „bezeichnet den Teil der Primärenergie, die den Verbrauchern 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 Klimaschutzgesetztes weiter angepasst werden müssen (BMU, 2021).

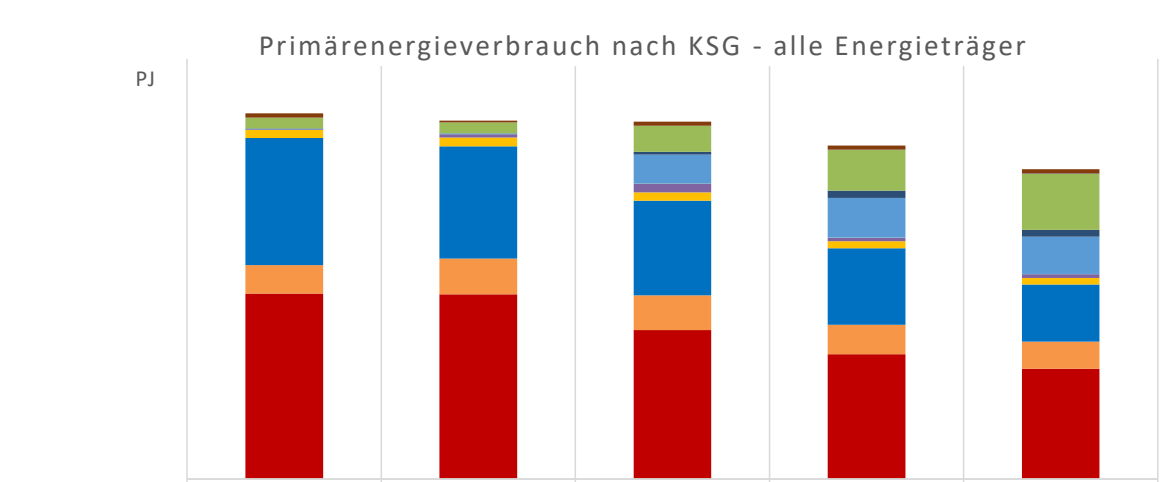
In REF-2020 wird aus der Verknüpfung des EEVs mit den spezifischen Primärenergiefaktoren der Primärenergieverbrauch approximativ berechnet. So wird der gesamte vorgelagerte Aufwand der Produktionskette, beispielsweise Förder- und Transportaufwand sowie Umwandlungsverlusten, berücksichtigt. Tabelle 40 gibt eine Übersicht der verwendeten Faktoren für die Energieträger auf Basis der Europäischen Norm DIN EN 16258.

Tabelle 40: 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-2020.

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 112) sowie nach Verkehrsmittel (Abbildung 113) wird im Folgenden dargestellt.

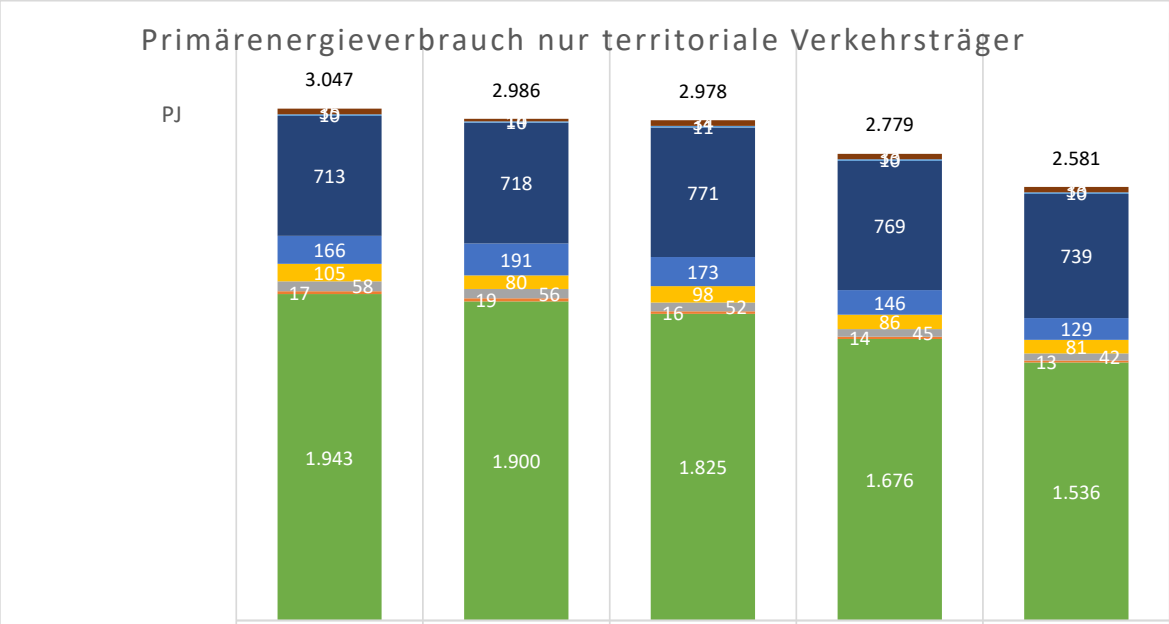


	2015	2020	2025	2030	2035
Kerosin national	34,7	13,7	33,6	33,0	32,8
PtL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H2	0,0	0,0	1,0	2,5	5,7
Strom	90,4	89,4	217,5	338,9	466,1
Biogas	0,3	2,6	23,4	61,6	56,8
LNG	0,0	0,0	236,6	327,8	310,7
LPG	6,9	5,8	4,2	2,7	1,4
CNG	6,3	27,3	73,3	30,5	33,0
Bioethanol	67,0	73,6	68,8	58,6	52,7
Benzin	1058,0	935,6	789,4	636,8	476,3
Biodiesel	237,9	298,4	287,6	245,6	228,1
Diesel	1545,6	1539,3	1242,6	1040,6	917,8
Gesamt territorial	3047,2	2985,7	2977,9	2778,5	2581,5

Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 112 Primärenergieverbrauch nach Energieträger (REF-2020)

Der Primärenergieverbrauch im Verkehr verringert sich bis ins Jahr 2030 gegenüber dem Basisjahr 2008 um etwa 6%. Diese Entwicklungen werden der zunehmenden Elektrifizierung und der Verbesserung der Fahrzeugeffizienz dominiert. Obwohl Strom einen hohen PEV aufweist, verursacht er geringe Treibhausgasemissionen und ist daher wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierung.



	2015	2020	2025	2030	2035
Luftverkehr national	35	14	34	33	33
BiSchi	10	10	11	10	10
SNF	713	718	771	769	739
LNF	166	191	173	146	129
Bahn	105	80	98	86	81
Bus	58	56	52	45	42
Kraftrad	17	19	16	14	13
PKW	1.943	1.900	1.825	1.676	1.536
Territorialer Verkehr	3.047	2.986	2.978	2.779	2.581

Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

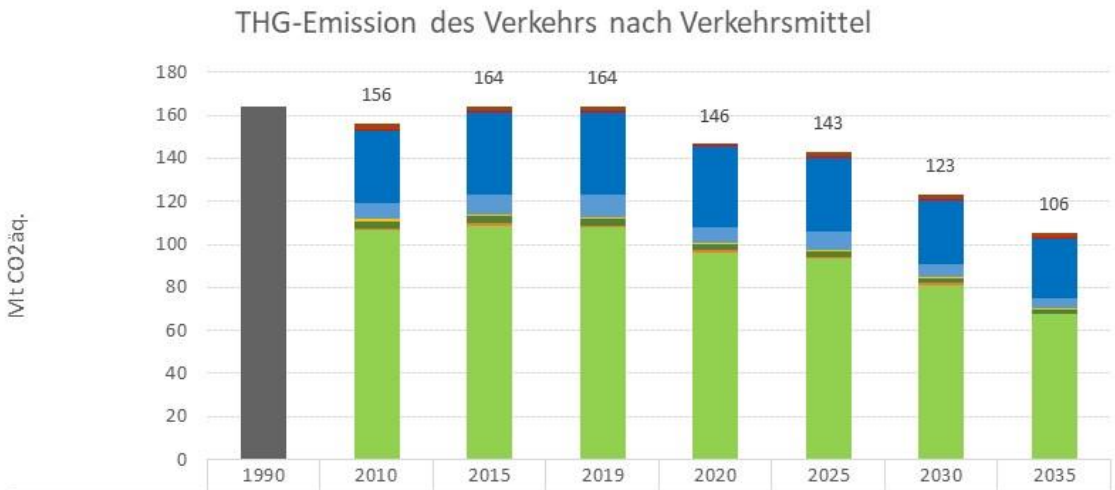
Abbildung 113 Primärenergieverbrauch nach Verkehrsmittel (REF-2020)

Zukünftig könnte eine detailliertere Modellierung des PEV die Bedeutung von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz versus Strom die Schlüsselinstrumente für das Erreichen der Klimaziele im Verkehr und in der Abwägung der Sektoren unterstreichen und 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.

14 Entwicklung der THG-Emission des Verkehrs

Die Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr entwickelten sich seit 1990 in drei Phasen bis 2019. 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. Seither sind sie wieder angestiegen und liegen 2019 bei etwa 164 Mt $CO_{2äq.}$ und damit ungefähr auf dem Niveau von 1990 (Daten nach UNFCCC). Es hat also bis 2019 keine THG-Minderung im Verkehr stattgefunden.

Die Corona-Pandemie hat in 2020 zu einem deutlichen Einbruch der THG-Emission des Verkehrs auf 146 Mt $CO_{2äq.}$ geführt.[45] In REF-2020 setzt sich nach einer 2-jährigen Stabilisierungsphase der Abwärtstrend der THG-Emission weiter fort getrieben durch die Elektrifizierung im PKW-, LNF-, Bus- und auch SNF-Bereich. In 2030 werden so etwa 123 Mt $CO_{2äq.}$ im Verkehrssektor erreicht und das Ziel des KSG von 85 Mt $CO_{2äq.}$ deutlich verfehlt. Damit verbleibt mit den bereits ergriffenen Instrumenten (siehe Tabelle 8) eine Lücke von 38 Mt $CO_{2äq.}$ zur Erreichung des Zielwertes in 2030 von 85 Mt $CO_{2äq.}$ nach KSG-neu.



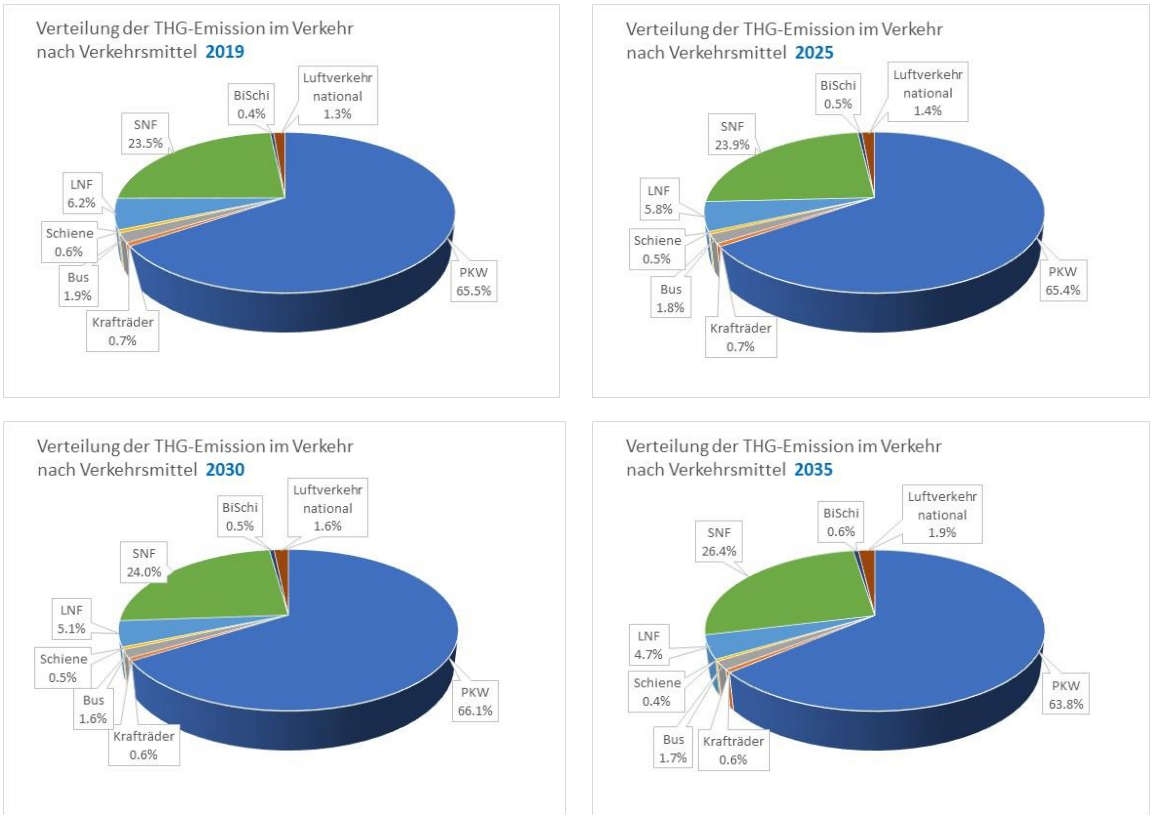
	1990	2010	2015	2019	2020	2025	2030	2035
Basis Verkehr 1990	164							
Luftv. Nat.		2.2	2.1	2.1	0.2	2.0	2.0	2.0
BiSchi		0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6
SNF		33.9	38.7	38.5	37.4	34.2	29.5	27.8
LNF		7.5	9.0	10.2	7.3	8.3	6.3	4.9
Schiene		0.8	0.8	1.0	0.7	0.7	0.6	0.4
Bus		3.4	3.3	3.1	3.1	2.6	2.0	1.7
Krafträder		1.0	1.1	1.1	1.1	0.9	0.7	0.6
PKW		106.3	108.6	107.7	96.0	93.4	81.2	67.4
Gesamt Kyoto		155.8	164.3	164.3	146.4	142.8	122.9	105.5

Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 114 Entwicklung der THG-Emission aus Verkehr in KSG-Abgrenzung (REF-2020)

Abbildung 115 stellt die Verteilung der THG-Emission auf die Verkehrsmittel dar. Der Anteil des PKW-Verkehrs von 65,5% in 2019 also in etwa zwei Drittel der Emissionen verbleibt bis 2035 in etwa 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. ergriffen, so dass sich ihr Anteil an den THG-Emissionen über die Zeit leicht erhöht aber auf niedrigem Niveau verbleibt.

[45] 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 wurde diese Verzögerung korrigiert.

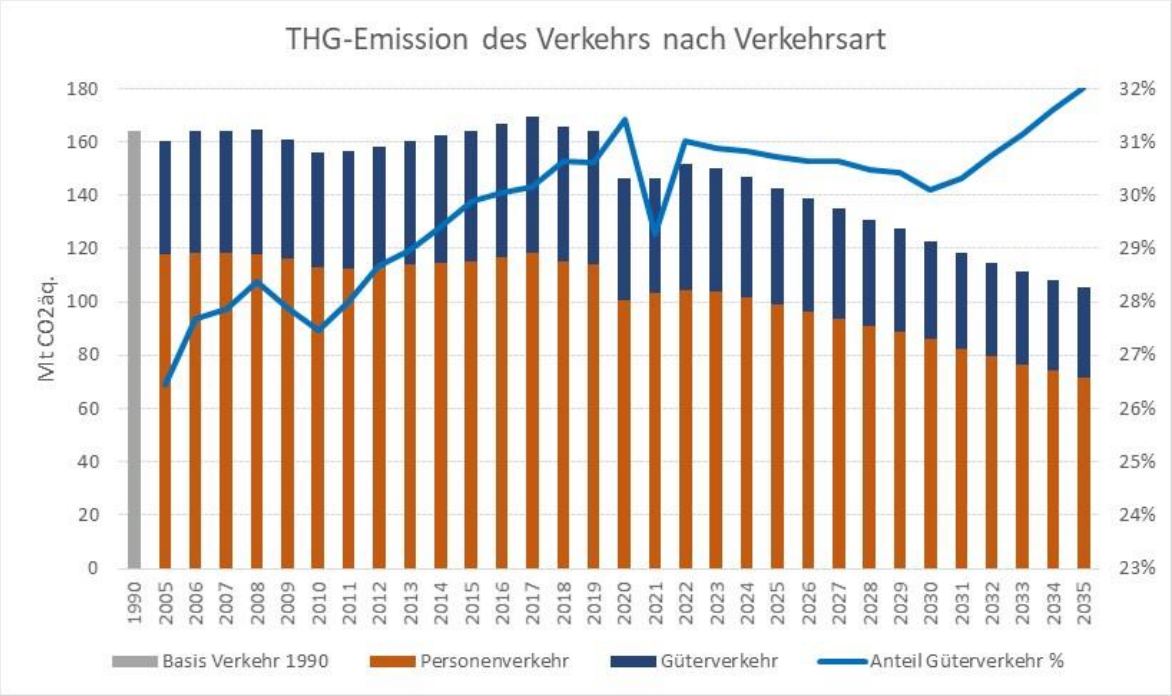


Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 115 Verteilung der THG-Emissionen auf die Verkehrsmittel über die Zeit (REF-2020)

Die sich wandelnden Trends der THG-Emissionen der wichtigsten Verkehrsmittel PKW und SNF ist ebenfalls zu beobachten bei der Verteilung der THG-Emission auf den Personen- und Güterverkehr (siehe Abbildung 116). 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. Auch das ist am sprunghaften Anstieg des Anteils des Güterverkehrs in 2020 gut zu erkennen.

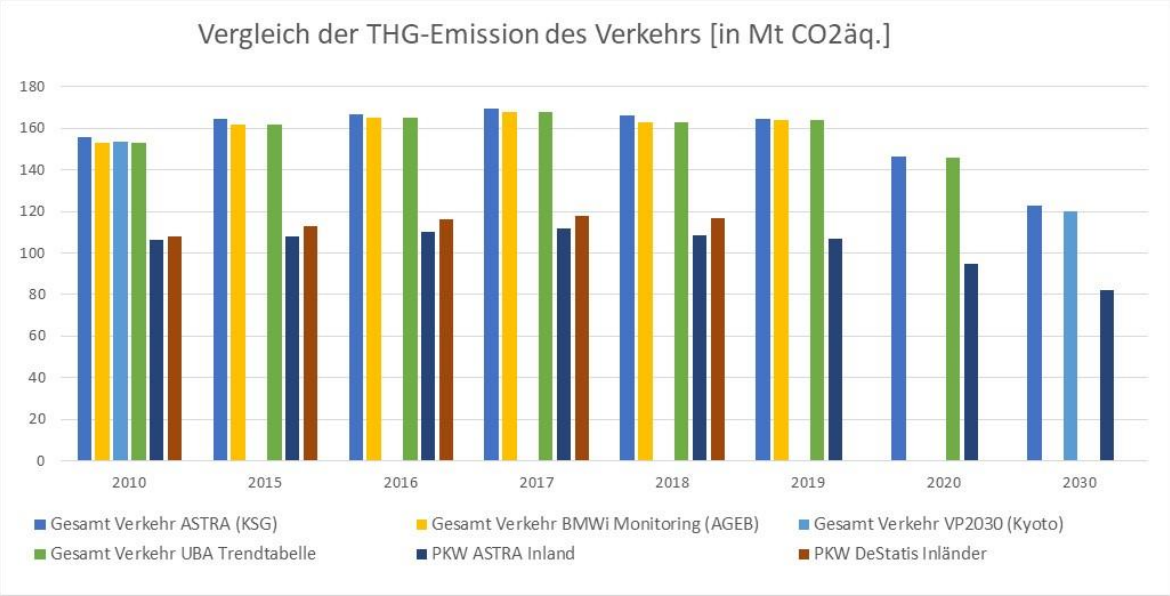
Allerdings verändert sich der Trend zum wachsenden Anteil des Güterverkehrs ab etwa 2023. Dann überlagern sich drei positive Trends im Güterverkehr: (1) die Elektrifizierung bei leichten NFz, (2) ein moderater Zuwachs des Modal-Anteils auf der Schiene, und (3) ein ebenfalls moderater Zuwachs der Elektrifizierung von SNF. Währenddessen behalten in REF-2020 PHEV einen substanziellen Marktanteil an elektrifizierten PKW (knapp ein Drittel im Bestand) erbringen aber im Realbetrieb nur eine sehr geringe Minderungsleistung gegenüber vergleichbaren Verbrennern insbesondere in den größeren Fahrzeug-Segmenten. Damit sinkt der Anteil des Güterverkehrs bis 2030 wieder leicht auf etwa 30% der THG-Emission des Verkehrs.



Quelle: M-Five, eigene Berechnungen, ASTRA-2020.

Abbildung 116 Entwicklung der THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr (REF-2020)

Abbildung 117 vergleicht die THG-Emissionen des Verkehrs mit Daten des BMWi, der VP2030, des UBA sowie DeStatis. Der Gesamtverkehr liegt nahezu auf gleicher Höhe für die betrachteten Jahre. Im Jahr 2030 beträgt der Unterschied der ASTRA-Berechnung zu VP2030 lediglich 3% und bewegt sich daher in einem sehr ähnlichen Rahmen. Für PKW liegt die ASTRA Inland-Berechnung in jedem Jahr leicht unter den DeStatis Inländer-Werten, dies deckt sich mit der Beobachtung des EEV hinsichtlich der beiden Messkonzepte.



Quelle: BMWi (2021), ITP et al. (2014), UBA (2021), DeStatis (2020), eigene Berechnungen, M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 117 Vergleich der THG-Emissionen im Verkehr von REF-2020 mit anderen Quellen

15 Synthese und Ausblick

Das überarbeitete und auf den Stand 2019 gebrachte MKS-Referenzszenario (REF-2020) wurde im MKS-Modellsystem neu implementiert. Dabei sind Maßnahmen bis zum Stichtag 31. August 2020 bereits Bestandteil des Referenzszenarios.

Die THG-Emissionen des bodengebundenen Verkehrs in REF-2020 sinken bis 2030 auf 123 Mt CO_2äq. und verringern sich damit um 25% gegenüber 1990. Unter Einbeziehung des nationalen Luftverkehrs beträgt in 2030 die Lücke zur Erreichung des verschärften Sektorziels für Verkehr aus dem KSG-neu rund 38 Mt CO_2äq.. Diese Lücke soll durch Maßnahmen, die seit dem Stichtag und bis 2030 noch verabschiedet und umgesetzt werden, geschlossen werden.

Die Ziele der CO_2-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 würden. Im Einzelnen ergibt sich für die 2030er Ziele:

- EU PKW-Ziel -37,5%: die deutschen Neuzulassungen erreichen gegenüber 2021 -43,3%.
- EU LNF-Ziel -31%: die deutschen Neuzulassungen erreichen gegenüber 2020 knapp -55,8%.
- EU SNF-Ziel (>16t zGG) -30%: die deutschen Neuzulassungen erreichen gegenüber 2019 knapp -30,3%.

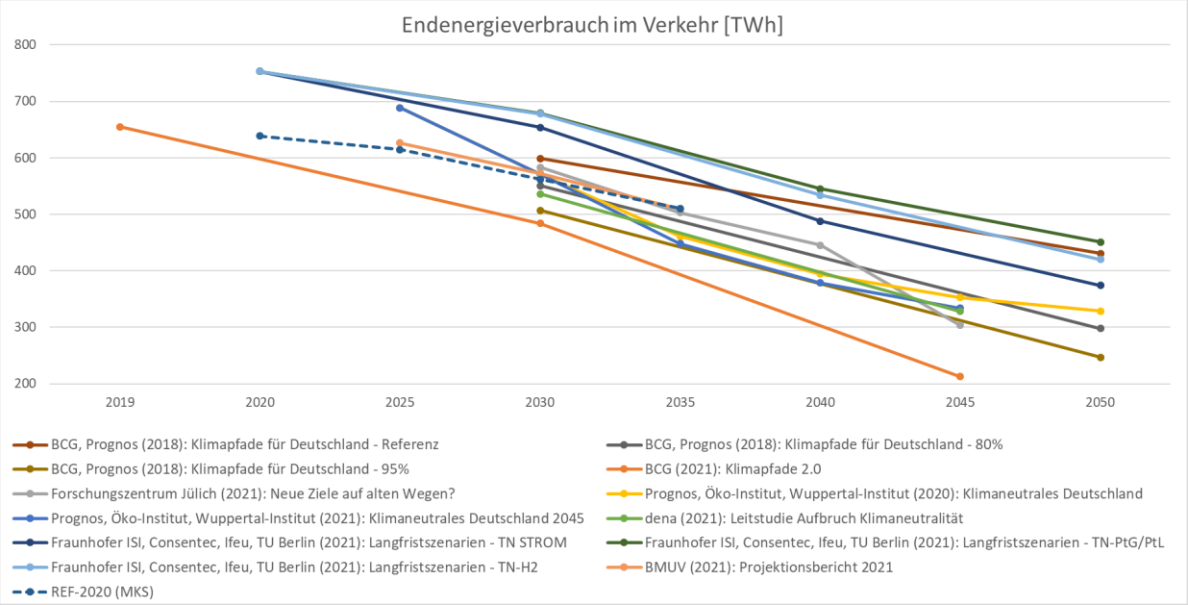
Aus modaler Sicht werden bis 2030 leichte Zuwächse für die Schiene (Fern- und Nahverkehr) sichtbar sowohl im Personenverkehr wo gemessen an der Verkehrsleistung knapp 10% (Zuwachs gegenüber 2019 +24%) als auch im Güterverkehr wo knapp 22% Modalanteil erreicht werden (Zuwachs gegenüber 2019 +33%).

Das MKS-Referenzszenario in der vorliegenden Form ist vorbereitet, um als Vergleichsmaßstab zu dienen, an dem die THG-Minderungswirkungen von ab 09/2020 ergriffenen bzw. ab 2022 zu ergreifenden Maßnahmen im Verkehrs- und gekoppelten Energiesektor gemessen und bewertet werden.

16 Anhang

16.1 Vergleich von REF-2020 mit anderen Szenarien

Die folgenden Darstellungen in Abbildung 118, Abbildung 119, Abbildung 120 und Abbildung 121 ordnen die Ergebnisse des REF-2020 in einem Szenario-Vergleich ein. Dafür wurden aktuelle Zielszenarien für den Verkehrssektor in Deutschland evaluiert und aufbereitet. Das REF-2020 ist, neben dem Projektionsbericht der Bundesregierung, als einziges Szenario maßnahmengetrieben angelegt und weicht daher von den zielgetriebenen Vergleichs-Szenarien ab. Zusätzlich ist das Jahr der Veröffentlichung der jeweiligen Studie von Bedeutung für deren Interpretation, da sich die Klimaziele in den letzten Jahren stark verschärft haben und deshalb das anvisierte Ziel der Zielszenarien sich geändert hat. Betrachtet werden im Vergleich der aggregierte Endenergieverbrauch im Verkehr, die aggregierten THG-Emissionen im Verkehr sowie die PKW Neuzulassungen und der PKW Bestand nach Kategorien. In allen Abbildungen ist das REF-2020 als gestrichelte Linie abgebildet.

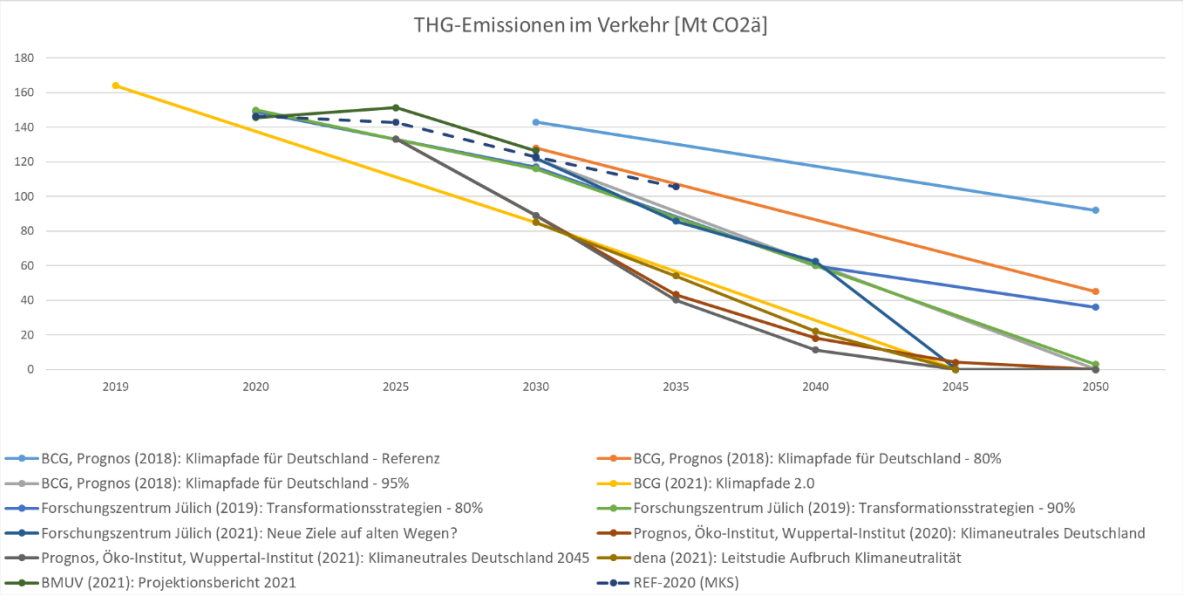


Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 118 Szenario-Vergleich Endenergieverbrauch Verkehr

In Abbildung 118 ist der territoriale Endenergieverbrauch (Kyoto-Abgrenzung) dargestellt. Ausnahmen hiervon bilden die Studien von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut (2020, 2021) die den internationalen Verkehr miteinbeziehen, sowie die Langfristszenarien von Fraunhofer ISI, Consentec, Ifeu und TU Berlin (2021). Dies spiegelt sich in den höheren Endenergieverbräuchen der Langfristszenarien wieder. Den geringsten Endenergieverbrauch weist das Szenario der Klimapfade 2.0 (BCG, 2021) auf, welches somit den größten Einsatz von Effizienzverbesserungen unterstellt, wobei die Elektrifizierung des Straßenverkehrs gleichzeitig eine Effizienzmaßnahme darstellt.

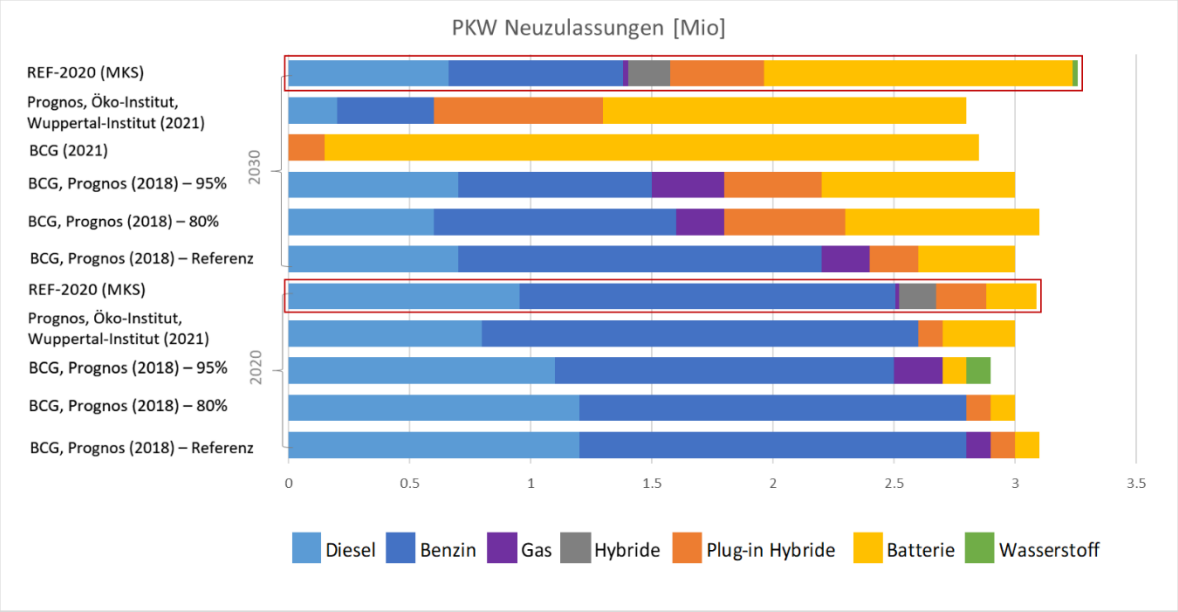
Der Vergleich der THG-Emissionen des Verkehrs in Abbildung 119 bildet auch die Verschärfung der Klimaziele ab, da insbesondere die Studie von BCG und Prognos aus dem Jahr 2018 noch deutlich höhere Werte aufweist. Das REF-2020 liegt ebenfalls im oberen Bereich der THG-Emissionen und zeigt eine deutliche Lücke zu den zielgetriebenen Szenarien, die Nullemissionen in 2045 erreichen.



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2020.

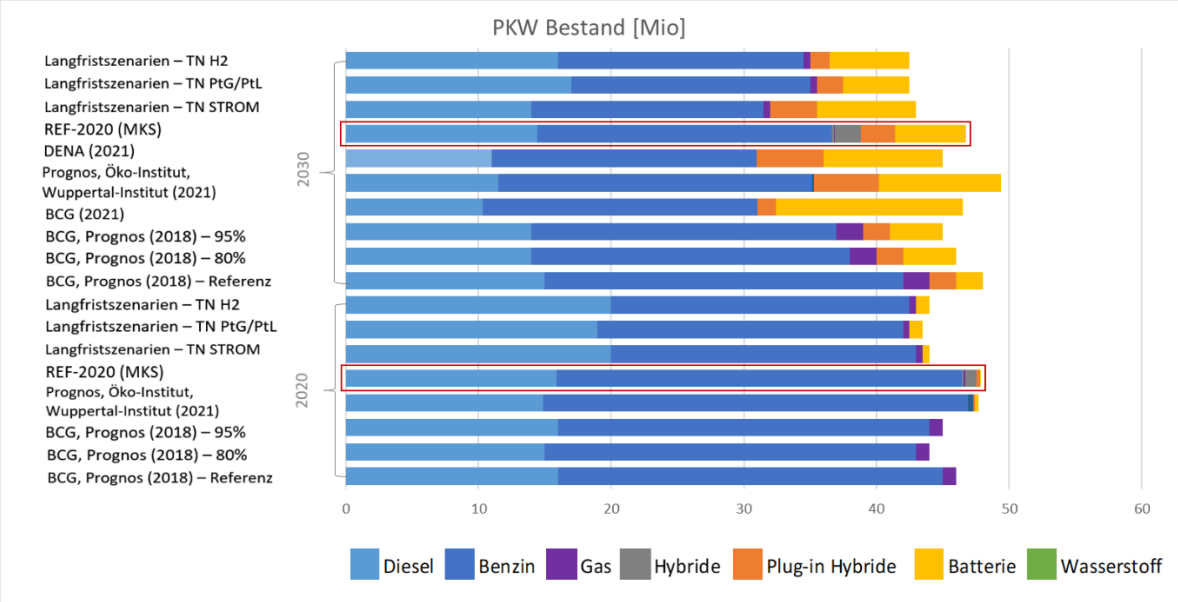
Abbildung 119 Szenario-Vergleich THG-Emissionen Verkehr

Die PKW Neuzulassungen sowie der PKW Bestand sind für die Jahre 2020 und 2030 dargestellt. Für das Jahr 2020 zeigt das REF-2020 insgesamt niedrigere Neuzulassungen, welche durch die berücksichtigten Pandemie-Effekte zu erklären sind. Für das Jahr 2030 zeigt insbesondere das Szenario der BCG Klimapfade 2.0 (2021) sehr hohe Anteile an Batterie-Fahrzeugen. Diese spiegeln sich auch im PKW-Bestand in Abbildung 121 wieder. Während die Neuzulassungen mit knapp unter 3 Millionen PKW relativ konstant bleiben, sowohl über die Jahre als auch zwischen den einzelnen Szenarien, zeichnet sich für die Verteilung der Antriebe ein differenziertes Bild ab. Der hohe Anteil an Diesel und Benzin in 2030 für die Szenarien von BCG und Prognos (2018) sowie für das REF-2020 ist durch das Erscheinungsjahr der Studie sowie durch das maßnahmengetriebene Referenzszenario zu erklären, welches bei REF-2020 sich noch in der Welt eines -37,5%-CO_2-Reduktionszieles bei neuen PKW befindet.



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 120 Szenario-Vergleich PKW-Neuzulassungen nach Antriebsart



Quelle: Zusammenstellung verschiedener Quellen von M-Five, ASTRA-2020.

Abbildung 121 Szenario-Vergleich PKW-Bestand nach Antriebsart

16.2 Einordnung der PKW Flottenstruktur 2030 in REF-2020 in den europäischen Kontext

Für die Erreichung der **Ziele des Klimaschutzgesetzes in 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, mit dem Beitrag von etwa -48% Verbesserung gegenüber 2021 den Deutschland

in REF-2020 leistet, müssen die **Neuzulassungen** der deutschen PKW-Flotte in 2030 im gesamten Kontext der Neuzulassungen in anderen Mitgliedsstaaten geprüft werden.

Tabelle 41 weist ein exemplarisches Mengengerüst aus, welches für die EU27 in 2030 das Reduktionsziel von -37,5% in 2030 erreicht. Dabei werden folgende Festlegungen und Annahmen für die Abschätzung getroffen:

- Ausgangspunkt der Berechnung sind die EEA-Monitoringdaten aus dem CO_2-Monitoring des Jahres 2020.
- Für Deutschland werden für das Jahr 2030 die Ergebnisse aus der ASTRA-M Modellierung in REF-2020 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 verfeinert wurde. Dieses beinhaltet:
    - Die Mitgliedsstaaten werden in vier Gruppen je nach Affinität zur Elektrifizierung abhängig von Kaufkraft, Stabilität Energie-System, Ambitions-Niveau Klimapolitik eingeteilt,
    - Um den Ausgangswert des landesspezifischen CO_2-Typ-Prüfwertes von 2021 zu berechnen wird eine Elektrifizierung von 6/3/1/1% angenommen (Reihenfolge von der stärksten Länder-Gruppe hinsichtlich Elektrifizierung zur schwächsten Gruppe). Anteile an PHEV liegen bei 45/50/70/80% in den vier Gruppen.
    - 2021 beträgt der EU-weite Durchschnitt der Neuzulassungen von Diesel 96 gCO2/km, bei Benzinern 101 gCO2/km und bei PHEV 29 gCO2/km (Angaben nach NEFZ).
- Für 2030 wurde angenommen:
    - Die Elektrifizierung der vier Ländergruppenbeläuft sich auf 67/57/47/36%. Anteile an PHEV liegen bei 10/20/25/25% in den vier Gruppen.
    - 2030 beträgt der EU-weite Durchschnitt der Neuzulassungen von Diesel noch 91 gCO2/km, bei Benzinern 95 gCO2/km und bei PHEV 28 gCO2/km (Angaben nach NEFZ).

In diesem exemplarischen Beispiel hätten einige Länder deutlich höhere Elektrifizierungsraten erreicht als Deutschland und auch der PHEV-Anteil Deutschlands läge am höchsten. Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl anderer Mengengerüste denkbar ist, die ebenfalls das Reduktionsziel von -37,5% aller Neuzulassungen in der EU erreichen würden. Außerdem würden sich die Berechnungen bei Nutzung des WLTP-Zyklus leicht verschieben und auch hinsichtlich ihrer Struktur leicht unterscheiden.

Tabelle 41: Mengengerüst zur Einordnung des deutschen Beitrages zur Erreichung des EU-Minderungszieles in REF-2020 (exemplarisch)

	Neuzulassungen in 2030					Elektrifizierung		Spezifische NEFZ-Werte				CO2-Reduktion
Mitgliedsstaat	Gesamt	Diesel	Benzin	PHEV	BEV	PHEV-Anteil	xEV-Anteil	Diesel	Benzin	PHEV	Länder-Prüfwert	2021 bis 2030
	PKW	PKW	PKW	PKW	PKW	%	%	gCO2/km	gCO2/km	gCO2/km	gCO2/km	%
Österreich	228,606	33,139	75,440	15,317	137,849	10%	67%	95.14	98.65	28.00	48.22	-49.9%
Belgien	419,631	67,257	180,441	47,838	191,352	20%	57%	87.46	98.10	28.00	59.39	-38.1%
Bulgarien	22,989	5,392	14,713	2,069	6,207	25%	36%	105.37	114.27	28.00	100.37	-12.8%
Zypern	10,273	2,008	6,574	925	2,774	25%	36%	97.78	102.40	28.00	87.16	-16.7%
Tschechien	219,179	44,836	140,275	19,726	59,178	25%	36%	97.08	100.55	28.00	86.73	-15.9%
Deutschland	**3,122,000**	**485,000**	**1,109,000**	**515,000**	**1,013,000**	**34%**	**49%**	**96.40**	**95.70**	**28.00**	**53.59**	**-47.6%**
Dänemark	179,973	15,744	59,391	12,058	108,524	10%	67%	84.82	90.72	28.00	39.23	-55.6%
Estland	17,292	3,018	11,067	1,556	4,669	25%	36%	93.44	103.16	28.00	84.85	-18.5%
Griechenland	83,357	15,479	53,349	7,502	22,506	25%	36%	80.18	92.00	28.00	76.29	-16.9%
Spanien	844,028	166,469	447,335	99,173	297,520	25%	47%	85.54	90.60	28.00	68.18	-25.9%
Finnland	77,973	6,322	41,326	9,162	27,485	25%	47%	96.52	94.18	28.00	61.03	-37.6%
Frankreich	1,632,189	204,030	538,622	109,357	984,210	10%	67%	81.80	89.82	28.00	41.74	-51.5%
Kroatien	38,048	9,784	24,351	3,424	10,273	25%	36%	85.56	94.78	28.00	85.18	-9.9%
Ungarn	132,769	17,819	70,368	15,600	46,801	25%	47%	98.29	98.29	28.00	68.58	-32.6%
Irland	86,916	21,857	46,065	10,213	30,638	25%	47%	89.20	90.15	28.00	73.50	-21.1%
Italien	1,196,298	308,039	765,631	107,667	323,000	25%	36%	88.81	90.91	28.00	83.57	-10.6%
Litauen	43,178	4,998	27,634	3,886	11,658	25%	36%	98.60	98.47	28.00	76.96	-24.5%
Luxemburg	40,734	9,549	21,589	4,786	14,359	25%	47%	96.99	112.41	28.00	85.60	-21.9%
Lettland	13,057	2,774	8,357	1,175	3,525	25%	36%	90.31	102.55	28.00	87.34	-14.5%
Malta	4,235	537	2,244	498	1,493	25%	47%	87.67	86.81	28.00	60.41	-33.0%
Niederlande	236,038	2,921	77,892	15,815	142,331	10%	67%	84.67	91.92	28.00	33.26	-63.2%
Polen	425,549	59,833	272,352	38,299	114,898	25%	36%	99.69	103.94	28.00	83.06	-22.1%
Portugal	135,557	28,829	71,845	15,928	47,784	25%	47%	81.46	91.25	28.00	68.98	-23.9%
Rumänien	129,181	25,408	82,676	11,626	34,879	25%	36%	89.74	99.96	28.00	84.15	-16.2%
Schweden	189,647	19,836	62,584	12,706	114,357	10%	67%	101.12	101.32	28.00	45.89	-54.2%
Slowenien	54,168	8,144	23,292	6,175	24,701	20%	57%	91.22	96.67	28.00	58.48	-39.4%
Slowakei	80,834	13,989	51,734	7,275	21,825	25%	36%	97.70	101.36	28.00	84.30	-18.9%
EU27											**60.00**	**-37,5%**

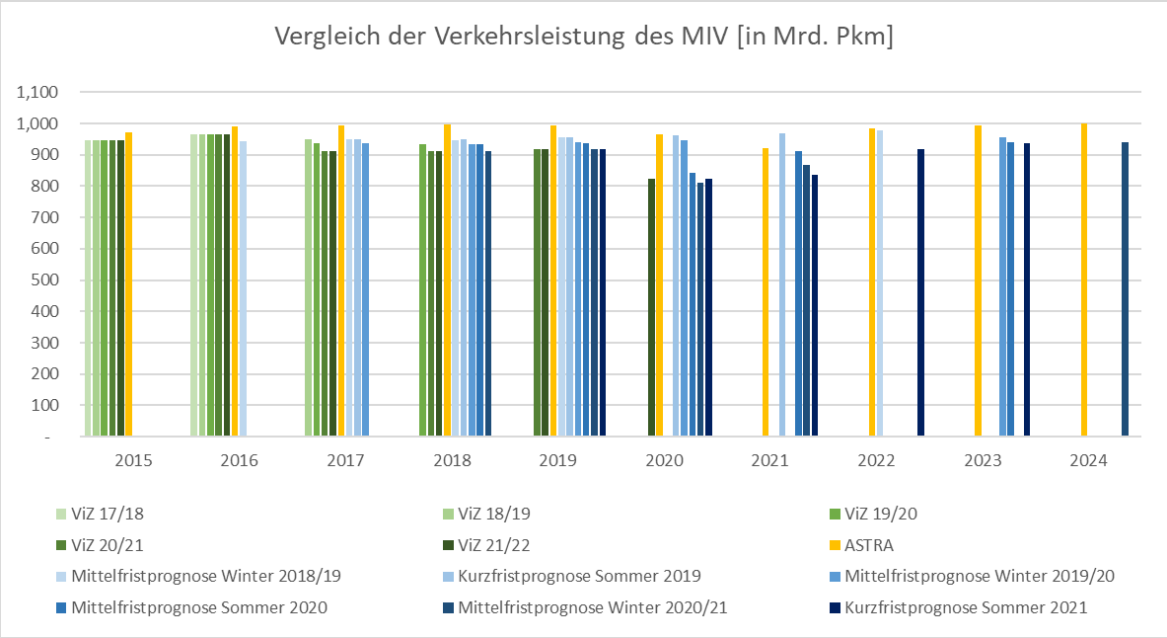
Quelle: Berechnungen M-Five, EEA-Monitoring Daten von 2020, Basis NEFz-Werte

16.3 Anmerkung zu Statistiken im Verkehr – Bandbreite und Variabilität

Wie bereits in Kapitel 10.3 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 122 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-2020.

Abbildung 122 Vergleich der Verkehrsleistung des MIV

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 in 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 2019. 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-2020 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 in REF-2020 beispielsweise ein höheres BIP in 2024 zugrunde gelegt als in der Mittelfristprognose Winter 2020/ 21, sowie ein höherer Benzinpreis.

17 Referenzen

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.

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/Pools/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf

BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2021): *Projektionsbericht der Bundesregierung 2021*. Abrufbar unter https://www.bmuv.de/download/projektionsbericht-der-bundesregierung-2021

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

Bundesamt für Güterverkehr BAG 2008 bis 2020: Mautstatistik Jahrestabellen 2007 bis 2019. 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

Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2019): *Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung*. Abrufbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.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.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwie8o60-PjvAhWmg_0HHUgXDIMQF-jAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.biek.de%2Fdownload.html%3Fgetfile%3D2431&usg=AovVaw288lQs-EhTCrVAHeDjh3LX

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

DeStatis (2017): *Bevölkerungsentwicklung bis 2060 – Ergebnisse der 13. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung: Aktualisierte Rechnung auf Basis 2015*. Erschienen am 27. März 2017.

DeStatis (2020): *Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Verkehr und Umwelt. Berichtszeitraum 2005 – 2018*. 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

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

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* CO_2*-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

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* CO_2*-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).

ICCT (2017): *From Laboratory to road: a 2017 update of official and real world fuel consumption and* CO_2 *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): CO_2 *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*. Los 3, Schlussbericht, München. Referenzdokument der **VP2030**.

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 (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.

Konzessionsabgabenverordnung. *Verordnung über Konzessionsabgaben für Strom und Gas.* Abrufbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/kav/BJNR000120992.html

Matt C. und Flämig H. (2018): *Finanzielle Anreize für die Dekarbonisierung des Verkehrs. AP6: Komponenten Modell und TCO-Rechnung LKW.* Arbeitspapier 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

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/Zwischen-bericht-03_2019-der-AG1-Klimaschutz-der-NPM-Wege-zur-Erreichung-der-Klima-ziele-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

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/

Ricardo-AEA (2015): *Improving understanding of technology and costs for* CO_2 *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.

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. 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.

Statistisches Bundesamt (2011): *Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Weiterentwicklung der Berechnungen zum Energieverbrauch und zu den* CO_2 *-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): *Treibhausgasemissionen in Deutschland 2020*. Abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/galerie/treibhausgasemissionen-in-deutschland-2020

ViZ – Verkehr in Zahlen (2021): *Verkehr in Zahlen 2021/ 2022.* Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.

Ziegler, Trankic (2021): *Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline*.