

TEXTE

13/2024

Endbericht

Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr

von:

Kirsten Biemann, Hinrich Helms, Daniel Münter, Axel Liebich, Julia Pelzeter, Claudia Kämper
Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg
Unterstützt durch Johannes Müller, ecoinvent Association (Zürich)

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 13/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 57 101 0
FB001307

Endbericht

Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr

von

Kirsten Biemann, Hinrich Helms, Daniel Münter, Axel
Liebich, Julia Pelzeter, Claudia Kämper
Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Unterstützt durch Johannes Müller, ecoinvent Association
(Zürich)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

November 2023

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2
Martin Kortschack, Martin Lange

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei allen Teilnehmenden der drei Projektfachgespräche bedanken, die im Juni 2021, im April 2022 und im November 2022 stattfanden. Ihre kritischen Fragen und fachlichen Vorschläge in den konstruktiven Diskussionen haben eine wichtige Grundlage für den vorliegenden Projektbericht geschaffen.

Im Rahmen der Recherche zum Kapitel „End-of-Life Optionen für gebrauchte Traktionsbatterien“ wurden drei Experteninterviews geführt: mit Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich (Leiter des IME – Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen), Dr. Jens Peters (University of Alcalá) und Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer (Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik an der RWTH Aachen). Ihnen gilt besonderer Dank für die fachlichen und konstruktiven Beiträge. Sie bilden eine wichtige Basis für das vorliegende Kapitel 3.5.

Kurzbeschreibung: Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr

Um die mittel- und langfristigen Klimaschutzziele Deutschlands im Verkehrssektor zu erreichen, ist neben der Verkehrsvermeidung und Verlagerung auch der Einsatz von alternativen Antrieben und alternativen Kraftstoffen notwendig. Ausgehend von heute verfügbaren durchschnittlichen Fahrzeugen, Antrieben und Kraftstoffen wird eine plausible Entwicklung untersucht, die sowohl die Fahrzeugeigenschaften als auch die steigende Beimischung synthetischer, strombasierter Kraftstoffe umfasst. Endpunkt ist eine weitestmöglich defossilisierte Welt im Jahr 2050. Untersucht wird jeweils durchschnittliche Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Lkw der Baujahre 2020, 2030 und 2050. Die Umweltwirkungen je gefahrenem Kilometer werden durch eine umfassende ökobilanzielle Analyse ermittelt, welche sowohl die Fahrzeugherstellung, -nutzung, -wartung und -entsorgung umfasst, als auch die Bereitstellung von synthetischen, biogenen und fossilen Kraftstoffen und Fahrstrom. Insgesamt zeigen sich die batterieelektrischen Fahrzeugkonzepte für alle Fahrzeugtypen und Baujahre als überlegene Lösung bezüglich der Treibhauswirkung und des kumulierten Energieaufwandes. Mittelfristig ist für sie die Nutzung des deutschen Strommixes aber noch mit deutlichen negativen Wirkungen bei anderen relevanten Umweltwirkungen verbunden. In einer defossilisierten Welt liegen alle Technologien auf niedrigerem Niveau bezüglich ihrer Umweltbelastung, doch die meisten Umweltwirkungen gehen nicht so stark zurück wie das Treibhauspotenzial. Während dieses je Fahrzeugkilometer bei den Pkw durchschnittlich um 96 % gegenüber 2020 sinkt, verringern sich etwa Versauerung und Feinstaubbelastung nur um 40-60 %. Auch durch ihre Sensitivitätsanalysen zeigt diese Studie zentrale Stellschrauben zu kurz- und langfristigen Verbesserungen. Diese betreffen vor allem die Rohstoffe zur Herstellung der Fahrzeuge und die Erzeugung des Stroms – auch für synthetische Kraftstoffe.

Abstract: Analysis of the environmental impacts of vehicles with different drivetrain and fuel options in Germany during the transition towards a greenhouse gas neutral mobility

In order to achieve Germany's medium- and long-term climate protection targets in the transport sector in addition to traffic avoidance and modal shift, the use of alternative powertrains and alternative fuels is necessary. Based on the average vehicles, powertrains and fuels available today, a plausible development is examined that includes both vehicle characteristics and the increasing share of synthetic (electricity-based) fuels. The end point is a largely decarbonized world in 2050. Average passenger cars, light commercial vehicles and trucks for the model years 2020, 2030 and 2050 are examined. The environmental impact per kilometer driven is calculated using a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) that includes vehicle production, use, maintenance and disposal, as well as the provision of synthetic, biogenic and fossil fuels and electricity. Overall, for all vehicle types and model years, the battery electric vehicle concepts are the superior solution in terms of greenhouse gas emissions and cumulative energy consumption. In the medium term, however, their use of the German electricity mix leads to significant negative effects in terms of other relevant environmental impacts. In a decarbonized world, all technologies are at a low level in terms of environmental impact, but most environmental impacts do not decrease as much as global warming potential. While GHG emissions per vehicle kilometer for passenger cars are reduced by an average of 96% compared to 2020, acidification and particulate matter, for example, are reduced by only 40-60%. Through sensitivity analyses, the study also identifies key levers for short- and long-term improvements. These relate mainly to the raw materials used in vehicle production and electricity generation, including synthetic fuels.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	16
Abkürzungsverzeichnis.....	19
Zusammenfassung.....	21
Summary.....	32
1 Einleitung.....	42
1.1 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen.....	42
1.2 Ökobilanzielle Methodik.....	45
1.2.1 Wirkungskategorien.....	45
1.2.2 Normierung.....	46
1.3 Transformation des Hintergrundsystems.....	47
2 Grundlagen der Bilanzierung.....	53
2.1 Fahrzeugeigenschaften und Verbrauchswerte.....	53
2.1.1 Eigenschaften der Kompaktklasse-Pkw.....	53
2.1.2 Eigenschaften der leichten Nutzfahrzeuge.....	57
2.1.3 Eigenschaften der Sattelzüge.....	59
2.2 Nutzungsmuster der Fahrzeuge.....	62
2.2.1 Durchschnittliche Nutzungsmuster der Fahrzeugtypen.....	62
2.2.2 Elektrische Fahranteile von PHEV und O-Lkw.....	65
2.3 Modellierung der Fahrzeugbereitstellung.....	68
2.3.1 Pkw und leichten Nutzfahrzeuge.....	68
2.3.2 Last- und Sattelzüge.....	69
2.4 Modellierung der Akkubereitstellung.....	71
2.4.1 Herstellung Nickel-Mangan-Kobalt-Akku.....	72
2.4.2 Herstellung Lithium-Eisenphosphat-Akku.....	73
2.4.3 Herstellung Lithium-Luft-Akku.....	74
2.4.4 Akku-Recycling.....	75
2.5 Stromvorketten.....	76
2.5.1 Ableitung der Strommixe und Zusammensetzung.....	76
2.5.2 Erneuerbare Stromerzeugung in Abhängigkeit von Standortparametern.....	81
2.5.3 Auswahl der Strommixe für Elektromobilität und synthetische Kraftstoffe.....	83
2.6 Kraftstoffvorketten.....	85
2.6.1 Fossile Kraftstoffe.....	85

2.6.2	Biokraftstoffe	87
2.6.3	Synthetische Kraftstoffe	88
2.6.4	Szenariogebundene Kraftstoffmixe	93
3	Gesamtergebnisse der Umweltbewertung	96
3.1	Einflussfaktoren und Standardfälle.....	96
3.2	Treibhauspotenziale.....	102
3.2.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	102
3.2.2	Sattelzüge.....	108
3.3	Normierte Umweltwirkungen.....	111
3.3.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	112
3.3.2	Sattelzüge.....	118
3.4	Sensitivitätsanalysen zu ausgewählten Aspekten.....	122
3.4.1	Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge	124
3.4.2	Sattelzüge.....	133
3.5	End-of Life Optionen für gebrauchte Traktionsbatterien	142
3.5.1	EoL: Definition und Systematisierung.....	142
3.5.2	Rechtlicher Rahmen zur EoL Behandlung von Traktionsakkus	144
3.5.3	Recycling von Traktionsbatterien	147
3.5.4	Second-Life Anwendung von Traktionsbatterien	154
4	Detailergebnisse und Beitragsanalyse.....	160
4.1	Kraftstoff- und Strombereitstellung.....	160
4.1.1	Netzstrommixe.....	160
4.1.2	Erneuerbare Strommixe.....	162
4.1.3	Kraftstoffmixe	164
4.1.4	Einfluss einzelner Prozessschritte auf das Treibhauspotenzial von synthetischen Kraftstoffen	167
4.2	Fahrzeugbereitstellung	175
4.2.1	Fahrzeugherstellung	176
4.2.2	Akkuherstellung	195
4.3	Analyse der umweltrelevanten Materialien, Basisprozesse und Emissionen.....	202
4.3.1	Umweltrelevante Materialien.....	203
4.3.2	Wichtige Prozessschritte und Emissionen aus der Bereitstellung der Materialien.....	212
5	Fazit und Ausblick.....	217
6	Quellenverzeichnis	224

A	Anhang	235
A.1	Verweis auf Datenanhang.....	235
A.2	Bereitstellungspfade	235

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw im Startpunkt (Baujahr 2020, GreenLate)	24
Abbildung 2:	Entwicklungen beim Treibhauspotenzial des Kompaktklasse-Pkw in Startpunkt, Übergangsphase sowie THG-Neutralität ...	25
Abbildung 3:	Vergleich ausgewählter Umweltwirkungen von Kompaktklasse-Pkw mit dem Benzin-Pkw Baujahr 2020 bezogen auf den km .	26
Abbildung 4:	Treibhauspotenzial ausgewählter Sattelzüge in der Übergangsphase sowie THG-Neutralität bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)	28
Abbildung 5:	Vergleich ausgewählter Umweltwirkungen von Sattelzügen mit dem Diesel-Sattelzug mit Baujahr 2030 bezogen auf den km..	30
Figure 6	Developments in the global warming potential of the compact car at starting point, transition phase and GHG neutrality	36
Figure 7:	Comparison of selected environmental impacts of compact class passenger cars with the petrol passenger car built in 2020, per kilometre.	37
Figure 8	Global warming potential of heavy-duty trucks in the transition phase and in GHG-neutrality – all with average payload (11 t)	39
Figure 9:	Selected environmental impacts of heavy-duty trucks in comparison to the diesel lorries built in 2030, per km	40
Abbildung 10:	Ergebnisse aller ecoinvent-Datensätze des Szenarios GreenSupreme 2050 im Vergleich zu 2020 für CO ₂ , fossil (grün) und GWP 100a (blau)	51
Abbildung 11:	Verbräuche der Kompaktklasse-Pkw im Jahr 2020 (durchschnittliche Nutzung)	56
Abbildung 12:	Verbräuche der LNF N1-III im Jahr 2020 (durchschnittliche Nutzung)	58
Abbildung 13:	Verbräuche der Sattelzüge (durchschnittliche Nutzung)	61
Abbildung 14:	Vorgehen zur Ableitung typischer Nutzungsmuster	63
Abbildung 15:	Fahrleistungsanteile auf verschiedenen Straßenkategorien....	65
Abbildung 16:	Hochlaufkurven für die Beimischung synthetischer Kraftstoffe für die Szenarien GreenLate und GreenSupreme	94
Abbildung 17:	Treibhauspotenziale je kWh der deutschen Netzstrommische nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate	98
Abbildung 18:	Treibhauspotenziale der Kraftstoffmische nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate (inkl. vollständiger Verbrennung) pro MJ Heizwert	100
Abbildung 19:	Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020, GreenLate)	103

Abbildung 20:	Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020 und 2030, GreenLate)	105
Abbildung 21:	Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2030, GreenLate und GreenSupreme)	106
Abbildung 22:	Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2030 und 2050, GreenSupreme)	107
Abbildung 23:	Treibhauspotenzial der LNF N1-III (Baujahr 2020, Szenario GreenLate)	108
Abbildung 24:	Treibhauspotenzial der Sattelzüge (Baujahr 2020 und 2030, GreenLate) bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)	109
Abbildung 25:	Treibhauspotenzial der Sattelzüge (Baujahr 2030, GreenLate und GreenSupreme) bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast) ..	110
Abbildung 26:	Treibhauspotenzial der Sattelzüge (Baujahr 2030 und 2050, GreenSupreme) bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)	111
Abbildung 27:	Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umweltwirkungskategorien und Inventargrößen für Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020, Szenario GreenLate)	113
Abbildung 28:	Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2050, Szenario GreenSupreme)	115
Abbildung 29:	Normierte Ergebnisse ausgewählter Umweltwirkungskategorien für leichte Nutzfahrzeuge und Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020, Szenario GreenLate)	117
Abbildung 30:	Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Sattelzüge mit 11 t Nutzlast (Baujahr 2030, Szenario GreenLate)	119
Abbildung 31:	Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Sattelzüge mit 11t Nutzlast (Baujahr 2050, Szenario GreenSupreme)	121
Abbildung 32:	Variation der Fahrzeuggröße und des Verbrauchs (Pkw, BJ 2020, GreenLate)	125
Abbildung 33:	Variation zentraler Batterieparameter (Pkw Kompaktklasse, BJ 2020, GreenLate)	126
Abbildung 34:	Variation der Platinbeladung der Brennstoffzelle (Pkw Kompaktklasse, FCEV und BEV BJ 2020, Green Late)	127
Abbildung 35:	Variation der Verkehrssituation (Pkw Kompaktklasse und LNF, BJ 2020, GreenLate)	128
Abbildung 36:	Variation der Lebensfahrleistung (Pkw Kompaktklasse, BJ 2020, GreenLate)	129
Abbildung 37:	Vergleich unterschiedlicher Nutzertypen (Pkw Kompaktklasse und LNF, BJ 2020, GreenLate)	130
Abbildung 38:	Variation des elektrischen Fahranteils (Pkw Kompaktklasse, BJ 2020, GreenLate)	131

Abbildung 39:	Variation der Beimischung von PtX aus EE (Pkw Kompaktklasse, BJ 2030)	133
Abbildung 40:	Variation der Akkutechnologie (Sattelzüge, BJ 2030, GreenLate)	134
Abbildung 41:	Variation der Verkehrssituation (Sattelzug, BJ 2020 und 2030, Green Late)	135
Abbildung 42:	Variation der Lebensfahrleistung (Sattelzug, BJ 2030, Green Late)	136
Abbildung 43:	Vergleich eines Sattelzugs im Fernverkehr (Standard) mit städtischem Verteiler-verkehr (Innerorts, 450.000 km Lebensfahrleistung, Baujahr 2030, Green Late)	137
Abbildung 44:	Variation des elektrischen Fahranteils von O-HEV auf Autobahnen (Sattelzug, BJ 2030, Green Late)	138
Abbildung 45:	Variation der Beimischung von EE-PtX zu Kraftstoffen (Sattelzug, BJ 2030)	139
Abbildung 46:	Treibhauspotenzial von strombasiert betriebenen Pkw mit Strommix 2030, reinem EE-Strom und dem gleitenden Mix nach GreenLate (Pkw Kompaktklasse, BJ 2030)	141
Abbildung 47:	Treibhauspotenzial von strombasiert betriebenen Sattelzügen mit Strommix 2030, reinem EE-Strom und dem gleitenden Mix nach GreenLate (Sattelzug, BJ 2030)	142
Abbildung 48:	Konzept der Akkunutzung nach Ende der ersten mobilen Anwendung	143
Abbildung 49:	Roadmap neue EU Batterie-Verordnung (Stand Juni 2023)	146
Abbildung 50:	Schematische Darstellung der Recyclingrouten	148
Abbildung 51:	Recyclingrouten nach globalen Kapazitäten	150
Abbildung 52:	Vergleich THG-Emissionen nach unterschiedlichen Recyclingrouten und Annahmen zu Sekundärquoten auf Basis eines NMC811 Akkus	152
Abbildung 53:	Verteilung der THG-Emissionen nach Prozessen und Inputmaterialien für das verbesserte hydrometallurgische Recyclingverfahren	153
Abbildung 54:	Anwendungsfelder für gebrauchte Traktionsbatterien	157
Abbildung 55:	Konzept Bilanzierung Second-Life mit Systemraumerweiterung	158
Abbildung 56:	Normierte Ergebnisse der Netzstrommische im Jahr 2020 und den Szenariojahren 2030, 2040 (GreenLate (GL) und GreenSupreme (GS)) und 2050 (GreenSupreme (GS)) in Einwohnerdurchschnittswerten pro kWh	161
Abbildung 57:	Normierte Ergebnisse der erneuerbaren Strommische zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe in den Jahren 2020, 2030 und 2050 (Szenario GreenSupreme) in Einwohnerdurchschnittswerten pro kWh	163

Abbildung 58:	Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umweltindikatoren für die Bereitstellung der Kraftstoffmixe in den Jahren 2020 und 2050.....	165
Abbildung 59:	Normierte Ergebnisse aller untersuchten Ressourcenindikatoren für die durchschnittlichen Kraftstoffmixe in den Jahren 2020 und 2050	166
Abbildung 60:	Treibhauspotenzial der synthetischen Kraftstoffe in dieser Studie.....	168
Abbildung 61:	Treibhauspotenzial der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Deutschland und Marokko.....	169
Abbildung 62:	Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Marokko und Deutschland mit unterschiedlichen EE-Quellen (2030/2050; AEL, DAC)	170
Abbildung 63:	Treibhauspotenziale der Bereitstellung von S-CNG und Wasserstoff aus Marokko und Deutschland auf unterschiedlichen Transportwegen (2030/2050; WindOn, AEL)	171
Abbildung 64:	Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen Elektrolysetechnologien (2020/2030/2050)	172
Abbildung 65:	Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen CO ₂ -Quellen (2020/2030/2050)	173
Abbildung 66:	Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen Synthesetechnologien (2020/2030/2050)	174
Abbildung 67:	Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung mit Baujahr 2020...176	
Abbildung 68:	Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung 2020 und 2030	177
Abbildung 69:	Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung 2030 und 2050	178
Abbildung 70:	Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2020 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug.....	180
Abbildung 71:	Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2020 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug	181
Abbildung 72:	Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2030 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug.....	182
Abbildung 73:	Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2030 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug	183

Abbildung 74:	Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2050 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug.....	184
Abbildung 75:	Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2050 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug	185
Abbildung 76:	Treibhauspotenzial der Sattelzugherstellung 2030.....	186
Abbildung 77:	Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2030 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug.....	188
Abbildung 78:	Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2030 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug	190
Abbildung 79:	Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2050 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug.....	192
Abbildung 80:	Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2050 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug	194
Abbildung 81:	Treibhauspotenzial der Akkus mit Baujahr 2020: NMC622 und LFP	195
Abbildung 82:	Treibhauspotenzial der Akkus mit Baujahr 2030: NMC811, LFP und Li-Luft.....	196
Abbildung 83:	Treibhauspotenzial der Akkus - Vergleich Baujahr 2020-2050	197
Abbildung 84:	LCIA-Ergebnisse (Umweltindikatoren) der Akkus mit Baujahr 2020-2050.....	198
Abbildung 85:	LCIA-Ergebnisse (Ressourcenindikatoren) der Akkus mit Baujahr 2020-2050	199
Abbildung 86:	LCIA-Ergebnisse - NMC622-Akku (150 Wh/kg) BJ 2020	200
Abbildung 87:	LCIA-Ergebnisse - LFP-Akku (100 Wh/kg) BJ 2020	201
Abbildung 88:	LCIA-Ergebnisse - Li-Luft-Akku (1500 Wh/kg) BJ 2050	202
Abbildung 89:	Beiträge von Materialgruppen zu Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2020	204
Abbildung 90:	Beiträge von Materialgruppen zu Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2050	206
Abbildung 91:	Beiträge einzelner Materialien zu den Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2020 für Pkw und die Antriebstechnologien Benzin, BEV und FCEV	208
Abbildung 92:	Beiträge einzelner Materialien zu den Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2050 für Pkw und die Antriebstechnologien Benzin, BEV und FCEV	209

Abbildung 93:	Beiträge einzelner Materialien, des Energieeinsatzes und von Transporten zu den Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus Windenergieanlagen (76 % onshore, 24 % offshore) 2050	211
Abbildung 94:	Beiträge einzelner Materialien, des Energieeinsatzes und von Transporten zu den Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus PV-Anlagen 2050	212

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Untersuchte Antriebs-Fahrzeug-Kombinationen	43
Tabelle 2:	Liste der betrachteten Prozessschritte zur Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe	44
Tabelle 3:	Einwohnerdurchschnittswerte der Belastung in Deutschland 2020	46
Tabelle 4:	Verhältnis der Ergebnisse für 2050 und 2020 im relativen Vergleich für alle Datensätze in ecoinvent und das Szenario GreenSupreme	51
Tabelle 5:	Elektro-Pkw Neuzulassungen (Kompaktklasse) nach KBA (2020/2021).....	54
Tabelle 6:	Eigenschaften der Pkw Neuzulassungen 2020 nach KBA.....	55
Tabelle 7:	Entwicklung der Reichweiten und Energiespeichergrößen der Kompaktklasse-Pkw	56
Tabelle 8:	Effizienzverbesserungen der Kompaktklasse-Pkw	57
Tabelle 9:	Eigenschaften ausgewählter LNF mit alternativem Antrieb.....	57
Tabelle 10:	Entwicklung der Reichweiten und Energiespeichergrößen der LNF N1-III	59
Tabelle 11:	Effizienzverbesserungen der LNF N1-III.....	59
Tabelle 12:	Eigenschaften der Last-/ Sattelzüge (40 t zGG)	60
Tabelle 13:	Effizienzverbesserungen der LZ/SZ (40 t zGG).....	61
Tabelle 14:	Angaben zur Lebensfahrleistung	63
Tabelle 15:	Jahresfahrleistung der betrachteten Fahrzeugtypen in Kilometer	65
Tabelle 16:	Utility Faktoren für PHEV bei Pkw und LNF	67
Tabelle 17:	Bauteile im modularen Ökobilanzmodell für Pkw und LNF	68
Tabelle 18:	Literaturübersicht Ökobilanzstudien zu Last-/ Sattelzügen	69
Tabelle 19:	Bauteile im modularen Ökobilanzmodell für Sattelzüge.....	70
Tabelle 20:	Effizienz durch erweitertes hydrometallurgisches Recycling...	76
Tabelle 21:	Erzeugungs-Strommix Deutschland 2020.....	76
Tabelle 22:	Datenquellen für die Strommixe der Szenarien und Regionen	77
Tabelle 23:	Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenSupreme in Deutschland.....	78
Tabelle 24:	Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenSupreme in Europa (ohne Deutschland)	79
Tabelle 25:	Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenSupreme Welt (ohne Europa)	79
Tabelle 26:	Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenLate in Deutschland	80
Tabelle 27:	Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenLate in Europa (ohne Deutschland).....	80

Tabelle 28:	Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenLate Welt (ohne Europa)81
Tabelle 29:	Lebensdauer und Volllaststunden von Windenergieanlagen in Abhängigkeit von Land und Bezugsjahr.....82
Tabelle 30:	Lebensdauer und Volllaststunden von Freiflächen-Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit von Land und Bezugsjahr82
Tabelle 31:	Lebensdauer und Volllaststunden von solarthermischen Kraftwerken in Marokko in 2030 und 2050.....83
Tabelle 32:	Zusammensetzung der erneuerbaren Strommixe zur Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland und Marokko (GreenLate/GreenSupreme).....85
Tabelle 33:	Anteile der Biomassearten in Biokraftstoffen 202088
Tabelle 34:	Ausgewählte Betriebsparameter der modellierten Elektrolysetechnologien. Quelle: (Liebich et al. 2020)89
Tabelle 35:	Ausgewählte Betriebsparameter der modellierten CO ₂ -Abscheideprozess.90
Tabelle 36:	Ausgewählte Betriebsparameter der modellierten Synthesetechnologien.92
Tabelle 37:	Zusammensetzung (fossil/biogen/synthetisch) der angenommenen Kraftstoffmixe nach den Szenarien GreenLate und GreenSupreme in Prozent (energetischer Anteil)93
Tabelle 38:	Standardparameter für die Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe 2020, 2030 und 2050.....94
Tabelle 39:	Angenommene Entwicklung der Reichweiten und nutzbaren Akkugrößen der Elektrofahrzeuge.....97
Tabelle 40:	Technologieniveau und Hintergrundsystem der Fahrzeug- und Akkuherstellung.....97
Tabelle 41:	Treibhauspotenziale der deutschen Netzstrommixe nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate99
Tabelle 42:	Treibhauspotenziale der vollständig erneuerbaren Strommixe zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen.....99
Tabelle 43:	Durchschnittliche Beimischung synthetischer und biobasierter Kraftstoffe über die Lebensdauer der betrachteten Fahrzeugtypen101
Tabelle 44:	Betrachtete Standardfälle102
Tabelle 45:	Übersicht zentraler Gesetze, Verordnungen und Übereinkommen zur End-of-Life Behandlung von Traktionsakkus.....144
Tabelle 46:	Vorgegebene Sekundäranteile in Aktivmaterialien des Akkus nach neuer EU-Batterie-Verordnung.....147
Tabelle 47:	Auswahl Second-Life Strategien der Automobilhersteller155

Tabelle 48:	Abweichungen ausgewählter Umweltwirkungen von Kompaktklasse-Pkw je Fahrzeugkilometer gegenüber dem Fahrzeug mit Benzinantrieb des jeweils gleichen Baujahres (2020 und 2030 GreenLate, 2050 GreenSupreme)218
Tabelle 49:	Abweichungen ausgewählter Umweltwirkungen von Sattelzügen je Fahrzeugkilometer gegenüber dem Fahrzeug mit Dieselantrieb des gleichen Baujahres (2030 GreenLate, 2050 GreenSupreme)219
Tabelle 50:	Liste der ausgewählten Bereitstellungspfade236

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
AP	Versauerungspotenzial (engl.: Acidification Potential)
BEV	Fahrzeug mit batterieelektrischem Antrieb (engl.: Battery Electric Vehicle)
BJ	Baujahr
BMS	Batteriemanagementsystem
BtL	Herstellung von Flüssigkraftstoff aus Biomasse (engl.: Power and Biomass to Liquid)
CFC-11eq	Trichlorfluormethanäquivalente (engl.: Chlorofluorocarbon-11 Equivalents)
CNG	Komprimiertes Erdgas (engl.: Compressed Natural Gas)
CSP	Solarthermische Kraftwerke (engl.: Concentrated Solar Power)
DAC	CO ₂ -Abscheidung aus der Luft (engl.: Direct Air Capture)
EP_aq	Eutrophierungspotenzial aquatisch
EP_ter	Eutrophierungspotenzial terrestrisch
FCEV	Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle)
FT	Fischer-Tropsch(-Synthese)
GL	Szenario GreenLate
GS	Szenario GreenSupreme
GWP	Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential)
H₂	Wasserstoff
H2-ICE	Wasserstoffverbrenner-Fahrzeug
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
ICE	Verbrennungsmotor (engl.: Internal Combustion Engine)
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Ökobilanz (engl.: Life Cycle Assessment)
LCI	Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory)
LCIA	Wirkungsabschätzung (engl.: Life Cycle Impact Assessment)
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LHV	(unterer) Heizwert (engl.: Lower Heating Value)
Li	Lithium
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Verflüssigtes Erdgas (engl.: Liquefied Natural Gas)
LZ/SZ	Lastzüge/Sattelzüge
MeOH	Methanol
MtG	Methanol-zu-Benzin(-Synthese) (engl.: Methanol-to-Gasoline)

NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (engl.: Nickel Cobalt Aluminium Oxide)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (engl.: Nickel Manganese Cobalt Oxide)
NZL	Neuzulassungen
O-BEV	Oberleitungsbatterieelektrisches Fahrzeug
O-HEV	Oberleitungs-Hybrid-Fahrzeug
ODP	Ozonabbaupotenzial (engl.: Ozone Depletion Potential)
PbTL	Herstellung von Flüssigkraftstoff mit elektrischem Strom und Biomasse (engl.: Power and Biomass to Liquid)
PEMEL	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse
PHEV	Plug-in-Hybrid-Fahrzeug
Pkw	Personenkraftwagen
PGM	Platingruppenmetalle
PM2.5	Feinstaubbelastung durch Partikel <2,5 µm (engl.: Particulate Matter)
POCP	Photochemische Ozonbildung (engl.: Photochemical Ozone Creation Potential)
PtG	Herstellung von gasförmigem Kraftstoff mit elektrischem Strom (engl.: Power to Gas)
PtL	Herstellung von Flüssigkraftstoff mit elektrischem Strom (engl.: Power to Liquid)
PV	Photovoltaik
R-10	Tetrachlormethan (Kühlmittel, engl. ‚Refrigerant‘ → R)
R-116	Hexafluorethan (Kühlmittel, engl. ‚Refrigerant‘ → R)
SMR	Dampfreformierung (von Erdgas) (engl.: Steam Methane Reforming)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
S-CNG	Synthetisches komprimiertes Erdgas (engl.: Synthetic Compressed Natural Gas)
S-LNG	Synthetisches verflüssigtes Erdgas (engl.: Synthetic Liquefied Natural Gas)
SNG	Synthetisches Erdgas (engl.: Synthetic Natural Gas)
SUV	Geländelimousine bzw. Stadtgeländewagen (engl.: Sport Utility Vehicle)
TFE	Tetrafluorethylen
WindOff	Windenergie auf See (offshore)
WindOn	Windenergie an Land (onshore)
WEA	Windenergieanlage
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheels
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

Die Energiewende im Verkehr und der damit verbundene Einsatz alternativer Antriebe und Kraftstoffe ist in den nächsten Jahren dringend notwendig, um das langfristige Ziel eines nahezu treibhausgasneutralen Verkehrs in Deutschland bis zum Jahr 2045 zu erreichen. Zur Debatte stehen dabei sehr unterschiedliche Kombinationen von Antriebskonzepten und Optionen zur Kraftstoff- bzw. Energiebereitstellung. Deswegen werden in dieser Studie die Umweltwirkungen von Personenkraftwagen, leichten Nutzfahrzeugen sowie Sattelzügen umfassend über den gesamten Lebensweg bewertet. Betrachtet wird die gesamte Prozesskette von der Herstellung der Fahrzeuge über den Betrieb bis zur Entsorgung sowie alle vorgelagerten Prozesse. Dabei kommt der Bereitstellung des (Fahr)stroms sowie der Kraftstoffe eine besondere Bedeutung zu. Neben dem Treibhauspotenzial werden auch weitere relevante Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung, Feinstaub, Ozonabbau, Sommersmog sowie Energie- und Ressourcenaufwand, Hemerobie und Wasserbedarf bewertet. Aufgrund der unterschiedlichen technischen Reifegrade und der dynamischen Entwicklung wird neben dem aktuellen Entwicklungsstand der Fahrzeuge und des Energiesystems auch die mögliche mittelfristige (2030) und langfristige (2050, Zielpunkt: THG-Neutralität) Entwicklung betrachtet. Neben den heute noch vorherrschenden Benzin- und Dieselfahrzeugen werden auch alternative Antriebsarten wie Erdgas- und Wasserstofffahrzeuge sowie batterieelektrische Fahrzeuge und Hybridlösungen untersucht.

Im Folgenden werden die Hauptergebnisse der Studie für generische Kompaktklasse-Pkw sowie für Sattelzüge mit 40 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht kurz vorgestellt und die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Umweltbilanz benannt. Dafür werden für die zukünftigen Entwicklungen bei den Fahrzeugen sowohl verbrauchs- als auch technologieseitig eine Reihe von Annahmen getroffen. Grundidee ist, eine robuste Abschätzung der erwartbaren Umweltwirkungen treffen zu können und einen fairen Vergleich der Antriebsarten zu ermöglichen. Den gesamtwirtschaftlichen Rahmenbedingungen kommt dabei eine zentrale Rolle zu. So beeinflusst die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom für den Fahrzeugbetrieb oder für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen maßgeblich die Umweltbilanz. Zentrale Annahmen müssen daher getroffen werden, wie die Energiewende in Deutschland, Europa und dem Rest der Welt fortschreitet, wie schnell die erneuerbaren Energien ausgebaut werden und wie schnell die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen an- und hochlaufen kann. Auch wenn der ungünstige Fall denkbar ist, dass synthetische Kraftstoffe anfangs mit Strommix sowie unter Einsatz von fossilem CO₂ (z. B. aus der Abscheidung in Zementwerken) betrieben werden, wird hier nur der (wünschenswerte) Fall der CO₂- Abscheidung aus der Luft sowie der Einsatz von rein erneuerbarem Strom untersucht.

Für die Entwicklungen im Hintergrundsystem sowie bei der Strombereitstellung und bei den PtL/ PtG Mengen orientieren wir uns in diesem Projekt an den RESCUE Szenarien GreenLate (GL) und GreenSupreme (GS) des Umweltbundesamtes. GreenLate unterstellt eine etwas konservativere Entwicklung und GreenSupreme eine sehr ambitionierte Entwicklung der gesellschaftlichen Defossilisierung. Für das Jahr 2050 wird in beiden Szenarien eine vollständige, weltweite Treibhausgasneutralität unterstellt. Die für diesen Zeitpunkt ermittelten Umweltwirkungen der Fahrzeuge stehen in diesem Projekt dabei weniger für ein konkretes Jahr, sondern exemplarisch für eine Zukunft, in der die Transformation zur Treibhausgasneutralität abgeschlossen ist.

Grundsätzlich wird die Umweltbilanz der Fahrzeuge von folgenden Faktoren beeinflusst:

- **Fahrzeugverbräuche und -eigenschaften:** Wir gehen im Projekt davon aus, dass es bei den verbrennungsmotorischen Antriebskonzepten in den nächsten Jahren noch gewisse

Effizienzsteigerungen gibt – unter anderem durch die vollständige Hybridisierung der Pkw. Diese entwickeln sich jedoch aufgrund der stärkeren Verbreitung der Elektromobilität ab 2030 nicht mehr nennenswert weiter. Bei den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (Brennstoffzelle sowie batterieelektrische) gehen wir davon aus, dass die Fahrzeugreichweiten dem aktuellen Trend folgend bis 2030 weiter steigen (z. B. beim Kompaktklasse-BEV von 55 kWh Akkukapazität in 2020 auf 80 kWh ab 2030) und danach stagnieren. Dabei bleibt das Fahrzeuggewicht annähernd konstant, da auch die Akkutechnologien sich weiterentwickeln und die Akkus durch höhere Energiedichten und andere Zellchemien leichter werden. Zudem nehmen wir an, dass sich bei den Elektrofahrzeugen Effizienzsteigerungen sowie der Einsatz in breiteren, oftmals ungünstigeren Einsatzprofilen ausgleichen und die Verbräuche damit annähernd konstant sind.

- ▶ **Entwicklungen bei der Fahrzeug- und Akkuherstellung:** Durch technologische Weiterentwicklungen bei den Brennstoffzellen (insbesondere eine verringerte Platinbeladung) sowie bei den Akkus (durch veränderte Zellchemien mit höheren Energiedichten sowie dem Aufbau einer europäischen Zellfertigung) werden hier mögliche Verbesserungen abgebildet.
- ▶ **Umweltwirkungen der eingesetzten Energieträger:** Relevant sind hier vor allem die Verbrennungsemissionen der fossilen Kraftstoffe sowie die Veränderungen bei den Anteilen erneuerbarer Energie. In den RESCUE Szenarien nimmt die PtL-/PtG-Beimischung zum Kraftstoff kontinuierlich zu. Dabei werden in GreenSupreme bereits im Jahr 2030 rund 6 % synthetische Kraftstoffe erwartet. Diese steigen bis zum Jahr 2040 auf über 30 % an. In GreenLate hingegen startet der Hochlauf synthetischer Kraftstoffe erst im Jahr 2040. Beide Szenarien erreichen 100 % PtG-/PtL-Kraftstoff im Jahr 2050, wobei ein nicht-linearer Hochlauf angenommen wird. Alle (teil)elektrischen Fahrzeuge werden immer mit dem Netzstrommix bzw. dem durchschnittlichen deutschen Kraftstoffmix betrieben. Dabei wird durch die Verwendung von gleitenden Mixen der Tatsache Rechnung getragen, dass ein heute zugelassenes Fahrzeug einen sich über seine Lebensdauer ändernden Energiemix sehen wird. Im Strombereich gehen wir davon aus, dass der Netzstrommix von 429 g CO₂eq pro kWh in 2020 auf 254 g CO₂eq/ kWh (GreenLate) bzw. 113 g CO₂eq/ kWh (GreenSupreme) in 2030 sinken wird. Bei vollständiger Treibhausgasneutralität betragen die verbleibenden Restemissionen der Strombereitstellung nur noch 8 g CO₂eq/ kWh in 2050.
- ▶ **Veränderungen im Hintergrundsystem durch eine fortschreitende Defossilisierung:** Die langfristige Defossilisierung der gesamten Wirtschaft führt auch zu sich ändernden Umweltwirkungen der Herstellung von (Energie)Infrastruktur und Fahrzeugen. Diese Veränderungen im so genannten Hintergrundsystem wirken sich auf den gesamten Fahrzeuglebensweg aus und betreffen daher sowohl die Fahrzeugbereitstellung als auch die Nutzung sowie die eingesetzten Energieträger. Diese Transformation wird ebenfalls gemäß des UBA-Szenarios GreenSupreme abgebildet.

Bei den gezeigten Ergebnisgrafiken werden teilweise die einzelnen Lebenswegabschnitte ausgewiesen, um deren Einfluss auf die Gesamtbilanz zu verdeutlichen. Dabei wird folgende Aufteilung vorgenommen:

- ▶ Fzg (Basis): bezieht sich auf die Herstellung des Fahrzeuges (inklusive aller Bestandteile von Rumpf und Antriebstrang) aber ohne Traktionsbatterie
- ▶ Akku: bezieht sich auf die Herstellung der Traktionsbatterie

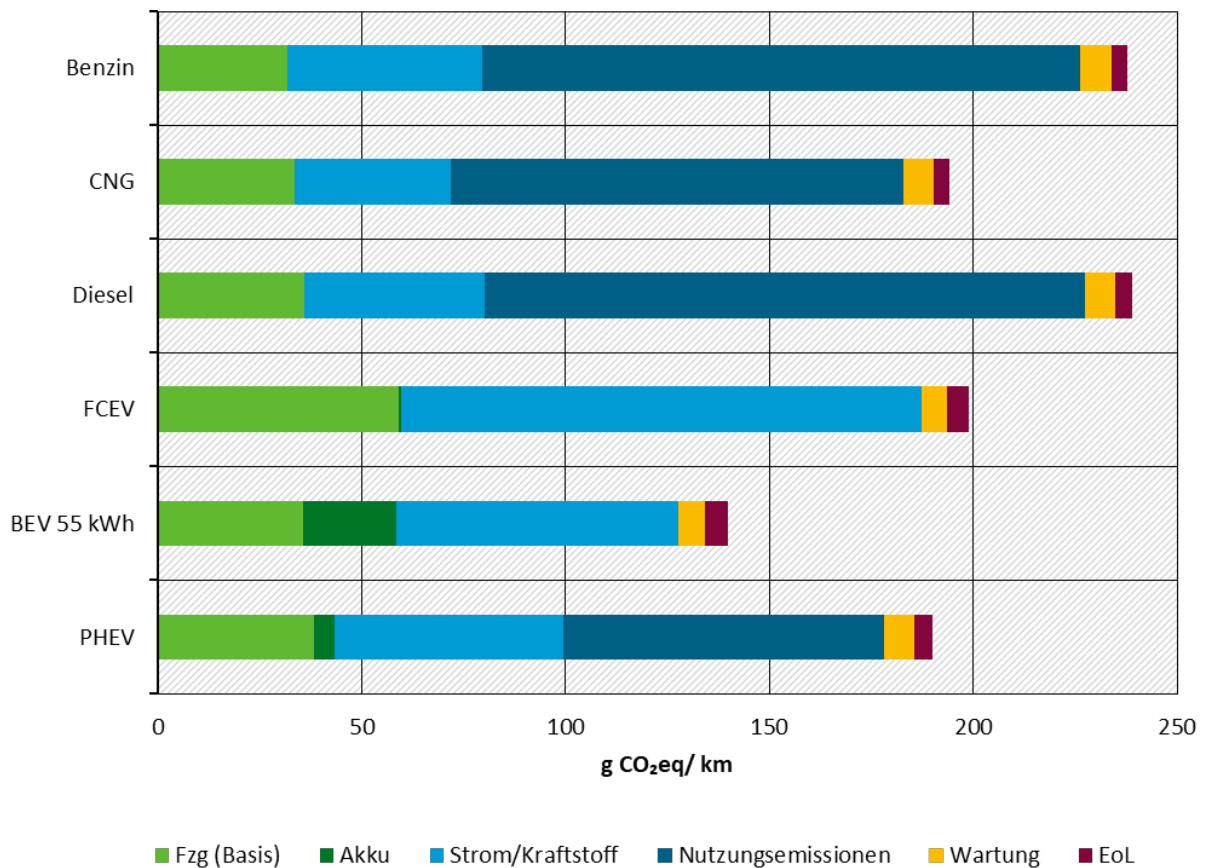
- ▶ Strom/ Kraftstoff: bezieht sich auf die Strom- und Kraftstoffbereitstellung (inklusive der Lade- und Tankstelleninfrastruktur sowie der Oberleitungsinfrastruktur bei den O-Lkw)
- ▶ Nutzungsemissionen: bezieht sich auf die direkten bzw. lokalen Abgasemissionen sowie die Abriebemissionen (z. B. durch Bremsen- und Reifenabrieb) der Fahrzeuge im Betrieb (rein elektrische Fahrzeuge verursachen zwar keine direkten Abgasemissionen sind aber dennoch für Emissionen aus dem Abrieb verantwortlich, welche eine ähnliche Höhe wie die konventionellen Fahrzeuge aufweisen)
- ▶ Wartung: bezieht sich auf die Wartungsaufwendungen für die Fahrzeuge
- ▶ EoL: End of Life bezieht sich auf die Entsorgung des Fahrzeuges inklusive Traktionsbatterie

Alle angegebenen Emissionswerte werden immer pro Fahrzeugkilometer ausgewiesen. Dabei wird bei den Sattelzügen von einer einheitlichen mittleren Beladung von 11 t Nutzlast ausgegangen.

Personenkraftwagen

Werden die Pkw mit Baujahr 2020, dem Startpunkt der Entwicklung, im weniger ambitionierten Szenario GreenLate betrachtet zeigt sich, dass die Fahrzeuge mit konventionellem Benzin- oder Dieselantrieb das höchste Treibhauspotenzial je Fahrzeugkilometer haben (Abbildung 1). Trotz der Effizienzvorteile des Dieselmotors gegenüber dem Ottomotor hat ein heutiger Diesel-Kompaktklasse-Pkw mit 239 g CO₂eq pro Kilometer ein vergleichbares Treibhauspotenzial wie ein Benzin-Pkw mit 238 g CO₂eq pro Kilometer, da die am Markt angebotenen Modelle oft leistungsstärker und schwerer sind als die Benzin-Kompaktklasse-Pkw. Erdgas-Pkw schneiden mit 194 g CO₂eq pro Kilometer besser ab, was vor allem am geringeren Verbrauch als bei Benzin- oder Diesel-Pkw liegt. Da im Szenario GreenLate synthetische Kraftstoffe erst ab dem Jahr 2040 in nennenswerter Menge produziert werden, fahren die Fahrzeuge noch mit fossilen Kraftstoffen mit geringfügigen Beimischungen von Biokraftstoffen. Der FCEV-Pkw mit 199 g CO₂eq pro Kilometer sowie der PHEV-Pkw mit 190 g CO₂eq pro Kilometer haben ähnliche Treibhauspotenziale wie der CNG-Pkw und damit heute nur geringe Vorteile gegenüber Benzin- und Diesel-Pkw. Das liegt unter anderem daran, dass aktuell der Wasserstoff für die Brennstoffzellenfahrzeuge noch aus der Reformierung von fossilem Erdgas stammt. Bei den Plug-In-Hybriden führen vor allem die im Realbetrieb relativ geringen elektrischen Fahranteile zu einer ähnlichen Bilanz wie bei CNG- oder FCEV-Pkw. Das geringste Treibhauspotenzial von 140 g CO₂eq pro Kilometer weist heute der Elektro-Pkw (mit 55 kWh Akku) auf, der mit Netzstrom fährt. Er liegt damit um 41 % unter dem Benzin-Pkw.

Abbildung 1: Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw im Startpunkt (Baujahr 2020, GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

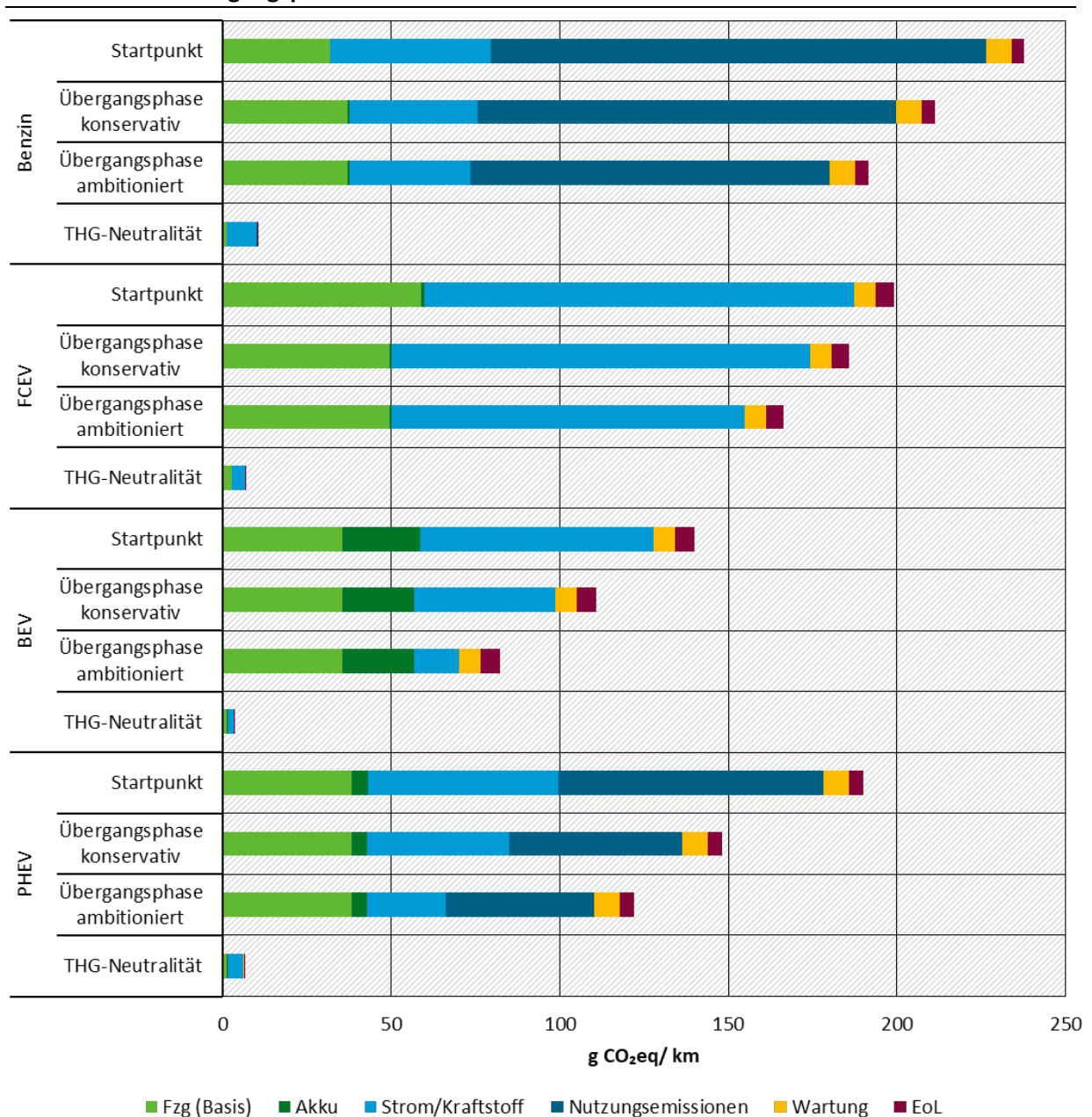
Eine Analyse der Beiträge der einzelnen Lebenswegabschnitte zum Treibhauspotenzial zeigt, dass bei den Pkw mit Verbrennungsmotor aktuell die direkten Nutzungsemissionen den größten Beitrag haben – bei Diesel- und Benzin-Pkw liegen diese bei 147 g CO₂eq pro Kilometer. Den zweitgrößten Posten bei den konventionellen Pkw bzw. den größten Posten bei den Pkw mit alternativen Antrieben macht das Treibhauspotenzial zur Bereitstellung des Stroms- bzw. der Kraftstoffe aus. Schließlich folgt die Fahrzeugherstellung (inklusive der Herstellung der Traktionsbatterie beim BEV-Pkw), wobei die Beiträge der Herstellung bei den Pkw mit alternativen Antrieben deutlich höher liegen als bei den konventionellen. Bei allen Antriebskonzepten haben die Wartung sowie das End-of-Life den geringsten Einfluss auf das Treibhauspotenzial.

Werden die zukünftigen Entwicklungen ab 2030 (Übergangsphase) betrachtet, zeigen sich schon im konservativen Szenario GreenLate Verbesserungen beim Treibhauspotenzial für alle Antriebsarten. Dabei kann der BEV-Pkw seinen Vorsprung gegenüber den anderen Antriebsarten ausbauen (Abbildung 2). Die Verbrauchsverbesserungen durch die Hybridisierung der konventionellen Pkw überkompensieren die Mehremissionen in der Herstellung. Beim FCEV-Pkw führt vor allem die verringerte Platinbeladung in der Brennstoffzelle zu geringeren Umweltlasten. Die Herstellung des BEV-Pkw verbessert sich trotz deutlich größerem Akku sogar leicht. Zusätzlich gehen die Treibhauspotenziale des eingesetzten Strommixes deutlich zurück. Wird ein ambitionierteres Fortschreiten der Energiewende

unterstellt, wird dieser Effekt noch deutlicher, da die Potenziale an PtL/PtG-Kraftstoffen auch bei einem 2030 neuzugelassenen Pkw noch sehr begrenzt sind.

Bei allen Antriebsarten zeigt sich, dass die vollständige Transformation hin zu einer Treibhausgasneutralität das Treibhauspotenzial um mehr als 95 % gegenüber dem Startpunkt senkt. Dennoch gibt es verbleibende, nach aktuellem Stand der Technik nicht vermeidbare, Treibhausgasemissionen, so dass hier nicht Nullemissionen erreicht werden.

Abbildung 2: Entwicklungen beim Treibhauspotenzial des Kompaktklasse-Pkw in Startpunkt, Übergangsphase sowie THG-Neutralität

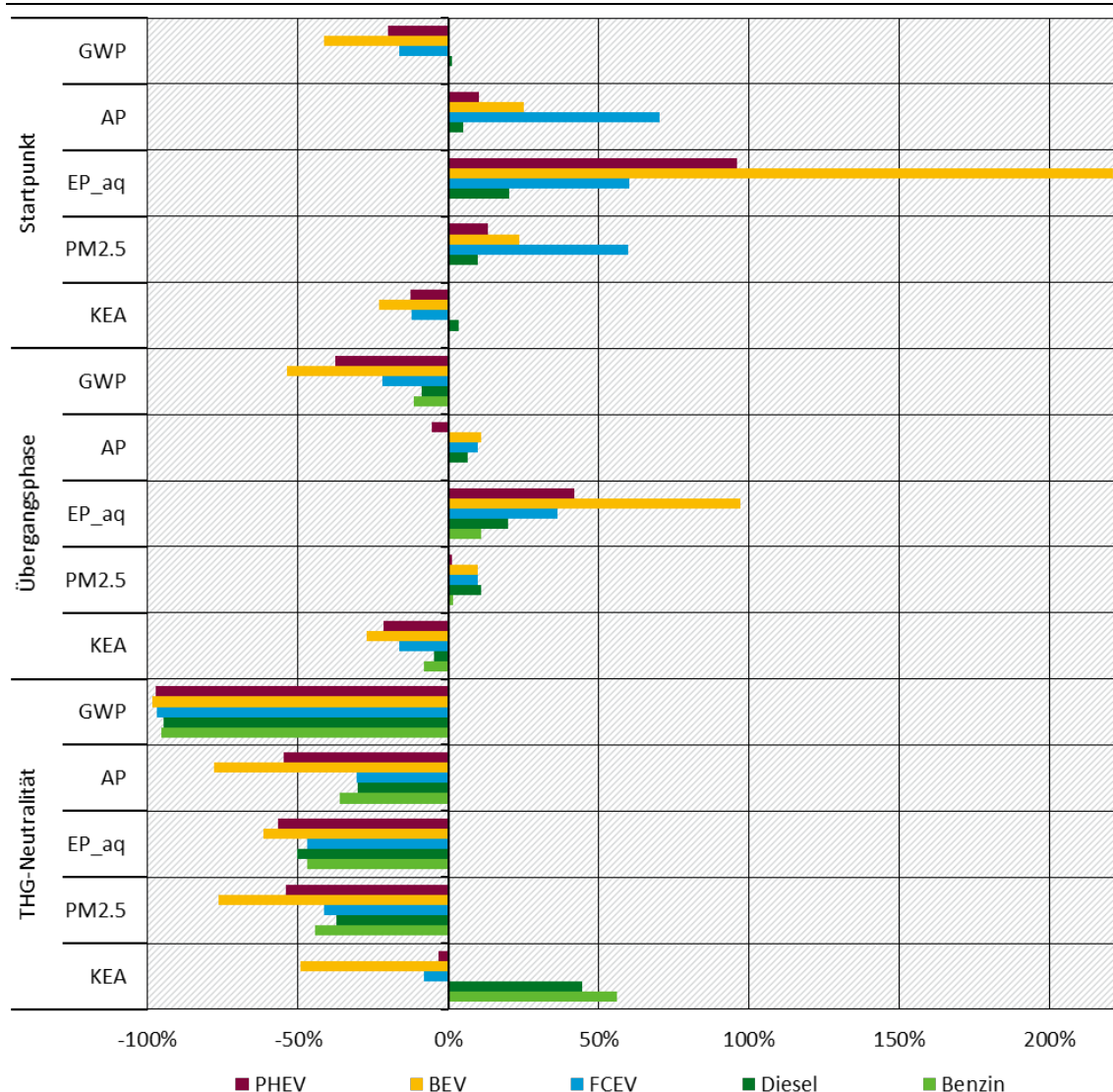


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Anmerkung: Startpunkt: Baujahr 2020 GreenLate / Übergangsphase konservativ (Baujahr 2030 GreenLate) / Übergangsphase ambitioniert (Baujahr 2030 GreenSupreme) / THG-Neutralität (Baujahr 2050 GreenSupreme)

Neben dem Treibhauspotenzial werden in dieser Studie auch die weiteren Umweltwirkungen anhand von auf Einwohnerdurchschnittswerte normierten Ergebnissen ausgewertet. Als relevante Kategorien haben sich dabei die aquatische Eutrophierung (EP_aq), die Feinstaubbelastung (PM2.5), die Versauerung (AP) sowie der kumulierte Energieaufwand (KEA) gezeigt.

Abbildung 3: Vergleich ausgewählter Umweltwirkungen von Kompaktklasse-Pkw mit dem Benzin-Pkw Baujahr 2020 bezogen auf den km



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Anmerkung: Berechnung der relativen Änderungen gegenüber dem Benzin-Pkw im Startpunkt (Baujahr 2020, GreenLate) zur Übergangsphase (Baujahr 2030, GreenLate) und THG-Neutralität (Baujahr 2050, GreenSupreme)

Dabei zeigt sich, dass der Diesel-Pkw in allen Baujahren und in den meisten Wirkungskategorien nur minimal schlechter als der Benzin-Pkw abschneidet. Der CNG-Pkw liegt fast durchgängig etwas niedriger als Benzin- oder Diesel-Pkw. Alle drei Konzepte haben in einer treibhausgasneutralen Welt deutliche Nachteile gegenüber den Pkw mit alternativen Antrieben, da die Bereitstellung der PtL/ PtG- Kraftstoffe mit hohen Konversionsverlusten – und damit mit einem hohen Bedarf an Stromerzeugungsanlagen – einhergeht.

FCEV-Pkw haben bis 2030 nur leichte Vorteile beim Treibhauspotenzial sowie beim KEA gegenüber dem Benzin-Pkw und weisen eine deutlich schlechtere Bilanz in den weiteren Wirkungskategorien (Versauerung, aquatische Eutrophierung und Feinstaubbelastung) auf. Dies ist vor allem auf die Herstellung der Brennstoffzelle und zurückzuführen. Erst in einer weitestgehend treibhausgasneutralen Welt ziehen sie mit den Benzin-/ Diesel- und CNG-Pkw gleich.

Die BEV-Pkw haben in allen Baujahren das geringste Treibhauspotenzial und liegen bereits heute beim kumulierten Energieaufwand unter dem Benzin-Pkw. Dafür liegen sie aktuell in einigen anderen Umweltwirkungen über dem Benzin-Pkw, dies betrifft vor allem die Versauerung sowie in geringerem Maße auch Feinstaub sowie die aquatische Eutrophierung. Diese Kategorien werden durch die Herstellung des Akkus getrieben. Zwar gehen Feinstaub, aquatische Eutrophierung sowie Versauerung in der Übergangsphase im Baujahr 2030 bereits deutlich zurück, sie liegen allerdings erst in einer vollständigen Treibhausgasneutralität unter denen des heutigen Benzin-Pkw. In einer treibhausgasneutralen Welt schneidet der BEV-Pkw schließlich in allen relevanten Wirkungskategorien besser ab als alle anderen Konzepte.

Der PHEV-Pkw liegt fast durchgängig zwischen dem Benzin-Pkw und dem BEV-Pkw. Durch die kleineren Akkus verringern sich die negativen Auswirkungen im Bereich von Versauerung und Feinstaub heute und bis 2030 gegenüber dem reinen BEV-Pkw. Da der PHEV-Pkw jedoch durch die (auch bei steigendem elektrischen Fahranteil) relevanten verbrennungsmotorischen Anteile weiterhin Benzin zum Betrieb benötigt, liegt sein Treibhauspotenzial durchgängig deutlich über dem BEV-Pkw.

Werden die Beiträge der einzelnen Lebenswegabschnitte betrachtet zeigt sich, dass die direkten Nutzungsemissionen in den Wirkungskategorien abseits des Treibhauspotenzials einen geringen Beitrag liefern und hier vor allem die Fahrzeugherstellung inklusive Akku sowie die Strom- und Kraftstoffbereitstellung relevant sind.

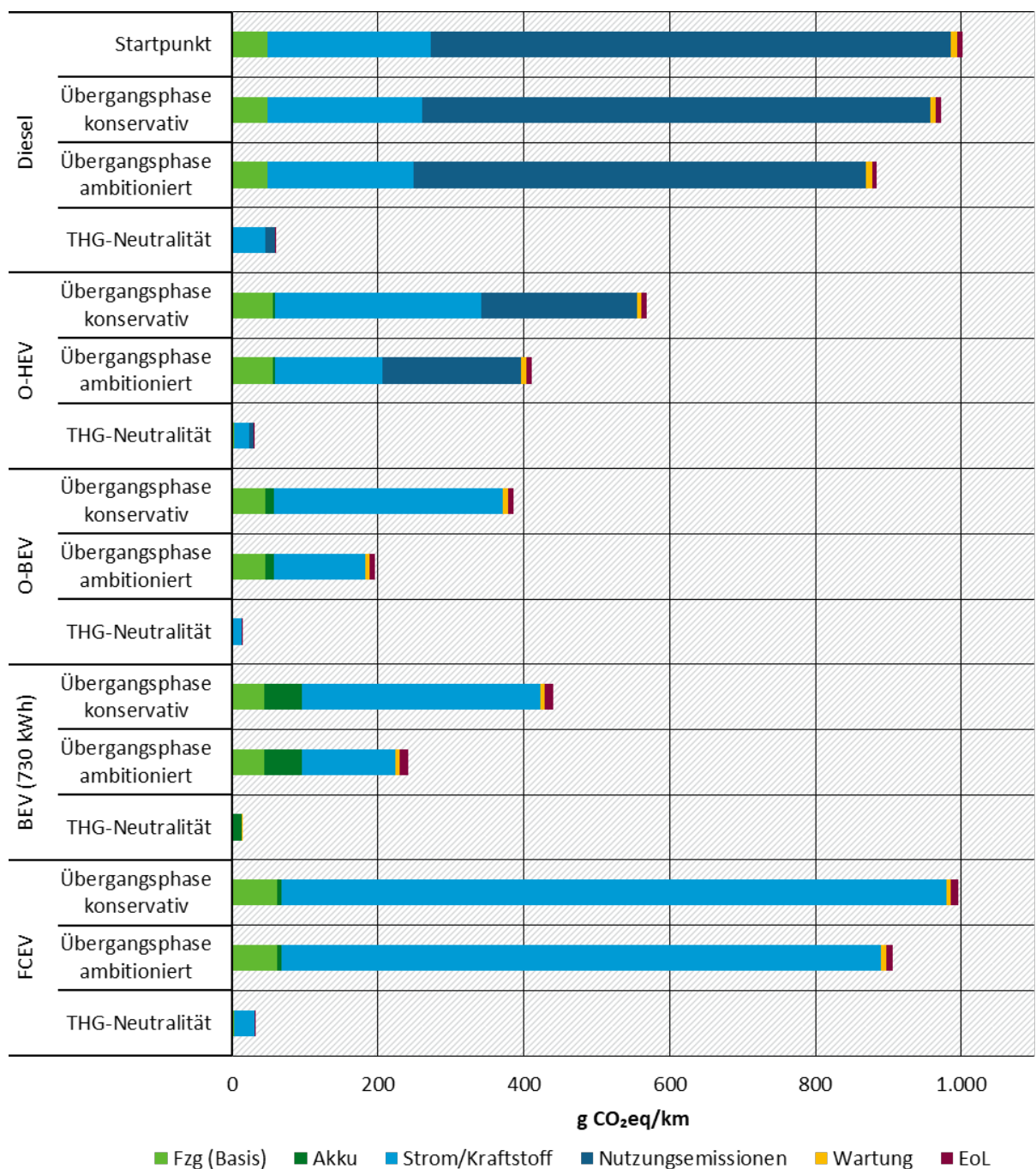
Bei den leichten Nutzfahrzeugen zeigen sich ähnliche Trends wie bei den Personenkraftwagen, daher werden diese hier nicht dargestellt.

Sattelzüge

Ein heutiger Diesel-Sattelzug mit 40 t zulässigem Gesamtgewicht hat bei einer mittleren Beladung ein Treibhauspotenzial von etwa 1000 g CO₂eq/km, wobei das meiste davon (937 g CO₂eq/km) auf die Kraftstoffverbrennung und -bereitstellung zurückzuführen sind.

Da die Einführung von Sattelzügen mit alternativen Antrieben erst in der Übergangsphase um 2030 erfolgt, wird in Abbildung 4 das Treibhauspotenzial nur für das Baujahr 2030 im Szenario GreenLate (konservativ) und im Szenario GreenSupreme (ambitioniert), sowie für die treibhausgasneutralen Zukunft (2050) gezeigt. In der Übergangsphase haben die Diesel-Sattelzüge aufgrund der erwarteten Verbrauchsverbesserungen ein etwas geringeres Treibhauspotenzial als heute. Im ambitionierten Szenario ist zu dem die Beimischung von PtL-Kraftstoffen etwas höher.

Abbildung 4: Treibhauspotenzial ausgewählter Sattelzüge in der Übergangsphase sowie THG-Neutralität bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Anmerkung: Übergangsphase konservativ (BJ 2030 GreenLate) / Übergangsphase ambitioniert (BJ 2030 GreenSupreme) / THG-Neutralität (BJ 2050 GreenSupreme)

Gegenüber dem Diesel-Sattelzug schneiden die batterieelektrischen Konzepte beim Treibhauspotenzial deutlich besser ab – das geringste Treibhauspotenzial haben der O-BEV sowie der BEV-Lkw, da sie rein elektrisch betrieben werden können. Durch die Nutzung der Oberleitung kommt der O-BEV jedoch mit einem deutlich kleineren Akku aus als der reine BEV-Lkw und schneidet daher am besten ab. Auch der O-HEV ist als Brückentechnologie mit Baujahr 2030 dem reinen Diesel-Sattelzug überlegen, liegt jedoch erheblich über dem (O-)BEV. Im

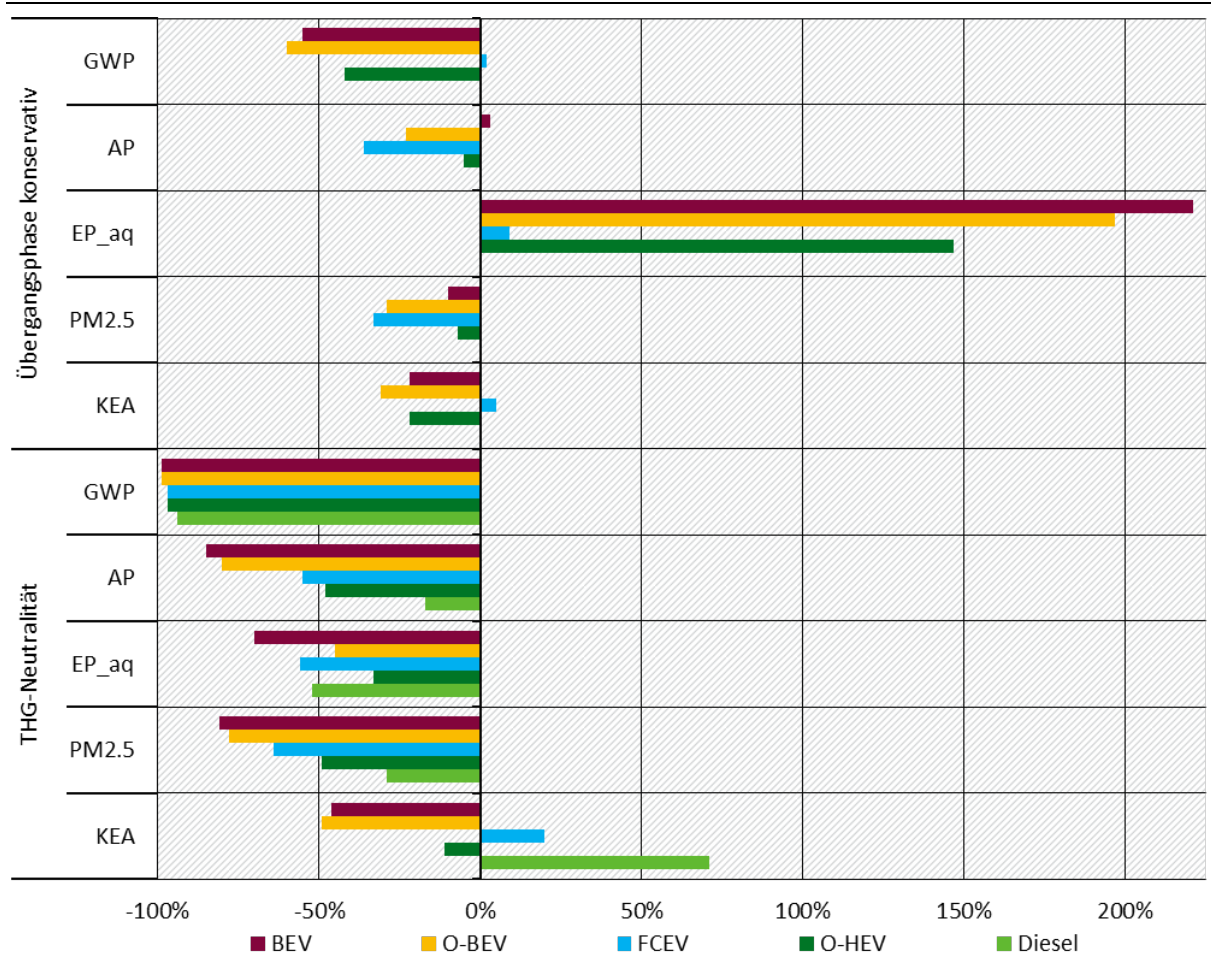
ambitionierten Übergangsszenario sind die Vorteile der batterieelektrischen Antriebe aufgrund des stärker defossilisierten Strommixes noch deutlicher ausgeprägt. Keine Vorteile gegenüber dem Diesel-Sattelzug hat der Brennstoffzellen-Lkw, welcher zu großen Teilen mit fossilem Wasserstoff aus der Erdgasdampfreformierung betrieben wird.

Bei den Beiträgen der unterschiedlichen Lebenswegabschnitte dominieren sehr stark die Kraftstoffverbrennung sowie die Kraftstoff- und Strombereitstellung. Auf diese entfallen über 90 % des Treibhauspotenzials bei den Lkw mit fossilen Kraftstoffen und selbst beim BEV-Sattelzug macht die Strombereitstellung noch 75 % aus. Die Herstellungsaufwendungen der Sattelzüge sind dagegen weniger relevant, da sie aufgrund der hohen Fahrleistungen stark abgeschrieben werden.

Ähnlich wie bei den Pkw gehen die Treibhauspotenziale bei allen Antrieben durch die Defossilisierung sehr stark zurück, Im Antriebsvergleich bleibt dabei weiterhin der O-BEV das Konzept mit dem geringsten Treibhauspotenzial.

Werden bei den Sattelzügen die weiteren relevanten Umweltwirkungen verglichen, zeigen sich grundsätzlich ähnliche Trends wie bei den Pkw.

Abbildung 5: Vergleich ausgewählter Umweltwirkungen von Sattelzügen mit dem Diesel-Sattelzug mit Baujahr 2030 bezogen auf den km



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Anmerkung: Berechnung der relativen Änderungen gegenüber dem Diesel-SZ in der Übergangsphase konservativ (Baujahr 2030, GreenLate) zur THG-Neutralität (Baujahr 2050, GreenSupreme)

Im Vergleich zum Diesel-Sattelzug haben Brennstoffzellen-Sattelzüge in der Übergangsphase keine Vorteile beim Treibhauspotenzial (GWP) oder dem kumulierten Energieaufwand (KEA) und liegen deutlich über den O-HEV-, O-BEV- und BEV-Sattelzügen. Lediglich Feinstaubemissionen (PM2.5) und Versauerung (AP) liegen beim FCEV-Sattelzug leicht (im Falle des Diesel-Sattelzuges) oder deutlich (bei O-HEV, O-BEV sowie BEV) unter denen der anderen Konzepte. Erst in einer treibhausgasneutralen Welt schneiden FCEV durchgängig besser ab als die Dieselreferenztechnologie, liegen aber außer bei der aquatischen Eutrophierung über den anderen Konzepten.

Alle Sattelzüge mit Traktionsbatterie haben bereits in der Übergangsphase bis 2030 ein weniger als halb so hohes Treibhauspotenzial gegenüber dem Diesel-Sattelzug und sind auch im Szenario einer THG-Neutralität besser als der Diesel-Sattelzug. Sie haben auch beim KEA deutliche Vorteile. Allerdings liegt die aquatische Eutrophierung zunächst aufgrund der großen Akkus noch deutlich höher als beim Diesel-Sattelzug. Erst mit der globalen Defossilisierung liegt auch die aquatische Eutrophierung deutlich unterhalb der heutigen Dieselreferenz aber immer noch leicht oberhalb des Diesel-Sattelzuges in 2050. Am besten schneiden in der Übergangsphase aufgrund des kleineren Akkus jeweils die Sattelzüge mit Traktionsbatterie und dynamischer

Lademöglichkeit (O-BEV) ab. Erst bei einer THG-Neutralität gleichen sich die Umweltwirkungen von BEV und O-BEV weitestgehend an.

Fazit

Alle batterieelektrischen Fahrzeuge haben das Potenzial die Klimawirkungen gegenüber den heute üblichen verbrennungsmotorischen Fahrzeugkonzepten deutlich zu verringern, und zwar sowohl kurz- als auch langfristig. Sie kommen dabei vor allem langfristig mit deutlich geringeren Mengen an (erneuerbarer) Energie aus als Fahrzeuge mit aufwändig hergestellten PtL/PtG-Kraftstoffen. Auch wenn Fahrzeuge mit alternativen Antrieben kurzfristig höhere Umweltlasten in anderen Wirkungskategorien mit sich bringen können, lassen sich auch diese negativen Wirkungen langfristig vermeiden.

In späteren Jahren kann eine ambitionierte Minderung der Treibhauspotenziale auch mit Hilfe von aus erneuerbarem Strom hergestellten PtG-/PtL-Kraftstoffen erfolgen. Allerdings sind die Herausforderungen, die entsprechenden Energiemärkte so zu entwickeln, dass der Straßenverkehr weitestgehend THG-neutrale Energieträger zu akzeptablen Kosten und in ausreichender Menge erhält enorm. Die Verfügbarkeit von Power-to-Liquid- bzw. Power-to-Gas-Kraftstoffen hängt von zwei zentralen Faktoren ab: zum einen von der Verfügbarkeit von zusätzlichem erneuerbarem Strom und zum anderen von der möglichen Hochlaufgeschwindigkeit des Baus von Anlagen zur PtL-/PtG-Herstellung. Da die PtL-/PtG-Herstellung große Mengen an (zusätzlichem) Strom benötigt, führt eine reine Umverteilung bestehender EE-Erzeugungskapazitäten nicht zu einer besseren globalen Klimabilanz. Damit sollten diese Kraftstofftypen vor allem dort genutzt werden, wo eine direkte Elektrifizierung schwer oder nicht möglich ist. Zudem benötigen auch andere Sektoren abseits des Verkehrssektors zur Dekarbonisierung aus erneuerbaren Energien hergestellte Kohlenwasserstoffe und konkurrieren damit mit dem Verkehrssektor um die vor allem mittelfristig begrenzten PtL-/PtG-Mengen.

Zentral ist für eine schnelle Dekarbonisierung neben dem beschleunigten Hochlauf der Elektromobilität und der ambitionierten Fortsetzung der Energiewende jedoch auch die Verkehrsvermeidung, denn jeder vermiedene Kilometer schont die Umwelt. Auch die bereits heute sehr effizienten öffentlichen Verkehrsmittel wie Busse und Bahnen sowie der Güterverkehr mit Binnenschiff und per Zug werden ihre Umweltwirkungen weiter verringern, so dass sie auch in Zukunft den Personenkraftwagen und Sattelzügen deutlich überlegen sind. Damit kommt neben der Vermeidung auch der Verlagerung eine zentrale Rolle bei der Verkehrswende zu.

Summary

The energy transition in transport and the associated use of alternative powertrains and fuels is urgently needed in the coming years. It is necessary to achieve the long-term goal of a virtually greenhouse gas-neutral transport in Germany by the year 2045. Very different combinations of powertrain concepts and options for fuel and energy supply are under discussion. This study comprehensively assesses the environmental impacts of passenger cars, light commercial vehicles and heavy-duty trucks over their full life cycle. The entire process chain is considered, from manufacture of the vehicles to their operation and disposal, as well as all upstream processes. The provision of fuels and of power for electric engines is of particular importance. In addition to the global warming potential, other relevant impact categories such as acidification, eutrophication, particulate matter formation, ozone depletion, summer smog as well as energy and resource demand, hemeroby and water demand are also assessed. Due to the different degrees of technical maturity and the dynamic development, the possible medium-term (2030) and long-term (2050, target point: GHG neutrality) evolution of vehicles and the energy system is considered as well as the current status. In addition to petrol and diesel vehicles that are still predominant today, alternative powertrains such as natural gas and hydrogen vehicles as well as battery-electric vehicles and hybrid solutions are also examined.

In this summary, the main study results for generic compact class passenger cars and for heavy-duty trucks with a gross vehicle weight of 40 tonnes are concisely presented and the most important factors influencing the life cycle assessment are described. To this end, a number of assumptions are made for future developments in vehicles, both in terms of consumption and technology. The basic idea is to be able to make a robust estimate of the expected environmental impacts and to enable a fair comparison of the powertrain types. The macroeconomic framework plays a central role in this. For example, the availability of renewable electricity to power vehicles or to produce synthetic fuels has a significant influence on the environmental burdens. Key assumptions are therefore made on how the energy transition in Germany, Europe and the rest of the world will progress. This includes estimates how quickly renewable electricity production will be expanded and how fast the production of synthetic fuels can start and ramp up. It is conceivable that synthetic fuels are initially operated with the electricity grid mix and fossil CO₂ (e.g., from capture in cement plants) is used. Nevertheless, only the desirable case of CO₂ capture from the air and the use of purely renewable electricity is examined here.

For the evolution of the background system as well as the electricity supply and PtL/PtG quantities, we follow the RESCUE scenarios GreenLate (GL) and GreenSupreme (GS) of the Federal Environment Agency. GreenLate assumes a somewhat more conservative development and GreenSupreme a very ambitious development of societal defossilisation. In both scenarios, complete global greenhouse gas neutrality is assumed for the year 2050. In this project, the environmental impacts of the vehicles determined for this point in time do not represent a specific year, but rather an example of a future in which the transformation to greenhouse gas neutrality has been completed.

The life cycle assessment of the vehicles is fundamentally influenced by the following factors:

- **Vehicle energy consumption and characteristics:** In this study, we assume that there will still be certain increases in fuel efficiency in the next few years for internal combustion engines. Among other things this is achieved through the complete hybridisation of passenger cars. However, this trend will not sustain from 2030 onwards due to the advances of electromobility. For vehicles with alternative powertrains (fuel cell and battery electric), we assume that the driving ranges will continue to increase until 2030 in line with the current trend (e.g., for the compact class BEV from 55 kWh battery capacity in 2020 to 80

kWh from 2030) and then stagnate. At the same time, the vehicle weight will remain more or less constant, as the battery technologies will also continue to develop. The batteries will become lighter due to higher energy densities and different cell chemistries. In addition, we assume that increases in efficiency and the use of electric vehicles in broader, often less favourable application profiles will balance each other out and that fuel efficiency will remain more or less constant.

- ▶ **Developments in vehicle and battery production:** Technological developments in fuel cells (especially reduced platinum loading) and batteries (through modified cell chemistries with higher energy densities and the ramp up of a European cell production) will lead to improvements.
- ▶ **Environmental impacts of the energy sources used:** Relevant here are above all the combustion emissions of fossil fuels and the changes in the shares of renewable energy. In the RESCUE scenarios, the PtL/PtG shares in fuels increase continuously. In GreenSupreme, around 6 % synthetic fuels are already expected in 2030. This rises to over 30 % by 2040. In GreenLate, on the other hand, the ramp-up of synthetic fuels does not start until 2040. Both scenarios reach 100 % PtG/PtL fuel in 2050, assuming a non-linear ramp-up. All (partially) electric vehicles are always operated with the grid electricity mix or the average German fuel mix. Here, the use of floating electricity mixes takes into account the fact that a vehicle registered today will see a changing energy mix over its lifetime. In the electricity sector, we assume that the grid electricity mix will fall from 429 g CO₂eq/kWh in 2020 to 254 g CO₂eq/kWh (GreenLate) and 113 g CO₂eq/kWh (GreenSupreme) in 2030. In the case of complete greenhouse gas neutrality, the remaining emissions from electricity supply are only 8 g CO₂eq/kWh in 2050.
- ▶ **Changes in the background system due to progressive defossilisation:** The long-term defossilisation of the entire economy also leads to changing environmental impacts of the production of (energy) infrastructure and vehicles. These changes in the so-called background system affect the entire vehicle life cycle and therefore affect both vehicle production and use as well as the energy sources used. This transformation is also modelled according to the UBA GreenSupreme scenario.

In some of the following figures, the individual life cycle stages are shown to demonstrate their influence on the overall result. The following breakdown is made:

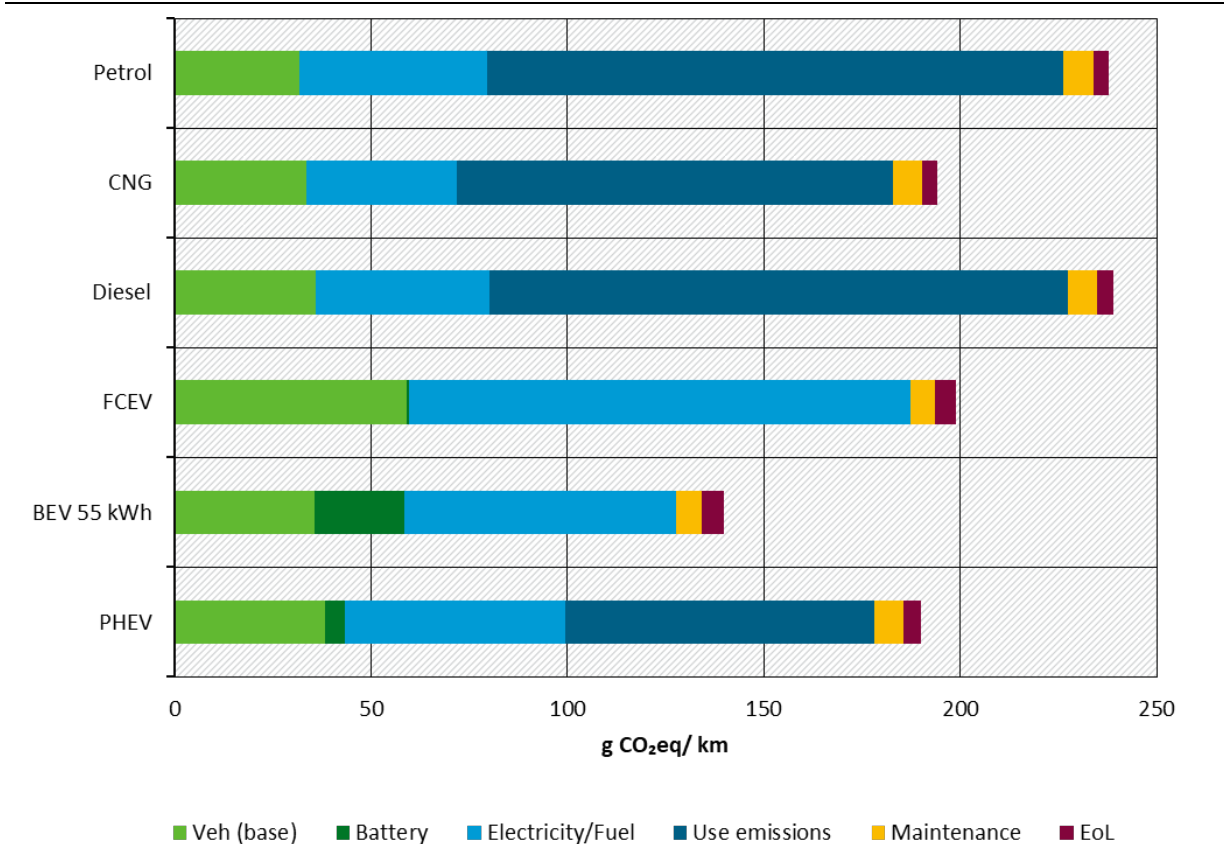
- ▶ Veh. (base): refers to the production of the vehicle (including all components of the body and powertrain) but without traction battery.
- ▶ Battery: refers to the production of the traction battery
- ▶ Electricity/fuel: refers to the provision of electricity and fuel (including the charging and refuelling station infrastructure as well as the overhead line infrastructure for the O-trucks).
- ▶ Use emissions: refers to the direct/local exhaust emissions as well as the abrasion emissions (e.g. from brake and tyre abrasion) of the vehicles in operation (purely electric vehicles do not cause any direct exhaust emissions, but are nevertheless responsible for emissions from abrasion, which have a similar level as from conventional vehicles).
- ▶ Maintenance: refers to the maintenance impacts for the vehicles
- ▶ EoL: End of Life refers to the disposal of the vehicle including the traction battery.

All emission values given are always per vehicle kilometre. A uniform average load of 11 t payload is assumed for the heavy-duty trucks.

Passenger car

For passenger cars built in 2020, the starting point of the development, and operated in the less ambitious GreenLate scenario, vehicles with conventional petrol or diesel engine have the highest global warming potential per vehicle kilometre. Despite the efficiency advantages of the diesel engine over the petrol engine, a current diesel compact class passenger car has a comparable global warming potential (239 g CO₂eq/km) to a petrol passenger car (238 g CO₂eq/km), as the diesel models on the market often have more engine power and are heavier than the petrol compact class passenger cars. Natural gas passenger cars perform better with 194 g CO₂eq/km, which is mainly due to their lower fuel consumption compared to petrol or diesel passenger cars. Since synthetic fuels are only produced in significant quantities from 2040 onwards in the GreenLate scenario, these vehicles still run on fossil fuels with minor shares of biofuels. The FCEV passenger car (199 g CO₂eq/km) and the PHEV passenger car (190 g CO₂eq/km) have similar global warming potentials as the CNG passenger car and thus only minor advantages over petrol and diesel passenger cars today. One of the reasons for this is that the hydrogen for fuel cell vehicles currently still comes from the reforming of fossil natural gas. In the case of plug-in hybrids, it is primarily the relatively low share of electric driving in real-world operation that leads to a similar balance as with CNG or FCEV passenger cars. The lowest global warming potential of 140 g CO₂eq/km is currently exhibited by the electric car (with 55 kWh battery) that runs on grid electricity. This is 41% lower than the petrol car.

Figure 6: Global warming potential of compact class cars built in 2020, operated in GreenLate



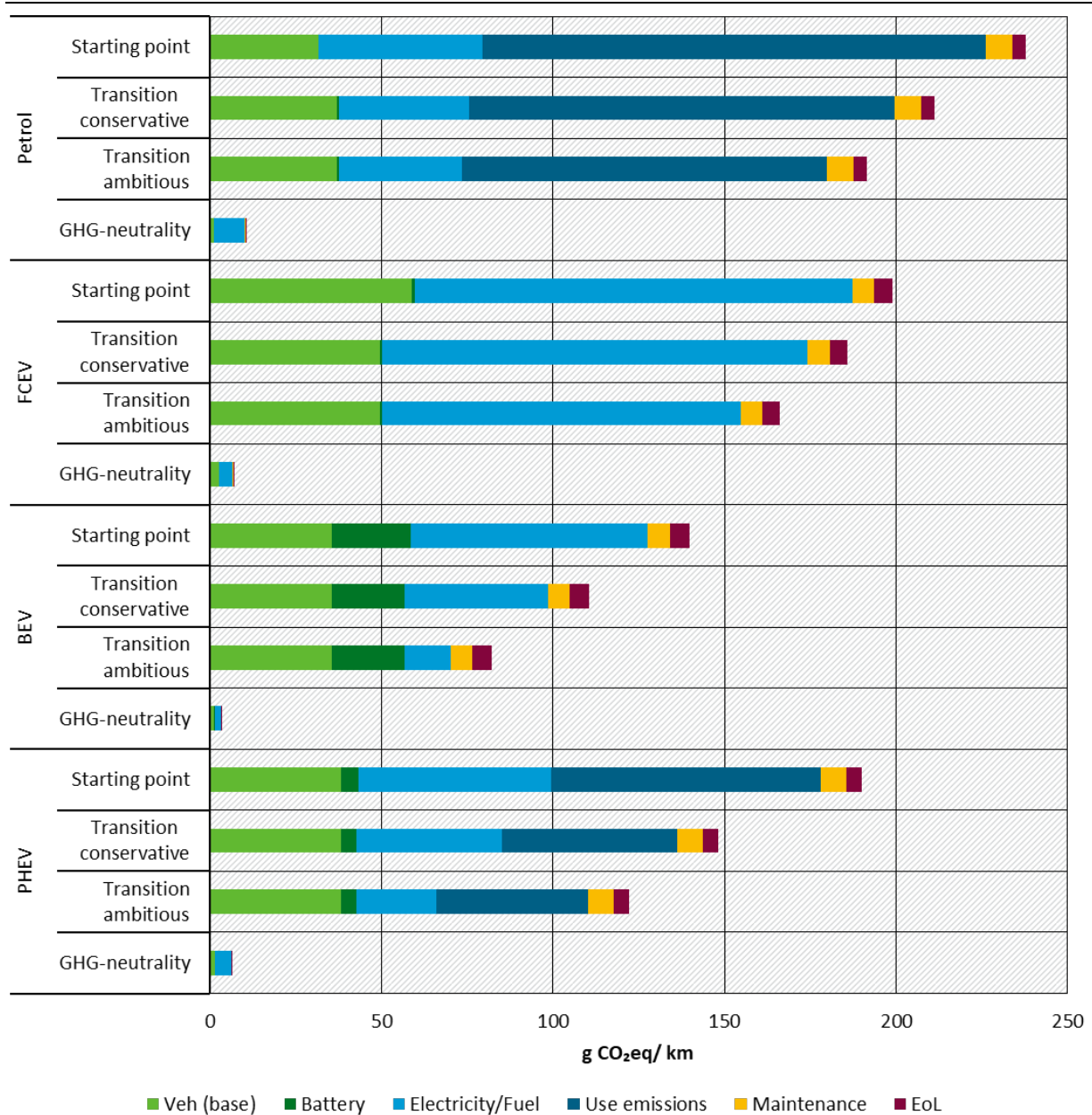
Source: own calculations ifeu

An analysis of the contributions of the individual life cycle stages to the global warming potential shows that in the case of passenger cars with internal combustion engines, direct use emissions currently make the largest contribution - for diesel and petrol passenger cars these are 147 g CO₂eq/km. The second largest influence for conventional passenger cars and the largest for passenger cars with alternative drive systems is the global warming potential for the provision of electricity and fuels. Another significant contribution is the vehicle production (including the production of the traction battery in the case of BEV passenger cars), whereby the contributions of production are significantly higher in the case of passenger cars with alternative drive systems than in the case of conventional ones. For all drive concepts, maintenance and end-of-life have the lowest impact on the global warming potential.

When the future developments from 2030 on (transition phase) are considered, improvements in the global warming potential can be seen for all types of powertrains, with the BEV passenger car being able to extend its lead over the other powertrain types. The improvements in fuel efficiency due to the hybridisation of conventional passenger cars more than compensate for the additional emissions in production. In the case of the FCEV, the reduced platinum loading in the fuel cell leads to lower environmental impacts. The production of the BEV car even improves slightly despite the significantly larger battery. In addition, the greenhouse potential of the electricity mix used decreases significantly. If a more ambitious progress of the energy transition is assumed (GreenSupreme scenario), this effect becomes even more pronounced, as the potential of PtL/PtG fuels is still very limited, even for a car built in 2030.

For all types of propulsion, the complete transformation towards greenhouse gas neutrality (2050) reduces the global warming potential by more than 95 % compared to the starting point. Nevertheless, there are remaining greenhouse gas emissions that cannot be avoided according to the current state of technology, so that zero emissions are not achieved here.

Figure 6 Developments in the global warming potential of the compact car at starting point, transition phase and GHG neutrality

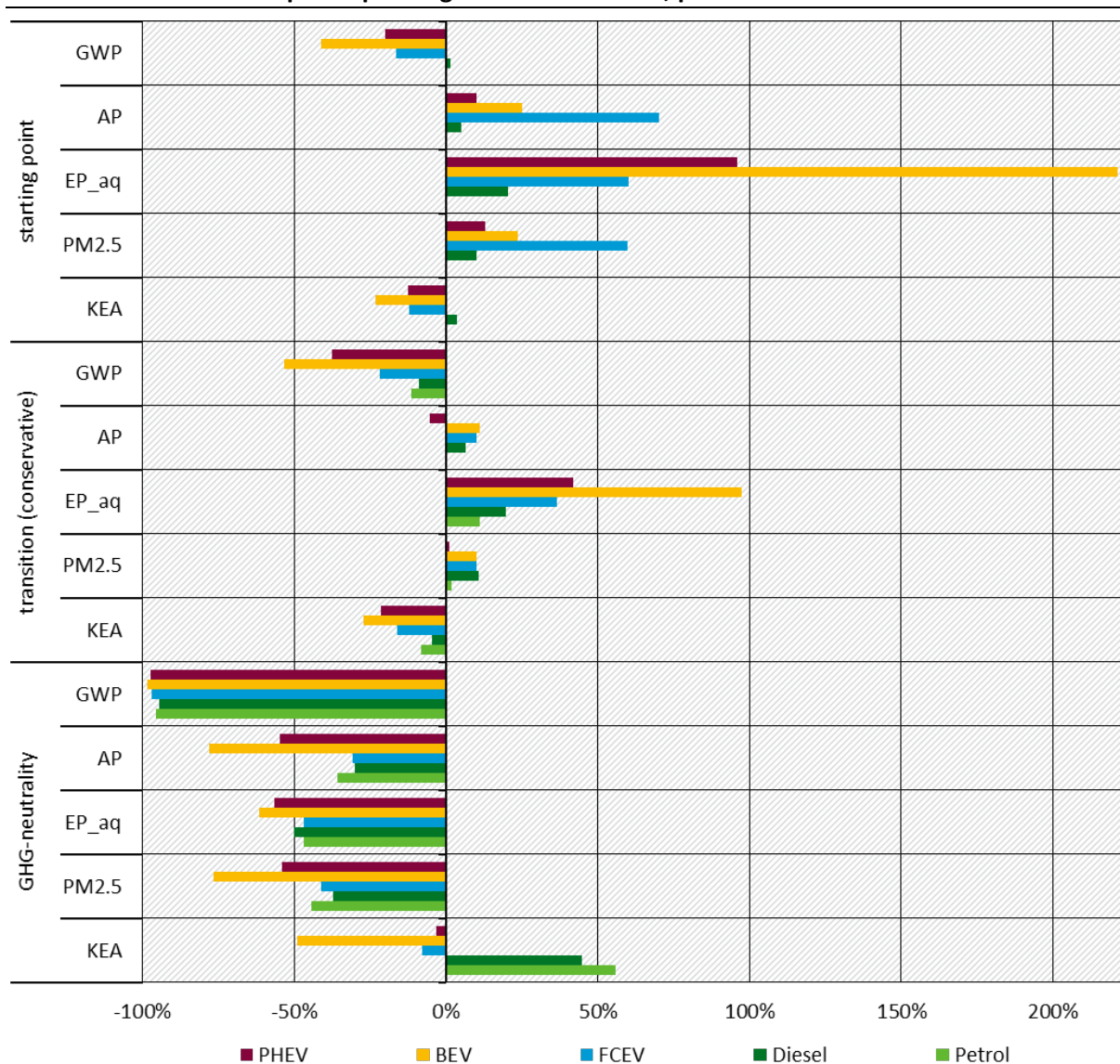


Source: own calculations ifeu

Note: Starting point (built in 2020, GreenLate) / transition phase conservative (built in 2030, GreenLate) / transition phase ambitious (built in 2030, GreenSupreme) / GHG neutrality (built in 2050, GreenSupreme).

In addition to the global warming potential, this study also evaluates other environmental impacts normalised to average population values. Aquatic eutrophication (EP_aq), particulate matter formation (PM2.5), acidification (AP) and cumulative energy demand (CED) were found to be relevant categories.

Figure 7: Comparison of selected environmental impacts of compact class passenger cars with the petrol passenger car built in 2020, per kilometre.



Source: own calculations ifeu

Note: Calculation of relative changes compared to the petrol car in the starting point (built in 2020, GreenLate) to the transition phase conservative (built in 2030, GreenLate) and GHG neutrality (built in 2050, GreenSupreme).

The results show that the diesel car performs only slightly worse than the petrol car in all years of manufacture and in most impact categories. The CNG car results are almost always slightly lower than the ones of the petrol or diesel car. In a greenhouse gas neutral world, all three concepts have clear disadvantages compared to passenger cars with alternative drives, as the provision of PtL/PtG fuels is associated with high conversion losses - and thus with a high demand for electricity generation plants.

By 2030, FCEV cars have only slight advantages over petrol cars in terms of global warming potential and KEA and have a significantly worse balance in the other impact categories (acidification, aquatic eutrophication and particulate matter formation). This is mainly due to

the production of the fuel cell. Only in a largely greenhouse gas neutral world they will they catch up with petrol/diesel and CNG cars.

BEV cars have the lowest global warming potential in all years of manufacture and are already below petrol cars in terms of aquatic eutrophication today. On the other hand, they currently have a higher environmental impact than petrol cars in some other categories, especially acidification and, to a lesser extent, particulate matter and cumulative energy demand (CED). These categories are driven by the production of the battery. Although particulate matter, CED and acidification already decrease significantly in the transition phase for the 2030 vehicles, they are only below those of the current petrol car in complete greenhouse gas neutrality. In a greenhouse gas neutral world, the BEV car ultimately performs better than all other concepts in all relevant impact categories.

The results for the PHEV passenger car are almost consistently between the petrol passenger car and the BEV passenger car. Due to the smaller batteries, the negative effects in acidification and particulate matter are reduced today and until 2030 compared to the BEV passenger car. However, since the PHEV car still requires petrol for operation (even with an increasing share of electric driving), its global warming potential is consistently significantly higher than that of the BEV car.

If the contributions of the individual life cycle stages are considered, it becomes apparent that the direct use emissions contribute only little to the impact categories other than the global warming potential. Vehicle production including the battery and the provision of electricity and fuel are particularly relevant here.

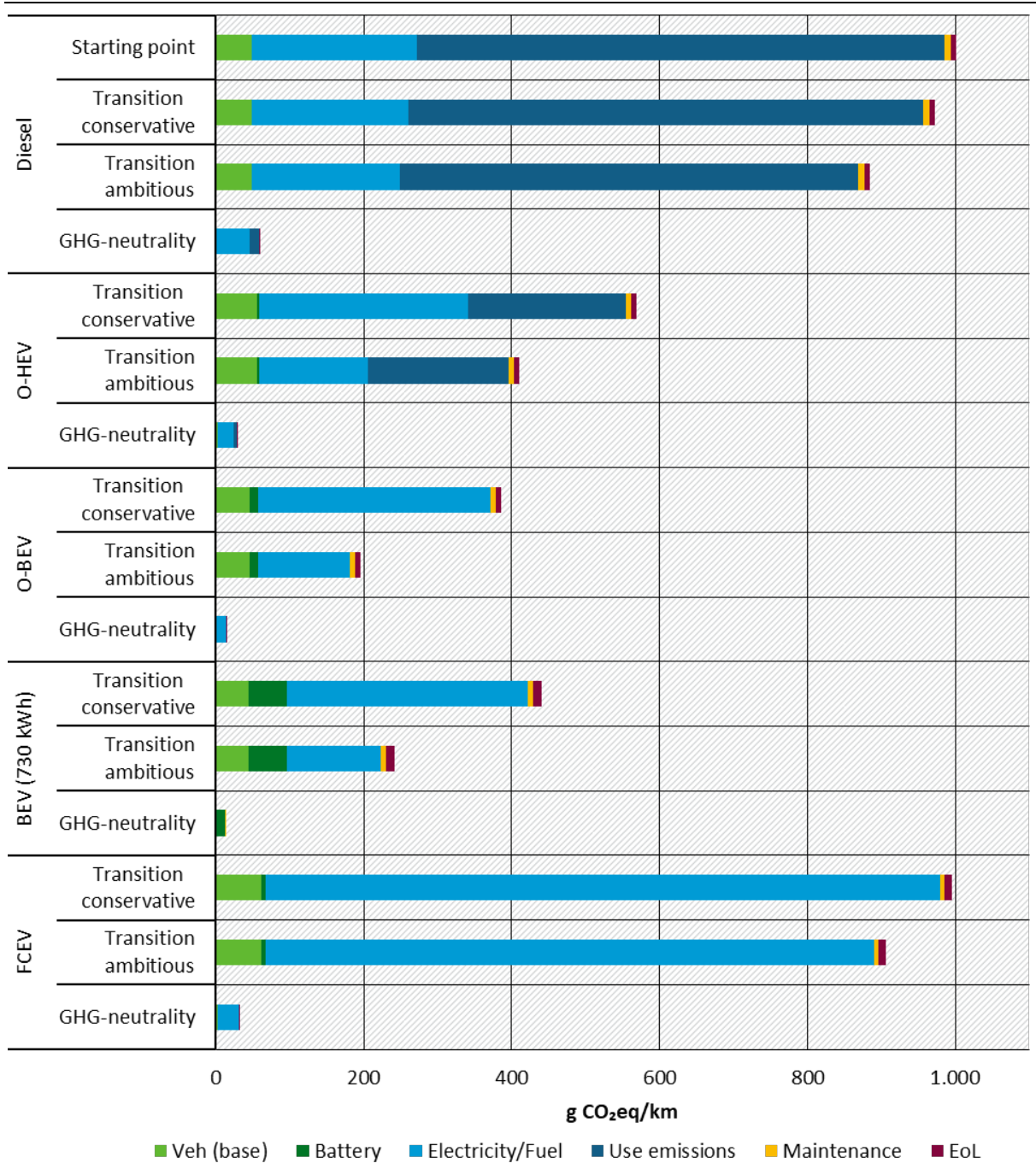
Light commercial vehicles show similar trends to passenger cars. Their results are not shown here.

Heavy-duty trucks

A current diesel heavy-duty trucks with a gross vehicle weight of 40 tonnes and an average load of 11 tonnes has a global warming potential of about 1.000 g CO₂eq/km, most of which (937 g CO₂ eq/km) is due to fuel combustion and provision.

Since heavy-duty trucks with alternative drives are only expected to be widely introduced way beyond 2020 (starting point), the results for trucks built in 2030 is shown here in the GreenLate scenario (transition phase). There diesel heavy-duty trucks have a slightly lower global warming potential than today due to the expected improvements in fuel efficiency.

Figure 8 Global warming potential of heavy-duty trucks in the transition phase and in GHG-neutrality – all with average payload (11 t)



Source: own calculations ifeu

Note: Transition phase conservative (built in 2030, GreenLate) / transition phase ambitious (built in 2030, GreenSupreme) / GHG neutrality (built in 2050, GreenSupreme).

Compared to the diesel truck, the battery-electric concepts perform significantly better in terms of global warming potential - the O-BEV and the BEV truck have the lowest global warming potential, as they can be operated purely electrically. However, due to the use of the overhead line, the O-BEV gets by with a significantly smaller battery than the pure BEV truck and therefore scores best. The O-HEV is also superior to the diesel heavy-duty truck as an intermediate technology built 2030 but is clearly above the (O-)BEV. In the ambitious transition

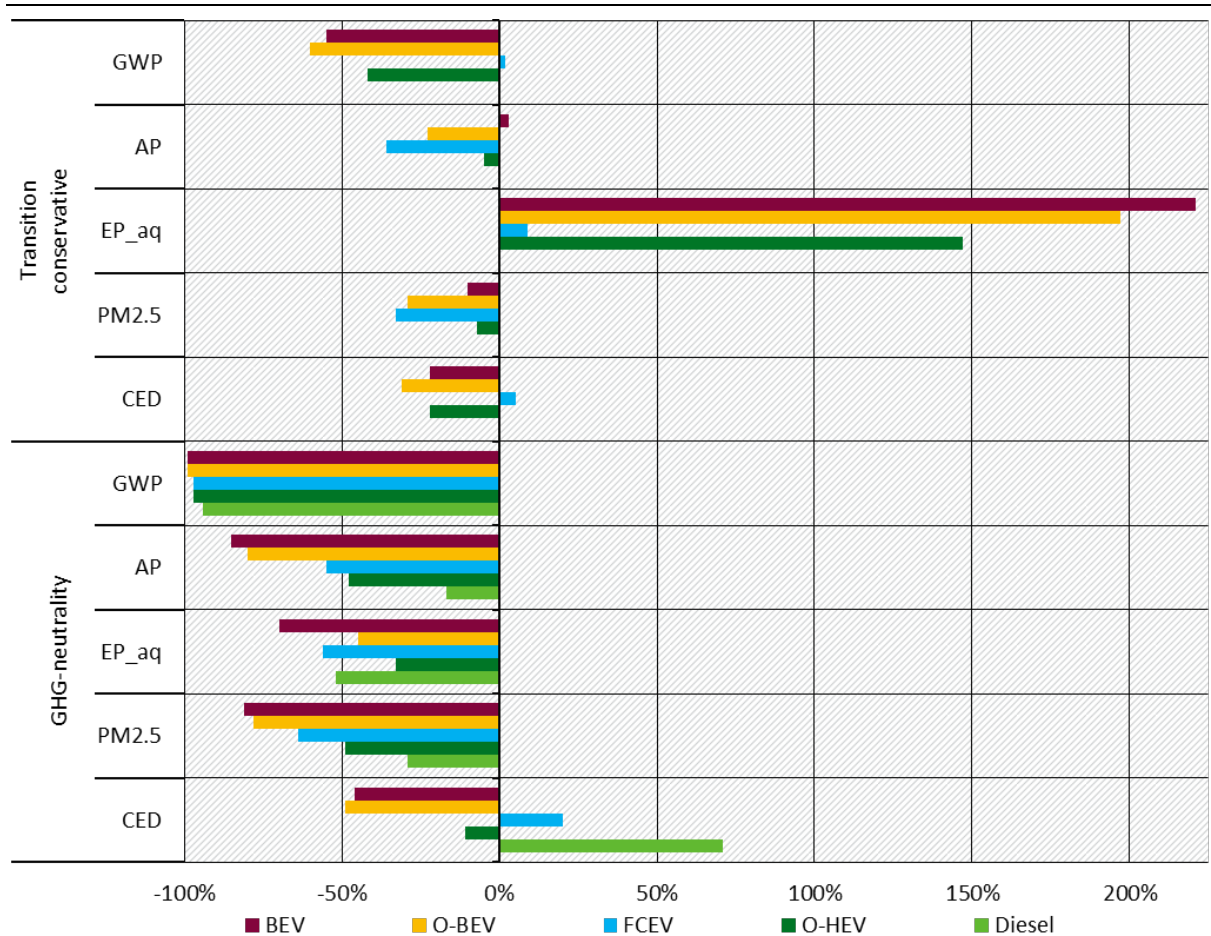
scenario, the advantages of battery-electric powertrains are even more pronounced due to the stronger defossilized electricity mix. The fuel cell truck, which is largely powered by fossil hydrogen from natural gas steam reforming, has no advantages over the diesel truck.

The contributions of the different life cycle stages are dominated by fuel combustion and the provision of fuel and electricity. These account for more than 90 % of the global warming potential of fossil fuel trucks, and even in the case of BEV trucks, the provision of electricity still accounts for 75 %. The contributions of manufacturing of the heavy-duty trucks, on the other hand, are less relevant, as they are heavily written off over the high mileage.

As in the case of passenger cars, the greenhouse potentials of all propulsion systems get decreasingly significant due to defossilisation.

The other relevant environmental impacts of heavy-duty lorries are similar to those for passenger cars.

Figure 9: Selected environmental impacts of heavy-duty trucks in comparison to the diesel lorries built in 2030, per km



Source: own calculations ifeu

Note: Calculation of relative changes compared to diesel SC in the conservative transition phase (year of construction 2030, GreenLate) to GHG neutrality (year of construction 2050, GreenSupreme).

Compared to diesel heavy duty trucks, fuel cell trucks have no advantages in the transition phase in terms of global warming potential (GWP) or cumulative energy demand (CED) and are significantly above the O-HEV, O-BEV and BEV trucks. Only particulate matter formation (PM2.5)

and acidification (AP) are slightly (in the case of the diesel truck) or significantly (in the case of the O-HEV, O-BEV and BEV) below those of the other concepts. Only in a GHG-neutral world do FCEVs consistently perform better than the diesel reference technology but are better than the other concepts except for aquatic eutrophication.

All heavy-duty trucks with traction battery already have less than half the global warming potential compared to the diesel truck in the transition phase starting 2030. They are also better than the diesel trucks in the scenario of GHG neutrality. They also have clear advantages in terms of CED. However, aquatic eutrophication is initially still significantly higher than for the diesel trucks due to the large batteries. Only with global defossilisation is the aquatic eutrophication significantly lower than today's diesel reference but still slightly higher than that of the diesel truck in 2050. The truck with traction battery and dynamic charging option (O-BEV) performs best in the transition phase due to the smaller battery. Only in the case of GHG neutrality do the environmental impacts of BEVs and O-BEVs largely equalise.

Conclusion

All battery electric vehicles have the potential to significantly reduce the climate impact compared to today's standard internal combustion engine vehicle concepts, both in the short and long term. Especially in the long term, they require significantly less (renewable) energy than vehicles with advanced PtL/PtG fuels. Even if vehicles with alternative drive systems may have higher environmental impacts in other impact categories in the short term, these negative impacts can also be avoided in the long term.

In later years, an ambitious reduction of greenhouse potentials can also be achieved with the help of PtG/PtL fuels produced from renewable electricity. However, the challenges of developing the corresponding energy markets in such a way that road transport receives largely GHG-neutral energy sources at acceptable costs and in sufficient quantities are enormous. The availability of power-to-liquid or power-to-gas fuels depends on two key factors: on the one hand, the availability of additional renewable electricity and, on the other, the possible ramp-up speed of the construction of PtL/PtG production plants. Since PtL/PtG production requires large amounts of (additional) electricity, a mere redistribution of existing renewable energy generation capacities does not lead to a better global climate. Thus, these fuel types should be used primarily where direct electrification is difficult or impossible. In addition, other sectors apart from the transport sector also need synthetic fuels produced from renewables for decarbonisation and thus compete with the transport sector for the limited PtL/PtG volumes.

In addition to the accelerated ramp-up of electromobility and the ambitious continuation of the energy transition, traffic avoidance is also central to rapid decarbonisation, because every kilometre avoided protects the environment. The already very efficient means of public transport such as buses and trains as well as freight transport by inland waterway and by train will also further reduce their environmental impact. They will continue to be clearly superior to passenger cars and heavy-duty trucks in the future. Thus, in addition to avoidance, modal shift also plays a central role in the transport transition.

1 Einleitung

Um die mittel- und langfristigen Klimaschutzziele Deutschlands auch im Verkehrssektor zu erreichen, sind Maßnahmen auf allen Ebenen notwendig. Neben den übergeordneten Strategien der Verkehrsvermeidung und der Verlagerung von Verkehr auf klimaverträgliche Verkehrsmittel, ist auch der Einsatz von alternativen Antrieben und alternativen Kraftstoffen notwendig, um das Ziel des nahezu treibhausgasneutralen Verkehrs bis 2050 zu erfüllen. Zur Debatte stehen dabei sehr unterschiedliche Kombinationen von Antrieben und Kraftstoffen.

Da die betrachteten Kombinationen aus Antrieb und Energieträger alle Aspekte eines Fahrzeuglebens betreffen – vom Fahrzeug selbst, über die Nutzung und Wartung bis hin zur Energiebereitstellung – wird ein umfassender ökobilanzieller Ansatz gewählt, der alle diese Aspekte in den Blick nimmt. Nur so können mögliche Verlagerungen von Umweltwirkungen in andere Regionen oder Abschnitte des Lebenswegs identifiziert werden. Ferner werden potenzielle Vor- und Nachteile der Optionen in verschiedenen Umweltwirkungen sichtbar, so dass Zielkonflikte gezielt adressiert werden können. Aufgrund der unterschiedlichen technischen Reifegrade und der dynamischen Entwicklung wird neben dem aktuellen Entwicklungsstand der Fahrzeuge und des Energiesystems auch die mögliche mittel- (2030) und langfristige (2050) Entwicklung betrachtet.

1.1 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

In den letzten Jahren zeichnete sich bereits ein stärkerer Markthochlauf von Elektrofahrzeugen insbesondere im Pkw-Bereich ab. Aufgrund der Anforderungen der Treibhausgasquote für Kraftstoffe und der verschärften CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (EU-Verordnung 2019/631) sowie der Einführung von Flottenzielwerten ab 2025 auch für schwere Nutzfahrzeuge (EU Verordnung 2019/1242) werden die Anteile von alternativen Antrieben und Kraftstoffen jedoch in allen Kfz-Bereichen zunehmen. Betrachtet werden in dieser Studie daher neben Personenkraftwagen (Pkw) auch leichte Nutzfahrzeuge (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Neben den klassischen Otto- und Dieselmotoren, die sowohl mit fossilen als auch synthetischen Kraftstoffen betrieben werden können, bieten sich auch gasförmige Kraftstoffe wie CNG oder LNG sowie Wasserstoff für eine direkte Verbrennung an. Zusätzlich erlauben elektrische Fahrzeuge die direkte Nutzung von Strom (gespeichert in einer Traktionsbatterie oder direkt per Oberleitung) und Brennstoffzellen die Verstromung von Wasserstoff. Schlussendlich ermöglichen Plug-In Hybride durch die Kombination aus Elektro- und Verbrennungsmotor auch die Verbindung zwischen direkter Stromnutzung und verschiedenen Kraftstoffen.

Daher werden die in Tabelle 1 gezeigten Kombinationen aus Fahrzeuggröße und Antriebsarten untersucht, jeweils für jedes der angegebenen Baujahre. Dabei wird davon ausgegangen, dass alternative Antriebe bei den Last- und Sattelzügen erst ab 2030 im größeren Maßstab zur Verfügung stehen. Neben den gezeigten Kombinationen wird im Rahmen der Sensitivitätsanalysen zusätzlich noch ein größerer Pkw (SUV) untersucht.

Tabelle 1: Untersuchte Antriebs-Fahrzeug-Kombinationen

	Antrieb	2020	2030	2050
Kompaktklasse- Pkw/ LNF N1-III	Benzin	X	X	X
	Diesel	X	X	X
	CNG	X	X	X
	PHEV Benzin	X	X	X
	BEV	X	X	X
	FCEV	X	X	X
Sattelzug 40t	Diesel	X	X	X
	Dual-fuel LNG	X	X	X
	LNG (CI)	X	X	X
	H2-ICE		X	X
	FCEV		X	X
	BEV		X	X
	O-HEV*		X	X
	O-BEV**		X	X

* O-HEV: Oberleitungshybrid-Lkw

** O-BEV: Oberleitungsbatterieelektrischer Lkw

Als Methode zur umfangreichen Analyse der Umwelt- und Ressourcenwirkungen wird eine Ökobilanz in Anlehnung an die ISO-Normen 14040 und 14044 über den kompletten Lebensweg durchgeführt. Berücksichtigt werden dabei Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge, die direkten Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb sowie die Umweltlasten der eingesetzten Energieträger (Kraftstoffe bzw. Strom, inklusive der Lade- und Tankinfrastruktur). Nicht betrachtet wird die benötigte Straßenverkehrsinfrastruktur, da diese sich zwischen den verschiedenen Antriebskonzepten nicht unterscheidet.

Eine wichtige Rolle nehmen die Umweltwirkungen der Kraftstoff- und Strombereitstellung vor einer Nutzung im Fahrzeug ein. Diese entstehen entlang der gesamten Herstellungskette: von der Gewinnung der Rohstoffe über die Produktion von Strom und die Synthese von gasförmigen oder flüssigen Kraftstoffen, der Speicherung und Transport zum Markt bis zur Konditionierung an der Tankstelle bzw. der Ladestation. Als Vergleichsmaßstab für alternative Kraftstoffe wird die heutige Herstellung auf Basis fossiler Rohstoffe modelliert: Diesel und Benzin aus Erdöl sowie CNG und LNG aus Erdgas und Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas. Zusätzlich wird die heutige Beimischung von Biokraftstoffen abgebildet.

Für die mittel- und langfristige Entwicklung wird die Herstellung synthetischer Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien und/oder Abfallbiomasse untersucht. Die grundlegenden Annahmen stimmen weitgehend mit denen des UBA-Projektes SYSEET (Liebich et al. 2020) überein. So werden für strombasierte Kraftstoffe (engl.: Power-to-Liquid (PtL), Power-to-Gas (PtG) und Power-and-Biomass-to-Liquid (PBtL)) als erneuerbare Stromquellen Photovoltaik, Windkraft an Land und auf See, sowie konzentrierende Solarthermie (CSP) betrachtet. Für

Fahrzeuge mit Baujahr 2050 wird die Herstellung synthetischer Kraftstoffe mit dem deutschen Netzstrommix untersucht. Elektrofahrzeuge werden in allen Referenzjahren mit dem deutschen Netzstrommix betrieben. Für die Bereitstellung von Kohlenstoff für die Synthese von Kohlenwasserstoffen werden die Abscheidung von CO₂ aus der Luft, aus den Abgasen von Zementwerken oder die Biogasaufbereitung berücksichtigt. Wasserstoff wird entweder in einer alkalischen Elektrolyse (AEL) oder einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL) hergestellt (engl.: Power-to-Gas (PtG)). In Anlagen auf Basis der Fischer-Tropsch-Synthese werden Diesel und Benzin synthetisiert. Syntheseanlagen, die Methanol als Zwischenprodukt erzeugen, liefern als Endprodukt Benzin. Synthetisches Erdgas (SNG) wird über den Sabatier-Prozess hergestellt (engl.: Power-to-Gas (PtG)). Als Biomasse für so genannte fortschrittliche Biokraftstoffe (engl.: Biomass-to-Liquid (BtL) und Power-and-Biomass-to-Liquid (PBtL)) kommt in dieser Studie Stroh zum Einsatz, während für die Biomethanherstellung Bioabfall und Grünschnitt als Ausgangssubstrate angenommen werden.

Als Produktionsstandorte werden exemplarisch die heimische Produktion und die Produktion in Marokko untersucht und mögliche Importwege (Pipeline, Tankschiff), sowie die Distribution in Deutschland abgebildet. Tabelle 2 zeigt die Liste der betrachteten Prozessschritte zur Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe im Rahmen dieser Studie.

Tabelle 2: Liste der betrachteten Prozessschritte zur Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe

Kraftstoffe	Strom	Standorte	Elektrolyse	CO ₂	Biomasse BtL/PBtL	Biomasse Gas	Synthese	Transport
Benzin	WindOn	Deutschland	AEL	DAC (Luft)	Stroh (nur D)	Bioabfall /Grünschnitt (nur D)	PBtL (FT, MtG)	Schiff (PtL)
Diesel	WindOff	Marokko	PEMEL	Zement			BtL (FT, MtG)	Pipeline, Gasnetz (PtG)
CNG	PV			Biogas (nur D)			PtL (FT, MtG)	Lkw (PtL)
LNG	CSP						PtG (SNG, Elektrolyse)	
Wasserstoff	Strommix						Biomethan	

CNG: Komprimiertes Erdgas (engl.: Compressed Natural Gas), LNG: Verflüssigtes Erdgas (engl.: Liquefied Natural Gas), PV: Photovoltaik, WindOff: Windenergie an Land (onshore), WindOn: Windenergie auf See (offshore), AEL: Alkalische Elektrolyse, PEM: Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse, DAC: CO₂-Abscheidung aus der Luft (engl.: Direct Air Capture), PBtL: Herstellung von Flüssigkraftstoff mit elektrischem Strom und Biomasse (engl.: Power and Biomass to Liquid), BtL: Herstellung von Flüssigkraftstoff aus Biomasse (engl.: Power and Biomass to Liquid), PtL: Herstellung von Flüssigkraftstoff mit elektrischem Strom (engl.: Power to Liquid), PtG: Herstellung von gasförmigem Kraftstoff mit elektrischem Strom (engl.: Power to Gas)

Für die Ergebnisdarstellung und Interpretation werden neben den beschriebenen Energieszenarien auch Sensitivitäten hinsichtlich der technischen Fahrzeugeigenschaften, Nutzungsprofile und unterschiedlichen Produktionsbedingungen durchgeführt.

1.2 Ökobilanzielle Methodik

1.2.1 Wirkungskategorien

Grundsätzlich orientiert sich die Methodik in dieser Studie an den internationalen Normen für Ökobilanzen ISO 14040 und ISO 14044 (ohne externe kritische Prüfung). Bei der Analyse wird für die ausgewählten Technologiekombinationen in der Regel der komplette Lebensweg von der Gewinnung der Rohstoffe, Verarbeitung, Nutzung bis zur Entsorgung berücksichtigt. Bei der tiefergehenden Betrachtung einzelner Prozessschritte in Kapitel 4 (Kraftstoffbereitstellung, Fahrzeug- und Akkuherstellung) liegt die Systemgrenze bei der Bereitstellung dieser Komponenten. Eine besondere Betrachtung wird dabei für das Treibhauspotenzial der Kraftstoffe angewendet. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Kraftstoffen herzustellen, wird bei allen die vollständige Oxidation (Verbrennung) des Kohlenstoffs zu CO₂ hinzugerechnet. Die zugehörigen Einzelprozesse bzw. Module werden der angepassten ecoinvent Datenbank (Abschnitt 1.3) entnommen und mit den spezifischen Technologieparametern des Vordergrundsystems (Volllaststunden, Lebensdauer, etc.) verknüpft. Die Berechnung der Modelle für die Bereitstellungspfade von Kraftstoffen und Fahrzeugen ergibt die zugehörigen Ressourcenbedarfe und kumulierten Wirkungsindikatoren.

Für diese Wirkungsabschätzung werden folgende Kategorien berechnet und ausgewertet:

- ▶ Klimawandel: Treibhauspotenzial (GWP, engl.: Global Warming Potential) über einen Zeitraum von 100 Jahren nach (IPCC 2014) in kg CO₂eq.
- ▶ Versauerung: Versauerungspotenzial (AP, engl.: Acidification Potential) nach (Hauschild und Wenzel 1998) in g SO₂eq.
- ▶ Eutrophierung aquatisch: Eutrophierungspotenzial, in das Wasser gelangende Nährstoffanteile (EP_{aq}) nach (Heijungs et al. 1992) in g PO₄eq.
- ▶ Eutrophierung terrestrisch: Eutrophierungspotenzial, auf Land eingetragene Nährstoffanteile (EP_{ter}) nach (Heijungs et al. 1992) in g PO₄eq.
- ▶ Photochemische Ozonbildung (Sommersmog): troposphärisches Ozonbildungspotenzial (POCP, engl.: Photochemical Ozone Creation Potential) nach ReCiPe (Goedkoop et al. 2009) in g C₂H₄eq.
- ▶ Ozonabbau: Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht, (ODP, engl.: Ozone Depletion Potential) nach (WMO 2014) in g CFC-11eq.
- ▶ Feinstaubbelastung: Schadwirkung auf die menschliche Gesundheit durch Partikel <2,5 µm, (PM_{2.5}, engl.: Particulate Matter) nach (De Leeuw 2002; WHO 2006) in kg PM_{2.5}eq.
- ▶ Ressourcenbeanspruchung: Kumulierter Energieaufwand (KEA) in MJ (LHV)
- ▶ Ressourcenbeanspruchung: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)
- ▶ Naturraumbeanspruchung: Hemerobie-Konzept nach (Fehrenbach et al. 2015) in m²a

- Frischwasserbedarf: Süßwasseraufnahme in l H₂O (ohne Kühlwasser und Input von Wasserkraftanlagen)

Anfänglich war in dieser Studie vorgesehen, die aquatische Ökotoxizität mit dem USEtox-Modell nach (Hauschild et al. 2008; Rosenbaum et al. 2008) zu berechnen. Im Laufe des Projektes beschlossen Auftraggeber und Bearbeiter dieses Forschungsvorhabens, auf die Berechnung dieser Umweltwirkungen zu verzichten. Zum einen liegt in der angepassten ecoinvent Datenbank (Kapitel 1.3) diese Bewertung nicht vor und eine Neuberechnung/-bewertung wäre mit hohem Aufwand verbunden gewesen. Zudem wird die Aussagekraft dieses Indikators im Rahmen der europäischen LCA-Harmonisierung als „eingeschränkt aussagekräftig“ eingeordnet (Saouter et al. 2020).

Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff für die Gewinnung von synthetischen Kohlenwasserstoffen aus erneuerbarem Strom wirft Fragen der Verfügbarkeit und der methodischen Bewertung auf. Wird das Kohlendioxid aus industriellen Abgasen gewonnen, werden nach Absprache mit dem Auftraggeber in dieser Studie die CO₂-Emissionen dem CO₂-liefernden Prozess zugeordnet. Diese Festlegung wurde so auch im Projekt SYSEET getroffen. Solche fossilen Emissionen werden in der Umweltbilanz der PtX-Energieträger nur nachrichtlich aufgeführt.

1.2.2 Normierung

In der Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wird auch eine Normierung der Resultate durchgeführt, so dass Entlastungen und Mehrbelastungen von Vergleichssystemen in verschiedenen Wirkungskategorien eingeordnet und besser bewertet werden können. Bei der Lebenszyklusanalyse nach ISO 14044 (ISO 2006) ist der Schritt der Normalisierung eine optionale Komponente. In ihm werden die Umweltbelastungen des untersuchten Prozesses in einer Wirkungskategorie ins Verhältnis zur Gesamtbelastung in einer definierten Region während eines Referenzjahres gesetzt, z. B. die Versauerung durch die Nutzung eines Pkw pro Fahrzeugkilometer ins Verhältnis zur gesamten anthropogenen Versauerung in Deutschland im Jahr 2000. Wird statt der Gesamtbelastung die jährliche Belastung pro Einwohner als Referenz herangezogen spricht man von Einwohnerdurchschnittswerten (EDW). Mit Hilfe der Normierung lassen sich signifikante von weniger signifikanten Ergebnissen unterscheiden. Wenn etwa ein Antriebstyp ein Mehrfaches der Belastung eines andern Antriebstyps in einer bestimmten Wirkungskategorie erzeugt, ist dies nur ein signifikanter Unterschied, wenn der Beitrag zum Einwohnerdurchschnittswert ebenfalls hoch ist. In Tabelle 3 sind die zur Normierung der Ergebnisse verwendeten Einwohnerdurchschnittswerte zur Belastung in Deutschland 2020 dargestellt.

Tabelle 3: Einwohnerdurchschnittswerte der Belastung in Deutschland 2020

Wirkungskategorie	Einheit	EDW	Quelle: ifeu-Berechnung basierend auf:
GWP	t CO ₂ eq.	9,0	(Günther et al. 2023)
AP	kg SO ₂ eq.	25	(Griffke 2023)
EP_ter	kg PO ₄ eq.	3,9	(Griffke 2023)
EP_aq	kg PO ₄ eq.	3,2	(Umweltbundesamt 2020)
POCP	kg Ethylen	13	(Griffke 2023)

Wirkungskategorie	Einheit	EDW	Quelle: ifeu-Berechnung basierend auf:
ODP	kg CFC11 eq.	0,022	(Günther et al. 2023)
PM2.5	kg PM2,5 eq.	18	(Griffke 2023)
KRA	t	50	(Destatis 2021; Giegrich et al. 2012)
KEA	GJ	145	(Buttermann et al. 2023)
Frischwasserbedarf	m ³	91	(DESTATIS 2022, 2023)
Hemerobie	m ² a	1,4*10 ³	(Fehrenbach et al. 2019)

1.3 Transformation des Hintergrundsystems

Mit zunehmender Defossilisierung der Energiesysteme und Industrieprozesse nimmt die Bedeutung der Vordergrundprozesse (z. B. Betrieb der Fahrzeuge) ab und die des so genannten Hintergrundsystems (z. B. Herstellung von Windkraft- und PV-Anlagen) zu. Zur Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen für Grundstoffe und Energieträger des Ökobilanz-Hintergrundsystems haben wir für die gewählten Transformationspfade die Emissionen und Rohstoffentnahmen der zugehörigen Prozessketten bestimmt. Die Berechnung erfolgte zu einem Großteil in dem UBA-Projekt REFINE (Dittrich et al. in Bearbeitung) auf Grundlage der Ökobilanzdatenbank ecoinvent. Dazu wurde die Datenbank-Version 3.7.1 (von Dezember 2020) in der Ausprägung Systemmodell ‚Cut-Off‘ herangezogen und an die Szenarien GreenSupreme und GreenLate aus RESCUE (Purr et al. 2019) für die Bezugsjahre 2030, 2040 und 2050 angepasst. Diese aufwendige Entwicklung setzt auf die methodische Vorarbeit im UBA-Projekt SYSEET (Liebich et al. 2020) auf und wurde gemeinsam mit dem Partner ecoinvent Association, einem in der Schweiz ansässigen gemeinnützigen Verein realisiert.

Die Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v3.7.1 besteht aus über 19000 Einzeldatensätzen. Diese beschreiben in der Regel einzelne technische Prozesse oder Marktmixe – mit den Input- und Outputflüssen zwischen ihnen und der Technosphäre (v. a. Zwischenprodukte und Abfälle) bzw. der Biosphäre (Rohstoffentnahme und Emissionen). Diese Prozesse werden nach der Logik unterschiedlicher Systemmodelle untereinander verknüpft und stellen ein vereinfachtes Abbild der weltweiten Produktionsverflechtungen dar. Strukturell werden die Prozesse in der Datenbank in Form einer erweiterten Matrix abgebildet, d.h. Veränderungen einzelner Prozesse in der Datenbank, die Rückkopplungen auf vorgelagerte Prozessschritte in der Lieferkette haben, können somit abgebildet und effizient neu berechnet werden. So hat beispielsweise die im Rahmen der Transformation angenommene technische Umstellung der Roheisenherstellung (Hochofen) auf DRI-Verfahren (Eisenschwamm), Reduktion mit Wasserstoff und anschließender Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen nicht nur direkt Einfluss auf das Umweltprofil der Stahlherstellung, sondern diese Veränderung hat indirekt Auswirkungen auf alle andere Produktlebenswege, die Stahl einsetzen –so auch auf die Umweltwirkungen des Strommixes, der zukünftig, insbesondere über den Bau von Windenergieanlagen, viel Stahl benötigt. Dieser Strom, erzeugt mit einem erhöhtem Stahlbedarf, geht wiederum in die Stahlherstellung ein, wodurch sich der Kreis schließt. Diese Rückkoppelungsmechanismen werden bei der Berechnung mit Hilfe der der Matrix in ecoinvent aufgelöst. Somit können die Umwelteinwirkungen aller Prozesse in der Matrix in Abhängigkeit aller anderen Prozesse ermittelt werden.

Die Anpassungen der ecoinvent-Datenbank basieren auf den Annahmen und Rahmenbedingungen für die Bezugsjahre 2030, 2040 und 2050 der RESCUE-Szenarien GreenSupreme. Diese beinhalten auch die Einführungen neuer und veränderter Technologien, die wir entsprechend in der Datenbank ergänzt bzw. modifiziert haben (insgesamt ca. 300 Datensätze).

Neue Prozesse/Technologien:

- ▶ Wasser-Elektrolyse (inkl. Herstellung Elektrolyseure) für H₂
- ▶ Direct Air Capture-Anlage für CO₂
- ▶ CO₂-Abscheidung aus Rauchgas mittels Aminwäsche
- ▶ Fischer-Tropsch-Synthese PtL (v. a. Benzin und Diesel)
- ▶ Methanisierung PtG (SNG)
- ▶ Methanolsynthese (direkt aus CO₂ und H₂)
- ▶ Ammoniak aus H₂ und N₂
- ▶ DRI-Stahlherstellung mit H₂ als Reduktionsmittel
- ▶ Oberleitungs-Infrastruktur für Lkw
- ▶ Vanadium-Redoxflow-Batterie (für das GreenLate-Szenario)
- ▶ CO₂-Speicherung im Untergrund inkl. Kompression und Transport (CCS für das GreenLate-Szenario)
- ▶ Wasserstoff-Tank für Fahrzeuge
- ▶ Wärmeerzeugung aus Wasserstoff
- ▶ Wasserstofftransport per Pipeline

Für einige Schlüsseltechnologien existierten bereits Datensätze in der ecoinvent-Datenbank. Diese konnten im Rahmen des UBA-Vorhabens SYSEET (Liebich et al. 2020) und in REFINE (Dittrich et al. in Bearbeitung) aktualisiert werden.

Aktualisierte Prozesse:

- ▶ Windkraftanlagen, onshore/offshore
- ▶ PV-Anlagen, Freifläche/Aufdach
- ▶ Li-Ionen-Akku (in 2050 als Li-S-Akku)
- ▶ CSP-Kraftwerk
- ▶ Geothermie-Kraftwerk
- ▶ Brennstoffzellen
- ▶ Meerwasserentsalzung

In der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent liegen die Prozessdaten in der Regel disaggregiert vor, d. h. Rohmaterial- und Energieeinsatz sowie die Emissionen eines Prozesses werden separat ausgewiesen und dokumentiert. Datenlieferanten aus der Industrie haben aber (in der Vergangenheit) häufig aus Geheimhaltungs- und Wettbewerbsgründen ihre Daten nur aggregiert zur Verfügung gestellt; dabei sind die Vorkettendaten für Energie- und Rohstoffbereitstellung bereits einbezogen. Mit den aggregierten Daten kann aber die Transformation der Energiewende, also die Umstellung von fossilen Rohstoffen auf erneuerbare

Energieträger (Strom und PtX) nicht abgebildet werden. Daher wurden 37 aggregierte LCA-Datensätze disaggregiert; dies betrifft v. a. Prozesse der Grundstoffchemie und Kunststoffherstellung, für die wir auf (vertrauliche) Erkenntnisse aus Industrieprojekten des ifeu zurückgreifen konnten. Die disaggregierten Prozessdaten stellen konservative Abschätzungen dar.

Eine sehr relevante Veränderung im Rahmen des Transformationsprozesses findet im Stromsektor statt. Die in den Szenarien ermittelten Strommixe für die drei Regionen sind in Kapitel 2.5.1 dargestellt. Diese wurden in ecoinvent in ca. 170 nationale/regionale Strommärkte eingesetzt.

Gemäß dem GreenSupreme-Szenario haben wir den Strom- und Wärmebedarf in den verschiedenen Verbrauchssektoren reduziert. Die Wärmebereitstellung erfolgt, wo technisch sinnvoll, elektrisch. Der Bedarf an Hochtemperaturwärme wird teilweise noch über die Power-to-Gas (PtG)-Produkte Wasserstoff und Methan abgedeckt. Für besonders energieintensive Branchen gibt es in RESCUE prozessspezifische Verbrauchsfaktoren, die auf die ecoinvent-Prozesse übertragen wurden:

- ▶ Metallherstellung: Stahl, Alu, Kupfer
- ▶ Zement
- ▶ Chemie (alle Prozesse mit ISIC Code 21, 22, 23)

Für alle anderen Branchen werden in RESCUE Energieeinsparungen von 51 % in den sonstigen Industriesektoren und 41 % für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) genannt. In ecoinvent wurden die betroffenen Prozesse über den ISIC-Code¹ herausgefiltert und entsprechend modifiziert.

Das GreenSupreme-Szenario ist hinsichtlich der Ressourceneffizienz besonders ambitioniert. Im Jahr 2050 werden für die Stahlherstellung Sekundäranteile von 52 % angesetzt und für Aluminium 65 %, Kupfer 58 %, Blei und Zink sogar 90 %. Diese Werte wurden auf die entsprechenden Datensätze in ecoinvent angewendet. Weiterhin gibt RESCUE eine allgemeine Materialeinsparung von 1,2 % pro Jahr an, bzw. eine Reduktion um 30 % in den Jahren von 2020 bis 2050. Für die Bereitstellung von Investitionsgütern wie Gebäude, Maschinen und Transportinfrastruktur sowie für Verpackungen wurde diese Annahme auf die ecoinvent-Datensätze übertragen.

Auch die nicht-energetische Nutzung fossiler Rohstoffe wird szenariogemäß im Jahr 2050 umgestellt. Für Erdölprodukte und Erdgas, die aktuell stofflich verwendet werden, kommen Power-to-Liquid (PtL)-Produkte aus der Fischer-Tropsch-Synthese oder PtG-Methan (SNG) zum Einsatz.

Auch im Verkehrssektor sehen die Szenarien drastische Veränderungen bis 2050 vor. Im Szenario GreenSupreme gelten z. B. im Verkehrssektor des Hintergrundsystems folgende Annahmen. Diese entsprechen nicht den in dieser Studie untersuchten Fahrzeugen und Kraftstoffen des Vordergrundsystems:

- ▶ Pkw sind vollständig batterieelektrisch und verfügen über eine Lithium-Schwefel-Batterie mit hoher Energiedichte (350 Wh/kg).

¹ ISIC: 'International Standard Industrial Classification' = Internationale Standardklassifikation der Wirtschaftszweige

- ▶ Leichte Nutzfahrzeuge sind in 2050 ebenfalls zu 100 % als rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) ausgelegt.
- ▶ Für schwere Nutzfahrzeuge bis 32 t werden Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) angenommen, die im Verbrennungsmotor PtL-Diesel einsetzen.
- ▶ Die Last- und Sattelzüge mit über 32 t zulässigem Gesamtgewicht sind für den Güterverkehr hinsichtlich der Transportleistung am wichtigsten. Diese Fahrzeuge sind in dem GreenSupreme-Szenario als hybride Oberleitungs-Lkw (O-HEV) ausgelegt, die auf Autobahnen überwiegend elektrisch fahren. Der angenommene elektrische Fahranteil beläuft sich durchschnittlich auf 65 %. Im Dieselmotor wird PtL genutzt.
- ▶ Die Emissionen aus Verbrennungsmotoren entsprechen weltweit der EURO 6d Abgasnorm.
- ▶ Im Flugverkehr und in der Schifffahrt wird ebenfalls fossiler Kraftstoff durch PtL ersetzt.

Nach den Anpassungen der Datensätze werden mithilfe der modifizierten Matrizen die Sachbilanzen (LCI) aller darin enthaltener Datensätze in Abhängigkeit voneinander neu berechnet. Diese umfassen alle bereits in ecoinvent v3.7.1 enthaltenen Datensätze sowie alle modifizierten und hinzugefügten Datensätze. Somit werden z. B. alle Datensätze, welche Elektrizität benötigen mit den angepassten Strommischen neu berechnet. Auf die Sachbilanzen werden dann zum Schluss die vom ifeu definierten LCIA-Methoden (engl.: Life Cycle Impact Assessment) nach Zuordnung zur ecoinvent Nomenklatur und Einbindung in der entsprechenden Matrix, angewendet.

Insgesamt haben wir im Rahmen der Anpassung der ecoinvent LCA-Datenbank je Szenario und Bezugsjahr insgesamt ca. 3.000 Datensätze ergänzt und modifiziert und ca. 70.000 Parameter in Datensätzen geändert oder neu erzeugt. ecoinvent hat für die technische Übertragung der Daten einige Prüfroutinen eingeführt, die helfen, systematische Fehler zu vermeiden. Zudem werden die Veränderungen in der Datenbank protokolliert.

Die Prüfung der Ergebnisse stellte eine große Herausforderung für alle Beteiligten dar. Jede Neuberechnung erzeugt über 19.000 Ergebnis-Datensätze mit jeweils ca. 2.100 Elementarflüssen und 25 Indikator-Ergebnissen je Bezugsjahr und Szenario. Dieser Großzahl an Ergebnissen stehen aber keine Referenz-Ergebnisse aus anderen Ökobilanz-Berechnungen gegenüber, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich war. Wir haben eine erste Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse anhand von 60 Datensätzen durchgeführt, die im Wesentlichen den Gütern aus dem GdK-Vorhaben (Dittrich et al. in Bearbeitung) entsprechen.

Im GreenSupreme-Szenario ist aus den RESCUE-Ergebnissen bekannt, dass sich die CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen allgemein bis 2050 um mindestens 95 % gegenüber 2020 reduzieren (mit Ausnahmen, z. B. für die Klinkerherstellung, die im Kalzinierungsprozess CO₂ aus Karbonaten freisetzt). Zudem ist der Einsatz von fossilen und nuklearen Energieträgern in diesem Szenario weltweit in 2050 ausgeschlossen, so dass die Indikatoren KEA, fossil und KEA, nuklear (KEA = Kumulierter Energieaufwand) in 2050 Null betragen müsste.

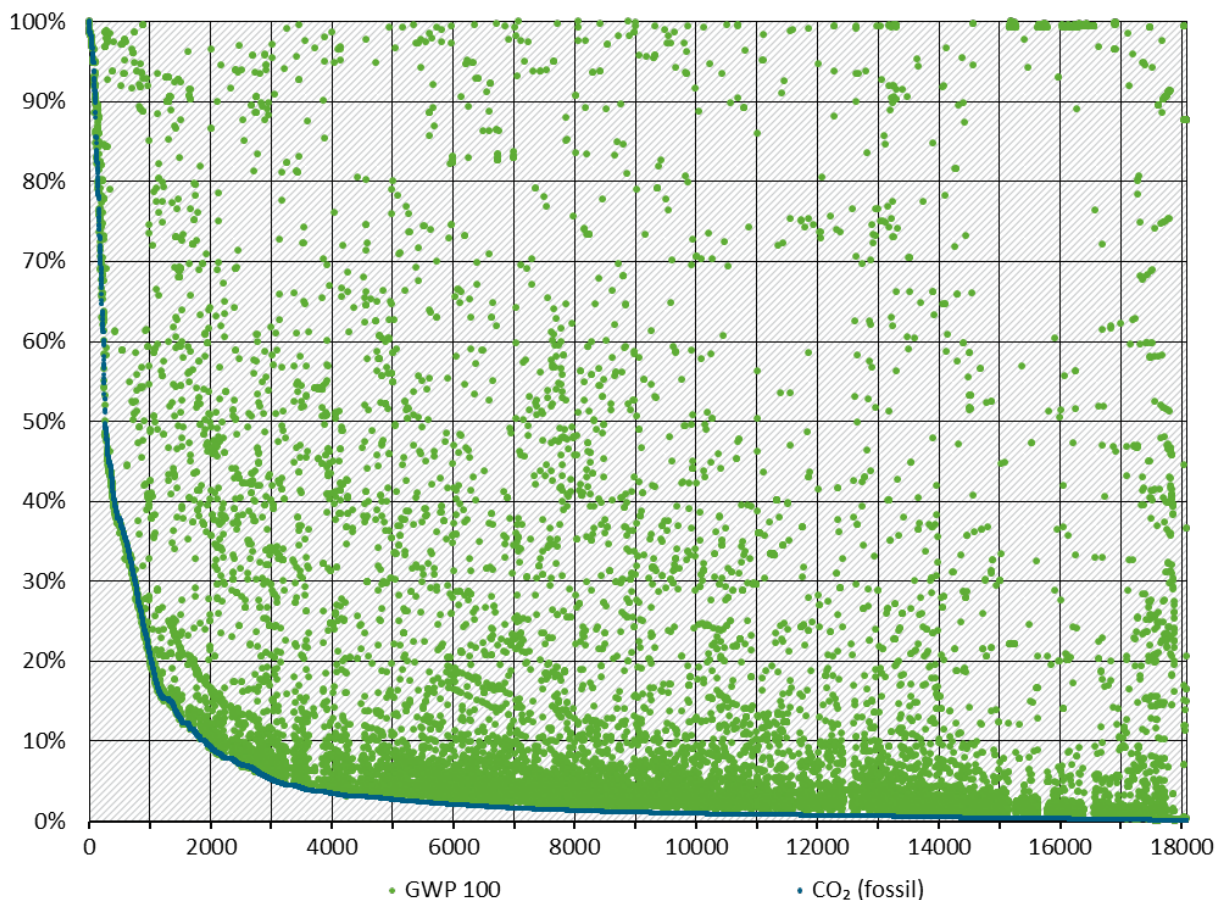
Wir haben für alle Datensätze in der LCA-Datenbank die CO₂-Emissionen ausgewertet (Tabelle 4). Darin enthalten sind auch fossile Prozesse, die in 2050 nicht mehr genutzt werden (z. B. Strom aus Kohlekraftwerken). Die Ergebnisse des Szenarios GreenSupreme 2050 haben wir mit denen von 2020 verglichen. Außer der Größe CO₂, fossil haben wir auch die Ergebnisse für GWP, KEA, fossil und KEA, nuklear ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Vergleiche 2050/2020 sind in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 4: Verhältnis der Ergebnisse für 2050 und 2020 im relativen Vergleich für alle Datensätze in ecoinvent und das Szenario GreenSupreme

	Mittelwert	Median
CO ₂ , fossil	5 %	1 %
GWP	19 %	6 %
KEA, fossil	5 %	0,3 %
KEA, nuklear	2 %	0,03 %

Im Mittel liegen die fossilen CO₂-Emissionen in der Datenbank für 2050 also bei 5 % der Emissionen von 2020. Betrachtet man den Median, so liegen das verbleibende fossile CO₂ sogar nur noch bei rund 1 %. Für den GWP ist die Abnahme nicht ganz so stark, während KEA, fossil und KEA, nuklear in der gleichen Größenordnung liegen.

Abbildung 10: Ergebnisse aller ecoinvent-Datensätze des Szenarios GreenSupreme 2050 im Vergleich zu 2020 für CO₂, fossil (grün) und GWP 100a (blau)



Quelle: eigene Berechnung ifeu/ecoinvent

In Abbildung 10 zeigt sich noch einmal grafisch, dass sich die CO₂-fossil-Ergebnisse (grün, sortiert nach dem Anteil der verbleibenden CO₂-Emissionen in 2050 im Vergleich zu 2020) für die meisten Datensätze in ecoinvent in 2050 infolge der Anpassung um mehr als 95 % reduzieren. Auch liegen die dazugehörigen GWP-Ergebnisse (rot) überwiegend nur leicht über den CO₂-fossil-Ergebnissen; d. h. CO₂, fossil ist auch 2050 das dominierende Treibhausgas in

GreenSupreme. Das verbleibende fossile CO₂ in 2050 stammt aus Karbonaten, die z. B. beim Brennen von Kalk für die Zementherstellung freigesetzt werden. Weitere relevante Treibhausgase sind Methan und Lachgas. Prozesse, die in 2020 fossile Energieträger einsetzen, liegen auch noch in den Datenbanken für 2030, 2040 und 2050 vor, werden aber nicht mehr von anderen Prozessen in den defossilisierten Szenarien genutzt. Diese Relikte in der LCA-Datenbank sind aber in dieser Abbildung noch sichtbar –als Ergebnisse für CO₂, fossil, die noch über 50 % im Vergleich zu 2020 betragen. Die Werte für KEA, fossil und KEA, nuklear in Tabelle 4 gehen ebenfalls auf diese Relikte zurück.

Weiterhin wurden für alle Datensätze zehn Indikatoren ausgewertet und mit der 2020-Referenz verglichen, um statistische Auffälligkeiten zu lokalisieren. Wir haben insgesamt knapp 30 Iterationsschleifen durchgeführt bis zu dem Punkt, an dem keine statistisch auffälligen Ergebnisse mehr enthalten waren.

2 Grundlagen der Bilanzierung

2.1 Fahrzeugeigenschaften und Verbrauchswerte

In diesem Projekt werden keine konkreten Fahrzeugmodelle, sondern generische Referenzfahrzeuge miteinander verglichen, die typisch für die entsprechende Fahrzeugklasse sind. Für diese generischen Fahrzeuge werden dementsprechend die wichtigsten technischen Daten (z. B. Leergewicht, Motorleistung, Tank- bzw. Akkugröße) abgeleitet, da diese sowohl für die Verbrauchsermittlung als auch für die Herstellungsaufwendungen benötigt werden.

Dabei werden realitätsnahe (Real-)Verbräuche ermittelt, da sich gezeigt hat, dass die Fahrzeugverbräuche im Testzyklus niedriger als die real erreichten Werte auf der Straße ausfallen. Um die Schadstoffemissionen zu ermitteln wird jeweils mit dem aktuellen verfügbaren Emissionsstandard gearbeitet, dies ist bei den meisten Fahrzeugen heute Euro 6d. Insbesondere die Stickoxidemissionen steigen dabei jedoch über den Fahrzeuglebenszyklus durch Alterungseffekte deutlich an. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt bei Fahrzeugen mit sehr hohen Lebenslaufleistungen wie den schweren Nutzfahrzeugen.

Neben den Daten für heutige Fahrzeuge werden auch plausible Entwicklungen (z. B. anhand von Trends oder angekündigten Fahrzeugtypen) für die zukünftigen Fahrzeugeigenschaften und mögliche Effizienzentwicklungen abgeleitet.

Als Datenbasis für die Fahrzeugverbräuche und direkten Emissionen werden insbesondere das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA 4.2) sowie TREMOD 6.23 (Transportemissionsmodellierung) genutzt. Für die schweren Nutzfahrzeuge wird zudem auf andere ifeu Projekte zu Lkw mit alternativen Antrieben zurückgegriffen. Alle Verbräuche und Emissionen werden jeweils nach Straßenkategorien differenziert (außerorts-innerorts-Autobahn) und dann anhand typischer Nutzungsmuster, die im folgenden Kapitel 2.2 beschrieben werden, gewichtet. Bei den schweren Nutzfahrzeugen wird immer von einer mittleren Auslastung ausgegangen.

2.1.1 Eigenschaften der Kompaktklasse-Pkw

Das Handbuch für Emissionsfaktoren (und auch TREMOD) weisen nur einen mittleren Pkw aus, ohne Bezug auf ein spezifisches Segment. Aus diesen Daten lässt sich daher nicht direkt ein Kompaktklasse-Pkw ableiten. Zusätzlich gibt es deutliche Unterschiede bei den Eigenschaften zwischen den Antrieben. So ist ein mittlerer Diesel-Pkw deutlich schwerer und leistungstärker als ein Benzin-Pkw und weist damit auch einen höheren Verbrauch auf. Daher müssen für jede Antriebsart typische Eigenschaften eines durchschnittlichen Kompaktklasse-Fahrzeug ermittelt werden. Es wird also nicht von einem möglichst gleichartigen Fahrzeug (z. B. der Golfklasse) ausgegangen, sondern es wird berücksichtigt, dass auch zwischen dem Kompaktklasse-Pkw mit unterschiedlichen Antriebsarten unterschiedliche Gewichte und Motorleistungen auftreten. Damit werden die Ergebnisse deutlich realitätsnäher, aber ein rein antriebsbezogener Vergleich ist nur eingeschränkt möglich.

Eigenschaften heutiger Fahrzeuge

Zunächst werden für die Elektro-Pkw die Akkugrößen anhand von Herstellerangaben recherchiert und aufbereitet. Datengrundlage sind die modellfeinen Neuzulassungsdaten (NZL) für die Jahre 2020 sowie das erste Halbjahr 2021 des Kraftfahrtbundesamtes (KBA).

Tabelle 5: Elektro-Pkw Neuzulassungen (Kompaktklasse) nach KBA (2020/ 2021)

	Akkugröße	NZL 2020	NZL 2021 (1.Halbjahr)
Volkswagen e-Golf	32 kWh	17.438 Stück	1.570 Stück
Volkswagen ID.3	45 kWh 58 kWh 77 kWh	14.493 Stück	21.539 Stück
Nissan Leaf	36 kWh 56 kWh	3.597 Stück	2.883 Stück
Hyundai Ioniq	38 kWh	1.915 Stück	1.766 Stück
Opel Ampera	58 kWh	680 Stück	14 Stück
Citroen C4	47 kWh	19 Stück	958 Stück
Mittelwert		38 bis 52 kWh	43 bis 69 kWh

Stand Anfang 2022

Die Untersuchung aktueller Akkukapazitäten von Kompaktklasse-Pkw zeigt deutlich den Trend zu steigenden Fahrzeugreichweiten und Akkugrößen. Daher wird, auch nach Rücksprache mit den Stakeholdern, für 2020 von einer nutzbaren Akkukapazität von 55 kWh ausgegangen, was in etwa einer realen Reichweite von 300 km entspricht.

Eine Untersuchung aktueller Fahrzeugmodelle für Plug-In Hybride im Kompaktklassesegment ergibt eine Akkugröße zwischen 8 und 16 kWh, damit wird in dieser Studie von einer mittleren Akkugröße von 10 kWh ausgegangen, was einer rein elektrischen realen Reichweite von 50 km entspricht. Aktuelle Kompaktklasse-Pkw mit CNG Antrieb haben eine Tankgröße zwischen 17,3 (z. B. Seat Leon oder Audi A3) und 21,3 kg (VW Caddy), in dieser Studie wird von 17,5 kg ausgegangen. Bisher gibt es noch keine Wasserstoff-Brennstoffzellen-Pkw (FCEV) in der Kompaktklasse, daher wird hier anhand der Reichweite von 500 km eine Tankgröße des H₂-Tanks von 5,4 kg Wasserstoff berechnet und angesetzt.

Anhand einer Sonderauswertung der Neuzulassungen im Jahr 2020 des Kraftfahrtbundesamtes wird zudem ermittelt welche durchschnittlichen Leergewichte und Motorleistungen die Kompaktklasse-Pkw haben. Um aus den HBEFA-Verbrauchswerten für einen durchschnittlichen Pkw auch realitätsnahe Verbrauchswerte für einen Kompaktklasse-Pkw zu ermitteln, wird zudem ein Korrekturfaktor auf Basis der CO₂-Emissionen im WLTP ermittelt. Dazu werden die WLTP-Werte für einen Kompaktklasse-Pkw den mittleren Pkw für Benzin-/ Diesel-Pkw gegenübergestellt.

Tabelle 6: Eigenschaften der Pkw Neuzulassungen 2020 nach KBA

	Leergewicht Kompaktklasse	CO2 Emissionen WLTP nur Kompaktklasse	CO2 Emissionen WLTP alle Pkw	Abweichung
Benzin	1395 kg	145,4 g/km	151,9 g/km	-4,3 %
Diesel	1492 kg	130,3 g/km	161,3 g/km	-19,2 %
CNG	1361 kg	k.A.	k.A.	-
Elektro	1695 kg	0 g/km	0 g/km	
Plug-In Hybrid	1659 kg	k.A.	k.A.	

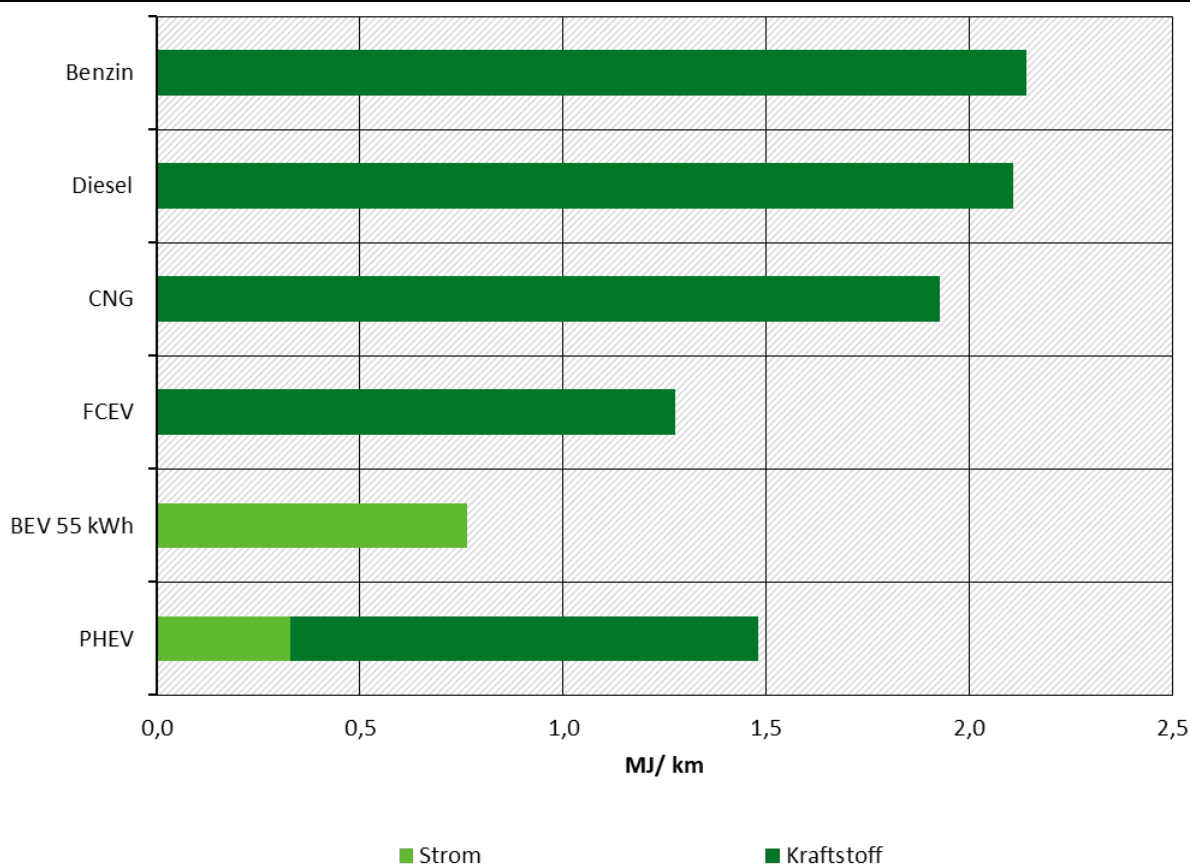
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei den schwereren Dieselfahrzeugen liegt der Verbrauch des Kompaktklassefahrzeugs entsprechend fast 20 % unter dem Durchschnitt, bei Benzin-Pkw dagegen nur gut 4 %. Bei den CNG Fahrzeugen sowie dem Plug-In Hybrid Pkw zeigt sich, dass der im HBEFA 4.2 berechnete Pkw ziemlich genau einem Kompaktklasse-Pkw entspricht, damit ist hier keine Verbrauchskorrektur notwendig. Für den Elektro-Pkw wurde im HBEFA ebenfalls ein Kompaktklassefahrzeug hinterlegt, allerdings mit einem etwas kleinerem Akku. Um dem größeren Akku des hier angenommenen Fahrzeugs Rechnung zu tragen, wird das resultierende Mehrgewicht von ca. 70 kg mit einem Verbrauchsaufschlag von 0,5 kWh/100 km berücksichtigt nach (Helms und Kräck 2016).

Die nicht korrigierten Basisverbräuche der Pkw stammen aus der Version 4.2 des HBEFA für die alten² deutschen Verkehrssituationen. Die damit erhaltenen, bereits für die betrachteten Kompaktklasse-Pkw adaptierten Verbräuche zeigt Abbildung 11.

² Auf die Verwendung der Daten mit den aktualisierten Verkehrssituationen wird verzichtet, da es hier methodische Inkonsistenzen gibt die zu teilweise fehlerhaften Zuordnungen der aggregierten Verkehrssituationen führen.

Abbildung 11: Verbräuche der Kompaktklasse-Pkw im Jahr 2020 (durchschnittliche Nutzung)



Anmerkung: PHEV Pkw mit elektrischer Fahrleistung von 45%.

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Fortschreibung der Fahrzeugeigenschaften

Neben den Eigenschaften für heutige Kompaktklasse-Pkw werden auch die möglichen Eigenschaften zukünftiger Pkw benötigt. Dafür werden Annahmen zu den künftigen Reichweiten und Akkukapazitäten (bzw. Tankgrößen) der Pkw mit alternativen Antrieben getroffen und im Rahmen der Stakeholderdialoge diskutiert.

Tabelle 7: Entwicklung der Reichweiten und Energiespeichergrößen der Kompaktklasse-Pkw

	Energiespeicher 2020	Reale Reichweite 2020	Energiespeicher 2030 - 2050	Reale Reichweite 2030 - 2050
BEV	55 kWh	300 km	80 kWh	440 km
PHEV	10 kWh	53 km	14 kWh	75 km
CNG	17,5 kg	400 km	18,3 kg	500 km
FCEV	5,4 kg	500 km	5,4 kg	500 km

Anmerkung: Ab 2030 bleiben die Fahrzeugeigenschaften unverändert

Weitere Varianten der Akkugrößen bei Pkw werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse(n) untersucht.

Bei der zukünftigen Effizienzentwicklungen von Kompaktklasse-Pkw kann beim klassischen (bisher nicht hybridisierten) Verbrenner-Pkw mit sinkenden Verbräuchen in den nächsten Jahren aufgrund von Effizienzgewinnen gerechnet werden (insbesondere getrieben durch eine Umstellung auf Vollhybride). Bei den Pkws mit Elektroantrieb werden dagegen keine Effizienzsteigerungen angenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei den BEV-Pkw die Effizienzverbesserungen und Gewichtseinsparungen durch höhere Energiedichten der verbauten Akkus durch die Reichweitenzunahme und damit wieder Gewichtssteigerungen kompensiert werden. Zudem kann bei einer Einführung von alternativen Antrieben in der Breite davon ausgegangen werden, dass diese in Zukunft auch für weitere Anwendungsbereiche mit höheren Verbräuchen (z. B. Urlaubsfahrten mit Dachboxen) genutzt werden. Aktuell gibt es keine Erkenntnisse zur Höhe möglicher Effizienzsteigerungen in den Brennstoffzellen selber, daher wird davon ausgegangen, dass auch bei den FCEV-Pkw die Verbräuche im Zeitverlauf gleich bleiben. Da Verbrenner-Pkw in den nächsten Jahren vermutlich verstärkt durch alternative Antriebe abgelöst werden, wird davon ausgegangen, dass ab 2030 keine Weiterentwicklungen bei den Verbrennungsmotoren mehr vorgenommen werden und damit die Fahrzeugeffizienz gleich bleibt.

Tabelle 8: Effizienzverbesserungen der Kompaktklasse-Pkw

	Benzin / Diesel	PHEV / FCEV / BEV
2020 - 2025	2,1 % pro Jahr	-
2025 - 2030	1,4 % pro Jahr	-

Quelle: TREMOD 6.23; eigene Annahmen

Anmerkung: Durch Verschiebungen in den Fahrzeugsegmenten bei den Neuzulassungen müssen diese Effizienzverbesserungen nicht auf die gesamte Fahrzeugflotte zutreffen.

2.1.2 Eigenschaften der leichten Nutzfahrzeuge

Für die leichten Nutzfahrzeuge der Klasse N1-III ist das Vorgehen deutlich einfacher, da für diese Fahrzeuge direkt Daten aus dem HBEFA 4.2 vorliegen und genutzt werden können. Tabelle 9 zeigt eine Übersicht aktueller LNF mit alternativen Antrieben sowie die in dieser Studie verwendeten Daten für die generischen leichten Nutzfahrzeuge-

Tabelle 9: Eigenschaften ausgewählter LNF mit alternativem Antrieb

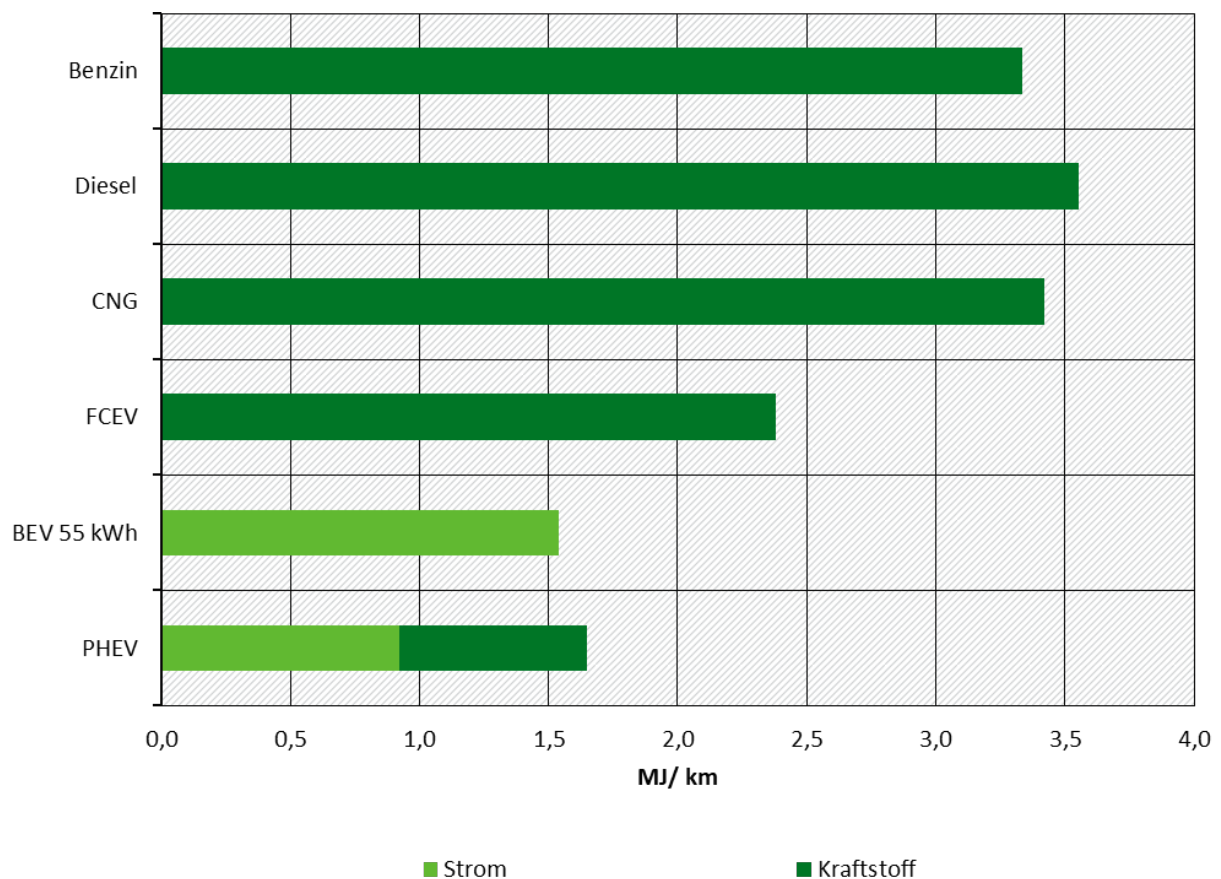
	Akkugröße (reale Fahrzeuge)	Akkugröße (diese Studie)
Streetscooter Work	40 kWh	
Mercedes Benz eSprinter	35 kWh 47 kWh	
Citroen e-Jumpy M	50 kWh 75 kWh	
Ford Transit PHEV	13,6 kWh	
LNF N1-III BEV		55 kWh
LNF N1-III PHEV		14 kWh

Quelle: Herstellerangaben; Akkukapazität LNF N1-III BEV analog zum Kompaktklasse-Pkw gewählt aufgrund geringer Modellvielfalt aktuell am Markt.

Das leichte Nutzfahrzeug mit 55 kWh Akku hat eine Reichweite von etwa 150 km. Aktuell gibt es am Markt kein leichtes Nutzfahrzeug mit reinem Wasserstoffantrieb (FCEV). Daher wird hier die Annahme getroffen, dass ein solches Fahrzeug eine Reichweite von 500 km und damit einen Wasserstofftank mit 10 kg hat. Analog wird auch das CNG LNF N1-III ausgestattet, dass damit einen CNG Tank mit einem Fassungsvermögen von 30 kg bekommt.

Die Verbräuche der LNF N1-III aus der Version 4.2 des HBEFA für die alten deutschen Verkehrssituationen werden in Abbildung 12 gezeigt. Die einzige Anpassung gegenüber den HBEFA 4.2 Werten erfolgt beim Plug-In Hybrid LNF N1-III, da hier bei den Daten des HBEFA ein deutlich kleinerer Akku hinterlegt wurde und damit ein Mehrgewicht von 70 kg auftritt.

Abbildung 12: Verbräuche der LNF N1-III im Jahr 2020 (durchschnittliche Nutzung)



Anmerkung: PHEV mit elektrischer Fahrleistung von 45%.

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Annahmen zu den zukünftigen Reichweiten und Akkukapazitäten (bzw. Tankgrößen) der LNF N1-III zeigt Tabelle 10.

Tabelle 10: Entwicklung der Reichweiten und Energiespeichergrößen der LNF N1-III

	Energiespeicher 2020	Reale Reichweite 2020	Energiespeicher 2030 - 2050	Reale Reichweite 2030 - 2050
BEV	55 kWh	150 km	75 kWh	200 km
PHEV	14 kWh	40 km	18 kWh	55 km
CNG	30 kg	400 km	31,5 kg	500 km
FCEV	10 kg	500 km	10 kg	500 km

Anmerkung: Ab 2030 bleiben die Fahrzeugeigenschaften unverändert

Analog zu den Kompaktklasse-Pkw werden auch bei den leichten Nutzfahrzeugen lediglich Effizienzgewinne der reinen Verbrenner bis zum Jahr 2030 angesetzt.

Tabelle 11: Effizienzverbesserungen der LNF N1-III

	Benzin / Diesel	PHEV / FCEV / BEV
2020 - 2025	1,9 % pro Jahr	-
2025 - 2030	1,3 % pro Jahr	-

Quelle: TREMOD 6.23; eigene Annahmen

2.1.3 Eigenschaften der Sattelzüge

Bei den schweren Nutzfahrzeugen werden in dieser Studie nur Sattelzüge betrachtet. Hier kann für die Ableitung der Eigenschaften auf eine Reihe von ifeu Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Da in der Breite bisher keine Einführung von Sattelzügen mit alternativen Antriebsarten erfolgt ist, werden diese erst ab dem Jahr 2030 analysiert.

Analysen zum Potenzial von schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben im Rahmen des Projektes My eRoads (Jöhrens et al. 2022) haben ergeben, dass diese Fahrzeuge in den meisten Fällen eine Tagesfahrweite zwischen 200 und 600 km (im Mittel 400 km) aufweisen. Daher wird die Reichweite eines typischen Last-/ Sattelzuges mit 500 km angenommen, da besonders hohe Tagesfahrweiten aus Kostengründen auch mittelfristig eher nicht von batterieelektrischen Lkw übernommen werden. Bei den reinen batterieelektrischen Lkw wird zudem davon ausgegangen, dass eine Zwischenladung in den ohnehin notwendigen Lenkzeitpausen der FahrerInnen erfolgen kann. Wasserstoffverbrenner oder Brennstoffzellen-Lkw werden vermutlich eine größere Reichweite aufweisen, in Höhe der doppelten mittleren Tagesfahrweite (also ca. 800 km).

Neben den rein elektrischen oder rein verbrennungsmotorischen Konzepten werden bei den schweren Nutzfahrzeugen auch zwei Varianten an Oberleitungs-Lkw betrachtet:

- ▶ Oberleitungshybrid-Lkw (O-HEV) mit einem kleinen Akku, der abseits der Oberleitungen verbrennungsmotorisch fährt
- ▶ Oberleitungs-batterieelektrischer Lkw (O-BEV), der mit Hilfe eines größeren Akkus bis zu 120 km ohne Oberleitung elektrisch fahren kann.

Tabelle 12: Eigenschaften der Last-/ Sattelzüge (40 t zGG)

	Leergewicht	Motorleistung / Brennstoffzelle	Max. Zuladung	Energiespeicher	Reale Reichweite
Diesel / LNG	15,9 t	327 kW	24,1 t		
O-HEV	16,9 t	327 kW	23,1 t	15 kWh	
BEV	19,1 t	327 kW	20,9 t	730 kWh	500 km
O-BEV	16,2 t	327 kW	23,8 t	160 kWh	120 km (ohne OL)
FCEV	16,7 t	327 kW / 200 kW	23,3 t	54 kg + 72 kWh	800 km + 50 km el.
H2-ICE	16,6 t	327 kW	23,4 t	62 kg	800 km

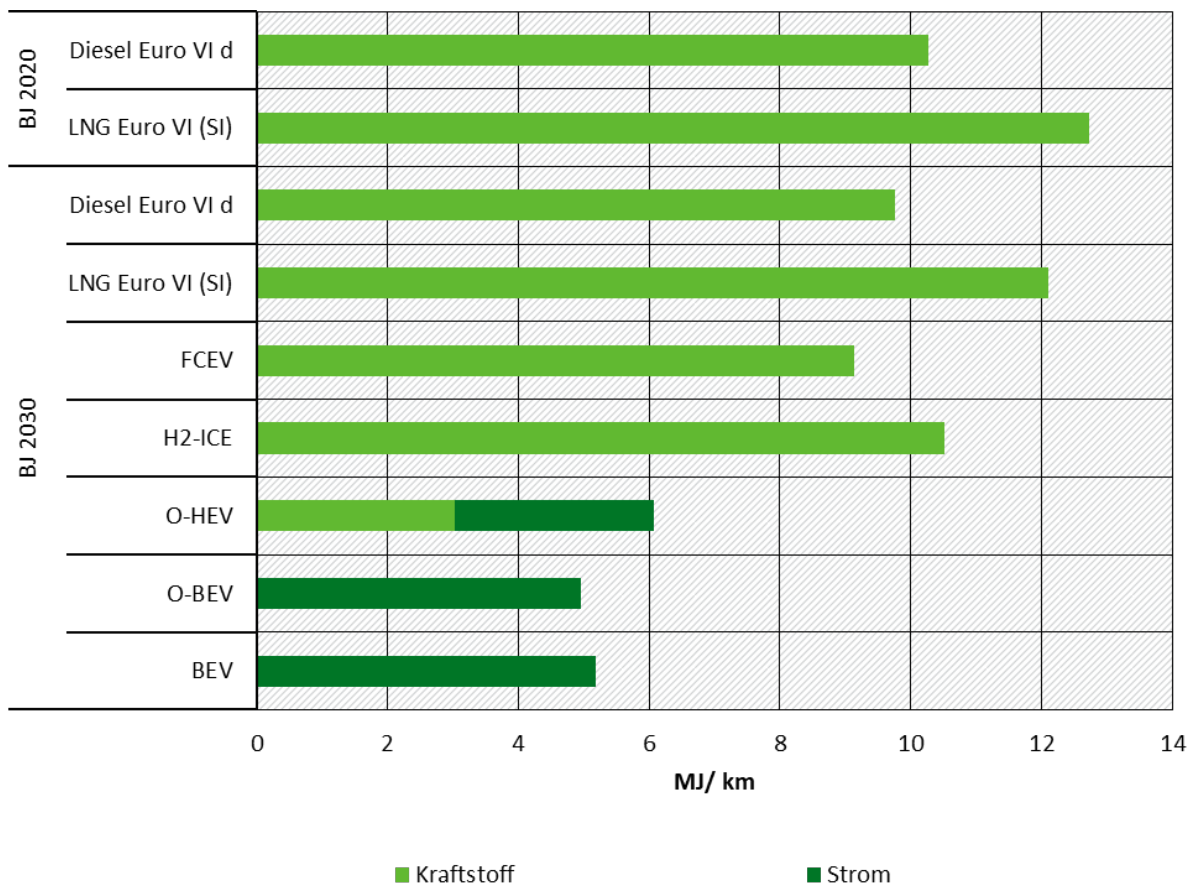
Anmerkung: Die Fahrzeugeigenschaften bleiben mit den Jahren unverändert.

Die Ableitung der Verbräuche der Last-/ und Sattelzüge basiert zunächst auf den Daten für einen heutigen Euro VI-d Diesel-Lkw bzw. auf Angaben aus My eRoads zu den Verbräuchen der (hybrid)elektrischen Lkw. Nach (Biemann et al. 2023) verbraucht ein LNG Lkw mit Ottomotor etwa 24 % mehr Kraftstoff als ein Diesel-Lkw. Der dual-fuel Diesel-Lkw hingegen hat dieselbe Motoreffizienz wie ein reiner Diesel-Lkw, er verbraucht allerdings zu etwa 60 % LNG und zu etwa 40 % Diesel. Die Oberleitungs-Lkw fahren jeweils auf der Autobahn unter der Oberleitung (und damit rein elektrisch), abseits der Autobahn wird entweder auf den Akku (beim O-BEV) oder den Dieselantrieb (beim O-HEV) zurückgegriffen.

Zwei bisher weniger untersuchte Antriebskonzepte für Lkw sind die Brennstoffzelle und der Wasserstoffverbrenner. Nach Angaben aus der FVV fuel study IV (Kramer, Ulrich et al. 2021) weist ein Brennstoffzellen-Lkw etwa einen um 6,4 % geringeren Verbrauch als ein Diesel-Lkw auf. Dies deckt sich gut mit Angaben aus dem HBEFA 4.2, wonach ein FCEV Lkw einen um gut 40 % höheren Verbrauch gegenüber einem rein elektrischen Lkw hat. Ebenfalls aus (Kramer, Ulrich et al. 2021) übernommen wird die Annahme, dass ein Wasserstoffverbrenner gegenüber dem Brennstoffzelle-Lkw einen über den gesamten Leistungs- und Lastbereich gemittelten Wasserstoffmehrerverbrauch von 15 % hat.

Die daraus resultierenden Verbräuche (jeweils für eine mittlere Fahrzeugbeladung) zeigt Abbildung 13.

Abbildung 13: Verbräuche der Sattelzüge (durchschnittliche Nutzung)



Dual-fuel LNG Lkw mit analogem Verbrauch zum Diesel Lkw
 Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Auch bei den schweren Nutzfahrzeugen werden die Effizienzsteigerungen bis zum Jahr 2030 lediglich für die verbrennungsmotorischen Konzepte angesetzt und aus TREMOD 6.43 übernommen.

Tabelle 13: Effizienzverbesserungen der LZ/SZ (40 t zGG)

	Diesel / LNG	FCEV / H2-ICE / BEV
2020 - 2030	0,5 % pro Jahr	-

Quelle: TREMOD 6.43; eigene Annahmen

Einfluss der Beladung von Sattelzügen auf die Umweltbilanz

Die funktionelle Einheit in dieser Studie ist ein Sattelzug mit mittlerer Beladung, die Bilanzierung erfolgt dabei für den Fahrzeugkilometer. Dies führt zu unterschiedlichen Fahrzeugleergewichten aufgrund zusätzlicher antriebsstrangspezifischer Komponenten wie z. B. des Akkus. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Fahrzeugleergewichte auf den Energieverbrauch werden entsprechend berücksichtigt.

Für den Güterverkehr kann alternativ auch eine Betrachtung pro Tonnenkilometer erfolgen. Damit würde dann auch berücksichtigt, wenn aufgrund technischer Einschränkungen (z. B. hohes

Akkugewicht) Unterschiede in der maximalen Zuladung existieren. In der Praxis greifen solche Beschränkungen jedoch nur teilweise, da die Fahrzeuge nicht immer mit voller Ladung betrieben werden. Der durchschnittliche Gesamtauslastungsgrad in Deutschland für 40 t Sattelzüge liegt bei etwa 50 %, was bereits darauf hindeutet, dass ein erheblicher Teil des Verkehrs nicht gewichtsbeschränkt ist. So liegt die maximale Zuladung des BEV zwar 13 % unter der eines Diesel und 3 % unter der eines FCEV, in der Praxis ist der Fahrleistungsanteil unter voller Beladung jedoch begrenzt. Eine Analyse des Treibhauspotenzials bei voller Beladung von (Helms et al. 2021) hat weiterhin gezeigt, dass die relativen Auswirkungen der verringerten maximalen Zuladung für BEVs pro Tonnenkilometer selbst bei ständig voller Beladung aufgrund der hohen absoluten Last begrenzt bleiben, so dass sich das Gesamtbild nicht drastisch ändert.

2.2 Nutzungsmuster der Fahrzeuge

2.2.1 Durchschnittliche Nutzungsmuster der Fahrzeugtypen

Im Projekt wird vorrangig eine direkte technische Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Antrieben angestrebt. Daher werden zunächst durchschnittliche Nutzungsprofile für die betrachteten Fahrzeugtypen abgeleitet und es wird keine Differenzierung nach Antrieben oder Nutzergruppen vorgenommen. Diese werden jedoch im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt. Es wird auch keine Änderung der Nutzerprofile für die Bezugsjahre 2030 und 2050 angenommen, damit Ergebnisse direkt miteinander vergleichbar bleiben. Eine Ausnahme bildet hier der elektrische Fahranteil (Utility Faktor) bei Plug-in-Hybridfahrzeugen, da hier steigende Reichweiten und bessere Infrastruktur einen Anstieg plausibel machen.

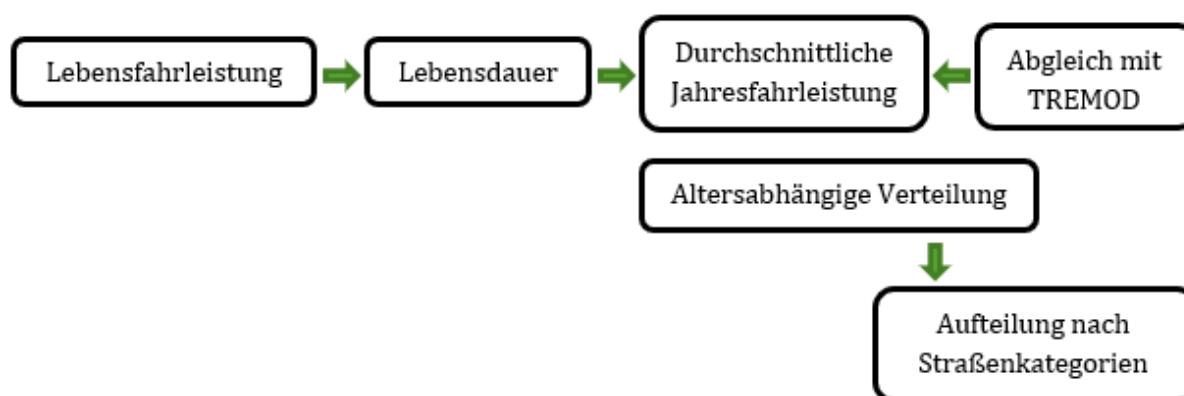
Zentrale Parameter für das Nutzungsmuster sind

- a) die durchschnittliche Lebensfahrleistung (auch zur Abschreibung der Herstellungsemissionen) und
- b) ihre Verteilung auf die Verkehrssituationen (verbrauchsrelevant),
- c) die Nutzungsdauer in Jahren und
- d) die Änderung der Jahresfahrleistung mit dem Alter (da Änderungen der spezifischen Emissionen der Energiebereitstellung über den Lebensweg möglich sind) und
- e) ein realitätsnaher Anteil für den elektrischen Betrieb bei PHEV (Utility Faktor) und Oberleitungs-Lkw.

Da bisher nicht klar ist, wieweit alternative Antriebskonzepte und Kraftstoffe außerhalb Deutschlands oder Europas weiterverwendet werden können, orientieren sich diese Parameter an einer Nutzung innerhalb Deutschlands oder Europas. Im Zweifel wird damit eher eine konservative Annahme getroffen.

Um Unsicherheiten auszugleichen und konsistente Nutzungsprofile zu ermitteln, wurden Daten sowohl zur Lebensfahrleistung, als auch zur Lebensdauer und Jahresfahrleistung gesammelt und miteinander verglichen (siehe schematisches Vorgehen in Abbildung 14). Auf die durchschnittliche Jahresfahrleistung werden dann Korrekturfaktoren für eine altersabhängige Verteilung gelegt und die Fahrleistung wird nach TREMOD auf die verschiedenen Straßenkategorien aufgeteilt.

Abbildung 14: Vorgehen zur Ableitung typischer Nutzungsmuster



Quelle: eigene Darstellung ifeu

In der Auswertung werden Daten des ifeu Transportemissionsmodells TREMOD (Allekotte et al. 2022), des HBEFA (Matzer et al. 2019), der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2017) und Sonderauswertungen des KBA verwendet sowie folgende Studien und Dokumente berücksichtigt: (Plötz et al. 2020b), (Kramer, Ulrich et al. 2021), (EU-Parlament und EU-Kommission 2019) und (Hill et al. 2020).

Tabelle 14 zeigt zunächst verschiedene Angaben zur Lebensfahrleistung. Bei Pkw stimmen die Angaben in TREMOD gut mit (Hill et al. 2020) überein, die Werte nach (Kramer, Ulrich et al. 2021) liegen etwas höher. Bei LNF stimmen die TREMOD-Werte dagegen gut mit (Kramer, Ulrich et al. 2021) überein, die Angaben in (Hill et al. 2020) liegen hier etwas niedriger. Um dies zu berücksichtigen und zur besseren Kommunikation werden die TREMOD-Annahmen jeweils in Richtung der abweichenden Daten gerundet, damit ergeben sich 220.000 km für Pkw und 280.000 km für LNF. Bei SNF liegen einige Literaturwerte deutlich unter dem berechneten Wert. Es ist hier teilweise aber auch unbekannt, ob die Werte tatsächlich für Sattelzüge gelten, die vor allem im Fernverkehr eingesetzt werden. Der TREMOD Wert wird dennoch deutlicher nach unten abgerundet auf 900.000 km.

Tabelle 14: Angaben zur Lebensfahrleistung

	Pkw	LNF	SNF
TREMOD	219.403	283.585	936.209
(Kramer, Ulrich et al. 2021)	257.856	272.000	704.000
(Hill et al. 2020) Default	225.000	240.000	800.000
(Hill et al. 2020) Low	150.000	200.000	600.000
(Hill et al. 2020) High	270.000	300.000	1.000.000
Gerundet	220.000	280.000	900.000

Bei der Nutzungsdauer sind Daten und Abgrenzungen tendenziell unscharf, auch aufgrund der Möglichkeit zur Zweitnutzung bzw. zum Export. Um eine Nutzung innerhalb Deutschlands oder Europas abzubilden wird daher eher eine konservative Annahme getroffen. Die Angaben zum Durchschnittsalter der Flotte nach KBA liegen hier bei deutlich über 50 % der Angaben zur typischen Lebensdauer, da in der Regel auch noch einige sehr alte Fahrzeuge in der Flotte sind.

So ergibt sich hier eine richtungssichere Tendenz:

- ▶ Bei Pkw liegen die Literaturwerte zwischen 16 Jahren (TREMODO) und 18 Jahren (Statista Research Department 2014), das Durchschnittsalter der Fahrzeugflotte liegt nach KBA bei 10,3 Jahren. Für dieses Projekt werden konservativ 16 Jahre Nutzungszeit angenommen.
- ▶ Bei leichten Nutzfahrzeugen ist die Nutzungsdauer in TREMOD mit durchschnittlich 14 Jahren hinterlegt, das Durchschnittsalter der Flotten beträgt nach KBA 8,4 Jahre. Für dieses Projekt werden 14 Jahre angenommen.
- ▶ Bei schweren Nutzfahrzeugen liegen die Angaben im Bereich von 8 Jahren (siehe (Allekotte et al. 2022) und (Kramer, Ulrich et al. 2021)), das Durchschnittsalter der Flotte nach KBA liegt bei 5,1 Jahren. In diesem Projekt werden 8 Jahre angenommen.

Mit den gerundeten Lebensfahrleistungen nach TREMOD und den Angaben zur Lebensdauer können nun typische Jahresfahrleistungen berechnet und mit weiteren Literaturwerten verglichen werden. Gegenüber den TREMOD-Angaben für die durchschnittliche Jahresfahrleistung gibt es für Pkw und LNF naturgemäß nur geringe Abweichungen, die vor allem durch die Rundung der Lebensfahrleistung bedingt sind. Die Angaben in FVV (Kramer, Ulrich et al. 2021) liegen für Pkw dagegen deutlich höher und für LNF deutlich niedriger. Es wird vermutet, dass in (Kramer, Ulrich et al. 2021) nur eine unscharfe Differenzierung zwischen Pkw und LNF vorgenommen wurde, was dafür spricht, die neu ermittelten Werte beizubehalten.

Da die Lebensfahrleistung für SNF deutlicher abgerundet wird, ergibt sich hier auch eine deutlichere Abweichung des vorgeschlagenen Wertes (112.500 km pro Jahr) zu TREMOD (124.053 km pro Jahr). Dafür liegt der vorgeschlagene Wert näher an den niedrigeren Angaben in FVV 2021 und nach EU 2019/1242. Im Sinne einer konservativen Betrachtung für Deutschland wird auch hier der vorgeschlagene Wert als plausibel erachtet. Trotz aller Unsicherheiten im Detail ergibt sich damit ein richtungssicheres Bild für die Lebens- und Jahresfahrleistung. Es besteht über diese durchschnittlichen Werte hinaus jedoch eine deutliche Varianz, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht wird.

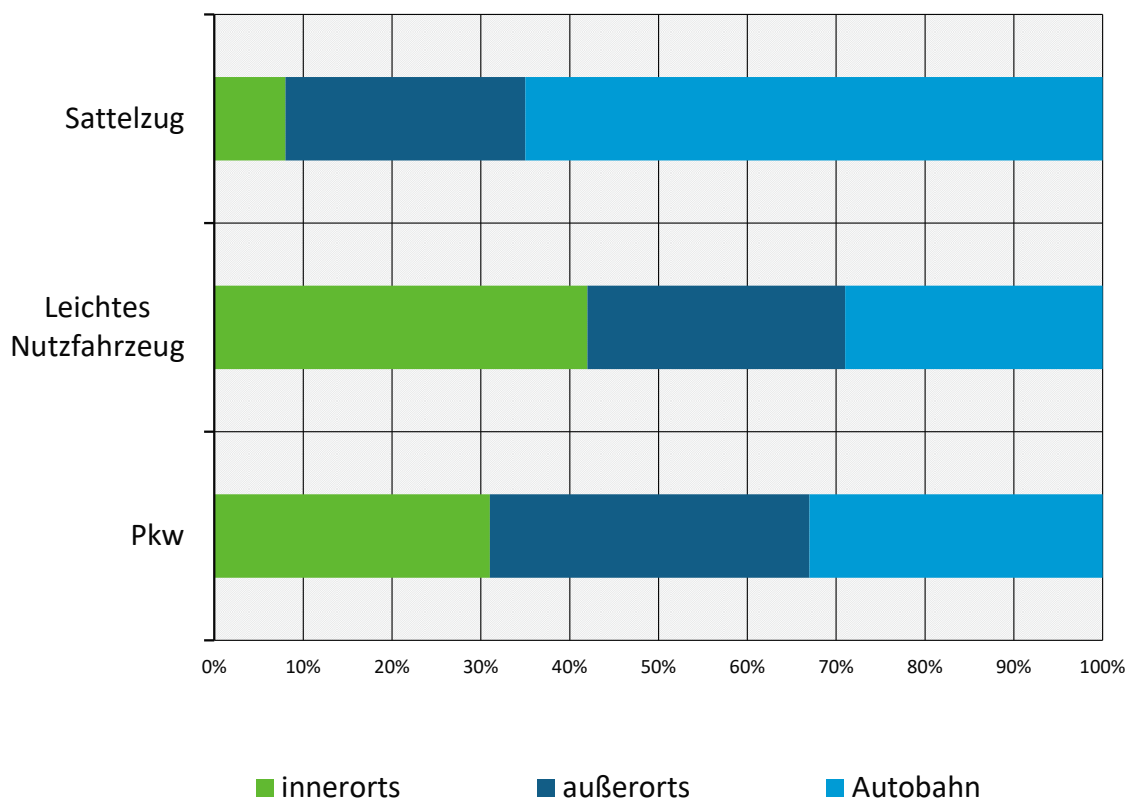
Auf die abgeleiteten Werte zur Jahresfahrleistung wird in TREMOD zusätzlich eine altersabhängige Korrektur angewendet, da Neufahrzeuge höhere und ältere niedrigere Jahresfahrleistungen haben als die in Tabelle 15 aufgeführte durchschnittliche Jahresfahrleistung. Diese Korrektur kommt auch in diesem Projekt zur Anwendung.

Für die weitere Differenzierung nach Straßenkategorien können die relativen Annahmen nach TREMOD direkt im Projekt übernommen werden (siehe Abbildung 15). Die Fahrleistung verteilt sich dabei für Pkw relativ gleichmäßig auf die Straßenkategorien Innerorts, Außerorts und Autobahn. Bei leichten Nutzfahrzeugen ist demgegenüber der Innerortsanteil etwas höher, vor allem zu Lasten der Außerortsfahrten. Bei den schweren Nutzfahrzeugen ist dagegen der Fahranteil auf Autobahnen (etwa zwei Drittel) besonders hoch, da diese Fahrzeuge vor allem im Fernverkehr eingesetzt werden. Innerortsfahrten machen hier im Flottenmittel nur etwa 10 % der Fahrleistungen aus.

Tabelle 15: Jahresfahrleistung der betrachteten Fahrzeugtypen in Kilometer

	Pkw	LNf	SNF
Lebensfahrleistung	220.000 km	280.000 km	900.000 km
Nutzungsdauer	16 Jahre	14 Jahre	8 Jahre
Ø Jahresfahrleistung	13.750 km	20.000 km	112.500 km
TREMODO	13.535 km	19.901 km	124.053 km
FVV 2021	15.168 km	16.000 km	117.664 km
EU 2019/1242			116.000 km

Abbildung 15: Fahrleistungsanteile auf verschiedenen Straßenkategorien



Quelle: TREMOD 6.23

2.2.2 Elektrische Fahranteile von PHEV und O-Lkw

Praxisdaten von Pkw (z. B. (Plötz et al. 2020a)) zeigen heute geringe elektrische Fahranteile (auch Utility Faktoren genannt) für Plug-In Hybride, die deutlich unter den offiziellen Kurven für den Utility Faktor liegen, die im Rahmen der Flottenzielwerte zur Anwendung kommen. Dabei haben Firmenwagen (Company Cars) einen deutlich niedrigeren Utility Faktor (UF) als Privatwagen (Private Car), dominieren aber heute noch stark bei den PHEV.

Es ist davon auszugehen, dass der mittlere Utility Faktor von PHEV mit einem Ausbau der Infrastruktur, steigenden Reichweiten und einer stärkeren Durchdringung im privaten Bereich in den Bezugsjahren ab 2030 ansteigt. Die Annahmen für die heutige Situation beruhen daher

zunächst direkt auf den Praxisdaten in (Plötz et al. 2020a) und werden dann auf Basis der angenommenen Steigerung der Reichweite bei PHEV (siehe Kapitel 2.1) und mittleren Anteilen an Dienstwägen in der PHEV Flotte für die Bezugsjahre ab 2030 fortgeschrieben. Die Eckpunkte dazu sind:

- ▶ Die angenommene reale Reichweite von PHEV-Pkw steigt von 60 km (2020) auf 80 km (ab 2030).
- ▶ Da die empirischen Daten zum UF in (Plötz et al. 2020a) in Abhängigkeit von der Reichweite im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) erhoben wurden, wird zur Umrechnung ein Aufschlag von 40 % angenommen. Die NEFZ-Reichweite der betrachteten PHEV-Pkw entspricht damit 84 km (2020) und 112 km (ab 2030).
- ▶ Für 2020 wird der heutige Anteil Firmenwagen bei PHEV von 58 % unterstellt, damit ergibt sich ein mittlerer UF von 45 %.
- ▶ Ab 2030 wird die höhere NEFZ-Reichweite berücksichtigt und unterstellt, dass sich der Firmenwagenanteil von PHEV an den von Diesel heute annähert (19 % in 2020). Der mittlere UF steigt damit ab 2030 auf 67 %.

Zur Ermittlung der mittleren Verbrauchswerte muss der Utility Faktor zusätzlich nach Straßenkategorien differenziert werden. Eine Aufteilung des UF nach Straßenkategorien wurde im HBEFA 4.2 vorgenommen. Der mittlere UF wurde für 2021 mit etwa 30 % jedoch sehr niedrig angenommen. Die Datengrundlage dafür wurden jedoch auch deutlich vor 2020 erhoben, so dass sich nicht unbedingt ein Widerspruch mit der oben getroffenen Annahme eines mittleren UF bei höheren Batteriekapazitäten in 2020 ergibt. Daher wird für diese Studie nur die relative Aufteilung des UF nach Straßenkategorien aus dem HBEFA 4.2 übernommen.

Auf der Autobahn liegt der UF mit heute 16 % besonders niedrig und bleibt auch ab 2030 mit 24 % begrenzt. Im Gegenzug beträgt der UF auf Innerortsstraßen schon heute 66 % und steigt dann ab 2030 auf 96 %. Insgesamt wird diese Entwicklung als plausibel erachtet, da auf Autobahnen bei den angenommenen Reichweiten recht häufige Ladestops notwendig wären und der Verbrennungsmotor auch sehr effizient arbeitet, während die Lademöglichkeiten im Innerortsbereich größer sind und auch die Reichweiten hier als ausreichend angesehen werden können.

Für LNF liegen keine empirischen Daten vor. Hier werden in Kapitel 2.1.2 geringere Reichweiten angenommen, allerdings werden wahrscheinliche mehr Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr betrieben und der Innerortsanteil ist höher. Mangels genauerer Informationen werden die für Pkw abgeleiteten UF daher nach Straßenkategorien übernommen, aber entsprechend des typischen Nutzungsmusters von LNF gewichtet (siehe Abbildung 15) um den höheren Innerortsanteil abzubilden. Der durchschnittliche UF ist damit für LNF mit 48 % 2020 und 71 % ab 2030 etwas höher als bei Pkw.

Tabelle 16: Utility Faktoren für PHEV bei Pkw und LNF

	UF 2020	UF 2030+
Autobahn	16 %	24 %
außerorts	54 %	80 %
innerorts	66 %	96 %
Mittelwert Pkw	45 %	67 %
Mittelwert LNF	48 %	71 %

Auch für Oberleitungs-Lkw (O-Lkw) sind Fahrtanteile unter Oberleitung festzulegen. Diese hängen besonders stark vom Infrastrukturausbau ab, der eine zwingende Voraussetzung für den sinnvollen Betrieb ist. Hier sind verschiedene Szenarien denkbar, die Umsetzung ist jedoch weiterhin offen. Dabei kann jedoch davon ausgegangen werden, dass O-Lkw vornehmlich dort eingesetzt werden, wo auch eine entsprechende Infrastruktur existiert. Daher soll als Standardfall zunächst davon ausgegangen werden, dass alle Fahrten auf der Autobahn unter Oberleitung stattfinden. Damit wird das technische Potenzial von Oberleitungen dargestellt. Zusätzlich werden dann niedrigere Fahranteile unter der Oberleitung als Sensitivitäten dargestellt.

2.3 Modellierung der Fahrzeugbereitstellung

Zur umweltbilanziellen Modellierung der Fahrzeugbereitstellung wird das am ifeu seit vielen Jahren gepflegte und weiterentwickelte Modellcluster eLCAr genutzt. Hiermit können die Herstellungsaufwendungen verschiedener Kfz-Kategorien (Pkw, LNF sowie SNF) mit unterschiedlichen Antriebsoptionen untersucht werden. Neben dem Fokus auf heute bereits erhältliche Fahrzeugtechnologien werden auch mögliche zukünftige Entwicklungen abgebildet. Durch den modularen Aufbau lassen sich verschiedene Antriebs-Größenklassen-Kombinationen berechnen. Als Ausgangspunkt für die Modellierung der Fahrzeugbereitstellung dienen die in Kapitel 2.1 abgeleiteten Fahrzeugeigenschaften wie das Leergewicht, die Motorleistung, die Größe des Energiespeichers sowie die Leistung der Brennstoffzelle.

2.3.1 Pkw und leichten Nutzfahrzeuge

In den letzten Jahren lag der Fokus der Modellierungsarbeiten am ifeu unter anderem auf der Pkw-Herstellung, damit konnte im Rahmen dieses Vorhabens das eLCAr Modell für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge fast unverändert weitergenutzt werden. Wichtige Modellierungsgrundlagen dafür sind beschrieben in (Helms et al. 2016) sowie (Agora Verkehrswende 2019a) und (Agora Verkehrswende 2019b). Allerdings erfolgt für diese Studie eine Aktualisierung aller verwendeten Hintergrunddatensätze auf die Version 3.8 der ecoinvent Datenbank sowie eine weitere Parametrisierung einzelner Fahrzeugkomponenten, um eine feinere Unterteilung und flexiblere Auslegung der Fahrzeuge zu ermöglichen.

In der Tabelle 17 sind die verschiedenen Bauteile im Modell gezeigt. Alle Fahrzeuge bauen dabei auf dem gleichen Fahrzeugrumpf auf (bei den Elektrofahrzeugen ergänzt um die Batterieaufnahme) und haben unterschiedliche antriebsspezifische Zusatzbauteile wie Verbrennungsmotor, Getriebe, Starterbatterie oder Tank je nach Art des Antriebes.

Tabelle 17: Bauteile im modularen Ökobilanzmodell für Pkw und LNF

Antriebsart	Rumpf	Verbrennungsmotor (mit Zusatzbauteilen)	Elektromotor (mit Zusatzbauteilen)	Brennstoffzelle	Tank	Akku
Benzin/Diesel/CNG	X	X	(X)		X	(X)
Plug-In Hybrid	X	X	X		X	X
BEV	X		X			X
FCEV	X		X	X	X	X

Anmerkung: Der Akku, der H2-Tank sowie die Brennstoffzelle sind analog zum Sattelzug modelliert. Durch die Hybridisierung brauchen auch Benzin/ Diesel/ CNG-Pkw ab dem Jahr 2030 einen elektrischen Antriebstrang sowie einen Akku

Die in dieser Studie verwendeten Wasserstofftanks werden einheitlich als Typ IV karbonfaserverstärkte Drucktanks mit 700 bar angesetzt. Der CNG Tank ist ebenfalls ein karbonfaserverstärkter Drucktank, muss allerdings lediglich einem Druck von 200 bar standhalten.

Die Modellierung der Brennstoffzelle ist in (Agora Verkehrswende 2019b) beschrieben, allerdings wurde die Platinbeladung überprüft und angepasst auf 380 mg/ kW heute und 165 mg pro kW ab dem Jahr 2030 nach (Kramer et al. 2022).

Ein wichtiger Parameter bei der Fahrzeugherstellung ist die verbaute Akkukapazität bei den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. In der Regel ist die nutzbare (Netto-)Kapazität eines Akkus etwas geringer als die gesamte Bruttokapazität, um eine höhere Lebensdauer zu gewährleisten. Laut (Kramer, Ulrich et al. 2021) kann davon ausgegangen werden, dass die Bruttokapazitäten bei allen rein batterieelektrischen Pkw sowie leichten Nutzfahrzeugen um etwa 10 % höher sind als die Nettokapazitäten. In allen Hybridfahrzeugen im Pkw- und LNF-Bereich liegt die Bruttokapazität sogar um 46 % höher. Bei den Plug-In Hybrid-Pkw und -LNF wird mit einem Aufschlag von 30 % gerechnet.

2.3.2 Last- und Sattelzüge

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden aktuelle Studien zur Herstellung von Zugmaschinen sowie Aufliegern untersucht und daraus ein neuer Datensatz für Last- bzw. Sattelzüge aufgebaut.

Folgende Tabelle gibt eine kurze Übersicht über die vorhandenen Ökobilanzstudien zum Thema schwere Nutzfahrzeuge und stellt deren Vor- bzw. Nachteile dar.

Tabelle 18: Literaturübersicht Ökobilanzstudien zu Last-/ Sattelzügen

	Fahrzeugtypen/-komponenten	Beschreibung der Datenbasis
ecoinvent Datenbank (Version 3.8)	Diesel-Solo-Lkw mit 6,8 t Leergewicht und maximalen Gesamtgewicht von 16 t (sowie über Skalierung anhand des Gewichtes weitere Größenklassen)	Relativ alte Datenbasis (2004) daher fehlt moderne Abgasreinigung; Herstellungsaufwendungen pro hergestelltes Fahrzeug ermittelt aus Umweltbilanz von 2002
Wolff et al. 2020	Zugmaschine	Basierend teilweise auf GREET 2021 sowie Hersteller-/ Primär- und Simulationsdaten sowie Literaturwerten; modularer Aufbau mit vielen einzelnen Komponenten und dadurch skalierbar (z. B. anhand von Leistung, Gewicht, Tankgröße...); Daten für Trailer fehlen
Carculator_truck (2021)	Zugmaschine und Trailer (vereinfacht abgeleitet anhand von skalierten Komponenten der Zugmaschine)	Basierend auf Wolff et al. 2020; teilweise unklare Zuordnung/ Skalierung einzelner Komponenten; deutlich höhere Gesamtemissionen pro Fahrzeug verglichen mit den anderen Studien
GREET 2021	Zugmaschine und Trailer (US class 8 day-cab truck)	Datensatz unterteilt in Tractor/ Trailer; Ableitung anhand der Materialzusammensetzungen aber Herstellungsaufwendungen relativ grob; enthält auch detaillierte Ersatzteilaufwendungen

Quellen: (Wolff et al. 2020); (Sacchi et al. 2021); (Wernet et al. 2016); (Argonne National Laboratory 2021).

Da keine der Studien eine optimale Abdeckung von Zugmaschine sowie Trailer bietet, wird mit einer Kombination der verschiedenen Datenquellen gearbeitet. Die Modellierung der

Zugmaschinenherstellung basiert dabei auf den komponentenfeinen Materialzusammensetzungen aus (Wolff et al. 2020). Die verwendeten Hintergrunddaten für die Fahrzeugbereitstellung stammen jedoch in diesem Vorhaben einheitlich aus der ecoinvent Datenbank in der Version 3.8. Für die Materialbearbeitungsprozesse wird ebenfalls auf Daten aus der ecoinvent Datenbank (z. B. zum Walzen oder Gießen von Metallen) zurückgegriffen, diese Prozesse enthalten damit auch bereits gewisse Schnittverluste. Nicht übernommen aus den Studien werden die Daten für den Elektromotor sowie für die Brennstoffzelle, den Wasserstofftank und die Akkus, deren Modellierung in Kapitel 2.3.1 bzw. 2.4 beschrieben ist.

Der Datensatz für die Zugmaschine besteht damit aus den folgenden Komponenten:

- ▶ Zugfahrzeugrumpf (Rahmen, Chassis, Kabine, Achsen, Bereifung)
- ▶ Zugfahrzeugantrieb (abhängig von der Antriebsart beinhaltet z. B. Verbrennungsmotor, Elektromotor, Transmission, Getriebe, Abgasreinigung, Elektronik, Tank, Pantograph für die O-Lkw, Brennstoffzelle für FCEV Lkw)
- ▶ Akku (analog zum Pkw, nur für Elektro-Lkw)

Der Trailer/ Auflieger wird aus GREET 2021 (Argonne National Laboratory 2021) übernommen. Auch hier werden die Materialzusammensetzungen mit Daten aus ecoinvent für die Materialbereitstellung und die -bearbeitung verknüpft.

- ▶ Der Auflieger ist unabhängig von der Antriebsart und besteht aus:
 - Aufbau
 - Fahrgestell (Chassis)
 - Zusatzkomponenten/ Hilfsmitteln

Einen Überblick über die Komponenten des modularen Ökobilanzmodells für Sattelzüge sowie der Zuordnung der antriebspezifischen Komponenten zeigt Tabelle 19.

Tabelle 19: Bauteile im modularen Ökobilanzmodell für Sattelzüge

Antriebsart	Zugfahrzeug-rumpf und Trailer	Verbrennungs-motor (mit Zusatzbauteilen)	Elektromotor (mit Zusatzbauteilen)	Brennstoff-zelle	Tank	Akku	Panto-graph
Diesel/ (dual-fuel) LNG	X	X			X		
O-HEV	X	X	X		X	X	X
O-BEV	X		X			X	X
BEV	X		X			x	
H2-ICE	x	x			x		
FCEV	X		X	X	X	X	

Im Basisfall wird davon ausgegangen, dass ab 2030 hergestellte Lkw mit alternativen Antrieben über ihre Lebensdauer nur einen einzigen Akku sowie keinen Ersatz der Brennstoffzelle

brauchen. Dennoch benötigen die schweren Nutzfahrzeuge im Laufe des Fahrzeuglebens regelmäßige Wartungsintervalle in denen bestimmte Verschleißkomponenten ausgetauscht werden. Der in früheren Studien verwendete ecoinvent Datensatz zur Wartung eines Solo-Lkw führt zu relativ hohen Emissionen, welche insbesondere aus der Lkw Werkstatt stammten. Laut einem internen Austausch mit einem Zugmaschinenhersteller sollten die Treibhausgasemissionen der Fahrzeugwartung etwa im Bereich von 11 % der Fahrzeugherstellung liegen, während es bei ecoinvent fast 50 % sind.

Basierend auf den GREET Daten zum Ersatz wichtiger Bauteile (insbesondere Bereifung, Schmier- und Kühlmittel für verschiedene Komponenten, Scheibenwischblätter sowie die Starterbatterie der konventionellen Fahrzeuge) wird daher die Wartung selbst modelliert. Zudem wird unterschieden zwischen den Lkw mit Verbrennungsmotor und den reinen Elektro- bzw. Brennstoffzellen-Lkw. Da hier keine Aufwendungen der Fahrzeugwerkstätten enthalten sind, unterschätzt der neue Datensatz die Wartungsemissionen vermutlich leicht.

Auch bei den schweren Nutzfahrzeugen unterscheidet sich die verbaute von der nutzbaren Akkukapazität. Im Gegensatz zum Pkw werden bei BEV, O-BEV sowie FCEV-Lkw aufgrund der höheren Lebenslaufleistungen größere Aufschläge auf die Akkukapazität von 20 % angesetzt, bei O-HEV sogar 100 % (Jöhrens et al. 2022).

Das Lebensende des schweren Nutzfahrzeuges wird analog zum Pkw abgebildet, damit wird jedes eingesetzte Material auch entsorgt bzw. recycelt.

2.4 Modellierung der Akkubereitstellung

Die Fahrzeugakkus sind ein zentraler Bestandteil aller Fahrzeuge mit alternativen Antrieben und herstellungsseitig der wichtigste Unterschied zu Verbrennerfahrzeugen. Daher wird hier genauer auf ihre Herstellung und Merkmale eingegangen. Derzeit dominieren Lithium-Ionen-Akkus mit Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)-Akkus gefolgt von Lithium-Eisenphosphat-Akkus (LFP) den europäischen Fahrzeugmarkt (IEA 2023; Posseme und Boillet 2023). Daher werden die NMC-Akkus für die Modellierung im Baujahr 2020 und 2030 gewählt. Zusätzlich wurde ein Datensatz für einen LFP-Akku abgeleitet. Dieser dient als Sensitivität gegenüber dem heute üblichen NMC-Akku und findet vor allem Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen.

Für zukünftige Akkutechnologien zeichnen sich in der Literatur (Bongartz et al. 2021; Xu et al. 2020) und den Herstellerankündigungen (BolidenForum 2021a; b; Cleanthinking.de 2022; Leichsenring 2021; Schaal 2021; Stegmaier und Hebermehl 2021; Werwitzke 2021) zwei übergeordnete Szenarien ab:

In einem **konservativen Szenario** werden in Zukunft überwiegend heute verfügbare Zellchemien in weiterentwickelter Form gesehen. So wird ein hoher Marktanteil an NMC811- bzw. NMC9.5.5- (Nickel-Mangan-Kobalt im Verhältnis 9:0,5:0,5) Akkus mit verringertem Kobaltgehalt, höheren Energiedichten und teilweise mit Silizium-Anode und/oder als Feststoffakkus angenommen. Zudem werden mehr LFP-Akkus v.a. bei SNF aber auch teilweise wieder vermehrt in Szenarien für Pkw prognostiziert.

In einem **innovativen Szenario** erlangt die Markteinführung von neuen Zellchemien größere Bedeutung. Zum einen werden Natrium-Ionen-Akkus als Alternative zu den heutigen Lithium-Ionen-Akkus gesehen. Ein großer Vorteil dieser Akkutechnologie ist der sinkende Bedarf an kritischen und teuren Rohstoffen. Insbesondere das stark nachgefragte Lithium und das kritische Kobalt, das mit einer Abhängigkeit von der Demokratischen Republik Kongo einhergeht, spielen bei Natrium-Ionen-Akkus keine Rolle. Nachteil dieser Zellchemie ist die geringere Energiedichte als bei Lithium-Ionen-Akkus, weshalb diese Akkus vermutlich eher in

stationären Anwendungen zum Einsatz kommen (Peters et al. 2021). Ein erstes Pkw-Modell wurden von einem chinesischen Hersteller jedoch schon mit Natrium-Ionen-Akku vorgestellt (Harloff 2023).

Andere Akkutechnologien, die in innovativen Szenarien in Zukunft eingeführt werden, sind die Lithium-Metall-Akkus Li-Schwefel und Li-Luft. Lithium hat das höchste elektrochemische Potential unter den Metallen. Diese Eigenschaft wird in Li-Metall-Akkus genutzt, sodass insbesondere den Li-Luft-Akkus eine zehnmal höhere theoretische Energiedichte als von heutigen Lithium-Ionen-Akkus zugeschrieben wird (Iturrondobeitia et al. 2021; Wang et al. 2020a).

In dieser Studie wird der Li-Luft-Akku aus den folgenden Gründen als zukünftige Akkutechnologie modelliert:

- ▶ **Umweltvorteil:** Durch die deutlich höhere theoretische Energiedichte hat der Li-Luft-Akku auch gegenüber Li-Schwefel- und Natrium-Ionen-Akkus einen Umweltvorteil in sämtlichen Kategorien des ökologischen Fußabdrucks (Wang et al. 2020b).
- ▶ **Geringere Rohstoffkritikalität:** Die Energiedichte ist nicht nur relevant für die Reichweite eines Fahrzeugs. Ohnehin erreichen heutige Akkutechnologien bereits Reichweiten, die mit wachsendem Ausbau der Ladeinfrastruktur keine Hürde mehr für die Ausweitung der Elektromobilität darstellen. Im Hinblick auf die Rohstoffkritikalität ist die um eine Größenordnung höhere Energiedichte jedoch entscheidend, da deutlich weniger Rohstoffe (geringere Anzahl verschiedener Rohstoffe und deutlich geringere Menge Lithium pro kWh) benötigt werden. Die starke Erhöhung der Energiedichte ist in diesem Fall also auch eine Maßnahme zur Minderung der Rohstoffkritikalität.
- ▶ **Visionäre Lösung:** Auch für Lithium-Ionen-Akkus als Feststoffakkus werden höhere Energiedichten prognostiziert, allerdings ist die Entwicklung hier nach oben hin beschränkt (nicht über 500 Wh/kg hinaus) (Schmaltz et al. 2022) und bleibt damit deutlich unter dem Potential von Li-Luft (bis ca. 1500 Wh/kg auf Systemebene). Ein konservatives Szenario würde also weiterhin einen hohen Rohstoffbedarf mit sich bringen, weshalb dieses nicht für den visionären Zukunftsakku gewählt wird. Als mittelfristiges Szenario sind Lithium-Ionen-Akkus als Feststoffakkus hingegen durchaus wahrscheinlich (Leichsenring 2021).
- ▶ **Potential in Forschung und Wirtschaft:** Die Entwicklung des Li-Luft-Akkus ist nach wie vor mit technischen Hürden beispielsweise bei der Stabilität und der zyklischen Lebensdauer verbunden (Wang et al. 2020a). Zudem ist die Sauerstoffzufuhr eine Herausforderung. Die Lösung über einen separaten Tank bringt die Nachteile höherer Kosten und eines größeren Platzbedarfs mit sich, während die Reinigung der Umgebungsluft ein aufwändiges Filtersystem benötigt. In der Forschung besteht aufgrund des hohen Potentials bei der Energiedichte jedoch viel Interesse an dieser Technologie und erste Erfolge bei der Überwindung der bisherigen Hürden wurden bereits erzielt (Kondori et al. 2023). Auch in der Wirtschaft ist für den Markt von Li-Luft-Akkus eine prognostizierte Wachstumsrate von 5,5 % im Zeitraum 2019 bis 2027 zu verzeichnen. Involvierter Schlüsselakteur ist u.a. Tesla (Mordor Intelligence 2022).

2.4.1 Herstellung Nickel-Mangan-Kobalt-Akku

In den letzten Jahren hat sich die Technologie der Lithium-Ionen-Akkus sehr schnell weiterentwickelt, was zu einer höheren Energiedichte, einem geringeren Energiebedarf bei der Herstellung und Änderungen in der Zellchemie (z. B. geringere Mengen an Kobalt in der Zelle) geführt hat. Aktuelle NMC622-Akkus haben nach (Kramer, Ulrich et al. 2021) eine Energiedichte

auf Systemebene von 150 Wh/kg; bei den NMC811-Akkus ist in naher Zukunft von einer Energiedichte von 200 Wh/kg (ebenfalls auf Systemebene) auszugehen.

Jeder Fahrzeugakku besteht aus mehreren Hauptbestandteilen: Zelle, Kühlung, Batteriemanagementsystem (BMS) und Gehäuse. Das eLCAR-Modell für den NMC-Akku basiert auf (Ellingsen et al. 2014) mit einigen Anpassungen wie sie auch in (Agora Verkehrswende 2019a) beschrieben sind. Für die Herstellung des Aktivmaterials aus Nickel-Mangan-Kobalt wird auf Daten aus (Dai et al. 2018a) zurückgegriffen, die Herstellung von Kobaltsulfat ist aus (Dai et al. 2018b) übernommen.

Ein zentraler Einflussfaktor auf die Umweltwirkungen der Zellbereitstellung ist die benötigte Energie. Hierfür sind in (Dai et al. 2017) Primärdaten eines chinesischen Zellherstellers enthalten, die hier verwendet werden. Für die Produktion von NMC-Zellen wird neben Strom auch Prozessdampf benötigt. Der Strom dient vor allem dazu Luftentfeuchter zu betreiben, um die sehr geringe Luftfeuchte in den Reinnräumen zu gewährleisten. Zudem wird Strom zur Kühlung von Prozesswasser verwendet. Prozessdampf (250°C) wird zur Trocknung der Elektroden und ebenfalls zur Luftentfeuchtung eingesetzt. Neben diesem Energiebedarf wird Strom auch zur Zellbildung und zum Laden benötigt. Hierfür setzt (Dai et al. 2017) einen zusätzlichen Strombedarf (anhand eines Ladezyklus mit 90 % Effizienz und 10 % Ladeverlusten) von 4,3 MJ pro kWh Akku an.

Für den Zusammenbau der Akkus wird nur ein vernachlässigbarer Energieeinsatz benötigt, da die meisten Schritte von Hand erfolgen.

Für die eigentliche Zellfertigung setzen wir damit nach (Dai et al. 2017) einen Energiebedarf von 168 MJ pro kWh Akku an, von denen 142 MJ Wärme (als Dampf bei 250°C und mit 80 % Effizienz) und 26 MJ Strom (die meisten davon für den Trockenraum) sind. Die Wärme verteilt sich gleichmäßig auf den Trockenraum und die Trocknungsprozesse der Elektroden. (Peters et al. 2021) nimmt an, dass der Energiebedarf für den Trockenraum direkt mit der Energiedichte der Zellen skaliert werden kann (da hier die Trockenraumgröße/ der Platzbedarf entscheidend sind) sowie die Elektrodentrocknung anhand der Elektrodenoberfläche skaliert. Damit lassen sich auch andere Zellchemien bzw. Energiedichten mit demselben skalierten Energiebedarf abbilden.

Aktuell erfolgt die Fertigung der Zellen vor allem in den USA (42 %), China (29 %) sowie in Japan (13 %), Korea (7 %), EU (6 %) und dem Rest der Welt (3 %) (Hill et al. 2020). Es gibt jedoch marktpolitische Bestrebungen, die Zellproduktion nach Europa zu verlagern. Daher verwenden wir für die Zellherstellung in 2030 einen entsprechenden europäischen Energiemix.

2.4.2 Herstellung Lithium-Eisenphosphat-Akku

Für die Modellierung des LFP-Akkus kommen vor allem zwei Quellen zum Einsatz: das ergänzende Material zu der Studie von (Peters et al. 2021) sowie das BatPac-Modell des Argonne National Laboratories. Dabei stützen sich die Analysen in (Peters et al. 2021) ebenfalls zu weiten Teilen auf BatPac 4.0.

Folgende Punkte werden aus anderen Quellen ergänzt und die LFP-Zellherstellung dementsprechend abweichend zu (Peters et al. 2021) modelliert:

- ▶ Elektrolyt: Die Herstellung des Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆)-Elektrolyt wird aus (Ellingsen et al. 2014) übernommen.

- ▶ Zellgehäuse: Das Zellgehäuse wird aus (Ellingsen et al. 2014) übernommen. Allerdings werden die Anteile der unterschiedlichen Bestandteile (Zellgehäuse sowie Stromabnehmer) wie in (Peters et al. 2021) verwendet.
- ▶ Energiedichte: Die Energiedichte des LFP-Akkus wird im Jahr 2020 mit 100 Wh pro kg auf Systemebene angesetzt. Dies entspricht einer Energiedichte auf Zellebene von 141 Wh pro kg (im Gegensatz zu 197 Wh pro kg in (Peters et al. 2021)), welche über den Mittelwert aus aktuellen Studien (Bongartz et al. 2021; Mauler et al. 2021; Peters et al. 2021; Porzio und Scown 2021; Xu et al. 2020) ermittelt wurde. Für das Baujahr 2030 wird eine Energiedichte auf Systemebene von 150 Wh pro kg angenommen. Diese entspricht einer Energiedichte auf Zellebene von 210 Wh pro kg, die schon heute von ersten Herstellern in Serie hergestellt wird (Schaal 2022) und für 2030 als Standard angenommen wird.
- ▶ Energie: Die benötigte Energie für die Zellfertigung und Zellbildung wird analog zu den NMC-Akkus nach (Dai et al. 2017) angesetzt. Der Produktionsmix wird dabei ebenfalls analog zum NMC-Akku angesetzt. Für das Baujahr 2030 wird dementsprechend auch ein europäischer Energiemix angenommen.
- ▶ Akkusystem: Um von der Modellierung der reinen LFP-Zelle auf den gesamten Akku auf Systemebene zu kommen, wird der Anteil der Zelle am gesamten Akku aus BatPac 4.0 ermittelt. Im Anschluss werden als zusätzliche Bauteile analog zum NMC-Akku das Batteriemanagementsystem (BMS), die Kühlung (mit Ethylenglykol) sowie das Akkugehäuse ergänzt aus (Ellingsen et al. 2014). Dabei wird ein Abgleich der Massen des Kühlmittels mit BatPac 4.0 gemacht.

2.4.3 Herstellung Lithium-Luft-Akku

Das eLCAR-Modell für den Li-Luft-Akku basiert auf (Wang et al. 2020a). Hauptbestandteile des Akkus sind analog zum NMC-Akku: Zelle, Kühlung, Batteriemanagementsystem (BMS) und Gehäuse. Bei einer geschlossenen Struktur des Akkusystems kommt zudem ein Sauerstoff-Tank hinzu. „Geschlossen“ heißt, dass reiner Sauerstoff über einen separaten Tank im Fahrzeug bereitgestellt wird, während bei einer offenen Struktur Luft über ein Filtersystem im Fahrzeug gereinigt wird. Die geschlossene Struktur hat den Vorteil, dass sie pragmatisch und zuverlässig ist. Nachteilig sind hingegen die höheren Kosten für Sauerstoff statt Luft und der größere Platzbedarf für den Sauerstoff-Tank im Fahrzeug. Aufgrund der Verfügbarkeit von LCI-Daten wird im eLCAR-Modell die geschlossene Struktur abgebildet. (Wang et al. 2020a)

Das Aktivmaterial in der Zelle umfasst Sauerstoff aus dem Tank und einen Lithium-Metallfilm, der mit einer Schutzschicht versehen die Anode ausmacht. Der Aufbau der Kathode unterscheidet sich grundlegend von konventionellen Lithium-Ionen-Akkus: Die Kathode wird durch ein mit Katalysator (Kobaltoxid-Nanopartikel) bestäubtes Skelett aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen gebildet. Als Elektrolyt fungiert Lithiumperchlorat in Tetraethylenglycoldimethylether (TEGDME) gelöst.

Folgende Punkte werden abweichend zu (Wang et al. 2020a) modelliert:

- ▶ Separator: (Wang et al. 2020a) verweist bei der Modellierung des Separators auf (Li et al. 2014). In eLCAR wird der Separator-Prozess aus derecoinvent-Version 3.8 verwendet. Dieser weicht lediglich geringfügig von der Modellierung nach (Li et al. 2014) ab.
- ▶ Elektrolyt: Bei der Herstellung von Lithiumperchlorat (für den Elektrolyten) werden zusätzlich die verwendeten Lösungsmittel (Isopropanol und Toluol gemäß der angegebenen Mengen in (Cretzmeyer 1963)) berücksichtigt.

- ▶ **Energiedichte:** Für das Baujahr 2050 wird eine Energiedichte auf Systemebene (inklusive Sauerstoff-Tank) von 1500 Wh pro kg angenommen. Diese Energiedichte wird ermittelt, indem die Energiedichte auf Zellebene von 2700 Wh pro kg aus (Zackrisson et al. 2016) mit dem Massenanteil der Zelle am Akkusystem aus (Wang et al. 2020a) multipliziert wird.
- ▶ **Energie:** Die benötigte Energie für die Zellfertigung und Zellbildung wird analog zu den NMC-Akkus nach (Dai et al. 2017) angesetzt.
- ▶ **LCI-Datenbank:** Die in (Wang et al. 2020a) verwendeten LCI-Prozesse sind nur vereinzelt ecoinvent-Markt-Prozesse, die bereits Transportprozesse berücksichtigen. In eLCAr werden, wenn vorhanden, die Markt-Prozesse verwendet, wodurch separate Transportprozesse entsprechend wegfallen. Bei den verwendeten ecoinvent-Verarbeitungsprozessen werden Verluste schon berücksichtigt, sodass diese nicht wie in (Wang et al. 2020a) separat aufgenommen werden. Zudem werden in den Metall-Prozessen in ecoinvent bereits Primär- und Sekundäranteile angesetzt, weshalb hier keine Trennung der Prozesse vorgenommen wird wie in (Wang et al. 2020a).
- ▶ **Produktionsort:** Im Baujahr 2050 wird, wie bereits für die in 2030 hergestellten NMC811-Akkus, ein europäischer Energiemix für die Zellherstellung angenommen. Zudem werden im gesamten Akku-Modell, wenn vorhanden, europäische ecoinvent-Prozesse verwendet.

2.4.4 Akku-Recycling

Ein Ziel des Projektes ist, die Datenbasis für das Akkurecycling zu aktualisieren. In dem Ökobilanzmodell eLCAr wurden bereits die verschiedenen Recyclingrouten für ein pyrometallurgisches, hydrometallurgisches und direktes Recycling angelegt. Die Datenbasis bezieht sich auf das EverBatt Modell von Argonne National Laboratory (Dai et al. 2018a). Die pyrometallurgische Recyclingroute ist als Standardeinstellung gesetzt, da dieses Verfahren in der EU und in Deutschland am weitesten verbreitet ist. Hier ist insbesondere das Recyclingverfahren des belgischen Recyclingkonzerns Umicore zu nennen, welches derzeit eine Kapazität von 7.000 Tonnen Lithium-Ionen-Akkus hat, was ca. 35.000 Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen entspricht³. Das Umicore Verfahren verfolgte in der Vergangenheit primär eine pyrometallurgische Recyclingroute, der Konzern integriert aber mittlerweile auch hydrometallurgische Prozesse in seinem Verfahren⁴.

Die Literaturrecherche und die Experteninterviews haben ergeben, dass eine „klassische“ pyrometallurgische Recyclingroute nicht mehr die geforderte Effizienz erfüllen kann und dieses Verfahren zumindest mit hydrometallurgischen Prozessen gekoppelt werden muss ((Doose et al. 2021), Experteninterview Dr. Peters). Die Recherche von aktuellen Inventardaten für die Ökobilanzierung hat gezeigt, dass zwar sehr viel in letzter Zeit zu Akkurecycling veröffentlicht, jedoch immer wieder auf die gleiche Datenbasis referenziert wurde. Den neuesten Stand zu einem erweiterten hydrometallurgischen Recyclingverfahren in einer Datenauflösung, die sich in das eLCAr-Modell integrieren lässt, konnten wir in den Arbeiten von Peters et al. (2021) und Mohr et al. (2020) finden. In diesem Datensatz wurden insbesondere die mechanischen Vorbereitungsschritte verbessert abgeleitet und orientieren sich an dem patentierten Düsenfeld Prozess⁵. Mit dieser erweiterten hydrometallurgischen Recyclingroute können fast alle Materialien zurückgewonnen werden. Als besonders relevante Inputströme in den

³ Pressemitteilung von 11.2.2022: <https://www.umicore.com/en/newsroom/new-generation-li-ion-battery-recycling-technologies-and-announces-award-with-acc/> (1.6.2023)

⁴ Recyclingverfahren: <https://brs.umicore.com/en/recycling/> (1.6.2023)

⁵ <https://www.duesenfeld.com/lizenziierung.html> (1.6.2023)

Recyclingprozess sind der Energieeinsatz von 5.5 MJ pro kg Zelle zu nennen und der Einsatz von Chemikalien als Reagenzien für den Laugungsprozess (u.a. Schwefelsäure). Die Einspareffekte durch das Recycling ergeben sich in der gesteigerten Sekundärquote für die Materialien in der Akkuherstellung. Dazu wurden die geforderten Sekundärquoten der neuen EU Batterie-Verordnung⁶ (derzeit im fortgeschrittenen Gesetzgebungsverfahren, Procedure 2020/0353/COD) zugrunde gelegt. Tabelle 20 gibt die Recyclingeffizienz auf Materialebene an.

Tabelle 20: Effizienz durch erweitertes hydrometallurgisches Recycling

Material	Recyclingeffizienz
<i>Mechanische Vorbehandlung</i>	
Aluminium, Kupfer	98 %
Elektrolyt	95 %
<i>Hydrometallurgische Behandlung</i>	
Lithium, Nickel, Cobalt, Mangan	95 %
Graphit	93 %

Quelle: nach (Peters et al. 2021)

2.5 Stromvorketten

Vorangegangene Studien wie SYSEET (Liebich et al. 2020) haben gezeigt, dass die Erzeugung, der Transport und die Verteilung von elektrischer Energie in erheblichem Umfang zu den Umweltwirkungen der betrachteten Systeme beitragen. Besondere Bedeutung hat Strom als Energieträger für den direkten Einsatz in Fahrzeugen (BEV, PHEV, O-BEV, O-HEV) als sogenannter „Fahrstrom“ und bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen. Letztere benötigen viel Strom für die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff. Darüber hinaus wird in den betrachteten Transformationsszenarien von einer verstärkten Elektrifizierung der Industrie ausgegangen. Damit ist Strom auch eine wichtige Komponente der Defossilisierung im Ökobilanz-Hintergrundsystem (Kap. 1.3).

2.5.1 Ableitung der Strommixe und Zusammensetzung

Die Modellierung der Strombereitstellung basiert grundsätzlich auf Ökobilanzdaten von ecoinvent Version 3.7.1. Die Originaldaten für die Stromerzeugung beziehen sich dort auf das Jahr 2018. Für Deutschland haben wir diese Daten für das Bezugsjahr 2020 durch eigene Berechnungen mit dem ifeu-eigenen Strommodell ELMO (Fehrenbach et al. 2022) aktualisiert, das Statistiken zur Stromerzeugung von EUROSTAT nutzt (Eurostat 2022).

Der deutsche Netto-Erzeugungs-Strommix nach EUROSTAT ist in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 21: Erzeugungs-Strommix Deutschland 2020

Stromquelle	2020
Andere	2,6 %

⁶ COM (2020) 798: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/HIS/?uri=CELEX:52020PC0798>

Stromquelle	2020
Biomasse	7,7 %
Braunkohle	15,7 %
Erdgas	19,0 %
Photovoltaik	8,9 %
Steinkohle	7,2 %
Wasserkraft	3,4 %
Wasserstoff	0,0 %
Wind onshore	19,5 %
Wind offshore	4,6 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Eurostat 2022)

Die Strommixe in der Zukunft (2030 – 2050) haben wir entsprechend der RESCUE-Szenarien GreenSupreme und GreenLate abgebildet (Dittrich et al. in Bearbeitung). Die Veränderungen der Strombereitstellung wird für die drei Regionen Deutschland, Europa (EU28 + Norwegen und Schweiz) ohne Deutschland und den Rest der Welt getrennt vorgenommen. Für die deutschen Mixe kommen die Daten aus den Energiesystemmodellierungen von REFINE (Dittrich et al. 2020a; b); für die verbleibenden Regionen ist die Datengrundlage die Veröffentlichung „Achieving the Paris Climate Agreement Goals“ (Teske 2019) und die dort beschriebenen Szenarien „Pathway for +1.5°C“ bzw. „Pathway for +2.0°C“.

Die Strommixe in der unveränderten ecoinvent-Datenbank berücksichtigen auch die Im- und Exporte von Elektrizität. Da sich diese Handelsbilanzen von Jahr zu Jahr verändern, werden sie in dieser Studie weder für die zukünftigen Strommixe noch aus Gründen der Konsistenz für das Jahr 2020 berücksichtigt. Für Deutschland beträgt der Unterschied im Treibhauspotenzial zwischen Produktions- und Versorgungsmix 2020 weniger als 2 %.

Tabelle 22: Datenquellen für die Strommixe der Szenarien und Regionen

Szenario	Region	Deutschland	Europa ohne Deutschland	Welt ohne Europa
GreenSupreme		RESCUE/GreenSupreme	Teske/1,5°C	Teske/1,5°C
GreenLate		RESCUE/GreenLate	Teske/2,0°C	Teske/2,0°C

RESCUE/Supreme und RESCUE/Late: Supreme-/Late-Szenario aus dem RESCUE-Vorhaben (Dittrich et al. 2020a; b)
 Teske/1,5°C und Teske/2,0°C: Pathway for +1.5°C bzw +2.0°C aus (Teske 2019)

Die verwendeten Strommixe für die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind in Tabelle 23 bis Tabelle 28 dargestellt. In Teske ist Strom aus Gezeitenkraftwerken (Ocean Energy) ein Bestandteil des Energiesystemmodells. Da in der ecoinvent-Datenbank aktuell kein entsprechendes Kraftwerk vorliegt, haben wir den zugehörigen Stromanteil den Laufwasserkraftwerken zugeschlagen, um die Infrastrukturaufwendungen näherungsweise abzubilden.

Keine Veränderung der ecoinvent-Daten haben wir für folgende Bereiche vorgenommen:

- ▶ Technologie-Mix (KWK, Feuerung, Abgasreinigung ...),
- ▶ Wirkungsgrade der Kraftwerke,
- ▶ Herkunft der fossilen Energieträger,
- ▶ Herkunft und Zusammensetzung der Biomasse.

Tabelle 23: Erzeugungs-Strommixe im Szenario GreenSupreme in Deutschland

Stromquelle	2030	2040	2050
Steinkohle	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Braunkohle	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Erdgas	16,8 %	2,9 %	1,3 %
Heizöl	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kernenergie	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Wind onshore	46 %	59 %	60 %
Wasserkraft	4,7 %	3,8 %	3,6 %
Photovoltaik	18,0 %	17,1 %	18,1 %
Biomasse	2,7 %	1,8 %	1,9 %
Wind offshore	12 %	15 %	15 %
Andere	0,1 %	0,1 %	0,2 %
Wasserstoff	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Dittrich et al. 2020a; Teske 2019)

Tabelle 24: Erzeugung-Strommixe im Szenario GreenSupreme in Europa (ohne Deutschland)

Stromquelle	2030	2040	2050
Steinkohle	0,7 %	0,0 %	0,0 %
Braunkohle	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Erdgas	18,0 %	5,6 %	0,0 %
Heizöl	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kernenergie	6,9 %	0,0 %	0,0 %
Wind onshore	23 %	32 %	34 %
Wasserkraft	13,8 %	10,9 %	10,3 %
Photovoltaik	15,0 %	21,3 %	22,9 %
Biomasse	11,7 %	9,3 %	8,3 %
Wind offshore	6 %	8 %	8 %
Andere	4,7 %	8,9 %	11,0 %
Wasserstoff	0,5 %	3,6 %	5,2 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Dittrich et al. 2020a; Teske 2019)

Tabelle 25: Erzeugung-Strommixe im Szenario GreenSupreme Welt (ohne Europa)

Stromquelle	2030	2040	2050
Steinkohle	13,8 %	2,6 %	0,0 %
Braunkohle	0,8 %	0,2 %	0,0 %
Erdgas	18,7 %	8,1 %	0,0 %
Heizöl	1,2 %	0,1 %	0,0 %
Kernenergie	3,8 %	0,4 %	0,0 %
Wind onshore	15 %	23 %	26 %
Wasserkraft	12,8 %	9,2 %	7,3 %
Photovoltaik	17,9 %	26,5 %	30,0 %
Biomasse	4,8 %	5,0 %	4,7 %
Wind offshore	4 %	6 %	6 %
Andere	6,6 %	16,9 %	21,4 %
Wasserstoff	0,3 %	1,7 %	4,6 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Dittrich et al. 2020a; Teske 2019)

Tabelle 26: Erzeugung-Strommixe im Szenario GreenLate in Deutschland

Stromquelle	2030	2040	2050
Steinkohle	8,0 %	0,0 %	0,0 %
Braunkohle	4,6 %	0,0 %	0,0 %
Erdgas	15,0 %	25,0 %	2,4 %
Heizöl	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kernenergie	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Wind onshore	39 %	40 %	55 %
Wasserkraft	4,7 %	3,9 %	2,9 %
Photovoltaik	15,1 %	18,8 %	24,5 %
Biomasse	3,5 %	2,6 %	1,8 %
Wind offshore	10 %	10 %	14 %
Andere	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Wasserstoff	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Dittrich et al. 2020a; Teske 2019)

Tabelle 27: Erzeugung-Strommixe im Szenario GreenLate in Europa (ohne Deutschland)

Stromquelle	2030	2040	2050
Steinkohle	2,0 %	0,0 %	0,0 %
Braunkohle	0,6 %	0,0 %	0,0 %
Erdgas	22,2 %	10,8 %	0,0 %
Heizöl	0,1 %	0,1 %	0,0 %
Kernenergie	7,2 %	0,0 %	0,0 %
Wind onshore	21 %	31 %	34 %
Wasserkraft	14,4 %	12,1 %	11,0 %
Photovoltaik	11,1 %	17,2 %	21,2 %
Biomasse	11,5 %	10,3 %	8,9 %
Wind offshore	5 %	8 %	9 %
Andere	4,4 %	9,1 %	11,6 %
Wasserstoff	0,0 %	2,0 %	4,7 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Dittrich et al. 2020a; Teske 2019)

Tabelle 28: Erzeugung-Strommixe im Szenario GreenLate Welt (ohne Europa)

Stromquelle	2030	2040	2050
Steinkohle	13,8 %	2,6 %	0,0 %
Braunkohle	0,8 %	0,2 %	0,0 %
Erdgas	18,7 %	8,1 %	0,0 %
Heizöl	1,2 %	0,1 %	0,0 %
Kernenergie	3,8 %	0,4 %	0,0 %
Wind onshore	15 %	23 %	26 %
Wasserkraft	12,8 %	9,2 %	7,3 %
Photovoltaik	17,9 %	26,5 %	30,0 %
Biomasse	4,8 %	5,0 %	4,7 %
Wind offshore	4 %	6 %	6 %
Andere	6,6 %	16,9 %	21,4 %
Wasserstoff	0,3 %	1,7 %	4,6 %

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (Dittrich et al. 2020a; Teske 2019)

Explizite Änderungen für die Szenarien und Bezugsjahre werden für die Stromerzeugungstechnologien angenommen und im REFINE-Zwischenbericht zu AP3 (Dittrich et al. in Bearbeitung) beschrieben. Dabei handelt es sich um:

- ▶ Windenergieanlagen (auch Aufteilung in onshore-/offshore-Anlagen)
- ▶ Photovoltaik (auch Aufteilung in Freiflächen- und Dachanlagen)
- ▶ Solarthermische Kraftwerke (CSP)
- ▶ Brennstoffzellen
- ▶ Geothermie

Die neu ermittelten Strommixe wurden in der ecoinvent-Datenbank (Hintergrundsystem, s.a. Kap. 1.3) in ca. 170 Strommärkten eingesetzt. Dort ersetzen sie die nationalen Strommärkte.

2.5.2 Erneuerbare Stromerzeugung in Abhängigkeit von Standortparametern

Neben dem Strommix werden in dieser Studie auch ausgewählte erneuerbare Stromquellen für die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe modelliert:

- ▶ Wind onshore/offshore (WEA, in Deutschland/Marokko)
- ▶ Freiflächen-Photovoltaik (PV, in Deutschland/Marokko)
- ▶ Konzentrierende Solarkraftwerke (CSP, in Marokko)

Die EE-Stromerzeugungsanlagen verursachen die meisten Umweltwirkungen bei ihrer Herstellung und Errichtung. In Abhängigkeit von dem Bezugsjahr und dem gewählten Transformationsszenario wird der Bau der Anlage in der modifizierten ecoinvent-

Ökobilanzdatenbank abgebildet. Die LCA-Inputdaten basieren auf den UBA-Projekten SYSEET (Liebich et al. 2020) und REFINE (Dittrich et al. in Bearbeitung). Die Anpassungen, die für das Hintergrundsystem vorgenommen werden, sind ausführlich im aktuellen REFINE-Zwischenbericht dokumentiert.

Die Aufwendungen zur Errichtung, Betrieb und Entsorgung der Anlagen werden über die Strommenge abgeschrieben, die eine EE-Anlage insgesamt produziert. Die Lebensdauer und der Nutzungsgrad der Anlagen bestimmen dabei die Gesamtstrommenge. Beide Kenngrößen sind für die Standorte und Jahre in der folgenden Tabelle 29 für Windenergieanlagen, Tabelle 30 für PV und Tabelle 31 für konzentrierende Solarkraft gezeigt. Die Volllaststunden sind dabei ein Maß für den Nutzungsgrad der Anlagen und entsprechend der Jahresstundenzahl, bei der die Anlage rechnerisch mit Nennleistung betrieben wird.

Tabelle 29: Lebensdauer und Volllaststunden von Windenergieanlagen in Abhängigkeit von Land und Bezugsjahr

WEA	Deutschland	Marokko
	Lebensdauer onshore/offshore in a	Lebensdauer onshore/offshore in a
2030	25	25
2050	25	25
	Volllaststunden onshore in h/a	Volllaststunden onshore in h/a
2030	2 960	2 950
2050	2 960	2 950
	Volllaststunden offshore in h/a	Volllaststunden offshore in h/a
2030	4 230	3 930
2050	4 230	3 930

Quelle: (Liebich et al. 2020)

Tabelle 30: Lebensdauer und Volllaststunden von Freiflächen-Photovoltaikanlagen in Abhängigkeit von Land und Bezugsjahr

PV	Deutschland	Marokko
	Lebensdauer in a	Lebensdauer in a
2030	25	25
2050	30	30
	Volllaststunden in h/a	Volllaststunden in h/a
2030	960	1 730
2050	960	1 730

Quelle: (Liebich et al. 2020)

Tabelle 31: Lebensdauer und Volllaststunden von solarthermischen Kraftwerken in Marokko in 2030 und 2050

CSP	Marokko
	Lebensdauer in a
2030	25
2050	30
	Volllaststunden in h/a
2030	6 190
2050	6 190

Quelle: (Liebich et al. 2020)

Der EE-Strom, der in Deutschland erzeugt wird, kann direkt als Fahrstrom eingesetzt werden oder auch zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen. Am Standort Marokko wird von einer ausschließlichen Nutzung für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen ausgegangen – ein Langstreckentransport des Stroms von Nordafrika nach Deutschland wird nicht angenommen.

2.5.3 Auswahl der Strommixe für Elektromobilität und synthetische Kraftstoffe

Bei direkter Nutzung von Strom in Deutschland wird in dieser vergleichenden Untersuchung immer der deutsche Strommix angesetzt. Dies entspricht auch der Empfehlungen in (Bracker, Joß et al. 2019). Dabei führt der Betrieb elektrischer Lkw zwar immer zu einem Anstieg des Strombedarfs und der sogenannte „Marginalstrommix“ kann in einer kurzfristigen Perspektive mit unverändertem Kraftwerkspark daher vom durchschnittlichen Strommix (über alle Verbraucher gerechnet) abweichen. In einer mittelfristigen Perspektive müssen bei der Bilanzierung jedoch auch die mittelfristig resultierenden Änderungen im Kraftwerkspark berücksichtigt werden, um Ursache und Wirkung korrekt abzubilden. So werden die heutigen Förderinstrumente für Erneuerbare Energien auf die relativen Ausbauziele im Stromsektor abgestimmt (80 % in 2030). Daher muss zur Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage für den Betrieb von Lkw auch die Erzeugungskapazität erneuerbarer Energien stärker ausgebaut werden um diese Ziele zu erreichen. Zusätzlich gibt es noch den Emissionshandel, der dafür sorgt, dass eine höhere Stromnachfrage durch Elektro-Lkw zu steigenden Zertifikatspreisen führt, was kurzfristig die Nutzung von Gas anstelle von Kohle begünstigt und mittelfristig ebenfalls einen zusätzlichen Anreiz bietet, erneuerbare Energien auszubauen. Um diesen Effekten Rechnung zu tragen, eine Gleichbehandlung der Verbraucher zu ermöglichen und Doppelzahlungen zu vermeiden, hat sich zur politischen Richtungsanalyse heute weitgehend die Berücksichtigung des durchschnittlichen Strommixes durchgesetzt.

Eine gezielte Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien (z. B. Ökostrom) zum Laden von Elektrofahrzeugen ist im derzeitigen energiewirtschaftlichen Rahmen in Deutschland dagegen kaum möglich und wird daher auch nicht dargestellt. Eine bilanzielle Zurechnung über Herkunftsnachweise führt tendenziell nur zu einer Umverteilung der ohnehin im Markt befindlichen Erzeugung zwischen verschiedenen Verbrauchern. In vielen Ländern der MENA-Region (Nahost und Nordafrika, engl.: Middle East and North Africa) ist es dagegen vorstellbar, durch gezielte Förderung zusätzliche Kapazitäten erneuerbarer Energien aufzubauen. Dies wird im Kontext der Entwicklungszusammenarbeit auch diskutiert. Entsprechend wird für synthetische Kraftstoffe von einer Produktion im Ausland mit erneuerbarem Strom ausgegangen. Dazu wird ein entsprechender erneuerbarer Strommix definiert. Diese

Importoptionen setzen jedoch voraus, dass in den möglichen Herkunftsländern nicht nur ein hohes Potenzial für die Erzeugung von erneuerbarem Strom besteht, sondern auch die entsprechenden Produktionskapazitäten, sowie verlässliche und effiziente Transportwege für synthetische Kraftstoffe bis 2030 aufgebaut werden können.

Die Zusammensetzung der Netzstrommixe orientiert sich an den Szenarien GreenLate und GreenSupreme und den Annahmen aus dem UBA Projekt REFINE. Auch die Daten für die deutschen EE-Mixe kommen aus den Energiesystemmodellierungen von REFINE (Dittrich et al. 2020a; b); für Marokko ist die Datengrundlage die Veröffentlichung „Achieving the Paris Climate Agreement Goals“ (Teske 2019) und die dort beschriebenen Szenarien „Pathway for +1.5°C“ bzw. „Pathway for +2.0°C“. Tabelle 32 zeigt die so abgeleiteten Mixe erneuerbarer Energien.

Tabelle 32: Zusammensetzung der erneuerbaren Strommixe zur Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland und Marokko (GreenLate/GreenSupreme)

EE-Quelle	2020	2030	2040	2050
	Deutschland GreenLate	Deutschland GreenLate	Deutschland GreenLate	Deutschland GreenLate
Wind onshore	59 %	59 %	56 %	57 %
Wind offshore	14 %	18 %	17 %	17 %
PV	27 %	24 %	27 %	26 %
	Deutschland GreenSupreme	Deutschland GreenSupreme	Deutschland GreenSupreme	Deutschland GreenSupreme
Wind onshore	59 %	62 %	66 %	65 %
Wind offshore	14 %	14 %	15 %	15 %
PV	27 %	24 %	19 %	19 %
	Marokko GreenLate	Marokko GreenLate	Marokko GreenLate	Marokko GreenLate
Wind onshore	72 %	54 %	45 %	42 %
Wind offshore	3 %	2 %	2 %	2 %
PV	25 %	44 %	42 %	37 %
CSP	0 %	0 %	11 %	19 %
	Marokko GreenSupreme	Marokko GreenSupreme	Marokko GreenSupreme	Marokko GreenSupreme
Wind onshore	72 %	55 %	42 %	40 %
Wind offshore	3 %	2 %	2 %	2 %
PV	25 %	37 %	44 %	40 %
CSP	0 %	6 %	13 %	18 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

2.6 Kraftstoffvorketten

Neben den Emissionen in der Nutzungsphase und den Umweltwirkungen der Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge kann auch die Bereitstellung der Kraftstoffe mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sein. Zur umfassenden ökobilanziellen Betrachtung in dieser Studie gehört deshalb eine detaillierte Modellierung der Bereitstellung fossiler und synthetischer Kraftstoffe.

2.6.1 Fossile Kraftstoffe

Als Kraftstoffe auf Basis fossiler Rohstoffe werden in dieser Studie betrachtet:

- Benzin und Diesel auf Basis von Rohöl

- ▶ Komprimiertes und verflüssigtes Erdgas (engl.: compressed natural gas (CNG) und liquefied natural gas (LNG))
- ▶ Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas

Für die Bereitstellungsketten fossiler Kraftstoffe – von der Extraktion über den Transport bis zur Verarbeitung in einer Raffinerie, bzw. in einer Anlage zur Dampfreformierung – verfügt das ifeu über detaillierte Ökobilanzmodelle. Dabei werden die Förderung und der Transport von Erdöl und Erdgas anhand der aktuellen Produktions- und Importdaten für Deutschland und Europa abgebildet. Energieaufwendungen, Verluste und Leckagen sind berücksichtigt und werden durch neue Daten laufend angepasst. Die Modellierung der Raffinerieprozesse erfolgt in einem am ifeu entwickelten Raffineriemodell, das in verschiedenen ifeu-Projekten eingesetzt und auch extern begutachtet wurde. Bezugsjahr für die Bereitstellung von Erdöl und Erdgas in dieser Studie ist 2019. Daten zu den Lieferländern und -mengen beruhen auf Daten des Statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat 2022).

Die Prozessdaten zur Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas via Dampfreformierung (englisch: steam methane reforming (SMR)) sind aus (Antonini et al. 2020) entnommen. Sie beschreiben Prozesssimulationen, die im Rahmen des Projektes ELEGANCY erstellt wurden (<https://www.sintef.no/elegancy/>). Aus den dort betrachteten Fällen für die Dampfreformierung wurde hier die Konfiguration mit kombinierter Hochtemperatur- und Niedertemperatur-Wassergas-Shift-Reaktion ausgewählt. Der im Prozess verwendete Strom wird mit dem ifeu-Strommaster (Kapitel 2.5.1) für den Verbrauchsmix Deutschland 2019 angepasst. Ebenso wird die Vorkette des genutzten Erdgases für den Verbrauchsmix Deutschland 2019 modelliert.

Exkurs: Erhöhte Methanemissionen aus Öl-/ Gasförderung

In den vergangenen Jahren sind eine ganze Reihe von neuen Erkenntnissen zu erhöhten Methanemissionen aus Öl- und Gasförderung veröffentlicht worden. Wie u. a. in (IPCC 2023; Jackson et al. 2020; Saunio et al. 2020; UNEP 2019) dargelegt, ist die Förderung von Öl- und Gas sehr wahrscheinlich für mehr als 20 % der anthropogenen Methanemissionen verantwortlich. In den vergangenen Jahren bedeutete dies eine Freisetzung von jährlich mehr als 80 Millionen Tonnen Erdgas. Diese Gesamtmenge ist durch so genannte Top-Down-Messungen (Satellitenfernerkundung, Flugzeugmessungen und Isotopenanalysen in weltweiten Atmosphärenmessnetzwerken) mittlerweile wissenschaftlich gefestigt. Sie ist deutlich größer als die Summe der von Industrie und staatlichen Stellen gemeldeten Emissionen. Die Zuordnung zu einzelnen Schritten der Prozesskette war deshalb in der jüngsten Vergangenheit Gegenstand intensiver Forschung. Ein Teil der Methanemissionen stammt aus dem regulären Betrieb von Öl- und Gasförderanlagen (gasbetriebene pneumatische Anlagenteile, Wartungsprozeduren, Methanschluß bei der Verbrennung) und sind schon jetzt in Emissionsinventaren und Emissionsfaktoren enthalten. Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten der letzten Jahre hat aber gezeigt, dass große Mengen von Erdgas - und damit Methan – durch den irregulären Betrieb von Anlagen entstehen (Alvarez et al. 2018; Cusworth et al. 2022; Irakulis-Loitxate et al. 2021). Dass diese Erkenntnisse lange keine Aufnahme in Ökobilanzdatenbanken und -studien gefunden haben, lag an einigen grundsätzlichen Hemmnissen. So ist die Zuordnung zu den oft gemeinsam geförderten Produkten Öl und Gas, eine Differenzierung zwischen konventioneller und unkonventioneller Förderung (Fracking), sowie on- und offshore-Produktion nicht einfach möglich. Auch in der aktuellen UBA-Studie „Emissionsfaktoren der Stromerzeugung - Betrachtung der Vorkettenemissionen von Erdgas und Steinkohle“ (Baumann und Schuller 2021) werden noch niedrigere Werte für die Methanemissionen angenommen.

Mit dem erstmals im Rahmen des „World Energy Outlook 2017“ (IEA 2017) von der internationalen Energieagentur beschriebenen und anschließend als Online-Tool „IEA Methane Tracker“ veröffentlichten Vorgehen, gibt es mittlerweile aber eine tragfähige Lösung. In der aktuellen Version werden für über 70 Länder Methanemissionsprofile der Erdöl- und Erdgasindustrie berechnet (IEA 2022). Seit Herbst 2022 bildet auch die Ökobilanzdatenbank ecoinvent in der aktuellen Version 3.9.1 die erhöhten Methanemissionen aus der Öl- und Gasförderung ab.

Im Rahmen dieser Studie werden für den Basisfall noch die niedrigeren Werte für die Methanemissionen verwendet.

2.6.2 Biokraftstoffe

Die Herstellung biogener Kraftstoffe wird wie in der aktuellen Version von TREMOD (Allekotte et al. 2022) modelliert. Tabelle 33 zeigt die energetischen Anteile der verschiedenen Biomassesubstrate für das Jahr 2020. Basis sind Daten der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE 2021). Außerdem sind die spezifischen Emissionsfaktoren auf Basis der Daten aus den Studien „BioEM“ (Fehrenbach et al. 2016) und „JEC Well-To-Wheels report v5“ (Prussi et al. 2020) dargestellt. Die Berechnung der Emissionsfaktoren in dieser Studie folgt der in der EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (REDII) (Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union 2018) festgelegten Methode. Das bedeutet insbesondere, dass indirekte Landnutzungsänderungen – also z. B. Rodungen von Primärwald, die durch Kettenwirkungen des globalen Marktes für landwirtschaftliche Erzeugnisse bewirkt werden – nicht in die Berechnung einfließen. Für Bioethanol würden diese indirekt verursachten Emissionen für die in Tabelle 33 aufgelisteten Anbaubiomassen zwischen 11 und 22 g CO₂eq/MJ ausmachen, für Biodiesel zwischen 24 und 39 g CO₂eq/MJ.

Tabelle 33: Anteile der Biomassearten in Biokraftstoffen 2020

Kraftstoff	Biomasse	Anteil (energetisch)	Emissionsfaktor [g CO ₂ eq/MJ]*
Ethanol	Abfall	2,3 %	10
	Mais	63,7 %	30
	Andere Getreide	9,9 %	30
	Weizen	17,5 %	30
	Zuckerrohr	4,6 %	10
	Zuckerrübe	2,0 %	30
	Biodiesel	Abfall	36,3 %
Palmöl		24,6 %	40.8
Raps		32,4 %	45
Soja		1,3 %	40
Sonnenblumen		3,4 %	40
HVO Palmöl		2,1 %	36
Biomethan	Abfall	60 %	20
	Silomais	40 %	30

*ohne indirekte Landnutzungsänderungen

Quellen: (BLE 2021; Fehrenbach et al. 2016; Prussi et al. 2020)

2.6.3 Synthetische Kraftstoffe

Die Herstellung der synthetischen Kraftstoffe wird auf Basis der im UBA-Projekt SYSEET (Liebich et al. 2020) zusammengestellten Prozessdaten modelliert. Wo diese Daten erweitert und ersetzt werden, wird dies im Folgenden gekennzeichnet.

Grundsätzlich werden auch in dieser Studie folgende allgemeine Festlegungen innerhalb der Bereitstellungspfade übernommen. Die betrachteten Syntheseverfahren sind exotherm – bei der Herstellung der Produkte wird Wärme freigesetzt. Diese kann für unterschiedliche andere Prozessschritte (z. B. die CO₂-Abscheidung, Biomassekonditionierung) oder teilweise zur Stromerzeugung genutzt werden.

Wie in SYSEET gibt es auch in dieser Studie eine Rangfolge der Wärmenutzung innerhalb der Prozesse:

In PBtL und BtL-Prozessen wird:

- Wärme mit einer Temperatur über 200 °C zur Erzeugung von Strom verwendet, der ggf. in die Elektrolyse fließt.

- ▶ Wärme mit einer Temperatur unter 200 °C zur Konditionierung (Trocknung, Pelletierung) der Biomasse eingesetzt.

In PtL und PtG-Prozessen wird:

- ▶ Wärme mit einer Temperatur über 200 °C zur Abscheidung von CO₂ eingesetzt. Dort nicht genutzte Wärme wird zur Erzeugung von Strom verwendet, der wieder in die Elektrolyse fließt.
- ▶ Wärme mit einer Temperatur unter 200 °C ebenfalls zur Abscheidung von CO₂ verwendet.

2.6.3.1 Quellen erneuerbaren Stroms

Als Quellen erneuerbaren Stroms für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe werden die in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Strommixe und Einzeltechnologien herangezogen. Sofern in der Prozesskette benötigt, wird dieselbe Stromquelle für die Herstellung von elektrolytischem Wasserstoff, die CO₂-Abscheidung und den Hilfsstrom in den Syntheseanlagen verwendet.

2.6.3.2 Elektrolyse

Im Rahmen dieser Studie werden zwei Elektrolysetechnologien modelliert:

- ▶ Die alkalische Elektrolyse (AEL) mit wässriger Kali- oder Natronlauge als Elektrolyt und
- ▶ die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEMEL) mit einer protonenleitenden Membran als Elektrolyt.

Die folgende Tabelle 34 zeigt die wichtigsten Betriebsparameter, die weitgehend aus der Studie SYSEET übernommen werden.

Tabelle 34: Ausgewählte Betriebsparameter der modellierten Elektrolysetechnologien. Quelle: (Liebich et al. 2020)

Elektrolysetechnologie	Jahr	Systemwirkungsgrad [%]			Lebensdauer [h]		
		2020	2030	2050	2020	2030	2050
Alkalische Elektrolyse		67 %	71 %	80 %	70000	90000	90000
Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse		67 %	71 %	80 %	60000*	80000	80000

*aktualisiert auf Basis von (Holst et al. 2021)

Die Umweltwirkungen der Herstellung der Elektrolyseure werden der angepassten ecoinvent-Datenbank (Abschnitt 1.3) entnommen.

2.6.3.3 CO₂-Quellen

Für die Gewinnung von CO₂ zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen werden drei unterschiedliche Quellen modelliert:

- ▶ Abscheidung aus der Luft (engl.: Direct Air Capture (DAC))
- ▶ Abscheidung aus den Abgasen eines Zementwerks mittels Aminwäsche
- ▶ Abscheidung aus der Biogasaufbereitung zu Biomethan mittels Membrantechnologie

Die folgende Tabelle 35 zeigt die wichtigsten Betriebsparameter, die aus der Studie SYSEET übernommen werden.

Tabelle 35: Ausgewählte Betriebsparameter der modellierten CO₂-Abscheideprozess.

Abscheideprozess	Jahr	Strombedarf [kWh/kgCO ₂]			Wärme [kWh/kgCO ₂]		
		2020	2030	2050	2020	2030	2050
Abscheidung aus der Luft (DAC)		2,52	1,85	1,44	7,92	6,57	5,76
Abscheidung Abgase Zementwerk		0,05	0,05	0,05	3,51	3,51	3,51
Abscheidung Biogasaufbereitung		2,45	2,45	2,20	-	-	-

Quelle: (Liebich et al. 2020)

Als Strom für die Abscheidung aus der Luft wird die gleiche Quelle angenommen, die auch die gekoppelte Syntheseanlage versorgt. Die Abwärme der Syntheseanlage deckt den Bedarf der DAC-Einheit.

Der Strom für die Abscheidung im Zementwerk und in der Biogasaufbereitung kommt aus dem deutschen Stromnetz. Die Wärme für die Aminwäsche im Zementwerk wird durch eine zusätzliche Erzeugung aus fossilen (2020/2030) bzw. synthetischen Brennstoffen (2050) bereitgestellt.

Die Umweltwirkungen der Herstellung der Abscheideanlagen werden der angepassten ecoinvent Datenbank (Abschnitt 1.3) entnommen.

2.6.3.4 Biomasse

Für die Biomasseprozesse werden in dieser Studie folgende Substrate berücksichtigt:

- ▶ Stroh für die PBtL- und BtL-Syntheseprozesse, sowie
- ▶ Bioabfall und Grünschnitt für Biomethanproduktion

Da alle betrachteten Substrate Abfall- bzw. landwirtschaftliche Reststoffe sind, gehen nur die Aufwendungen für Einsammlung und Transport in die Bilanzierung ein.

2.6.3.5 Synthese

Für die Herstellung von synthetischem Benzin stehen die Fischer-Tropsch-Synthese mit anschließender Produktaufbereitung und die Methanolsynthese mit anschließendem Methanol-to-Gasoline-Prozess als Optionen zur Verfügung. Synthetischer Diesel kann nur über die Fischer-Tropsch-Route hergestellt werden.

- ▶ Die **Fischer-Tropsch-Synthese** (FT-Synthese) kann prinzipiell mit reinem CO₂ und Wasserstoff oder mit Biomasse als Input betrieben werden.
 - PtL: In der rein strombasierten Prozessführung, dem Power-to-Liquid-Prozess, wird aus Wasserstoff und CO₂ in einer reversen Wassergas-Shift-Reaktion ein Synthesegas erzeugt, das der Fischer-Tropsch-Synthese zugeführt wird. Nachfolgend wird das Rohprodukt in einem Hydrocracker und einer Produktaufbereitung/-raffination veredelt.
 - BtL: Im BtL-Prozess wird zunächst die Biomasse getrocknet und aufbereitet und dann in einer Vergasereinheit vergast. Das dabei entstehende Gas wird anschließend durch

Gasreinigungs- und Gaskonditionierungsschritte für die Fischer-Tropsch-Synthese vorbereitet. Nach der Synthese folgen wie beim PtL-Prozess Trennungs- und Veredelungsschritte.

- **PBtL:** Der Power&Biomass-to-Liquid-Prozess ist eine Kombination aus PtL- und BtL-Prozess. Die Hauptbestandteile sind wie beim BtL-Prozess Pyrolyse- und Vergasereinheit gefolgt von einer Synthesegaskonditionierung. Es folgt die Fischer-Tropsch-Synthese, der Hydrocracker sowie die notwendige Produktaufbereitung/-raffination. Hauptunterschied ist die Nutzung von zusätzlichem Wasserstoff, um die gewünschte Zusammensetzung des Synthesegases und eine höhere Ausnutzung des biogenen Kohlenstoffs zu erreichen.
- ▶ Auch die **Methanol-to-Gasoline**-Route (MtG) kann mit reinem CO₂ und Wasserstoff oder mit Biomasse als Input verfolgt werden. In einem ersten Schritt wird dabei Methanol hergestellt, mit dem dann in einem darauffolgenden Prozess Benzin synthetisiert werden kann.
 - **PtL:** Für die rein strombasierte Prozessführung stehen prinzipiell zwei Optionen zur Verfügung. In der zweistufigen Methanol-Synthese wird analog zur FT-PtL-Synthese erst ein Synthesegas erzeugt. In der einstufigen Methanol-Synthese werden CO₂ und Wasserstoff direkt zu Methanol synthetisiert. In beiden Fällen muss das Methanol anschließend in einer Separationskolonne entwässert werden. In dieser Studie wird die einstufige Methanol-Synthese modelliert, die auch schon im kommerziellen Einsatz ist.
 - **PBtL und BtL:** Für die biomassebasierte Prozessführung muss der Weg über die zweistufige Methanol-Synthese genommen werden. Wie in den FT-PBtL und FT-BtL-Prozessen wird zunächst die Biomasse getrocknet und aufbereitet und dann in einer Vergasereinheit vergast. Das dabei entstehende Gas wird anschließend durch Gasreinigungs- und Gaskonditionierungsschritte für die Methanol-Synthese vorbereitet und das so gewonnene Methanol in einer Separationskolonne entwässert.
 - **Methanol-to-Gasoline Prozess (MtG):** In einem Synthesereaktor wird an einem Katalysator (z. B. Cu/ZnO) Methanol über das Zwischenprodukt Dimethylether (DME) in Benzin umgewandelt. Dieses muss in einem zweiten Schritt von Restmethanol separiert werden. Die MtG-Technologie wurde bereits in der Praxis getestet und in verschiedenen Demonstrations- und industriellen Produktionsanlagen eingesetzt. Bereits in den 1990er-Jahren existierte eine Anlage in Neuseeland. In Chile (Haru Oni) befindet sich aktuell eine MtG-Anlage im Bau, die planmäßig 410.000 t/a in 2026 produzieren soll. Die Prozessdaten kommen von der CAC (Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH) und wurden in einer FVV-Studie erhoben (Kramer et al. 2022).
- ▶ In der **Power-to-Gas**-Synthese (PtG) wird aus CO₂ und Wasserstoff in einem Schritt, dem Sabatier-Prozess, Methan synthetisiert und anschließend in einer Gastrocknungseinheit behandelt. Da das Produkt, ähnlich wie natürliches Erdgas noch kleinere Anteile von CO₂ und Wasserstoff enthalten kann, nennt man es auch synthetisches Erdgas (englisch: Synthetic Natural Gas (SNG))
- ▶ Methan kann auch über die **Vergärung von Biomasse** zu Biogas und eine anschließende Biogasaufbereitung gewonnen werden. Biomethan wird schon heute in erheblichen Mengen in das Gasnetz eingespeist. Aus der Vielzahl der möglichen Aufbereitungstechniken wird für diese Studie die Membrantechnologie ausgewählt.

Die folgende Tabelle 36 zeigt die wichtigsten Betriebsparameter der Synthesen, die aus der Studie SYSEET übernommen werden. Es wird keine Veränderung über die Zeit angenommen. Für die Produkte Benzin und Diesel aus der FT-Synthese sind pro Energieeinheit des Kraftstoffs die gleichen Aufwendungen notwendig.

Tabelle 36: Ausgewählte Betriebsparameter der modellierten Synthesetechnologien.

Synthese	Strombedarf [kWh/MJ]	CO ₂ -Bedarf [kg/MJ]	H ₂ -Bedarf [kg/MJ]	Biomassebedarf [kg/MJ]
FT-PtL		7,20E-02	1,12E-02	
FT-BtL				1,74E-01 (Stroh)
FT-PBtL			7,44E-03	4,59E-02 (Stroh)
MtG-PtL	1,18E-02	1,05E-01	1,45E-02	
MtG-BtL				2,22E-01 (Stroh)
MtG-PBtL			9,01E-03	7,85E-02 (Stroh)
SNG-PtG		5,62E-02	1,06E-02	

Quelle: (Liebich et al. 2020)

Die Umweltwirkungen der Herstellung der Syntheseanlagen werden der angepassten ecoinvent Datenbank (Abschnitt 1.3) entnommen.

2.6.3.6 Transport

Im Gegensatz zur Studie SYSEET werden die Kraftstoffe für Tankschiffe und Tank-LKW in dieser Studie nicht mit dem jeweils transportierten Kraftstoff betrieben. Transportprozesse sind den an die Stützjahre angepassten ecoinvent-Datenbanken (Abschnitt 1.3) entnommen und werden mit den im dortigen Szenario hinterlegten Kraftstoffen versorgt.

Für die Transporte von Kraftstoffen aus Marokko nach Deutschland werden folgende Möglichkeiten angenommen:

- ▶ Synthetisches Benzin und Diesel werden per Tankschiff transportiert.
- ▶ Synthetisches Erdgas wird per Pipeline transportiert. Die Erdgaspipelines aus der angepassten ecoinvent v3.7.1 Datenbank sind unterschieden in Transporte innerhalb Europas und im Rest der Welt.
- ▶ Wasserstoff wird per Pipeline oder verflüssigt per Tankschiff transportiert. Die Wasserstoffpipelines aus der angepassten ecoinvent v3.7.1 Datenbank sind unterschieden in Transporte innerhalb Europas und im Rest der Welt.

2.6.3.7 Distribution

Die Distribution der Kraftstoffe innerhalb Deutschlands bis in den Fahrzeugtank wurde in SYSEET nicht betrachtet.

Für die Distribution bis zur Tankstelle werden folgende Annahmen auf Basis von Transportprozessen aus der angepassten ecoinvent Datenbank (Abschnitt 1.3) getroffen:

- ▶ Synthetisches Benzin und Diesel werden per Tankcluster transportiert.

- ▶ Synthetisches Erdgas und Biomethan werden per Gasnetz transportiert.
- ▶ Wasserstoff wird 2020 gasförmig per Lkw und 2030/50 per Pipeline transportiert.

Die Aufwendungen an der Tankstelle, hauptsächlich Kompression für Wasserstoff und Kompression/Verflüssigung für CNG/LNG werden nach Werten aus (Prussi et al. 2020) modelliert. Als Stromquelle wird dafür der deutsche Netzstrom angenommen (Kapitel 2.5.1).

2.6.4 Szenariogebundene Kraftstoffmixe

Im Rahmen dieser Studie orientiert sich auch die Zusammensetzung der Kraftstoffmixe an den Szenarien GreenLate und GreenSupreme und den Annahmen aus dem UBA Projekt REFINE. Das betrifft zum einen die Anteile von fossilen, biogenen und synthetischen Kraftstoffen als auch den erneuerbaren Strommix, mit dem die strombasierten Kraftstoffe hergestellt werden. Tabelle 37 zeigt die angenommenen fossilen, biogenen und synthetischen Anteile für die unterschiedlichen Kraftstoffe.

Tabelle 37: Zusammensetzung (fossil/biogen/synthetisch) der angenommenen Kraftstoffmixe nach den Szenarien GreenLate und GreenSupreme in Prozent (energetischer Anteil)

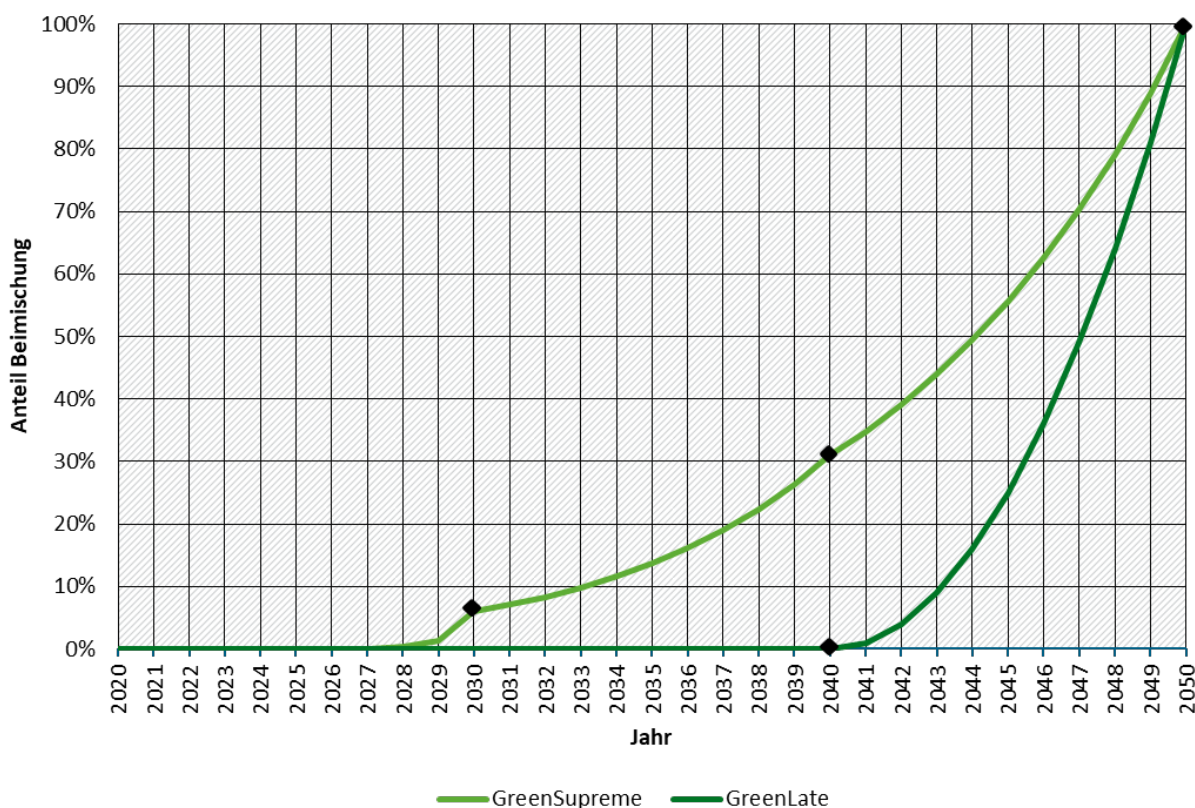
Kraftstoff	Szenario	2020 (fos/bio/syn)*	2030 (fos/bio/syn) *	2040 (fos/bio/syn) *	2050 (fos/bio/syn)*
Benzin	GreenSupreme	94/6/0	87/7/6	69/0/31	0/0/100
	GreenLate	94/6/0	93/7/0	100/0/0	0/0/100
Diesel	GreenSupreme	92/8/0	87/7/6	69/0/31	0/0/100
	GreenLate	92/8/0	93/7/0	100/0/0	0/0/100
CNG	GreenSupreme	99/1/0	93/6/1	69/0/31	0/0/100
	GreenLate	99/1/0	99/1/0	100/0/0	0/0/100
LNG	GreenSupreme	99/1/0	93/6/1	69/0/31	0/0/100
	GreenLate	99/1/0	99/1/0	100/0/0	0/0/100
H ₂	GreenSupreme	100/0/0	94/0/6	69/0/31	0/0/100
	GreenLate	100/0/0	100/0/0	100/0/0	0/0/100

*(fos/bio/syn) = (fossil/biomassebasiert/synthetisch)

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Bereiche zwischen diesen Stützjahren werden für die Biokraftstoffe linear und für die synthetischen Kraftstoffe mit exponentiellen, bzw. polynomischen Hochlaufkurven modelliert. Diese spiegeln die angenommene Dynamik der Technologieeinführungen wider. Die in Abbildung 16 sichtbaren Unstetigkeiten an den Stützwerten des Szenarios GreenSupreme in den Jahren 2030 und 2040 sind darauf zurückzuführen, dass jeweils zwischen zwei Stützwerten interpoliert wird. Dies hat jedoch keine signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse.

Abbildung 16: Hochlaufkurven für die Beimischung synthetischer Kraftstoffe für die Szenarien GreenLate und GreenSupreme



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Für die unterschiedlichen synthetischen Kraftstoffe werden im Rahmen dieses Projektes auch Importanteile und die Zusammensetzung der erneuerbaren Stromquellen für ihre Erzeugung aus den Szenarien GreenLate und GreenSupreme und dem parallellaufenden Projekt REFINE abgeleitet. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass in den Jahren 2020/30 Benzin und Diesel aus Marokko importiert werden, während die gasförmigen Kraftstoffe CNG, LNG und Wasserstoff aus heimischer Produktion sind. Für die Synthesetechnologien, CO₂-Quellen und Transportmoden werden ebenso Standardfälle festgelegt. Tabelle 38 fasst die wichtigsten Annahmen zusammen.

Tabelle 38: Standardparameter für die Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe 2020, 2030 und 2050

PtX-Kraftstoff	Jahr	Produktionsland	Anteile EE-Quellen (WindOn/WindOff/PV/CSP) in %**	CO ₂ -Quelle	Transport
MtG-Benzin	2020*	MA*	72/3/25/-	DAC*	Tanker + LKW
	2030	MA	54/2/44/-	DAC	Tanker + LKW
	2050	DE	Netzmix GreenSupreme***	DAC	LKW

PtX-Kraftstoff	Jahr	Produktionsland	Anteile EE-Quellen (WindOn/WindOff/PV/CSP) in %**	CO ₂ -Quelle	Transport
FT-Diesel	2020+	MA+	72/3/25/-	DAC	Tanker + LKW
	2030	MA	54/2/44/-	DAC	Tanker + LKW
	2050	DE	Netzmix GreenSupreme***	DAC	LKW
S-CNG	2020*	DE*	59/14/27/-	DAC	Pipeline
	2030	DE	59/18/24/-	DAC	Pipeline
	2050	DE	Netzmix GreenSupreme***	DAC	Pipeline
S-LNG	2020*	DE*	59/14/27/-	DAC	Pipeline
	2030	DE	59/18/24/-	DAC	Pipeline
	2050	DE	Netzmix GreenSupreme***	DAC	Pipeline
PtG-H ₂	2020*	DE*	59/14/27/-	-	Pipeline
	2030	DE	59/18/24/-	-	Pipeline
	2050	DE	Netzmix GreenSupreme***	-	Pipeline

WindOn=Windkraft onshore, WindOff=Windkraft offshore, PV=Photovoltaik, CSP=Konzentrierende Solarkraft
 FT=Fischer-Tropsch, MtG=Methanol-to-Gasoline, S-CNG=Synthetisches komprimiertes Erdgas, S-LNG=Synthetisches verflüssigtes Erdgas, PtG-H₂=Elektrolytischer Wasserstoff, MA = Marokko, DE = Deutschland, DAC = CO₂-Gewinnung aus der Luft

*im Jahr 2020 wurden nur sehr kleine Mengen PtL und PtG hergestellt. Erste Beimischung werden entsprechend auch erst 2027 modelliert **gerundet ***Die Zusammensetzung der Strommixe GreenSupreme ist in Kapitel 2.5.1 dargestellt

Der Einfluss dieser Auswahl auf die Umweltwirkungen der synthetischen Kraftstoffe wird exemplarisch anhand des Treibhauspotenzials in Kapitel 4.1.4 untersucht.

3 Gesamtergebnisse der Umweltbewertung

3.1 Einflussfaktoren und Standardfälle

Die grundlegende Modellierung im Projekt erlaubt die Berechnung einer Vielzahl von Kombinationen und Variationen zu den Fahrzeugen und Kraftstoffen. Um zentrale Ergebnisse ableiten zu können, werden diese zu zentralen Standardfällen gebündelt, die eine plausible Entwicklung in der Fahrzeuge- und Akkutechnologie, bei der Verbrauchsentwicklung sowie im Hintergrundsystem abbilden.

Die Bilanz der Fahrzeuge je gefahrenem Kilometer wird besonders von folgenden Faktoren beeinflusst:

- ▶ Fahrzeugverbräuche und -eigenschaften
- ▶ Entwicklungen bei der Fahrzeug- und Akkuherstellung
- ▶ Umweltwirkungen der eingesetzten Energieträger (inklusive Verbrennungsemissionen sowie dem Einsatz von erneuerbaren Energien zum Fahrzeugbetrieb)
- ▶ Veränderungen im Hintergrundsystem durch eine fortschreitende Defossilisierung

Im Folgenden werden die Annahmen zu diesen Einflussfaktoren sowie die abgeleiteten Standardfälle erläutert.

Entwicklungen bei den Fahrzeugverbräuchen und -eigenschaften

Ein zentraler Einflussfaktor auf die Umweltbilanz der Fahrzeuge sind die hinterlegten Fahrzeugeigenschaften sowie die daraus ermittelten Fahrzeugverbräuche.

Bei den Personenkraftwagen wird jeweils ein mittleres Kompaktklassefahrzeug betrachtet, wie es in Deutschland im Jahr 2020 neuzugelassen wurde. Die zugehörigen Fahrzeugeigenschaften und Verbräuche sind in Kapitel 2.1 beschrieben, hier werden kurz die wichtigsten Trends zusammengefasst. Grundsätzlich hat der Dieselmotor gegenüber dem Ottomotor Effizienzvorteile, allerdings sind typische Kompaktklasse-Diesel-Pkw heute in Deutschland schwerer als typische Benzin-Kompaktklasse-Pkw. Das führt zu sehr ähnlichen Verbräuchen in MJ pro Kilometer der beiden Fahrzeugkonzepte. Etwas niedriger liegt dagegen der typische CNG-Kompaktklasse-Pkw, da hier im Jahr 2020 relativ verbrauchsarme Pkw neu zugelassen wurden. Bei den Pkw mit Benzin-/Diesel-/ CNG- Antrieb werden Effizienzsteigerungen von 2,1 % pro Jahr bis 2025 und 1,4 % pro Jahr zwischen 2025 und 2030 angesetzt. Danach bleibt der Verbrauch konstant. Bei den Pkw mit alternativen Antrieben werden gleichbleibende Verbräuche unterstellt, da davon ausgegangen werden kann, dass eventuelle Effizienzsteigerungen durch ungünstigere Einsatzprofile ausgeglichen werden. Zudem bleiben bei den Elektro-Pkw die Fahrzeuggewichte fast konstant, da angenommen wird, dass die Akkus pro kWh Kapazität zwar leichter werden, aber gleichzeitig die Fahrzeugreichweiten (und damit die Akkugrößen) ansteigen.

Bei den Sattelzügen gab es im Jahr 2020 nur sehr wenige Modelle mit alternativen Antrieben. Daher werden Sattelzugmaschinen mit Elektro- oder Wasserstoffantrieb erst ab dem Baujahr 2030 analysiert. Grundsätzlich haben heutige dual-fuel-LNG-Lkw ebenfalls einen Dieselmotor und damit eine ähnliche Effizienz wie der reine Diesel-Lkw. Dabei wird neben LNG zusätzlich auch Dieseldieselkraftstoff für die Zündung genutzt, wobei der Dieselanteil im Mittel bei etwa 40 % liegt. Reine LNG-Lkw haben einen Ottomotor und kommen damit auf 24 % höhere Verbräuche gegenüber dem Diesel-Lkw. Bei den Sattelzügen mit Diesel sowie LNG-Antrieb werden

Effizienzsteigerungen von 0,5 % pro Jahr bis 2030 angesetzt. Danach bleiben die Verbräuche konstant. Bei den Sattelzugmaschinen mit alternativen Antrieben ist vor allem der Mehrverbrauch des Wasserstoffverbrenner-Fahrzeugs gegenüber dem Brennstoffzellen-Fahrzeug von 15 % erwähnenswert, welcher möglicherweise entstehende Vorteile durch den Wegfall der Brennstoffzelle wieder aufwiegen kann.

Ein wichtiger Einflussfaktor sowohl auf den Fahrzeugverbrauch als auch für die Fahrzeugherstellung ist die jeweiligen Akkugröße der Elektrofahrzeuge. Grundsätzlich steigt bei allen Fahrzeugen mit alternativen Antrieben die Reichweite (und damit die Größe der Traktionsbatterie) mit den Jahren wie in Tabelle 39 gezeigt an.

Tabelle 39: Angenommene Entwicklung der Reichweiten und nutzbaren Akkugrößen der Elektrofahrzeuge

	Akkugröße 2020	Reale Reichweite 2020 (elektrisch)	Akkugröße 2030 - 2050	Reale Reichweite 2030 – 2050 (elektrisch)
Pkw BEV	55 kWh	300 km	80 kWh	440 km
Pkw PHEV	10 kWh	53 km	14 kWh	75 km
LNF BEV	55 kWh	150 km	75 kWh	200 km
LNF PHEV	14 kWh	40 km	18 kWh	55 km
SZ BEV	-	-	730 kWh	500 km
SZ O-BEV	-	-	160 kWh	120 km (ohne OL)

Anmerkung: Weitere Fahrzeugeigenschaften sind zu finden in Kapitel 2.1.

Entwicklungen bei den Fahrzeug- und Akkutechnologien

Neben den Verbesserungen im Energieverbrauch werden auch Verbesserungen bei der Fahrzeugbereitstellung (vor allem bedingt durch technologische Weiterentwicklungen bei den Traktionsbatterien sowie den Brennstoffzellen) angenommen. Eine Kurzübersicht zeigt Tabelle 40, in Kapitel 2.4 ist dies ausführlich dargestellt. Zudem wird für das Baujahr 2050 mit einer vollständig defossilisierten Fahrzeug- und Akkuherstellung gerechnet. Details dazu befinden sich in Kapitel 1.3.

Tabelle 40: Technologieniveau und Hintergrundsystem der Fahrzeug- und Akkuherstellung

Baujahr	Hintergrundsystem	Akkutechnologie	Brennstoffzelle
2020	Heute	NMC622 (mit 150 Wh/kg auf Systemebene)	PEMFC 2020 (mit 380 mg Platinbeladung pro kW)
2030	Heute	NMC811 (mit 200 Wh/kg auf Systemebene)	PEMFC 2030+ (mit 165 mg Platinbeladung pro kW)
2050	GreenSupreme 2050	Li-Luft (mit 1500 Wh/kg auf Systemebene)	PEMFC 2030+ (mit 165 mg Platinbeladung pro kW)

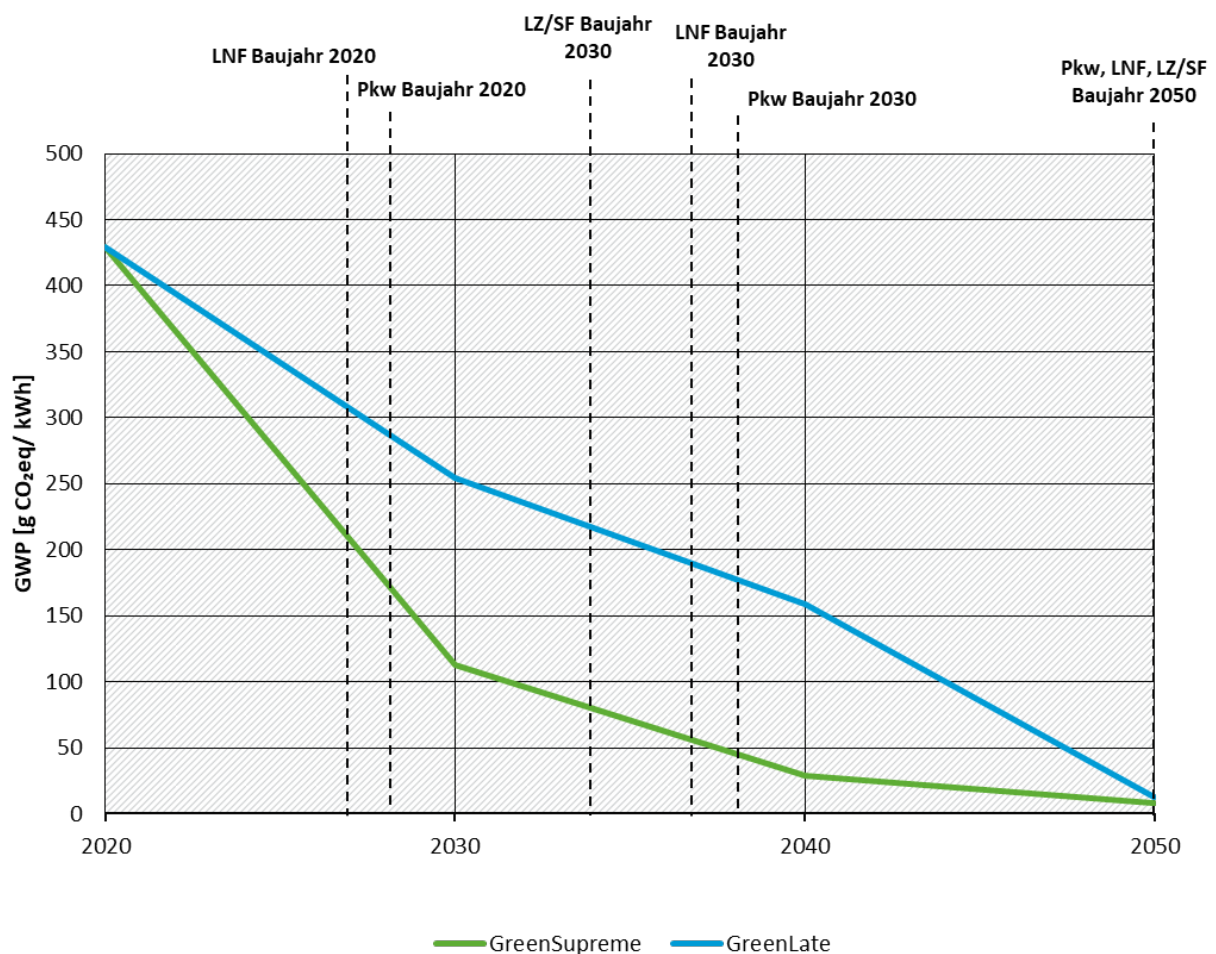
Anmerkungen: Weitergehende Informationen finden sich in Kapitel 2.4

Strom- und Kraftstoffmixe

Zentrale Annahmen werden auch für die Nutzung von Strom und die Herstellung synthetischer Kraftstoffe getroffen. Für batterieelektrische bzw. hybridelektrische Fahrzeuge werden deutsche Netzstrommixe eingesetzt. Für das Jahr 2050 wird zusätzlich auch für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe der Einsatz von deutschem Netzstrom (der zu diesem Zeitpunkt weitestgehend erneuerbar ist) gemäß dem Szenario GreenSupreme angenommen. Die Zusammensetzung der Strommixe nach den Szenarien GreenLate und GreenSupreme sind in Kapitel 2.5.1 dokumentiert.

In Abbildung 17 sind die Treibhauspotenziale der deutschen Netzstrommixe nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate dargestellt.

Abbildung 17: Treibhauspotenziale je kWh der deutschen Netzstrommixe nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Ausgangspunkt ist das Treibhauspotenzial des deutschen Erzeugungsstrommixes im Jahr 2020. In den verschiedenen Szenarien ist dann eine unterschiedliche schnelle Defossilisierung des Stromsektors und des für die Energieinfrastruktur relevanten Hintergrundsystems angenommen (Kapitel 1.3). Entsprechend unterschiedlich schnell sinkt das Treibhauspotenzial je Kilowattstunde. Batterie- und hybridelektrische Fahrzeuge nutzen im Laufe ihres Fahrzeuglebens Netzstrom mit unterschiedlichem Treibhauspotenzial als Antriebsenergie. In Abbildung 17 sind diejenigen Jahre mit gestrichelten Linien eingezeichnet, die dem

durchschnittlichen Strommix für ein bestimmtes Fahrzeugbaujahr entsprechen. So nutzt etwa ein PKW mit Baujahr 2020 aufgrund seiner längeren Lebensdauer gegenüber einem leichten Nutzfahrzeug im Mittel einen Strom mit niedrigerem Treibhauspotenzial. Fahrzeuge mit Baujahr 2050 nutzen über ihr ganzes Fahrzeubleben den gleichen, maximal defossilisierten Netzstrom.

Im Jahr 2050 münden in dieser Studie alle Szenarien in den weitestmöglich defossilisierten Netzstrommix von GreenSupreme. Tabelle 41 zeigt die Treibhauspotenziale für die unterschiedlichen Szenarien und Jahre.

Tabelle 41: Treibhauspotenziale der deutschen Netzstrommixe nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate

Szenario	Einheit	2020	2030	2040	2050
GreenLate	g CO ₂ eq./kWh	429*	254	158	8**
GreenSupreme	g CO ₂ eq./kWh	429*	113	29	8

*Strommix 2020 szenariounabhängig; **für 2050 wird für alle Szenarien der Wert aus GreenSupreme übernommen
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Für die Erzeugung synthetischen Kraftstoffe werden in allen Jahren vollständig erneuerbare Strommixe herangezogen. In den Jahren 2020, 2030 und 2040 ist dies für die flüssigen synthetischen Kraftstoffe, Benzin und Diesel, ein Mix aus Windkraft (on- und offshore), Photovoltaik und konzentrierender Solarkraft in Marokko. Die gasförmigen Kraftstoffe, synthetisches Erdgas und Wasserstoff, werden in den gleichen Jahren mit einem Mix aus Windkraft (on- und offshore) und Photovoltaik in Deutschland hergestellt. Die Mengenverhältnisse leiten sich dabei auch aus Szenarien GreenLate und GreenSupreme ab und sind in Kapitel 2.6.4 dargestellt. Tabelle 42 zeigt das Treibhauspotenzial dieser Strommixe. 2050 werden alle Kraftstoffe mit dem deutschen Strommix hergestellt.

Tabelle 42: Treibhauspotenziale der vollständig erneuerbaren Strommixe zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

Szenario	Einheit	2020	2030	2040	2050
Deutschland	g CO ₂ eq./kWh	30	11	10	8
Marokko	g CO ₂ eq./kWh	18	10	9	–

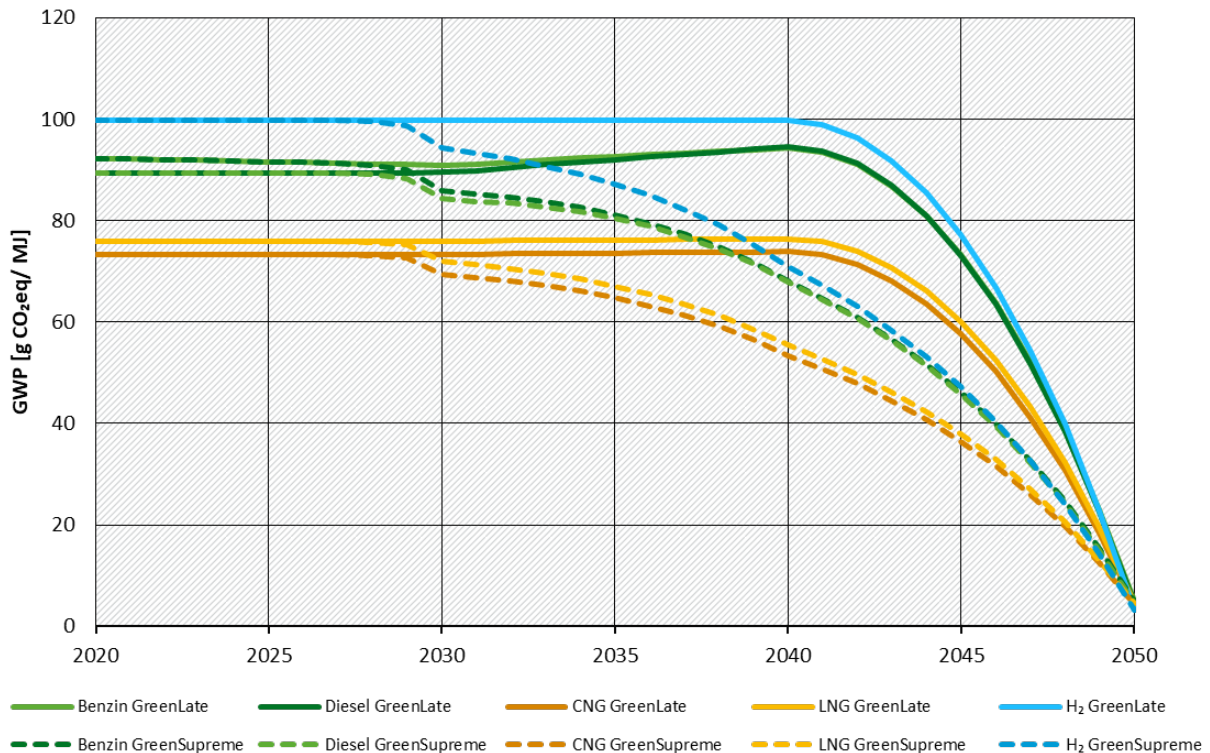
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Im Rahmen dieser Studie orientieren sich nicht nur die erneuerbaren Strommixe, mit denen die strombasierten Kraftstoffe hergestellt werden, an den Szenarien GreenLate und GreenSupreme aus dem UBA Projekt REFINE. Auch die Anteile von fossilen, biogenen und synthetischen Kraftstoffen werden aus diesen Szenarien abgeleitet. Details dazu sind ebenfalls in Kapitel 2.6.4 zu finden. Grundsätzlich gilt, dass nach GreenSupreme erst ab 2030 synthetische Kraftstoffe in nennenswerten Mengen zur Verfügung stehen. Nach GreenLate ist das sogar erst ab 2040 der Fall.

Abbildung 18 zeigt die Treibhauspotenziale der Kraftstoffmixe je Megajoule Heizwert nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate für den Zeitraum von 2020 bis 2050. Für die Jahre zwischen den Stützjahren sind die Mixe und damit auch ihre Treibhauspotenziale exponentiell bzw. polynomisch interpoliert (Kapitel 2.6.4). Um eine Vergleichbarkeit zwischen den

Kraftstoffen herzustellen, ist bei allen die vollständige Oxidation (Verbrennung) des Kohlenstoffs zu CO₂ hinzugerechnet.

Abbildung 18: Treibhauspotenziale der Kraftstoffmixe nach den Szenarien GreenSupreme und GreenLate (inkl. vollständiger Verbrennung) pro MJ Heizwert



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

An dieser Stelle weisen wir darauf hin, dass die fossilen Vorketten in dieser Studie noch ohne die erhöhten Methanemissionen berechnet werden, die mittlerweile in die Umweltziele der vereinten Nationen und wichtige Ökobilanzdatenbanken Einzug gehalten haben. Erläuterungen dazu finden sich in Kapitel 2.6.1. Würden diese Emissionen berücksichtigt, läge das Treibhauspotenzial von fossilem Benzin und Diesel noch einmal rund 3 g CO₂eq/MJ höher. Für Wasserstoff läge dieser Aufschlag bei rund 4 g CO₂eq/MJ.

Für die synthetischen Kraftstoffe werden folgende technologische Rahmenbedingungen über die Jahre konstant gehalten: Benzin wird im Methanol-to-Gasoline-Verfahren hergestellt, Benzin über die Fischer-Tropsch-Route, CNG/LNG über direkte Methanisierung. Es kommt durchgehend die alkalische Elektrolyse zum Einsatz. CO₂ wird aus der Luft abgeschieden. Weitere Details zur Modellierung von Strom und Kraftstoffen finden sich in den Kapiteln 2.5.3 und 2.6.4, Detailergebnisse zu den Umweltwirkungen in Kapitel 4.1.

Weil im Szenario GreenLate synthetische Kraftstoffe erst ab 2040 beigemischt werden und der Bioanteil bis dahin sogar zurückgeht, steigt das Treibhauspotenzial für Benzin, Diesel und Erdgas sogar leicht an und stagniert für Wasserstoff. Im Szenario GreenSupreme sinkt dagegen das Treibhauspotenzial für alle Kraftstoffe kontinuierlich ab. Die stärkste Reduktion findet aber erst im Zeitraum zwischen 2040 und 2050 statt, in dem der Anteil synthetischer Kraftstoffe von 31 auf 100 % steigt.

Der Anstieg der PtL/PtG-Beimischung und das Absinken der Biobeimischungen haben zur Folge, dass Fahrzeuge jährlich eine andere Kraftstoffmischung nutzen. Die in Tabelle 43 dargestellten

mittleren Beimischungen entsprechen dem Kraftstoffmix, mit dem ein Fahrzeug über sein gesamtes Fahrzeugleben im Durchschnitt betrieben wird.

Tabelle 43: Durchschnittliche Beimischung synthetischer und biobasierter Kraftstoffe über die Lebensdauer der betrachteten Fahrzeugtypen

Fahrzeug	Szenario	Anteil synthetische Kraftstoffe	Anteil Biodiesel	Anteil Bioethanol	Anteil Biomethan
Pkw Baujahr 2020	GreenLate	0 %	7 %	5,6 %	0,9 %
	GreenSupreme	3,1 %			
Pkw Baujahr 2030	GreenLate	2,8 %	2,9 %	2,9 %	0,4 %
	GreenSupreme	22,6 %			
Pkw Baujahr 2050	GreenSupreme	100%	0 %	0 %	0 %
LNF Baujahr 2020	GreenLate	0 %	7,6 %	5,7 %	1,0 %
	GreenSupreme	1,7 %			
LNF Baujahr 2030	GreenLate	0,7 %	3,5 %	3,5 %	0,5 %
	GreenSupreme	18,0 %			
LNF Baujahr 2050	GreenSupreme	100 %	0 %	0 %	0 %
LZ/SZ Baujahr 2020	GreenLate	0 %	7,6 %	5,3 %	1,0 %
	GreenSupreme	0 %			
LZ/SZ Baujahr 2030	GreenLate	0 %	5,2 %	5,1 %	0,7 %
	GreenSupreme	10,6 %			
LZ/SZ Baujahr 2050	GreenSupreme	100 %	0 %	0 %	0 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Entwicklungen im Hintergrundsystem

Langfristig wird von einer weitestmöglichen Defossilisierung der Wirtschaft sowohl in Deutschland als auch im Rest der Welt ausgegangen, so dass Werkstoffe und Vorprodukte von Fahrzeugen sowie die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien emissionsärmer werden. Um eine solche global defossilisierte Zukunft abzubilden, wird für alle Fahrzeuge mit Baujahr 2050 ein weitestmöglich defossilisiertes Hintergrundsystem berücksichtigt, das auf den REFINE-Ergebnissen für das Jahr 2050 (GreenSupreme) beruht (siehe Kapitel 1.3). Für andere Prozesse – von der Herstellung der Stromerzeugungsanlagen, über Materialien für den Bau und Betrieb der CO₂-Abscheide- und Synthesanlagen bis zu Transporten – wird bereits für das Jahr 2030 das teilweise defossilisierte Hintergrundsystem nach GreenSupreme herangezogen.

Zusammenfassung

Damit gibt es bei den Berechnungen und Auswertungen folgende Standardfälle:

- ▶ Fahrzeuge mit Baujahr 2020 als Ausgangspunkt („Startpunkt“) mit einer Entwicklung der Strom-/ Kraftstoffe nach GreenLate sowie nach GreenSupreme
- ▶ Fahrzeuge mit Baujahr 2030 als Stützjahr („Übergangsphase“) mit einer Entwicklung der Strom-/ Kraftstoffe nach GreenLate sowie nach GreenSupreme
- ▶ Fahrzeuge mit Baujahr 2050 als Abbildung eines möglichen vollständig defossilisierten Zielpunktes („THG-Neutralität“) anhand des Szenarios GreenSupreme

Alle betrachteten Kombinationen sowie ihre Kurzbezeichnungen sind in Tabelle 44 aufgelistet.

Tabelle 44: Betrachtete Standardfälle

Baujahr	Strom-/Kraftstoffe	Hintergrundsystem (Fahrzeuge/Akkus)	Bezeichnung (kurz)	Baujahr
2020	GreenLate / GreenSupreme	Heute	BJ 2020 GL/ GS	2020
2030	GreenLate/ GreenSupreme	Heute/ Akku sowie PEMFC 2030	BJ 2030 GL/ GS	2030
2050	GreenSupreme	GreenSupreme 2050	BJ 2050 GS	2050

Bei den gezeigten Ergebnisgrafiken werden teilweise die einzelnen Lebenswegabschnitte ausgewiesen, um deren Einfluss auf die Gesamtbilanz zu verdeutlichen. Dabei wird folgende Aufteilung (siehe auch die Legende in den Abbildungen) vorgenommen:

- ▶ Fzg (Basis): bezieht sich auf die Herstellung des Fahrzeuges (inklusive aller Bestandteile von Rumpf und Antriebstrang) aber ohne Traktionsbatterie
- ▶ Akku: bezieht sich auf die Herstellung der Traktionsbatterie
- ▶ Strom/ Kraftstoff: bezieht sich auf die Strom- und Kraftstoffbereitstellung (inklusive der Lade- und Tankstelleninfrastruktur sowie der Oberleitungsinfrastruktur bei den O-Lkw)
- ▶ Nutzungsemissionen: bezieht sich auf die direkten bzw. lokalen Abgasemissionen sowie die Abriebemissionen (z. B. durch Bremsen- und Reifenabrieb) der Fahrzeuge im Betrieb (rein elektrische Fahrzeuge verursachen zwar keine direkten Abgasemissionen sind aber dennoch für Emissionen aus dem Abrieb verantwortlich, welche eine ähnliche Höhe wie die konventionellen Fahrzeuge aufweisen)
- ▶ Wartung: bezieht sich auf die Wartungsaufwendungen für die Fahrzeuge
- ▶ EoL: End of Life bezieht sich auf die Entsorgung des Fahrzeuges inklusive Traktionsbatterie

Alle angegebenen Emissionswerte werden immer pro Fahrzeugkilometer ausgewiesen, dabei wird bei den Sattelzügen von einer einheitlichen mittleren Beladung von 11t Nutzlast ausgegangen. Die vollständigen Ergebnistabellen sind im separaten Anhang zu finden.

3.2 Treibhauspotenziale

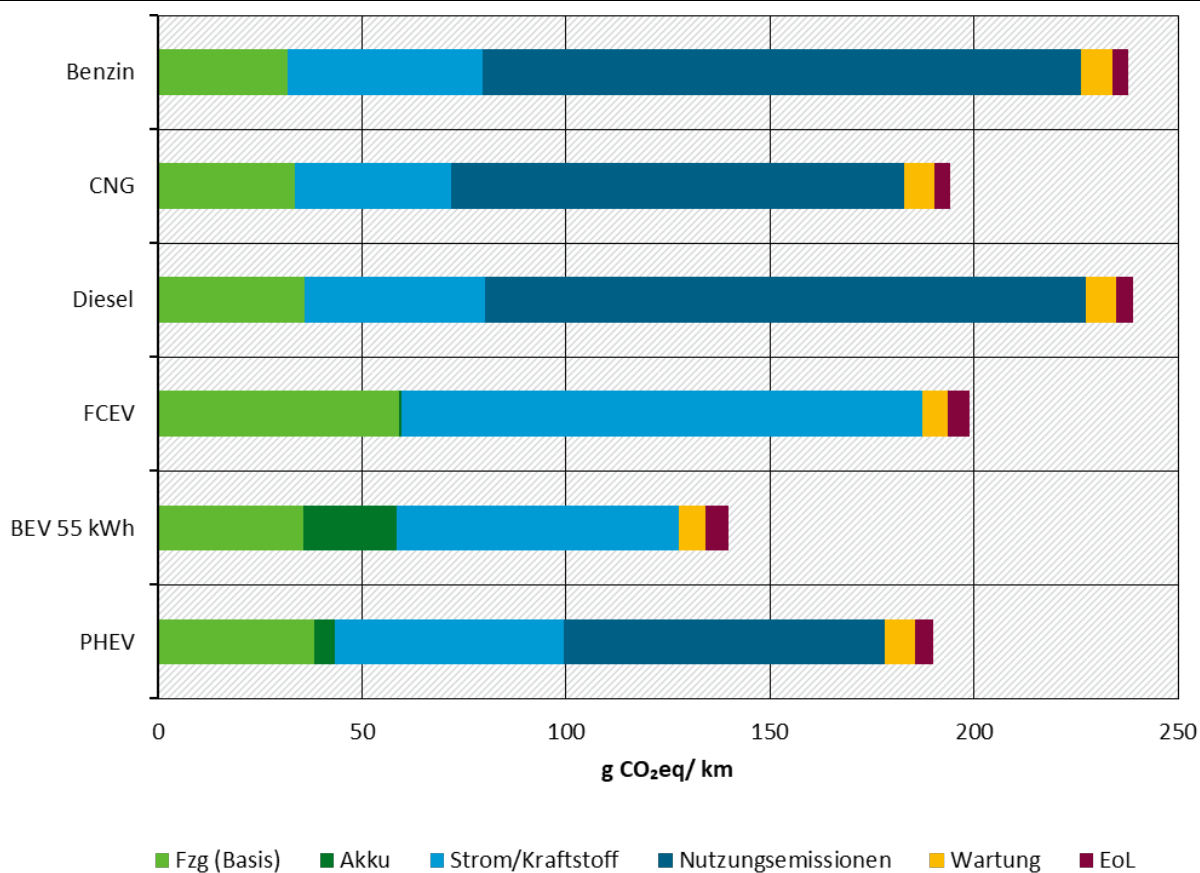
3.2.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Pkw Baujahr 2020 (Startpunkt)

Zunächst werden in Abbildung 19 die Pkw mit Baujahr 2020 im weniger ambitionierten Stromszenario GreenLate betrachtet. Hier zeigt sich, dass die Fahrzeuge mit konventionellem

Benzin- oder Dieselantrieb das höchste Treibhauspotenzial je Fahrzeugkilometer haben. Trotz der Effizienzvorteile des Dieselmotors gegenüber dem Ottomotor hat ein heutiger Diesel-Kompaktklasse-Pkw mit 239 g CO₂eq pro km ein vergleichbares Treibhauspotenzial wie ein Benzin-Pkw mit 238 g CO₂eq pro km, da die am Markt angebotenen Modelle oft leistungsstärker und schwerer sind als bei den Benzin-Kompaktklasse-Pkw. Erdgas-Pkw schneiden mit 194 g CO₂eq pro km besser ab, was vor allem am geringeren Verbrauch als bei Benzin- oder Diesel-Pkw liegt. Der FCEV-Pkw mit 199 g CO₂eq pro km sowie der PHEV-Pkw mit 190 g CO₂eq pro km haben ähnliche Treibhauspotenziale wie der CNG-Pkw und damit heute nur geringe Vorteile gegenüber Benzin- und Diesel-Pkw. Das liegt unter anderem daran, dass aktuell der Wasserstoff für die Brennstoffzellenfahrzeuge noch aus der Reformierung von fossilem Erdgas stammt. Bei den Plug-In Hybriden führen vor allem die im Realbetrieb relativ geringen elektrischen Fahranteile zu einer ähnlichen Bilanz wie bei CNG- oder FCEV-Pkw. Das geringste Treibhauspotenzial von 140 g CO₂eq pro km weist heute der Elektro-Pkw (mit 55 kWh Akku) auf, er liegt damit um 41 % unter dem Benzin-Pkw.

Abbildung 19: Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020, GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Eine Analyse der Beiträge der einzelnen Lebenswegabschnitte zum Treibhauspotenzial zeigt, dass bei den Pkw mit Verbrennungsmotor aktuell die direkten Nutzungsemissionen den größten Beitrag haben – bei Diesel- und Benzin-Pkw liegen diese bei 147 g CO₂eq pro km⁷. Geringer

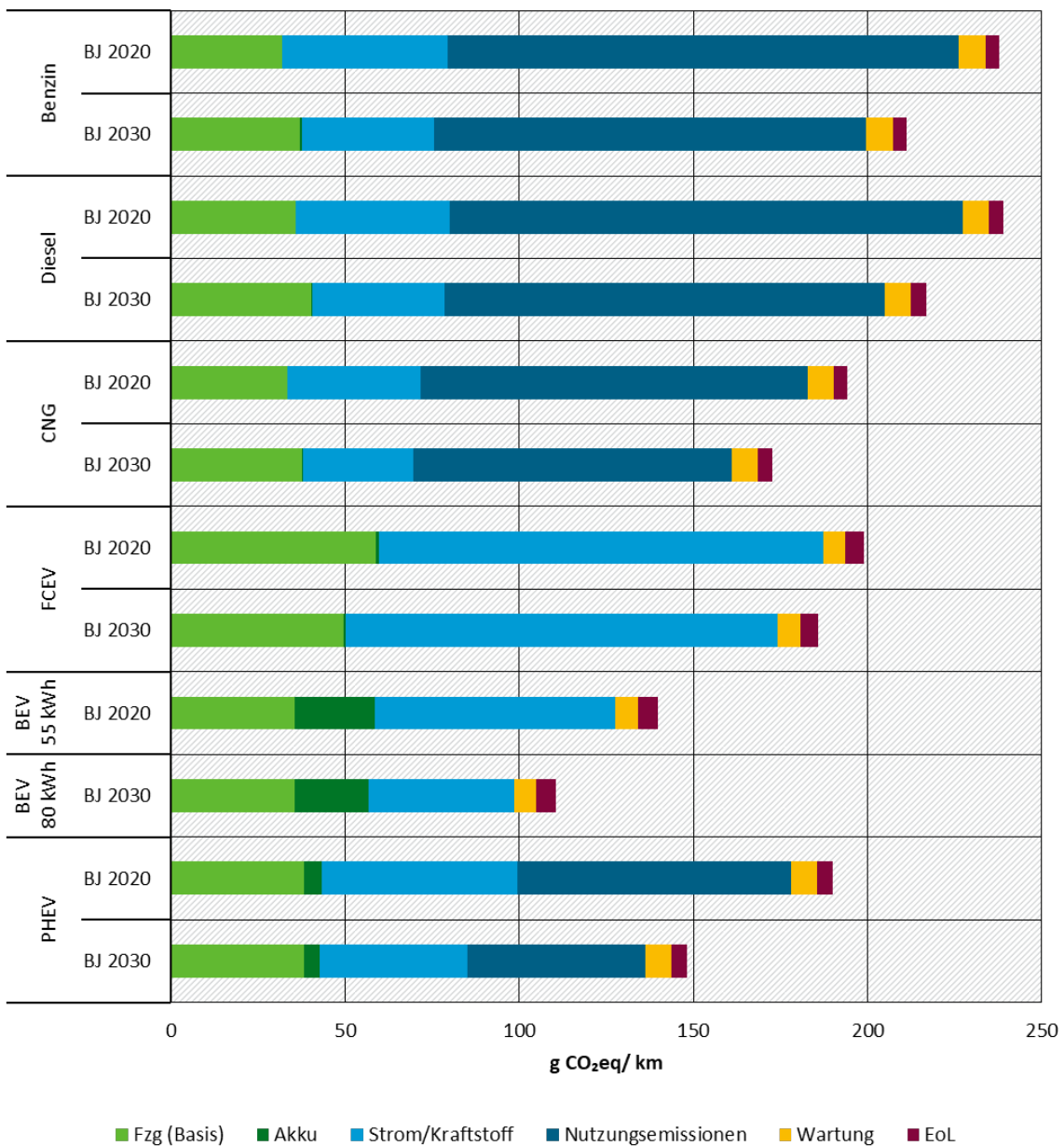
⁷ In dieser Studie werden die gesamten Lebenszyklusemissionen betrachtet. Im Gegensatz dazu beinhalten die Flottenzielwerte nur die direkten (Tank-to-Wheel) Abgasemissionen. Zum Vergleich: Dieser offizielle Flottenzielwert für Pkw lag in Deutschland im Jahr 2020 bei 95 g CO₂/km, wobei batterieelektrische Pkw mit Nullemissionen angerechnet werden.

liegen die direkten Nutzungsemissionen der CNG-Pkw mit 111 g CO₂eq pro km sowie die der Plug-In-Hybride mit 79 g CO₂eq pro km. Den zweitgrößten Posten bei den konventionellen Pkw bzw. den größten Posten bei den Pkw mit alternativen Antrieben macht das Treibhauspotenzial zur Bereitstellung des Stroms- bzw. der Kraftstoffe aus. Schließlich folgt die Fahrzeugherstellung (inklusive der Herstellung der Traktionsbatterie beim BEV-Pkw), wobei die Beiträge der Herstellung bei den Pkw mit alternativen Antrieben deutlich höher liegen als bei den konventionellen. Eine detailliertere Analyse der Fahrzeug- und Traktionsbatterieherstellung findet sich in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2. Bei allen Antriebskonzepten haben die Wartung sowie das End-of-Life den geringsten Einfluss auf das Treibhauspotenzial.

Pkw Baujahr 2030 (Übergangsphase)

Abbildung 20 zeigt wie sich die Treibhauspotenziale pro Fahrzeugkilometer der Kompaktklasse-Pkw in Zukunft entwickeln könnten. Hier zeigt sich, dass sich die Pkw mit konventionellem Antrieb im konservativen Szenario GreenLate mit Baujahr 2030 nur leicht gegenüber dem Baujahr 2020 verbessern. Dies ist vor allem auf Verbrauchsminderungen (unter anderem durch die unterstellte Hybridisierung) zurückzuführen, welche die Zusatzlasten in der Fahrzeugherstellung deutlich überkompensiert. Da im Szenario GreenLate davon ausgegangen wird, dass bis 2030 keine erneuerbar hergestellten Kraftstoffe für den Fahrzeugbetrieb bereitstehen, verändern sich die Nutzungsemissionen ansonsten kaum. Durch das Fortschreiten des Ausbaus der erneuerbaren Energien profitieren dagegen sowohl der Plug-In-Hybrid (für den elektrisch gefahrenen Fahranteil, der ebenfalls leicht steigt) als auch das batterieelektrische Fahrzeug vom geringeren Treibhauspotenzial aus der Stromerzeugung in Deutschland. Trotz größerer Traktionsbatterie steigt damit der Vorteil des BEV-Pkw mit Baujahr 2030 im Treibhauspotenzial je Kilometer auf 49 % gegenüber dem Benzin-Pkw mit demselben Baujahr.

Abbildung 20: Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020 und 2030, GreenLate)



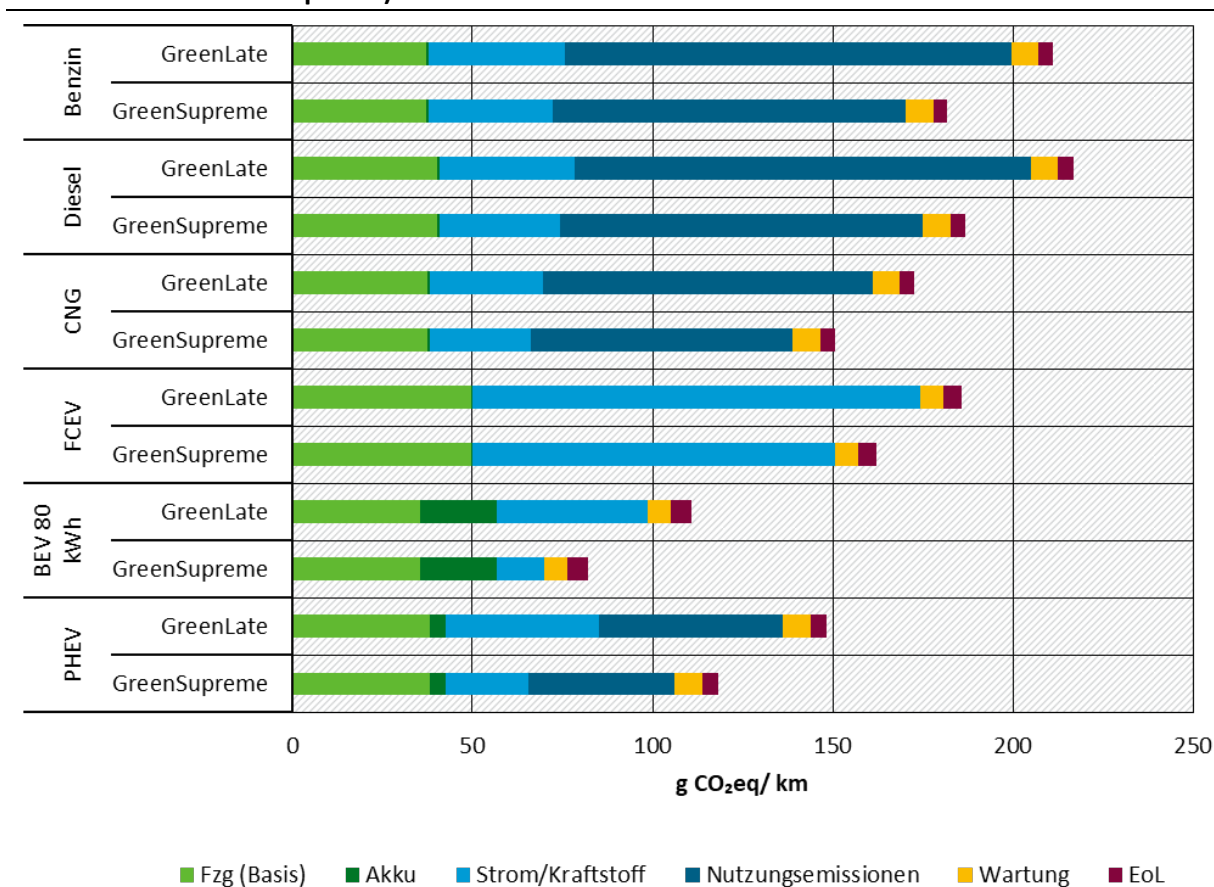
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei der Analyse der Beiträge zu den Lebenswegabschnitten zeigen sich auch für das Baujahr 2030 keine größeren Verschiebungen gegenüber dem Baujahr 2020. Einzige Ausnahme ist der BEV-Pkw, hier liegt der Beitrag der Fahrzeugherstellung und Traktionsbatterie im Baujahr 2030 höher als der Beitrag der Strombereitstellung. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei der Fahrzeug- und Traktionsbatterieherstellung das Hintergrundsystem noch auf dem heutigen Stand ist und lediglich technologische Verbesserungen unterstellt werden, während die Anteile erneuerbarer Energie im Strommix bereits relativ hoch sind. Beim BEV-Pkw unterscheiden sich die absoluten Beiträge der Traktionsbatterien zwischen den Baujahren kaum, da sich die Mehraufwendungen für die Herstellung des größeren Akkus sowie die Verbesserungen durch die veränderte Zellchemie und verbesserte Zellfertigung ausgleichen, obwohl die Fahrzeugreichweite deutlich zunimmt. Beim Brennstoffzellen-Pkw kommt es zu

einem Rückgang des Beitrages der Fahrzeugherstellung gegenüber dem Baujahr 2020 durch die Brennstoffzelle mit geringerer Platinbeladung.

In Abbildung 21 werden für Kompaktklasse-Pkw mit Baujahr 2030 die beiden Szenarien, GreenLate und GreenSupreme, gegenübergestellt. Unterschiede liegen daher nur in der Kraftstoff- und Strombereitstellung bzw. bei den direkten Nutzungsemissionen (durch den höheren PtX Anteil). Hier zeigen sich deutliche Unterschiede bei allen Antriebsvarianten zwischen den Szenarien GreenLate und GreenSupreme, da mit dem schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien und der verstärkten Beimischung von EE-basierten PtX Kraftstoffen die Treibhauspotenziale sinken. So sieht ein Benzin-Pkw mit Baujahr 2030 in GreenSupreme eine PtX Beimischung von im Mittel 22,6 % über seinen Lebensweg gegenüber nur 2,8% in GreenLate. Dennoch profitiert insbesondere der Elektro-Pkw überproportional vom höheren EE-Anteil im deutschen Strommix. Hat der BEV-Pkw mit Baujahr 2030 im Szenario GreenLate ein 45 % geringeres Treibhauspotenzial als der Benzin-Pkw, beträgt im Szenario GreenSupreme der Unterschied 52 %.

Abbildung 21: Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2030, GreenLate und GreenSupreme)



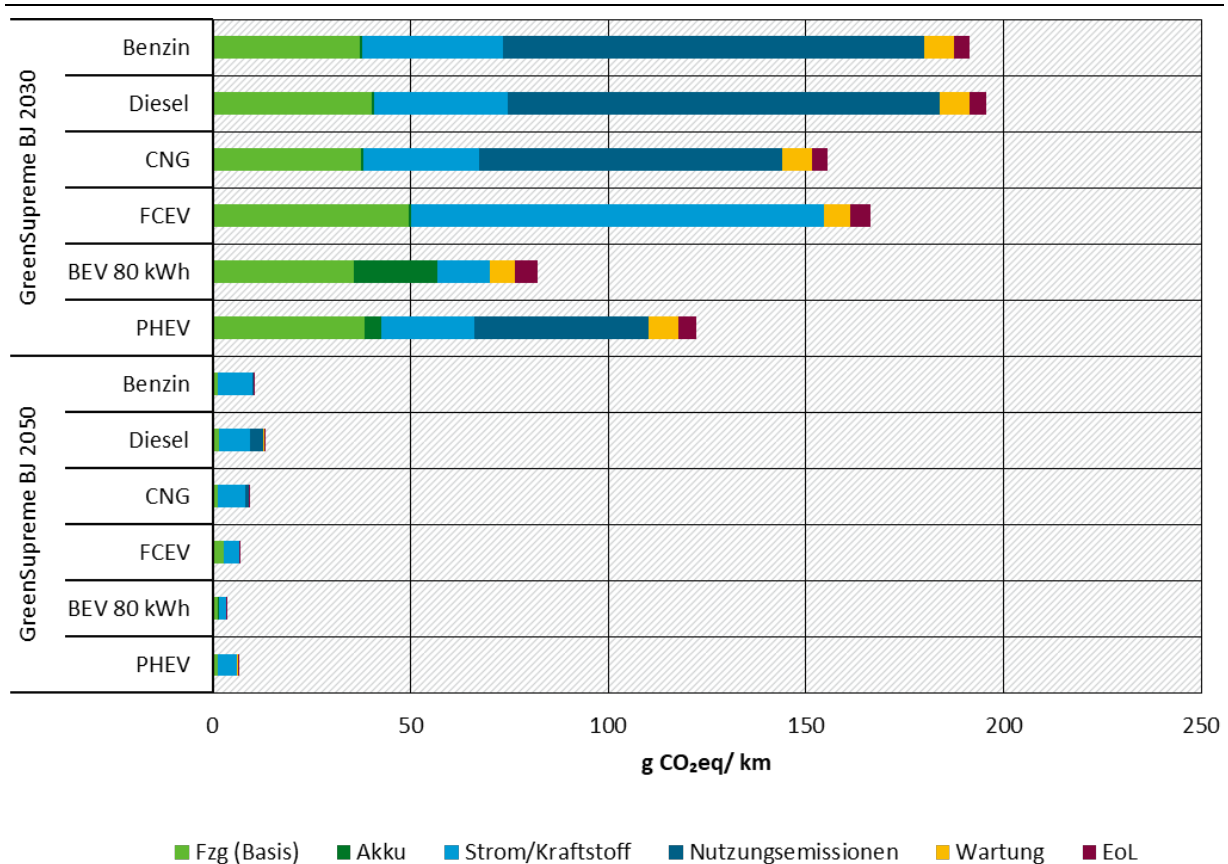
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Pkw Baujahr 2050 (THG-Neutralität)

Ein Blick auf die Treibhauspotenziale in Abbildung 22 in einer defossilisierten Welt nach dem GreenSupreme Szenario in 2050 zeigt einen Rückgang des Treibhauspotenzials je Fahrzeugkilometer bei allen Antrieben um mehr als 90 % gegenüber dem Baujahr 2030 (bzw. um mindestens 95% gegenüber dem Baujahr 2020 GreenLate), wobei auch hier der reine

Elektro-Pkw aufgrund der höheren Gesamtenergieeffizienz die günstigste Bilanz hat. Die Nutzungsemissionen weisen den stärksten Rückgang auf, lediglich beim Diesel-Pkw sind die durch die Entstickung auftretenden Lachgasemissionen noch deutlicher zu erkennen. Alle sonstigen verbleibenden Rest-Treibhauspotenziale werden von der Bereitstellung der weitestmöglich defossiliert hergestellten Kraftstoffe sowie in geringem Maße von der Herstellung der Fahrzeuge bestimmt. Detailergebnisse zu Strom und Kraftstoffen finden sich in Kapitel 4.1.

Abbildung 22: Treibhauspotenzial der Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2030 und 2050, GreenSupreme)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

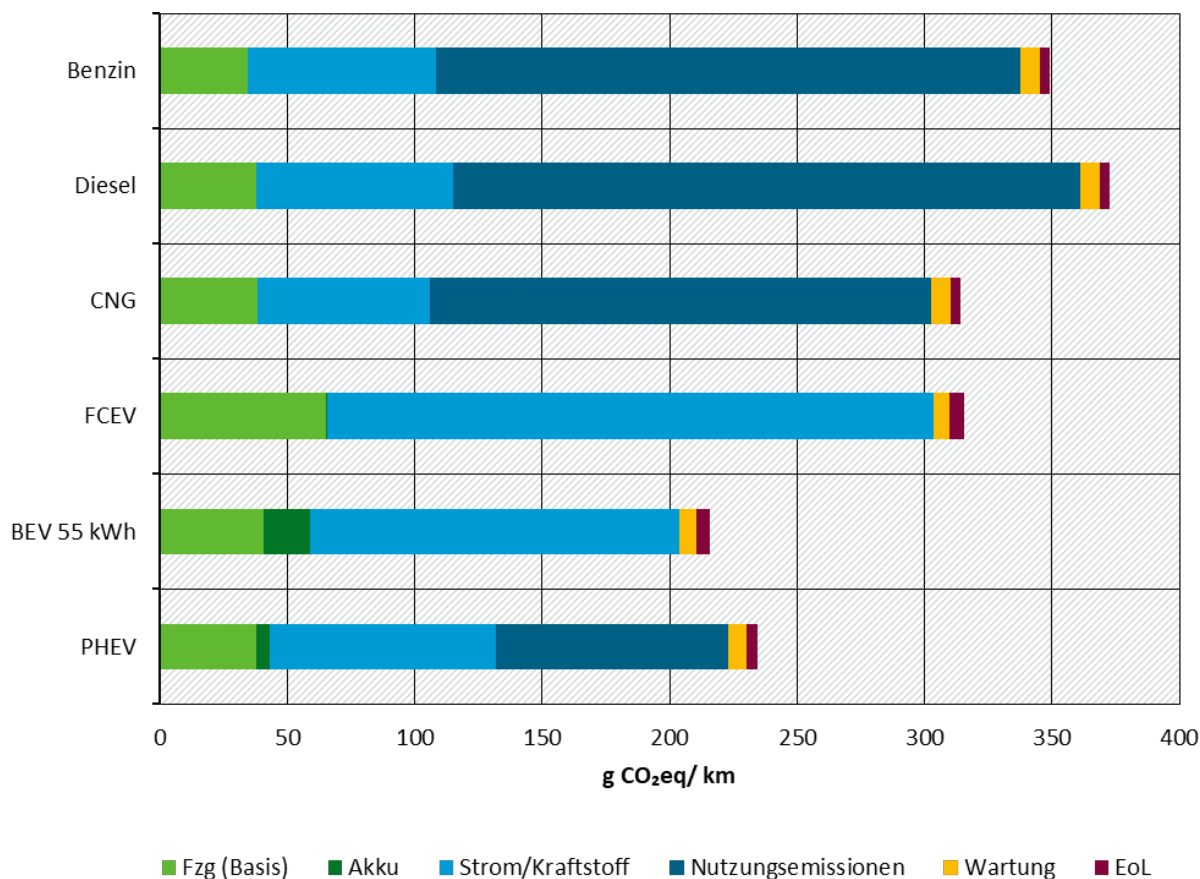
Leichte Nutzfahrzeuge

Bei den leichten Nutzfahrzeugen zeigen sich ähnliche Trends wie bei den Personenkraftwagen, daher werden diese weniger ausführlich dargestellt.

Auch bei den leichten Nutzfahrzeugen mit Baujahr 2020 (Abbildung 23) weist das batterieelektrische Fahrzeug das geringste Treibhauspotenzial auf mit aktuell 216 g CO₂eq pro km und liegt damit um 42 % niedriger als das Diesel-LNF mit dem höchsten Treibhauspotenzial von 373 g CO₂eq pro km. Das Benzin-LNF liegt mit 349 g CO₂eq pro km etwas unter dem Diesel, noch etwas günstiger schneiden das CNG- und FCEV-LNF mit 315 g CO₂eq pro km ab. Der Plug-In Hybrid liegt mit 235 g CO₂eq pro km nur wenig über dem batterieelektrischen Fahrzeug und hat damit einen geringeren Abstand zum BEV-Fahrzeug als bei den Pkw. Dies liegt vor allem daran, dass der Anteil an Innerortsfahrten bei den leichten Nutzfahrzeugen höher ist als bei den Pkw.

Damit hat der Plug-In-Hybrid ein günstigeres Einsatzprofil – er kann höhere elektrische Fahranteile erreichen und von der Rekuperation im Innerortsverkehr profitieren.

Abbildung 23: Treibhauspotenzial der LNF N1-III (Baujahr 2020, Szenario GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die weiteren Trends bei den leichten Nutzfahrzeugen folgen stark denjenigen beim Pkw. Auch hier kommt es in den späteren Baujahren insbesondere in Verbindung mit einem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien zu sinkenden Treibhauspotenzialen, wobei wiederum das batterieelektrische Fahrzeug am meisten profitiert.

3.2.2 Sattelzüge

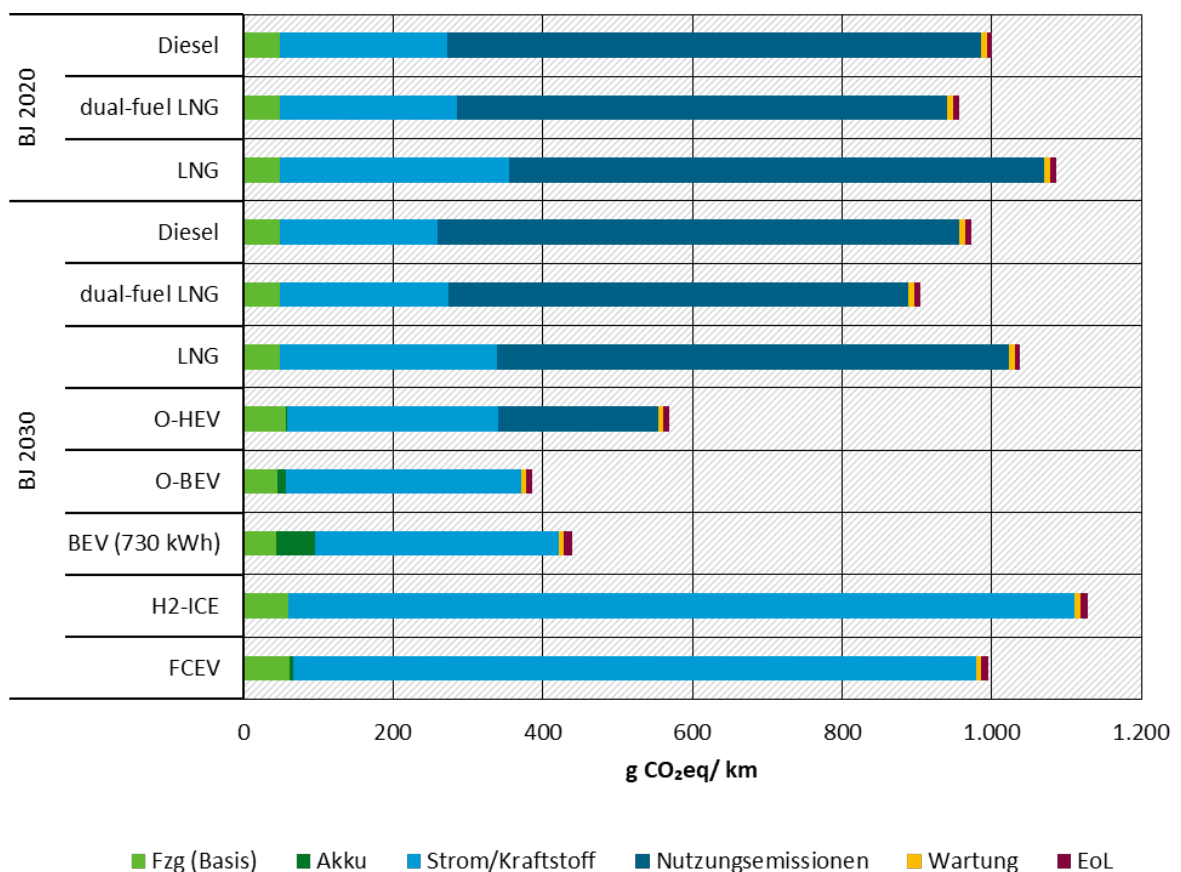
Sattelzüge Baujahr 2020 („Startpunkt“) sowie 2030 („Übergangsphase“)

Wie in Abbildung 24 gezeigt hat ein heutiger Diesel-Sattelzug mit 40t zulässigem Gesamtgewicht bei einer mittleren Beladung ein Treibhauspotenzial von etwa 1000 g CO₂eq/km (davon entfallen 937 g CO₂eq/ km auf die Dieselverbrennung und -bereitstellung). Dies entspricht einem Treibhauspotenzial von 83 g CO₂eq pro Tonnenkilometer beim Diesel-Sattelzug mit Baujahr 2020. Während der dual-fuel-LNG-Sattelzug um 5 % besser abschneidet als der Diesel-Sattelzug, liegt der reine LNG-Lkw aufgrund seiner geringeren Motoreffizienz sogar um 8 % höher beim Treibhauspotenzial. Bis zum Baujahr 2030 kommt es durch die Effizienzverbesserungen bei den Sattelzügen mit konventionellen Antrieben zu leichten Verbesserungen, an der Reihenfolge der Antriebskonzepte ändert sich dadurch jedoch nichts. So hat ein Diesel-Sattelzug mit Baujahr 2030 im Szenario GreenLate immer noch ein Treibhauspotenzial von 973 g CO₂eq/ km. Alle Sattelzüge mit alternativen Antrieben außer dem

Brennstoffzellen- sowie dem H2-ICE-Sattelzug haben ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial gegenüber den konventionellen Fahrzeugen. Das geringste Treibhauspotenzial weist mit 386 g CO₂eq / km dabei der O-BEV auf, da er ausschließlich elektrisch betrieben wird, aber aufgrund des vorhandenen Oberleitungsnetzes eine kleinere Traktionsbatterie benötigt als der BEV-Sattelzug, welcher mit 440 bei g CO₂eq/km etwas höher liegt. Auch der O-HEV ist als Brückentechnologie im Baujahr 2030 noch attraktiv und liegt bei 569 g CO₂eq/ km, dabei wird davon ausgegangen, dass das Oberleitungsnetz an den deutschen Autobahnen soweit ausgebaut worden ist, dass auf diesen ausschließlich elektrisch gefahren werden kann.

Der Brennstoffzellen-Sattelzug sowie der Wasserstoffverbrenner-Sattelzug mit Baujahr 2030 haben keine Vorteile gegenüber dem Diesel-Sattelzug, da sie (fast) vollständig mit Wasserstoff aus der Dampfreformierung von fossilem Erdgas betankt werden.

Abbildung 24: Treibhauspotenzial der Sattelzüge (Baujahr 2020 und 2030, GreenLate) bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)

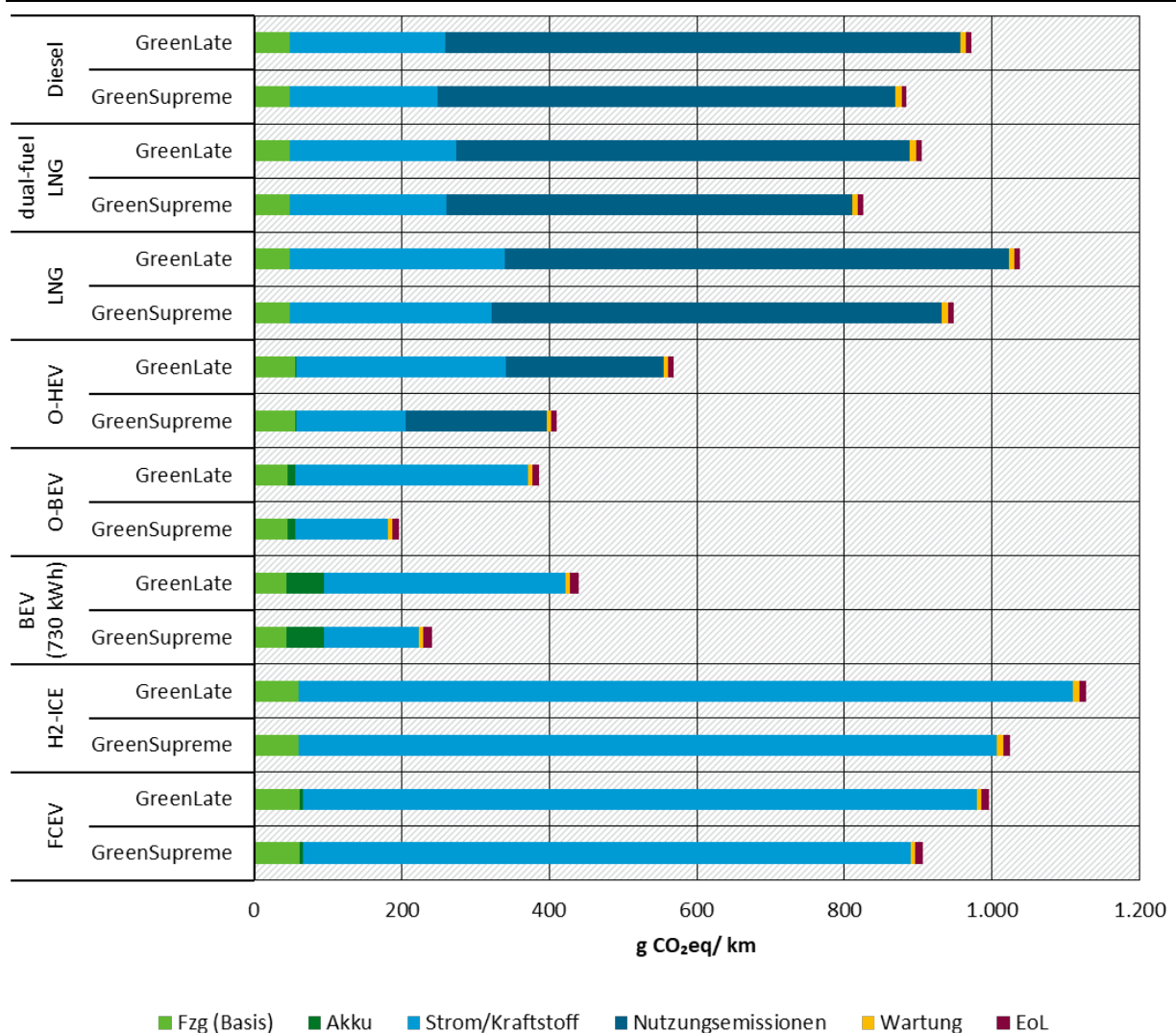


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Werden die einzelnen Beiträge der Lebenswegabschnitte untersucht zeigt sich, dass die Kraftstoffverbrennung sowie die Kraftstoff- und Strombereitstellung das Treibhauspotenzial noch deutlich stärker als beim Pkw dominieren. Über 90 % des Treibhauspotenzials bei den Lkw mit fossilen Kraftstoffen entfallen auf diese Lebenswegabschnitte und selbst beim BEV-Sattelzug macht die Strombereitstellung noch 75 % aus. Dies liegt unter anderem daran, dass die Herstellungsaufwendungen durch die hohen Fahrleistungen der Sattelzüge auf viele Kilometer abgeschrieben werden.

Werden in Abbildung 25 die Treibhauspotenziale der Sattelzüge mit Baujahr 2030 in den beiden Szenarien GreenLate und GreenSupreme gegenübergestellt, zeigt sich, dass alle Fahrzeuge von einem schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien in GreenSupreme profitieren. Dabei profitieren die Elektro-Sattelzüge (BEV sowie O-BEV) stärker von der Gesamtentwicklung, da der Strom bereits zu großen Teilen erneuerbar ist, während gleichzeitig die Mengen an erneuerbar hergestellten strombasierten Kraftstoffen begrenzt sind und somit weiterhin größtenteils fossile Kraftstoffe eingesetzt werden. Damit können BEV sowie O-BEV ihren Vorteil beim Treibhauspotenzial im Szenario GreenSupreme gegenüber dem Diesel-Sattelzug auf -73 % bzw. -78 % ausbauen. Die FCEV- und H2-ICE Sattelzüge sowie der LNG-Sattelzug haben weiterhin Nachteile gegenüber dem Diesel-Sattelzug, da von einer kraftstoffunabhängigen PtG/PtL -Beimischung ausgegangen wird. Lediglich falls erneuerbar hergestellter Wasserstoff früher in größeren Mengen bereitgestellt werden kann als PtL-Diesel könnte sich dieses Bild noch ändern. Höhere Anteile erneuerbar hergestelltem Kraftstoff werden in den Sensitivitätsanalysen in Kapitel 3.4 untersucht.

Abbildung 25: Treibhauspotenzial der Sattelzüge (Baujahr 2030, GreenLate und GreenSupreme) bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)

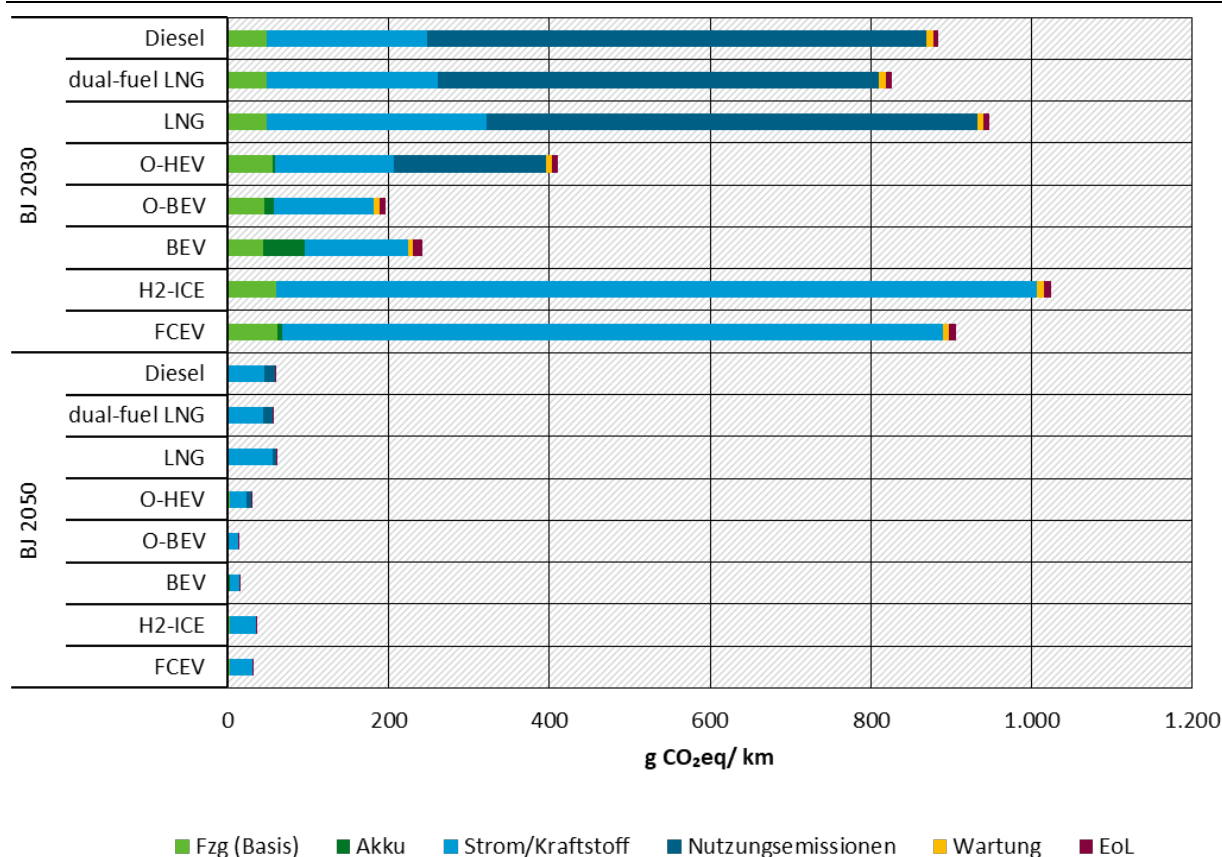


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Sattelzüge Baujahr 2050 („THG-Neutralität“)

Auch bei den Sattelzügen verringern sich die Treibhauspotenziale bei einer vollständigen Defossilisierung bis 2050 im Szenario GreenSupreme um über 90 % gegenüber dem Baujahr 2030 GreenSupreme. Dabei bleibt, wie in Abbildung 26 zu sehen ist, der O-BEV weiterhin das Konzept mit dem geringsten Treibhauspotenzial. Die verbleibenden Rest-Treibhausgasemissionen stammen vor allem aus der Kraftstoff- bzw. Strombereitstellung, auf diese wird in Kapitel 4.1 näher eingegangen.

Abbildung 26: Treibhauspotenzial der Sattelzüge (Baujahr 2030 und 2050, GreenSupreme) bei mittlerer Beladung (11 t Nutzlast)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

3.3 Normierte Umweltwirkungen

Die Diskussion um die mittel- und langfristigen Klimaschutzziele Deutschlands fokussiert sich im Verkehrssektor naturgemäß auf den Vergleich der Treibhauspotenziale der unterschiedlichen Antriebsoptionen. Neben dieser Wirkungskategorie spielen aber auch andere Umweltlasten eine signifikante Rolle bei der Bewertung der Auswirkungen des Straßenverkehrs auf Natur und Mensch. In diesem Abschnitt werden die Umweltwirkungen von Pkw, leichten Nutzfahrzeugen und Sattelzügen in insgesamt acht Umweltkategorien und drei Ressourcenkategorien je Fahrzeugkilometer bewertet. Die einzelnen Indikatoren sind in Kapitel 1.2.1 beschrieben.

Um abzuschätzen, wie relevant die zusätzlichen Be- und Entlastungen in diesen Kategorien sind, wird ihre Größe mit der heutigen Umweltbelastung in Bezug gesetzt. Ausgangspunkt für diese Normierung ist in dieser Studie die aktuelle Umweltbelastung je Einwohner in Deutschland. Sie

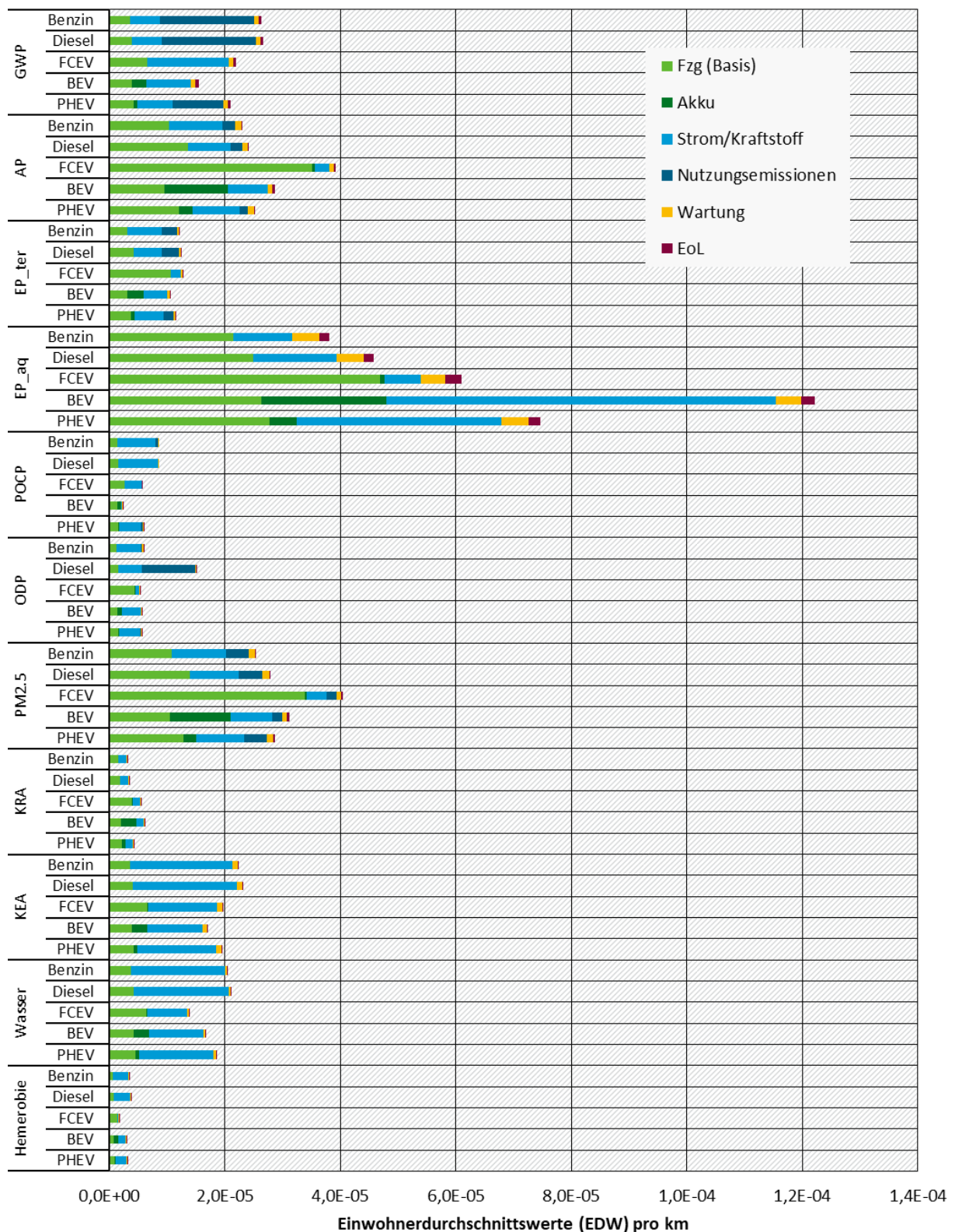
ist in Kapitel 1.2.2 beschrieben. Um die Lesbarkeit der Grafiken zu erhöhen und weil teilweise sehr ähnliche Trends zu beobachten sind, werden nicht immer alle Antriebskonzepte ausgewiesen. Grundsätzlich liegt der Fokus bei den Pkw auf den Benzin-/Diesel-Pkw sowie den Pkw mit alternativen Antrieben und bei den Sattelzügen auf den Diesel-/dual-fuel-Sattelzügen sowie den Sattelzügen mit alternativen Antrieben. Auf Plug-In-Hybride und CNG-Pkw wird nur in Einzelfällen explizit eingegangen. Gleiches gilt für reine LNG-Fahrzeuge und Oberleitungs-Hybrid-Lkw.

3.3.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Abbildung 27 zeigt die normierten Ergebnisse pro Fahrzeugkilometer in allen untersuchten Umweltwirkungskategorien und Inventargrößen für Kompaktklasse-Pkw mit Baujahr 2020 und den durchschnittlichen Strom- bzw. Kraftstoffmischen nach Szenario GreenLate. Alle Ergebnisse finden sich im Datenanhang.

In der Gesamtschau treten in Bezug auf die Gesamtbelastung pro Einwohner in Deutschland besonders folgende Wirkungskategorien in den Vordergrund: aquatische Eutrophierung (EP_aq), Feinstaubbelastung (PM2.5), Versauerung (AP) und das Treibhauspotenzial (GWP). Auch die Ressourcenkategorien kumulierter Energieaufwand (KEA) und Frischwasserbedarf sind von höherer Signifikanz. Die Umweltkategorien, in denen Kompaktklasse-Pkw mit Baujahr 2020 in Deutschland weniger zur Gesamtbelastung beitragen sind terrestrische Eutrophierung (EP_ter), photochemische Ozonbildung (POCP), Ozonabbau (ODP) und die Ressourcenkategorien kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) und Naturraumbeanspruchung (Hemerobie).

Abbildung 27: Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umweltwirkungskategorien und Inventargrößen für Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020, Szenario GreenLate)



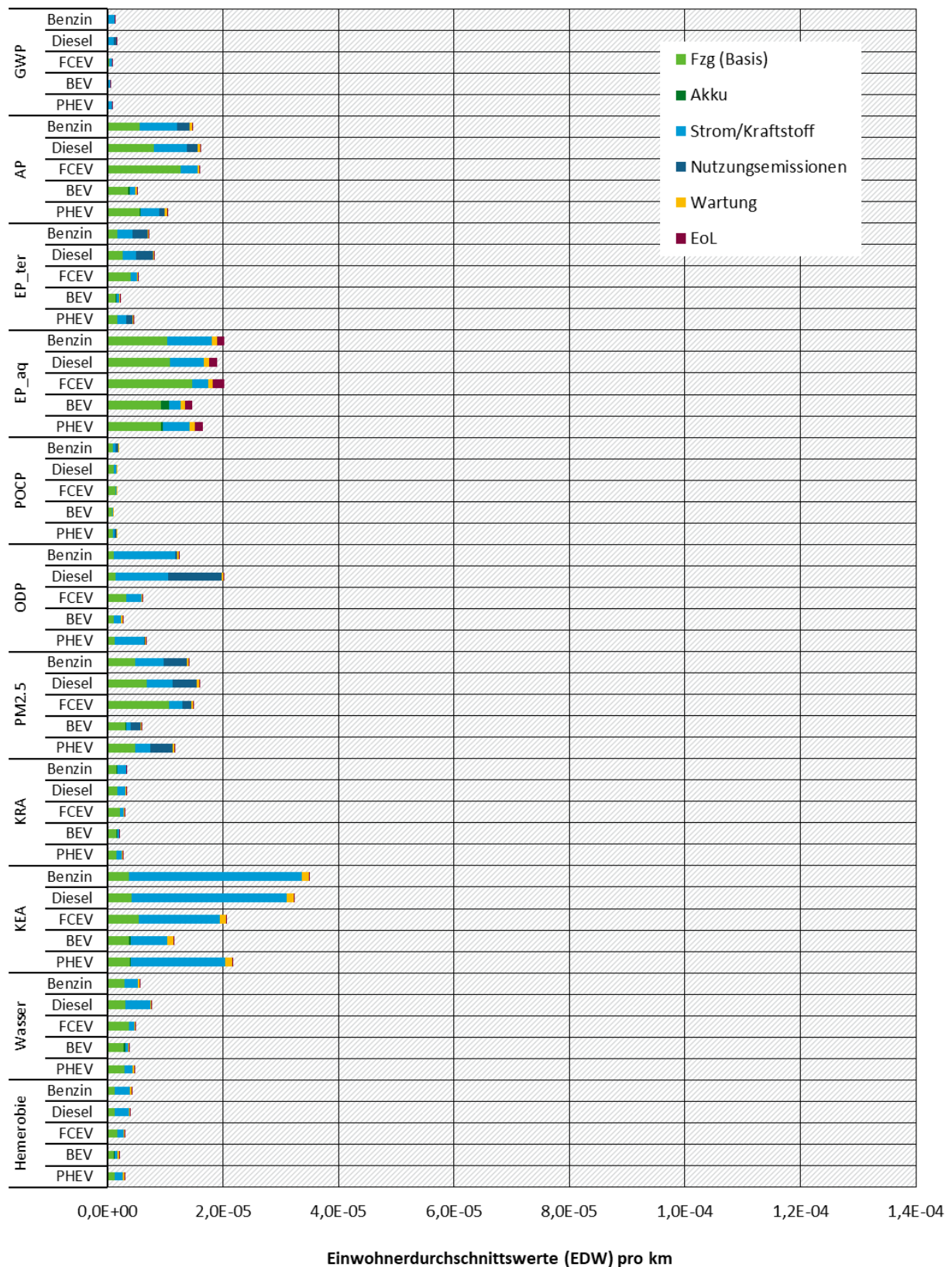
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Direkte Nutzungsemissionen liefern nur in zwei Wirkungskategorien die größten Beiträge: im Treibhauspotenzial der fossilen Verbrenner und im Ozonabbaupotenzial von Diesel-Pkw.

Letzteres ist eine Folge der Entstickung der Abgase, bei der ozonschädliches Lachgas (N_2O) entsteht. In geringerem Maße tragen die direkten Emissionen noch zur Versauerung (Ammoniak und Stickoxide), terrestrischen Eutrophierung (Stickoxide) und zur Feinstaubbelastung (Reifenabrieb) bei.

In fast allen anderen Wirkungskategorien sind die Fahrzeugherstellung inklusive Traktionsbatterie und die Bereitstellung der Kraftstoffe für die größten Umweltlasten verantwortlich. Zwischen den Antriebsvarianten gibt es im Detail Unterschiede, die aber nicht einheitlich und nur in wenigen Kategorien größer ausfallen. So trägt die Herstellung der Traktionsbatterie von BEV und PHEV-Fahrzeugen besonders stark zur Versauerung, aquatischen Eutrophierung und zur Feinstaubbelastung bei. Ursachen sind hauptsächlich Emissionen aus der Kupfer- und Nickelbereitstellung (Kapitel 4.2.2.2 und 4.3.2). Für das FCEV liefert die Fahrzeugherstellung in den wichtigen Kategorien Versauerung, aquatische Eutrophierung und Feinstaubbelastung einen größeren Anteil als die Fahrzeugherstellung der anderen Antriebe. Ursachen sind hauptsächlich Emissionen aus der Platinbereitstellung (Kapitel 4.3.2).

Abbildung 28: Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2050, Szenario GreenSupreme)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

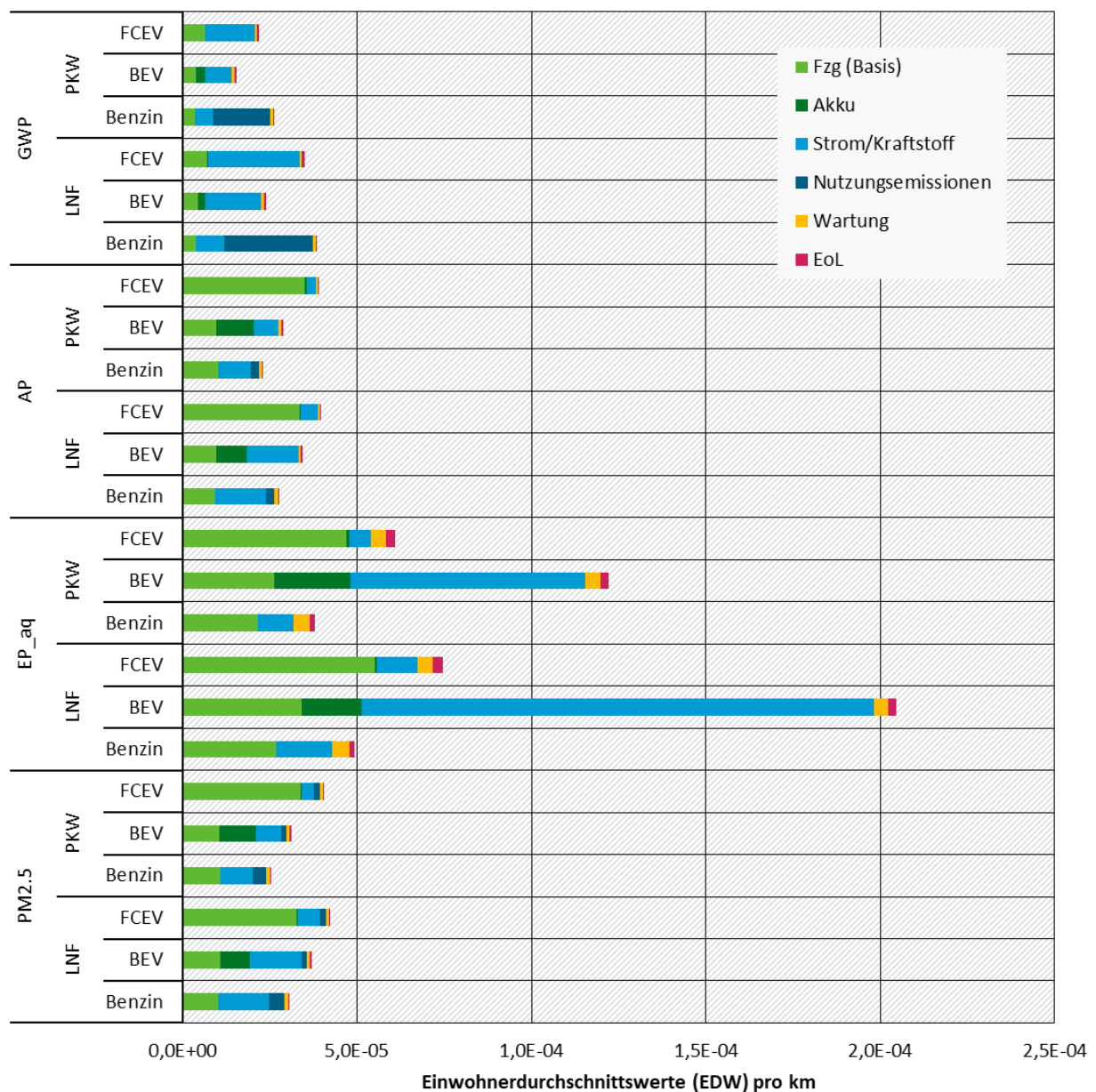
Abbildung 28 zeigt die normierten Ergebnisse aller untersuchten Umweltwirkungskategorien und Inventargrößen für Kompaktklasse-Pkw in der vollständig defossilisierten Zukunft, also mit Baujahr 2050 und durchschnittlichen Strom- bzw. Kraftstoffmischen nach Szenario GreenSupreme.

Die Gesamtbelastung nimmt gegenüber dem Jahr 2020 in fast allen Wirkungskategorien ab – gerade auch in den wichtigen Umweltwirkungen Versauerung, aquatischen Eutrophierung und Feinstaubbelastung, die aber die wirkungsstärksten Kategorien bleiben. Das Treibhauspotenzial (GWP) ist nicht mehr Leitkategorie. Die Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung dominieren jetzt alle Wirkungskategorien. Das Ozonabbaupotenzial steigt leicht für alle Antriebe außer für das BEV an. Hauptbeitrag beim Ozonabbaupotenzial ist die Herstellung strombasierter Kraftstoffe, nur für den Dieselantrieb sind in dieser Kategorie weiterhin die höheren Emissionen aus der Abgasentstickung zu erkennen. Der kumulierte Energieaufwand nimmt ebenfalls für alle Antriebe außer für BEV zu. Die größten Beiträge leisten hier ebenfalls die strombasierten Kraftstoffe.

Das Zwischenjahr 2030 und die alternative Entwicklung nach dem Szenario GreenSupreme werden hier nicht ausführlich dargestellt. Für Benzin- und Diesel verschieben sich Werte zwischen 2020 und 2030 nur geringfügig. Die Belastung durch die Fahrzeugherstellung nimmt bei ihnen aufgrund der Hybridisierung etwas zu. Der Beitrag der Kraftstoffe sinkt durch Verbrauchsverbesserungen, sinkenden Bioanteil und – im Szenario GreenSupreme – die beginnende Beimischung strombasierter Kraftstoffe in ähnlicher Größenordnung. Für das batterieelektrische Fahrzeug ändert sich zwischen 2020 und 2030 und den Szenarien nur der Beitrag des Stroms für den Antrieb. Vor allem die Belastung in der Kategorie aquatische Eutrophierung sinkt deutlich, da mit der Defossilisierung des Netzstroms auch die Auswaschungen aus dem Kohlebergbau zurückgehen. Die Wirkungen der Fahrzeugherstellung bleiben trotz größerem Akku durch Verbesserungen in der Akkuherstellung annähernd gleich.

Die vollständigen Daten für alle Wirkungskategorien, Inventargrößen, Jahre und Szenarien finden sich im Anhang.

Abbildung 29: Normierte Ergebnisse ausgewählter Umweltwirkungskategorien für leichte Nutzfahrzeuge und Kompaktklasse-Pkw (Baujahr 2020, Szenario GreenLate)



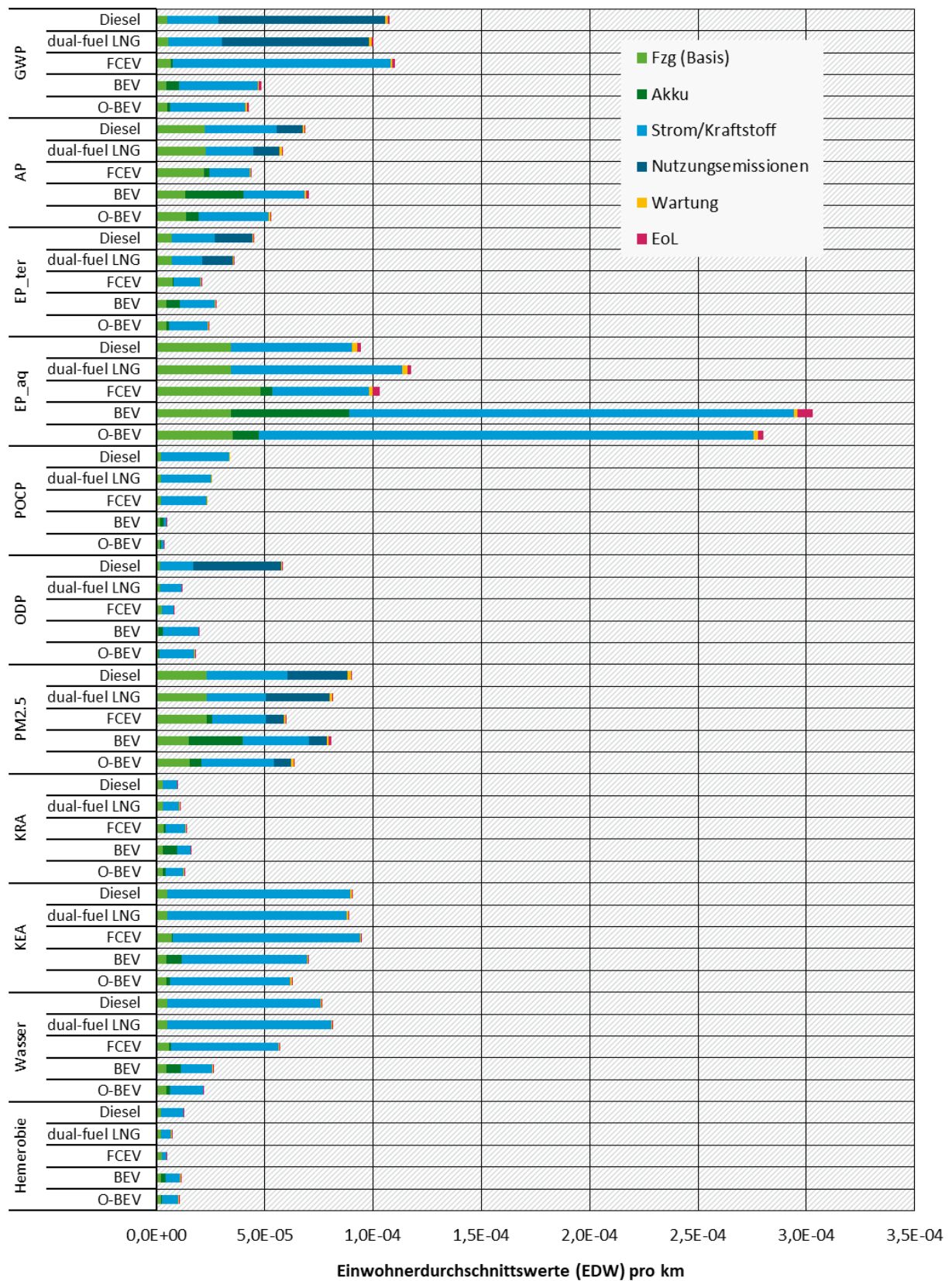
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 29 zeigt die normierten Ergebnisse der wichtigsten Umweltwirkungskategorien für leichte Nutzfahrzeuge mit Baujahr 2020 im Vergleich zu Kompaktklasse-Pkw desselben Baujahrs. Es zeigt sich ein ähnliches Muster in den Beiträgen der jeweiligen Umweltwirkungskategorien – mit durchgehend etwas höheren Emissionen pro Fahrzeugkilometer bei den leichten Nutzfahrzeugen. Die vollständigen Ergebnisse finden sich im Datenanhang.

3.3.2 Sattelzüge

Abbildung 30 zeigt die normierten Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorie für Sattelzüge bei mittlerer Beladung mit Baujahr 2030 und durchschnittlichen Strom- bzw. Kraftstoffmischen nach Szenario GreenLate. Die vollständigen Ergebnisse finden sich im Datenanhang. Wie schon bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen treten in der Gesamtschau in Bezug auf die Gesamtbelastung pro Einwohner in Deutschland besonders folgende Umweltkategorien in den Vordergrund: aquatische Eutrophierung (EP_aq), Feinstaubbelastung (PM2.5), Versauerung (AP) und das Treibhauspotenzial (GWP). Auch die Ressourcenkategorien kumulierter Energieaufwand (KEA) und Frischwasserbedarf sind von höherer Signifikanz. Die Wirkungskategorien, in denen Sattelzüge mit Baujahr 2030 in Deutschland weniger zur Gesamtbelastung beitragen sind terrestrische Eutrophierung (EP_ter), photochemische Ozonbildung (POCP), Ozonabbau (ODP) und die Ressourcenkategorien kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) und Hemerobie. Die Werte liegen aber drei bis vier Mal so hoch wie bei Pkw.

Abbildung 30: Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Sattelzüge mit 11 t Nutzlast (Baujahr 2030, Szenario GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die direkten Nutzungsemissionen tragen stärker als beim Pkw zu den Wirkungskategorien Versauerung (Ammoniak und Stickoxide), terrestrischen Eutrophierung (Stickoxide) und zur Feinstaubbelastung (Reifenabrieb) bei und dominieren auch das Treibhauspotenzial. In der Kategorie Ozonabbau sind auch bei den Sattelzügen die N₂O-Emissionen aus der Abgasentstickung der Dieselmotoren die größten Verursacher.

Wie auch bei den Pkw sind Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung die anderen beiden großen Quellen für Umweltbelastungen. Wartung und End-of-Life spielen eine noch geringere Rolle als bei den leichten Fahrzeugen. Während bei den Pkw die Fahrzeugherstellung mehr ins Gewicht fällt, steht wegen der viel höheren Lebensfahrleistung bei den Sattelzügen die Bereitstellung der Kraftstoffe stärker im Fokus.

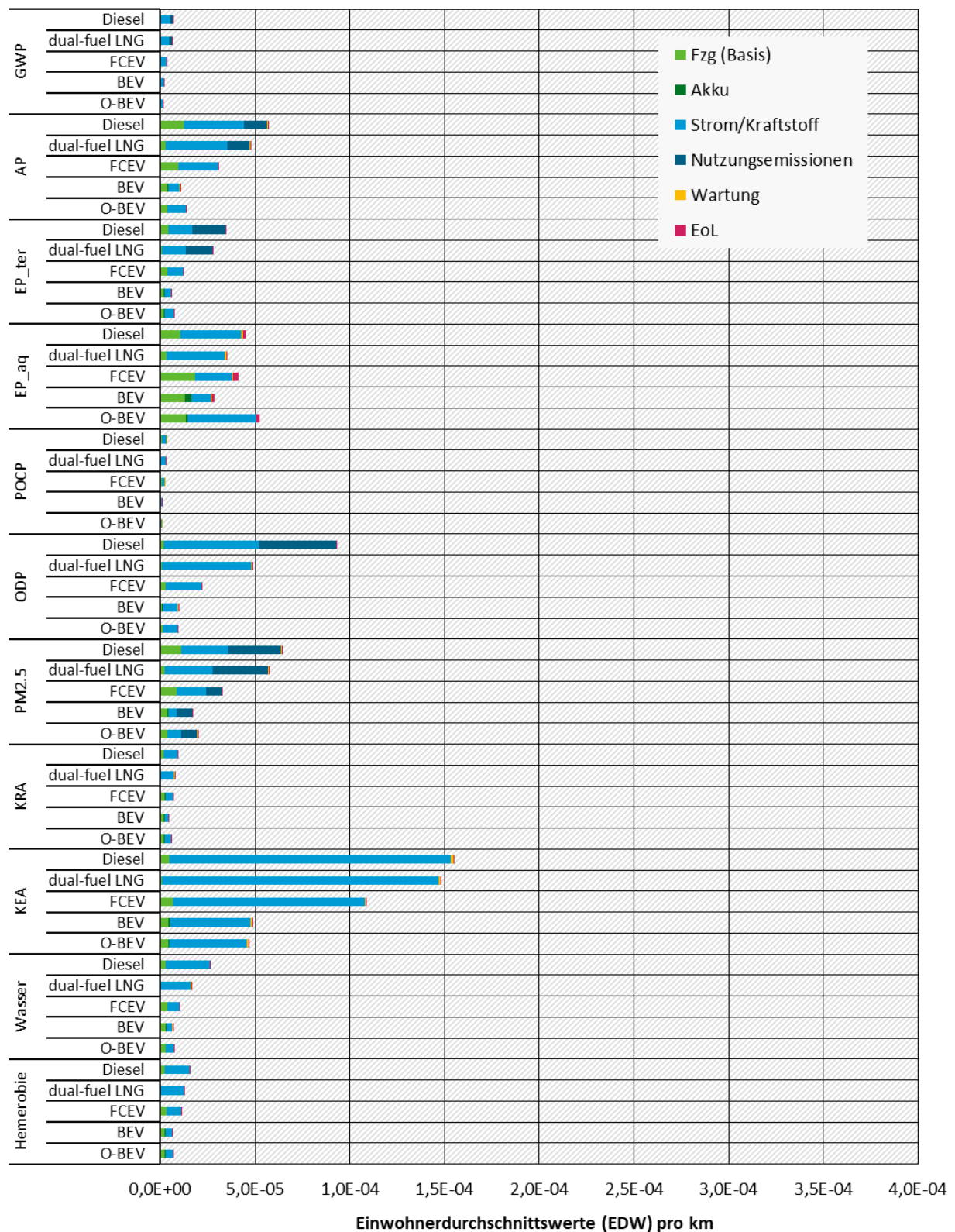
Das Jahr 2030 wird hier für die Auswertung gewählt, da zu diesem Zeitpunkt alle alternativen Antriebskonzepte zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse für 2020 sind hier nicht aufgeführt. Die Ergebnisse für die verfügbaren Antriebe unterscheiden sich auch nur geringfügig durch die etwas schlechtere Effizienz in 2020.

Generell liegen Dieselfahrzeuge und solche mit dual-fuel-LNG-Antrieb in den meisten Kategorien nah beieinander – mit leichten Nachteilen für den Diesel in den Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, Versauerung, terrestrischer Eutrophierung, photochemische Ozonbildung und Feinstaubbelastung. Gleiches gilt für die Ressourcenkategorien kumulierter Energieaufwand und Hemerobie. In der Kategorie Ozonabbau liegen Dieselfahrzeuge durch ihre N₂O-Emissionen mehr als sechsmal höher als solche mit dual-fuel-LNG-Antrieb.

Die Ergebnisse für BEV und O-BEV-Lkw liegen in den Kategorien Treibhauspotenzial, terrestrische Eutrophierung, photochemische Ozonbildung, kumulierter Energieaufwand und Frischwasserbedarf deutlich unter denen von Diesel- und dual-fuel-LNG-Fahrzeugen. In den Kategorien Versauerung, Feinstaubbelastung, kumulierter Rohstoffaufwand und Hemerobie liegen diese beiden Fahrzeuggruppen etwa gleich auf. Das Ozonabbaupotenzial der elektrischen Sattelzüge ist höher als das der dual-fuel-LNG-Fahrzeuge aber niedriger als das von Diesel Lkw. In der Umweltkategorie aquatische Eutrophierung zeigen BEV und O-BEV rund dreimal so hohe Werte wie alle anderen Antriebsarten. Dies ist auf den fossilen Anteil im genutzten Netzstrom zurückzuführen, bei dem Auswaschungen aus dem Kohlebergbau diese Kategorie dominieren.

Sattelzüge mit Brennstoffzellenantrieb liegen in vielen Kategorien zwischen Verbrennern und elektrischen Fahrzeugen. Bei Versauerung, terrestrischer Eutrophierung, Ozonabbaupotenzial, Feinstaubbelastung und Hemerobie sind FCEV-Sattelzüge sogar die beste Variante.

Abbildung 31: Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Sattelzüge mit 11t Nutzlast (Baujahr 2050, Szenario GreenSupreme)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 31 zeigt die normierten Ergebnisse aller untersuchten Umwelt- und Ressourcenkategorien für Sattelzüge in der weitestmöglich defossilisierten Zukunft, also mit

Baujahr 2050 und durchschnittlichen Strom- bzw. Kraftstoffmischen nach Szenario GreenSupreme.

Die Gesamtbelastung nimmt gegenüber dem Jahr 2020 in fast allen Wirkungskategorien ab, gerade auch in den wichtigen Umweltwirkungen Versauerung, aquatische Eutrophierung und Feinstaubbelastung, die aber die wirkungsstärksten Kategorien bleiben. Die Treibhauswirkung (GWP) ist auch bei den Sattelzügen nicht mehr Leitkategorie. Eine Zunahme der Belastung ist für Diesel und dual-fuel-LNG-Fahrzeuge in der Kategorie Ozonabbau zu beobachten. Grund sind die N₂O-Emissionen aus der Abgasentstickung sowie die Bereitstellung strombasierter Kraftstoffe. Im Gegensatz zum Pkw spielen die direkten Nutzungsemissionen für die Antriebsarten Diesel und dual-fuel-LNG bei Versauerung und terrestrischer Eutrophierung eine größere Rolle. Für alle Antriebe ist der Beitrag des Reifenabriebs zur Feinstaubbelastung auch im Jahr 2050 noch signifikant. Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung dominieren alle anderen Wirkungskategorien. Ausnahme ist die aquatische Eutrophierung, bei der für den Oberleitungs-Lkw die Abnutzung und Erneuerung des Fahrdrabtes durch die Kupferproduktion für erhebliche Belastungen sorgt.

Zwischen den Antriebskonzepten gibt es bei den Sattelzügen mit Baujahr 2050 deutlich größere Unterschiede als bei den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen. Kraftstoffbereitstellung und direkte Emissionen sorgen bei Diesel und dual-fuel-LNG in den Kategorien Versauerung und terrestrische Eutrophierung für eine vier- bis fünffache Belastungen gegenüber (O-)BEV-Fahrzeugen. Die Feinstaubbelastung ist im direkten Vergleich dreimal so hoch. Auch in der Kategorie Ozonabbau weisen die Verbrenner ein Vielfaches an Lasten auf. FCEV-Fahrzeuge nehmen in diesem Vergleich jeweils eine Mittelstellung ein. Nur in der aquatischen Eutrophierung ergibt sich ein ausgewogeneres Bild. Hier weisen sogar O-BEV-Fahrzeuge das schlechteste Ergebnis auf.

In den Ressourcenkategorien Rohstoffaufwand, Energieaufwand, Wasserverbrauch und Hemerobie schlägt sich der Strombedarf für die Erzeugung der Kraftstoffe nieder. Kohlenwasserstoffe sind dort deshalb mit höheren Lasten verbunden als Wasserstoff oder die direkte Nutzung von Strom.

Detailergebnisse zu den Ursachen in den einzelnen Wirkungskategorien finden sich in den Kapiteln 4.2.1 (Fahrzeuge), 4.2.2 (Akkus), 4.1 (Kraftstoffe und Strom) und 4.3 (Basisprozesse).

3.4 Sensitivitätsanalysen zu ausgewählten Aspekten

Während in den Kapiteln 3.2 und 3.3 die Ergebnisse nur für den sogenannten Standardfall durchschnittlicher Fahrzeugeigenschaften, Verbrauchswerte und Nutzungsprofile der betrachteten Fahrzeuge dargestellt wird, werden nun ausgewählte Aspekte im Rahmen von Sensitivitätsanalysen variiert um den Einfluss der jeweiligen Parameter auf das Gesamtergebnis aufzuzeigen. So wird einerseits die Vielfalt individueller Fahrzeugausprägungen und Nutzungsmuster abgebildet und andererseits werden auch Verbesserungspotenziale für die Umweltbilanz aufgezeigt bzw. es können bevorzugte Anwendungsgebiete für verschiedene Technologien identifiziert werden.

Zentrale Kategorien der Sensitivitätsanalysen in diesem Abschnitt sind

- ▶ die Fahrzeug- und Akkueigenschaften und
- ▶ die Nutzungsmuster und Energiemixe.

Die Detailparameter der Kraftstoff- und Strombereitstellung werden dagegen in Kapitel 4.1 ausführlich analysiert, so dass hier nur der anteilige Einsatz erneuerbarer Energien in den verschiedenen Technologien diskutiert wird. Auch die Auswirkungen verschiedener End-of-Life

Optionen waren ein besonderer Schwerpunkt des Projektes, der separat in Kapitel 3.5 dargestellt wird.

Der Fokus liegt beim Pkw und leichten Nutzfahrzeug für die Fahrzeugeigenschaften und dem Nutzungsmuster auf dem aktuellen Baujahr 2020, da es hier vor allem darum geht bereits existierende Unterschiede zwischen Fahrzeugen und Nutzern darzustellen. Die relevanten Antriebskonzepte sind auch bereits am Markt verfügbar. Bezüglich der genutzten Energiemixe wird dagegen das Baujahr 2030 betrachtet, da die heutige Situation bereits systemisch festgelegt ist, jedoch bis 2030 sehr verschiedene Entwicklungen im Energiesystem möglich sind. Beim Sattelzug waren dagegen im Baujahr 2020 nur sehr wenige Antriebskonzepte bereits serienmäßig verfügbar, ein breiter Vergleich von Fahrzeugeigenschaften und Nutzungsmustern über alle Antriebstechnologien hinweg ist daher nur für das Baujahr 2030 möglich.

Im Hinblick auf eine übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse steht das Treibhauspotenzial im Mittelpunkt der Sensitivitätsanalyse. Insbesondere bei der Akkuherstellung werden jedoch auch noch andere Umweltwirkungen dargestellt. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf folgende zusätzliche Wirkungen:

- ▶ **Kumulierter Energieaufwand (KEA):** Dieser stellt als Ergänzung zum Treibhauspotenzial vor allem den zukünftigen Bedarf an erneuerbaren Energien dar und kann daher in einer zukünftig defossilisierten Welt auch vom Treibhauspotenzial entkoppelt sein. Der KEA zeigt dann jedoch weiterhin den notwendigen Aufwand zur erneuerbaren Energieerzeugung und damit die Chancen einer kurzfristigen Defossilisierung vor dem Hintergrund knapper erneuerbarer Energien.
- ▶ **Versauerung:** Wird dargestellt als Beispiel für zahlreiche negative Wirkungen auf die natürliche Umgebung. In den berücksichtigten Substanzen gibt es z.T. auch Überschneidungen mit anderen Umweltwirkungen (z. B. Eutrophierung).
- ▶ **Feinstaubbelastung:** Wird als PM_{2,5} äquivalente Emissionen beispielhaft für negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit dargestellt.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden die ausgewählten Parameter innerhalb plausibler Bandbreiten und Entwicklungen variiert. Im Fokus steht die Variation einzelner Parameter, um deren Einflüsse klar herausarbeiten zu können, z.T. erfolgt jedoch auch eine Bündelung zu aussagekräftigen Nutzertypen. Bei den Fahrzeugeigenschaften stehen Pkw-seitig vor allem die Fahrzeuggröße, Reichweite und der individuelle Verbrauch der Fahrzeuge im Vordergrund. Dies betrifft insbesondere batterieelektrische Fahrzeuge, für die zusätzlich verschiedene Rahmenbedingungen der Akkufertigung sowie Akkueigenschaften untersucht werden. Bei schweren Nutzfahrzeugen spielt dagegen die Nutzungsphase eine besonders große Rolle, so dass darauf ein Fokus gelegt wird.

Im Bereich der Fahrzeugnutzung ist die Bandbreite sowohl hinsichtlich der gesamten Lebensfahrleistung als auch ihrer Aufteilung auf die Straßenkategorien groß. Beide Parameter werden separat und in Bezug auf aussagekräftige Nutzertypen analysiert. Bei PHEV-Pkw und Oberleitungs-Hybrid-Lkw spielt zusätzlich noch der elektrische Fahranteil eine relevante Rolle. Schlussendlich wird für zukünftige Baujahre noch untersucht, wie sich verschiedene Ausbauszenarien für die erneuerbare Stromerzeugung oder Beimischungen von erneuerbarem Wasserstoff oder synthetischem Kraftstoff auf die Bilanz auswirken.

3.4.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Im Vordergrund steht hier der Pkw, da viele Effekte in ähnlicher Form auch bei leichten Nutzfahrzeugen erwartet werden können. Nur bei Aspekten, die eine deutliche Abweichung zum Pkw vermuten lassen, werden leichte Nutzfahrzeuge separat dargestellt.

Fahrzeug- und Akkueigenschaften

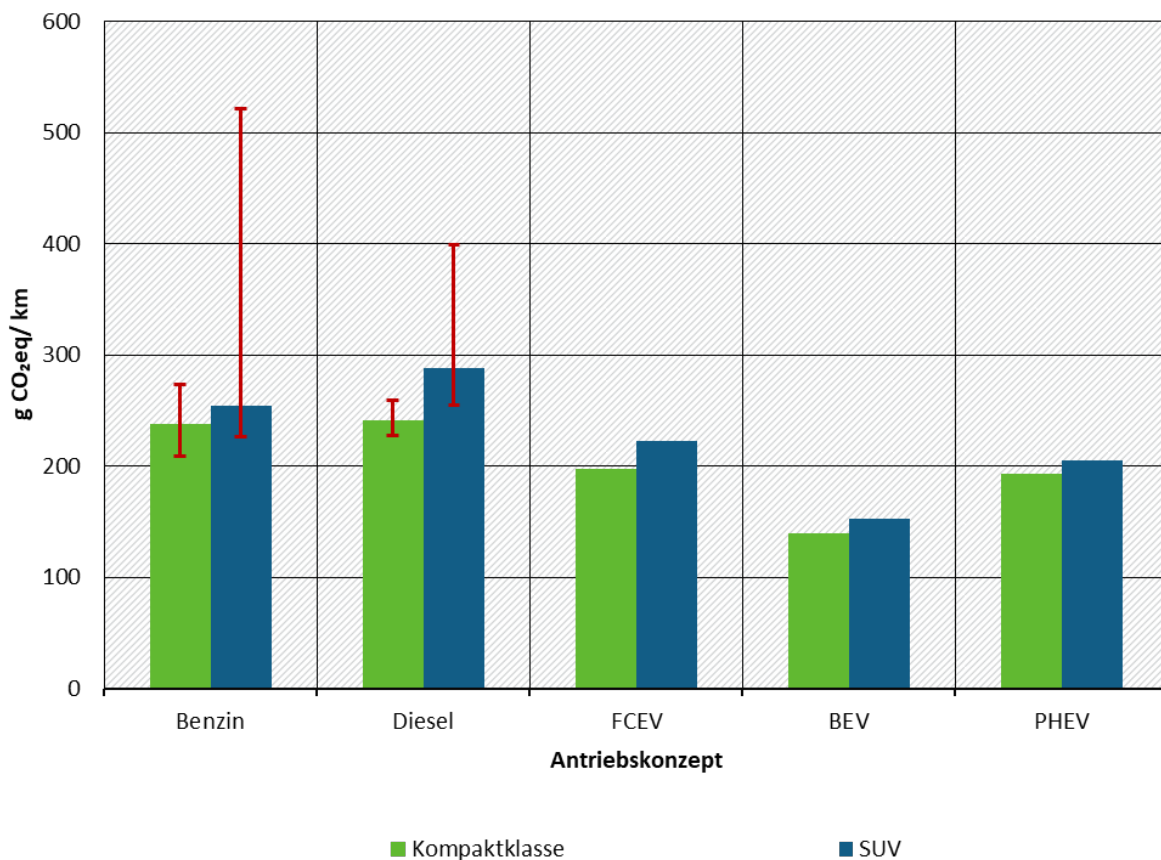
Im Projekt wird ein Kompaktklasse Pkw mit einem mittleren Energieverbrauch untersucht. Pkw decken heute jedoch eine große Bandbreite an unterschiedlichen Segmenten ab und weisen auch sehr unterschiedliche Kraftstoffverbräuche auf. Daher wird zusätzlich zum Pkw der Kompaktklasse auch ein SUV modelliert. Zusätzlich existiert aber bei Pkw auch innerhalb der Segmente eine große Bandbreite unterschiedlicher Kraftstoffverbräuche für individuelle Fahrzeugmodelle. Diese werden für Benzin- und Diesel-Pkw auf Basis der WLTP-Verbräuche der Neuzulassungen in den Segmenten Kompaktklasse und SUV im Jahr 2020 untersucht:

- ▶ Bei Benzin-Pkw schwanken die Kraftstoffverbräuche einzelner Modelle der Kompaktklasse im Bereich von +18 % und -15 % um den Mittelwert. Bei den Benzin-SUV ist die Bandbreite vor allem nach oben deutlich größer, die WLTP-Werte liegen um bis zu 137 % über und 14 % unter dem Mittelwert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Segment der SUV-Pkw eine Vielzahl an sehr unterschiedlichen Fahrzeugmodellen und -größen enthält.
- ▶ Bei Diesel-Pkw ist die Bandbreite etwas eingeschränkter und liegt bei der Kompaktklasse zwischen +9 % und - 7 % und beim SUV zwischen + 57 % und - 17 %.

Da der Energieverbrauch heute aufgrund der fossil dominierten Energiequellen die gesamte Klimabilanz von Pkw maßgeblich bestimmt, wirkt sich diese modellindividuelle Varianz der Energieeffizienz vor allem beim SUV, aber auch beim Kompakt-Pkw deutlich auf das gesamte Treibhauspotenzial über den Lebensweg aus. Auch für alternative Antriebskonzepten (BEV und FCEV) ist bei Pkw eine fahrzeugindividuelle Varianz zu erwarten. Hier sind allerdings zu wenig Modelle für eine breite statistische Auswertung am Markt verfügbar. Bei BEV-Pkw werden die Daten auch nicht umfassend vom KBA berichtet.

Abbildung 32 zeigt, dass das mit der Nutzung eines durchschnittlichen SUV-Pkw verbundene Treibhauspotenzial bei Fahrzeugen des Baujahrs 2020 bei gleichem Nutzungsmuster z.T. deutlich über denen der Nutzung eines Kompaktklassefahrzeugs liegt. Besonders hoch ist das zusätzliche Treibhauspotenzial bei Diesel- und Brennstoffzellen-SUV (+19 % bzw. +12 %). Bei Benzin- (+9 %), BEV- (+7 %) und PHEV-SUV (6 %) liegen die Mehrmissionen dagegen deutlich niedriger. Demgegenüber ist die Bandbreite individueller Energieverbräuche jedoch groß und kann das Ergebnis z. T. sogar entscheidend beeinflussen. So kann das Treibhauspotenzial besonders energieeffizienter SUV sogar noch unter dem von Pkw der Kompaktklasse mit besonders hohem Verbrauch liegen. Andererseits sind insbesondere bei SUV auch einzelne Modelle auf dem Markt, die einen deutlich überdurchschnittlichen Verbrauch aufweisen. Bei diesen Modellen (z.B. Benzin-SUV) kann das Treibhauspotenzial über den Lebensweg sogar doppelt so hoch liegen wie mit durchschnittlichem Verbrauch. Entsprechend bleibt mittelfristig die Energieeffizienz auch alternativer Antriebskonzepten eine zentrale Stellschraube der Gesamtklimabilanz.

Abbildung 32: Variation der Fahrzeuggröße und des Verbrauchs (Pkw, BJ 2020, GreenLate)



Anmerkung: Die Fahrzeugbereitstellung bezieht sich hier immer auf den mittleren Kompaktklasse- bzw. SUV- Pkw, lediglich die Verbräuche wurden angepasst.

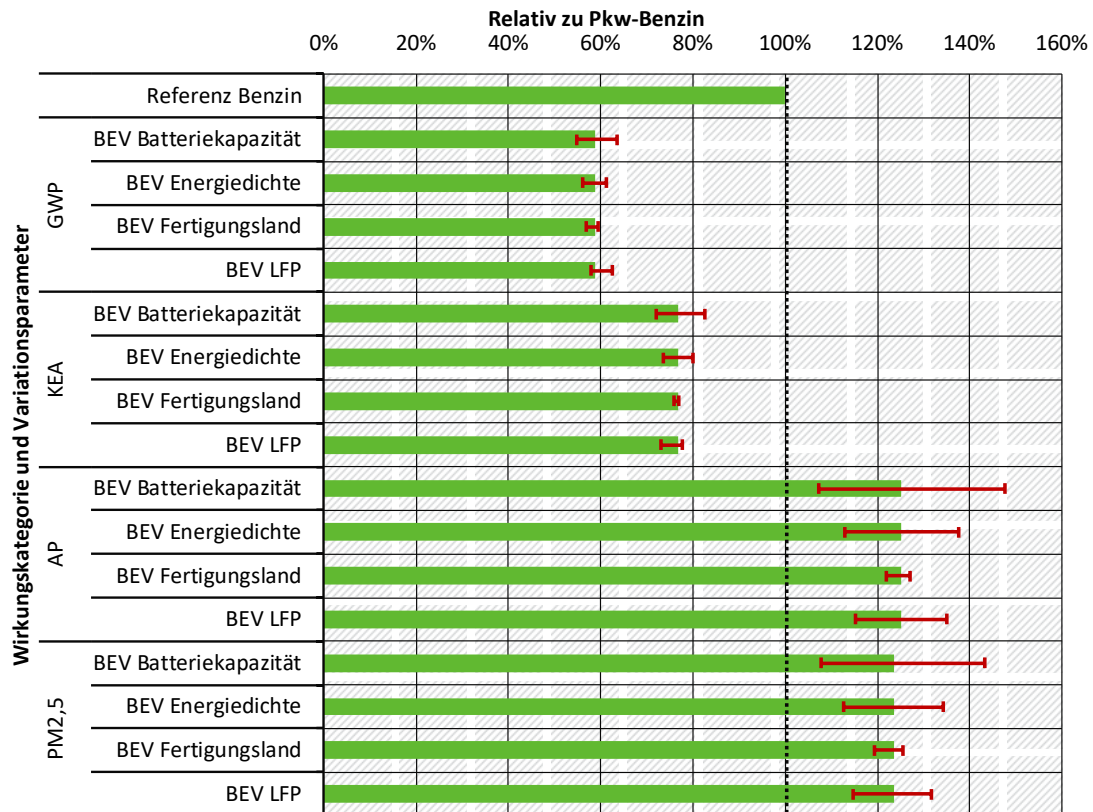
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Würde die Energieeffizienz beim BEV-Pkw ebenfalls variiert, würde dies einen deutlich geringeren Einfluss auf das Treibhauspotenzial haben, da hier der Anteil der Herstellung an der Gesamtbilanz deutlich höher liegt. Die Herstellungsemissionen sind vor allem mit der Akkuherstellung verbunden. Die angenommenen Akkueigenschaften variieren jedoch z.T. erheblich. Zusätzlich werden derzeit am Markt neben den im Standardfall angenommenen NMC-Zellen verstärkt auch wieder LFP-Zellen eingesetzt. Die Auswirkungen einer Variation zentraler Akkuparameter auf das gesamte Treibhauspotenzial eines BEV sind in Abbildung 33 für verschiedene Umweltwirkungen relativ zur Gesamtbilanz des Kompaktklasse Benzin-Pkw dargestellt. Dabei werden die Akkueigenschaften und Herstellungsbedingungen wie folgt variiert:

- Variation der **Kapazität** auf Basis der Bandbreite marktüblicher Akkugrößen zwischen 35 kWh und 80 kWh.
- Variation der **Energiedichte** auf Basis der am Markt verfügbaren Modelle zwischen 120 Wh und 200 Wh pro Kilogramm (auf Systemebene).
- Variation des **Strommix in der Zellfertigung** anhand der Standortbeispiele Schweden und China.

- Nutzung einer **LFP-Batterie** einmal mit marktüblich geringerer Energiedichte von 100 Wh/kg und einmal mit der gleichen Energiedichte von 150 Wh/kg wie für die NMC-Zelle angenommen (siehe Kapitel 4.2.2).

Abbildung 33: Variation zentraler Batterieparameter (Pkw Kompaktklasse, BJ 2020, GreenLate)



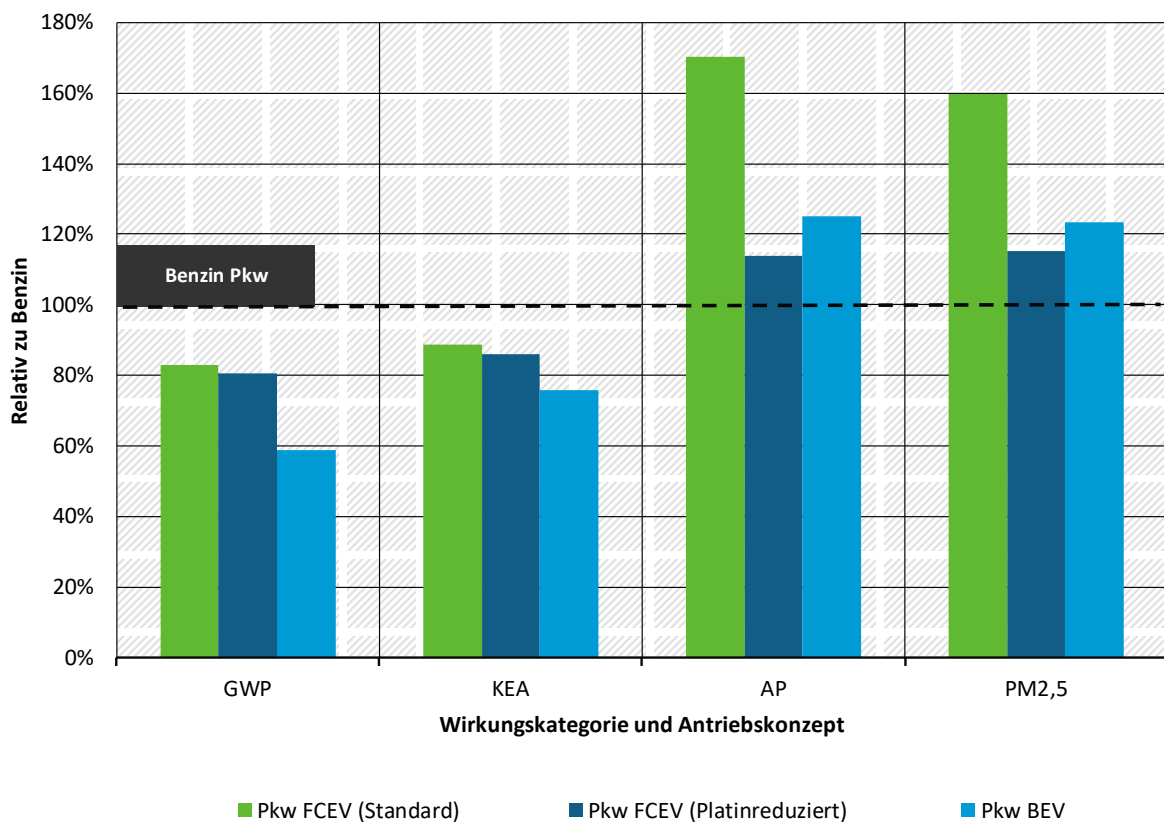
Variationen: Batteriekapazität 35-80 kWh, Energiedichte 120-200 Wh/kg, Fertigungsland Schweden-China, LFP-Batterie mit 100 Wh/kg (marktüblich) und 150 Wh/kg
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Beim Treibhauspotenzial (GWP) und dem kumulierten Energieaufwand (KEA) hat die Variation zentraler Akkuparameter dabei jedoch nur einen begrenzten Einfluss auf die gesamte Klimabilanz von BEV (siehe Abbildung 33). Denn aufgrund der immer noch hohen Anteile fossiler Stromerzeugung spielt die Fahrenergie in der Nutzungsphase für BEV mit Baujahr 2020 noch eine große Rolle und der Akku trägt daher nur in begrenztem Umfang zur Gesamtbilanz bei. Am deutlichsten ist der Einfluss bei der Akkukapazität, da hier Zellen in Gänze vermieden bzw. zusätzlich verbaut werden. Auch ist hier die Bandbreite an angebotenen Reichweiten besonders groß. Bei der Energiedichte sind die Unterschiede am Markt dagegen geringer und der Energieeinsatz betrifft nur einen Teilprozess der Zellfertigung.

Deutlichere Auswirkungen einer Variation zentraler Akkuparameter zeigen sich jedoch bei anderen Umweltwirkungen, zu denen die Akkuherstellung deutlich mehr beiträgt (hier die Beispiele Versauerung (AP) und Feinstaubbelastung (PM2,5) in Abbildung 33). Hier kann die Wahl der Akkukapazität, Zellchemie sowie deren Energiedichte auch die Gesamtwirkung über den Lebensweg deutlich beeinflussen. Andererseits ergibt sich hier durch Reichweitensparsamkeit und hohe Energiedichten ein deutliches Verbesserungspotenzial (siehe auch Kapitel 3.3.1).

Bei Brennstoffzellen-Pkw spielt die Platinbeladung der Brennstoffzelle eine ähnliche Rolle, wie Abbildung 34 verdeutlicht. Dem Standardfall mit einer Platinbeladung von 380 mg Platin pro kW wird eine Sensitivität mit einer Platinbeladung von 165 mg/kW dem BEV gegenübergestellt, wie sie für zukünftige Brennstoffzellen in 2030 vorliegen sollte (siehe auch Kapitel 2.3.1). Wieder sind die Auswirkungen beim Treibhauspotenzial (GWP) und KEA begrenzt, hier behält das BEV einen deutlichen Vorteil. Bei der Versauerung (AP) und Feinstaubbelastung (PM2,5) reduziert sich die Wirkung jedoch deutlich, der FCEV-Pkw liegt dann unter dem Niveau des BEV und unter dem Benzin-Pkw.

Abbildung 34: Variation der Platinbeladung der Brennstoffzelle (Pkw Kompaktklasse, FCEV und BEV BJ 2020, Green Late)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Nutzungsmuster

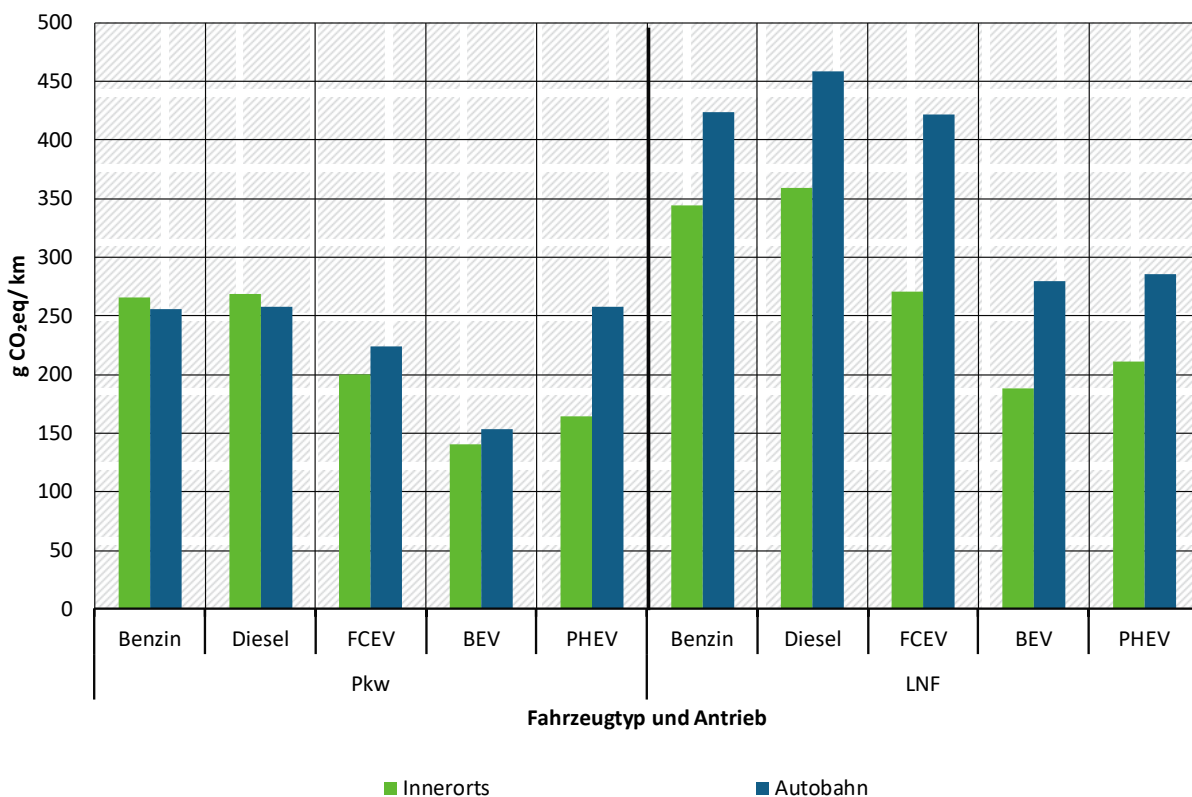
Beim Treibhauspotenzial ist heute der Energieverbrauch der Nutzungsphase für die meisten Antriebskonzepte der entscheidende Faktor. Neben der fahrzeugindividuellen Energieeffizienz (siehe Abbildung 32) hängt dieser auch vom Einsatzgebiet ab. Abbildung 35 vergleicht die Klimabilanz des Kompaktklasse Pkw und leichten Nutzfahrzeugs (LNF) bei Einsatz im Innerortsbereich und auf Autobahnen. Bei Pkw sind die Unterschiede vergleichsweise gering. Durch den Teillastbetrieb ist der Kraftstoffverbrauch der Verbrennungs-Pkw im Innerortsbereich etwas höher als auf Autobahnen, wo der steigende Luftwiderstand durch die höhere Motoreffizienz unter Volllast teilweise kompensiert wird. Bei den alternativen Antrieben (FCEV und BEV) liegt die Motoreffizienz dagegen in beiden Einsatzfeldern in einem ähnlichen Bereich, so dass sich der höhere Luftwiderstand auf Autobahnen negativ auswirkt. Zusätzlich

kann hier im Fernverkehr eine größere Reichweite, also auch Akkukapazität erforderlich sein (siehe Abbildung 35).

PHEV stellen hier einen Sonderfall dar: Prinzipiell erlauben die zwei Antriebsstränge die Nutzung des Elektromotors im Innerortsbereich und des Verbrennungsmotors vor allem auf Autobahnen. Dominieren die Fernverkehrsanteile auf Autobahnen jedoch die Nutzung, liegt der elektrische Fahranteil entsprechend besonders niedrig, was sich negativ auf das Treibhauspotenzial auswirkt. Auf Autobahnen ist der PHEV-Pkw daher nur unwesentlich besser als der Benzin- oder Diesel-Pkw. Im Innerortsbereich sind die Vorteile gegenüber den Verbrennern dagegen besonders groß.

Bei leichten Nutzfahrzeugen ist das Treibhauspotenzial auf Autobahnen gegenüber dem Innerortsbereich dagegen für alle Konzepte deutlich höher als im Innerortsbereich. Besonders groß ist der Unterschied dabei vor allem für das FCEV und BEV. Ein Grund hierfür könnten schlechteren aerodynamischen Eigenschaften des LNF sein (Frontfläche, Luftwiderstandsbeiwert).

Abbildung 35: Variation der Verkehrssituation (Pkw Kompaktklasse und LNF, BJ 2020, GreenLate)

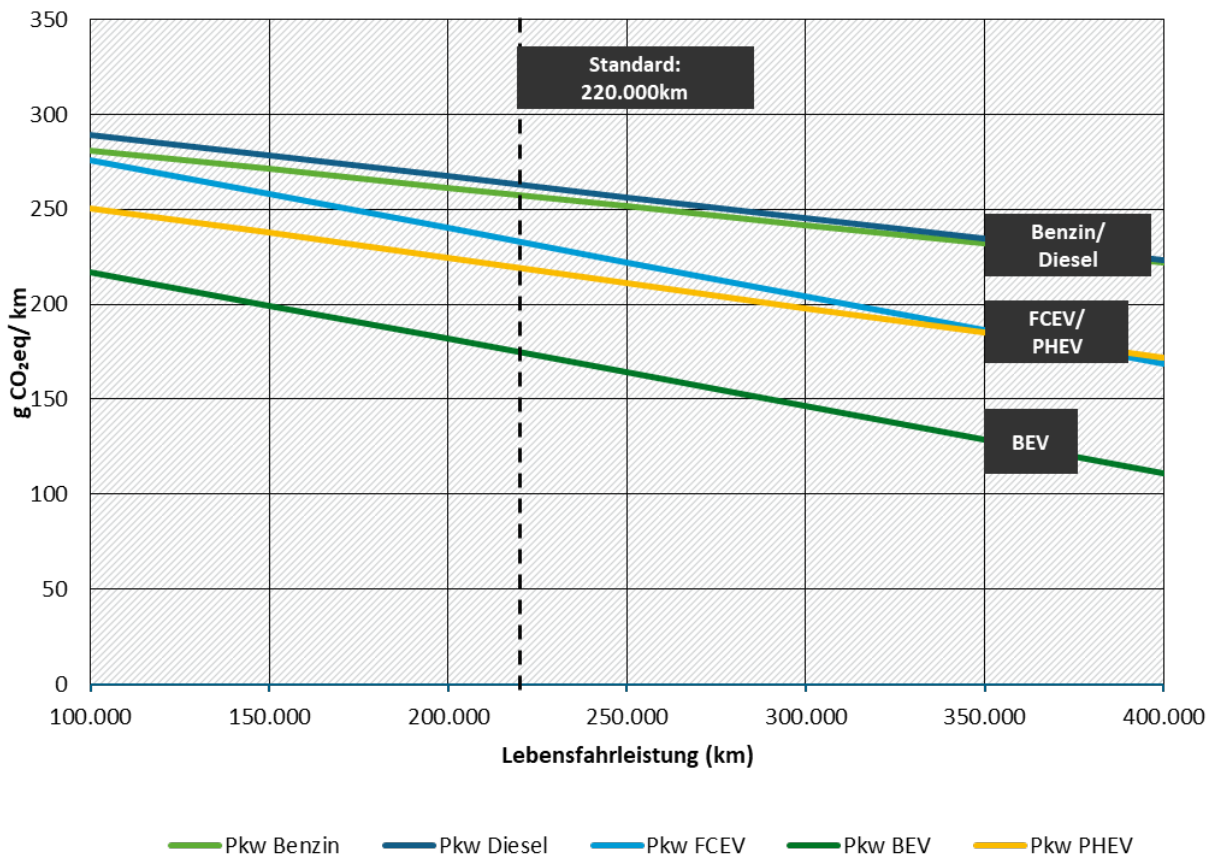


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Ein weiterer relevanter Faktor des Nutzungsmusters ist die jährliche Fahrleistung bzw. die Lebensfahrleistung. In einer Betrachtung des Treibhauspotenzials pro Fahrzeugkilometer nimmt das mit der Fahrzeugherstellung und -entsorgung verbundene Treibhauspotenzial mit steigender Lebensfahrleistung ab. Entsprechend ist das Treibhauspotenzial pro gefahrenen Kilometer aller Fahrzeugkonzepte bei einer Lebensfahrleistung von nur 100.00 km - bei gleichem Fahrmuster - deutlich höher als bei einer Lebensfahrleistung von 400.000 km (siehe

Abbildung 36). Der Effekt ist bei den alternativen Antriebskonzepten (FCEV, BEV und PHEV) etwas ausgeprägter als bei den Verbrennern (Benzin und Diesel), da hier die Herstellung aufgrund der zusätzlichen Komponenten wie Akku (BEV), Brennstoffzelle und Wasserstofftank (FCEV) oder zwei Antriebsstränge (PHEV) größeren Anteil an der Gesamtbilanz hat. Ab einer Lebensfahrleistung von 100.000 km bleibt jedoch in allen Fällen das BEV das Antriebskonzept mit dem geringsten, die Verbrenner das mit dem höchsten Treibhauspotenzial.

Abbildung 36: Variation der Lebensfahrleistung (Pkw Kompaktklasse, BJ 2020, GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

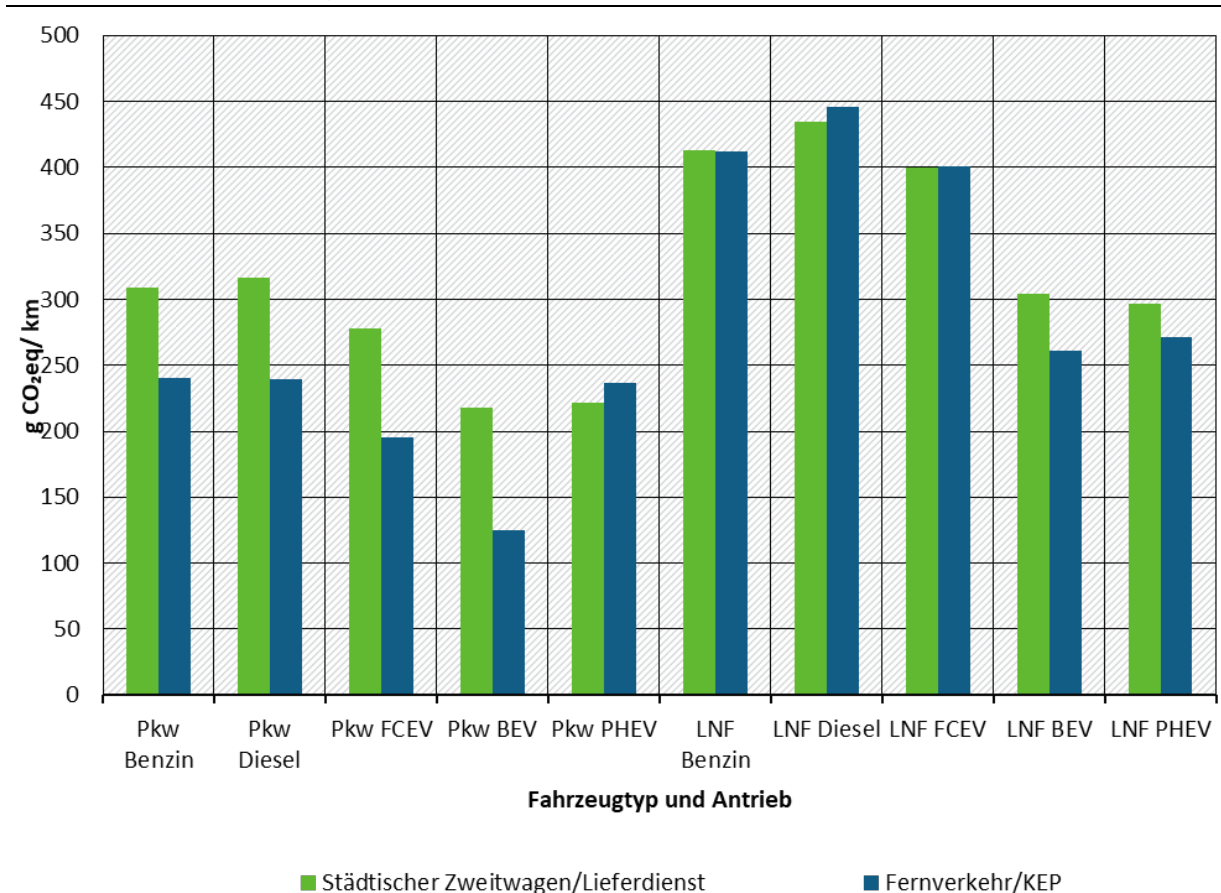
In der Praxis geht eine hohe Lebensfahrleistung häufig mit einem Einsatz im Fernverkehr und damit bevorzugt auf Autobahnen einher. Umgekehrt bleibt die Lebensfahrleistung im Stadtverkehr dagegen meistens begrenzt. Abbildung 37 vergleicht daher die Kombination aus beiden Variationen:

- ▶ Städtisches Fahrmuster bei einer Lebensfahrleistung von 100.000 km, was z. B. einem privaten Zweit-Pkw oder einem LNF auf kurzen Strecken im städtischen Lieferverkehr entsprechen könnte.
- ▶ Autobahneinsatz bei einer Lebensfahrleistung von 400.000 km, was z. B. einem Pkw im Fernverkehr oder einem LNF im Bereich von Langstreckenkurieren entspricht.

Dabei zeigt sich für Pkw und LNF ein unterschiedliches Bild. Da die Verbrauchsunterschiede für beide Fahrmuster beim Pkw nur gering sind, dominiert der positive Effekt der verbesserten Abschreibung der Fahrzeugherstellung auf den Fahrzeugkilometer. Die einzige Ausnahme sind PHEV. Aufgrund des geringen elektrischen Fahranteils auf Autobahnen sind beide

Nutzungstypen hier in der Klimabilanz vergleichbar. Bei BEV könnte der Einsatz im Fernverkehr überdies eine größere Reichweite notwendig machen (siehe Abbildung 33), die sich bei großen Lebensfahrleistungen jedoch geringer auswirkt. Bei den leichten Nutzfahrzeugen ist aufgrund der hier besonders hohen Energieeffizienz im Innerortsbereich (siehe Abbildung 35) der dortige Einsatz mit einem ähnlichen Treibhauspotenzial verbunden wie im Fernverkehr.

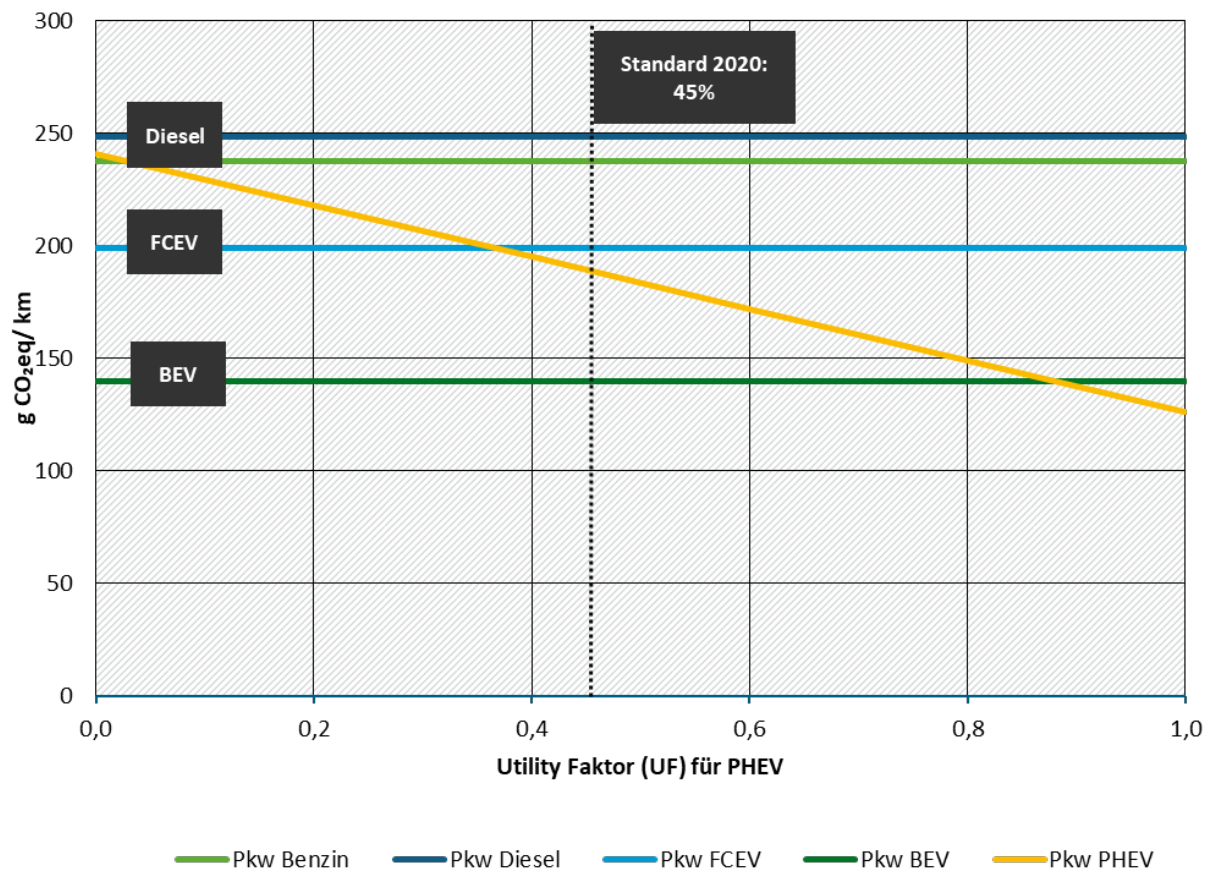
Abbildung 37: Vergleich unterschiedlicher Nutzertypen (Pkw Kompaktklasse und LNF, BJ 2020, GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei PHEV spielt in allen Betrachtungen der elektrische Fahranteil eine besondere Rolle. Abbildung 38 variiert diesen daher noch einmal im Vergleich mit den anderen Antriebskonzepten. Im reinen Verbrennerbetrieb ist das Treibhauspotenzial entsprechend mit dem Benzin-Pkw vergleichbar, die Herstellungsemissionen des doppelten Antriebsstrangs werden durch die höhere Effizienz des hybridisierten Antriebsstrangs grob kompensiert. Im reinen Elektroantrieb liegt das Treibhauspotenzial sogar noch leicht unter der des BEV, da ein deutlich kleinerer Akku verbaut ist. Dieser Vorteil entsteht jedoch erst ab elektrischen Fahranteilen von über 90 %, was einer weitgehenden Nutzung des PHEV als BEV entspricht. Erreichbar ist diese Bilanz jedoch auch mit einem reinen Elektro-Fahrzeug mit begrenzter Reichweite, also kleinem Akku. Bei dem heute im Mittel noch niedrigen angenommenen elektrischen Fahranteil entsteht für das PHEV dennoch ein Vorteil beim Treibhauspotenzial gegenüber den anderen dargestellten Antriebskonzepten, gegenüber dem FCEV jedoch erst ab elektrischen Fahranteilen von über 40 %.

Abbildung 38: Variation des elektrischen Fahranteils (Pkw Kompaktklasse, BJ 2020, GreenLate)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Entwicklung der Energiebereitstellung

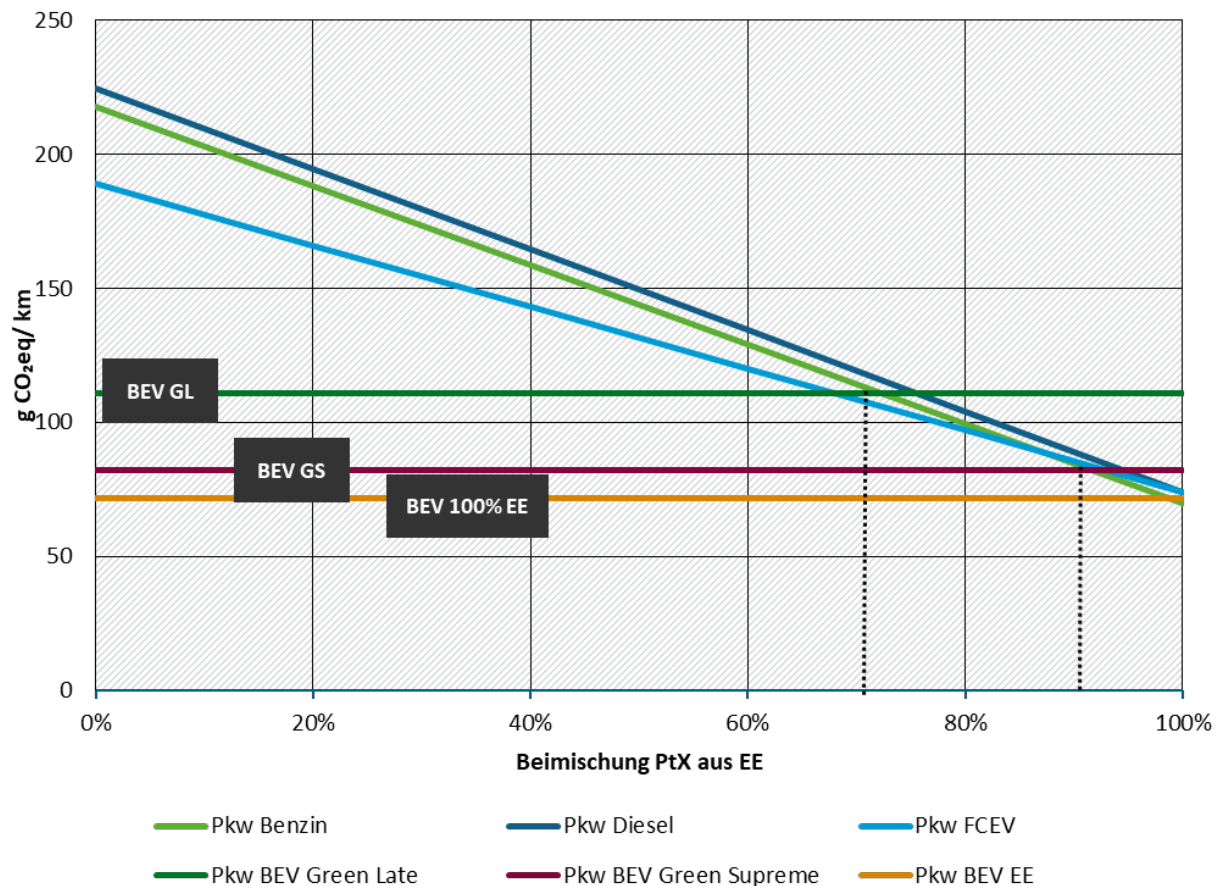
Fahrzeugeigenschaften und Nutzungsmuster zeigen bereits bei Fahrzeugen mit Baujahr 2020 eine große Bandbreite zwischen Fahrzeugmodellen und Nutzern. Das Energiesystem ist für die heutigen Nutzer dagegen eine relative feste Größe, die nur wenig nutzerindividuelle Varianz ermöglicht. Bis zum Baujahr 2030 sind die Einflüsse von Variationen des Nutzungsmuster weitgehend vergleichbar mit der heutigen Situation. Deutlichere Unterschiede können jedoch bei der Energiebereitstellung für die Nutzungsphase erwartet werden. So ist einerseits mit einem starken Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung zu rechnen, von der BEV und eingeschränkt auch PHEV (mit dann höher angenommenen elektrischen Fahranteilen) profitieren. Dazu werden zwei Szenarien der weiteren Entwicklung betrachtet, GreenLate als konservatives Standardszenario und GreenSupreme als ambitioniertes Szenario. GreenSupreme liegt dabei bereits recht nah an einer theoretischen Nutzung reinen EE-Stroms. Bei den kraftstoffbasierten Konzepten Benzin, Diesel und FCEV wird 2030 im Standardfall mit geringen Biokraftstoffanteilen gerechnet. Rein erneuerbarer Wasserstoff oder rein synthetische Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien werden im Standardfall für Fahrzeuge mit Baujahr 2030 noch kaum berücksichtigt (2,8% in GreenLate) oder nur in geringem Umfang (22,6% in GreenSupreme).

Die Darstellung von möglicherweise deutlich höheren Beimischungsquoten von PtG/PtL aus erneuerbaren Energien in Abbildung 39 zeigt jedoch, dass sehr hohe Beimischungsquoten bereits ab 2030 notwendig wären, um ein gegenüber BEV vergleichbares Treibhauspotenzial dieser Konzepte zu erreichen. Erst ab Beimischungen von über 70 % EE PtG/PtL erreichen

Verbrenner und FCEV für das Baujahr 2030 eine bessere Klimabilanz als das BEV unter Nutzung des deutschen Strommix wie im Standardszenario GreenLate angenommen. Gelingt der ambitionierte Ausbau der EE-Stromerzeugung wie im GreenSupreme Szenario, zusammen mit einer sektorenübergreifenden Elektrifizierung und Umstellung auf effiziente Prozesse, dann ist sogar eine Beimischung von über 90 % EE PtG/PtL notwendig.

Diese Importoptionen setzen jedoch voraus, dass in den potenziellen Herkunftsländern nicht nur ein hohes Potenzial für die Erzeugung von erneuerbarem Strom besteht, sondern auch die entsprechenden Produktionskapazitäten sowie verlässliche, effiziente Transportwege für PtG/PtL bis 2030 aufgebaut werden können. Das Export-Potenzial ist zwar theoretisch groß, allerdings ist dieser Ansatz mit erheblichen geopolitischen Herausforderungen und neuen Abhängigkeiten verbunden. Zudem muss sichergestellt werden, dass neben dem wirtschaftlich und technisch anspruchsvollen Technologiehochlauf auch Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich politischer, sozialer und ökologischer Anforderungen eingehalten werden. Hierzu sollte insbesondere das Potenzial zur heimischen Nutzung des erneuerbaren Stroms bereits genutzt werden um die lokale Energieversorgung zur Treibhausgasneutralität zu transformieren, bevor der Strom unter Energieverlusten zu PtL oder Wasserstoff umgewandelt und exportiert wird.

Abbildung 39: Variation der Beimischung von PtX aus EE (Pkw Kompaktklasse, BJ 2030)



Herstellung des erneuerbaren PtL in Marokko (Direct Air Capture, Transport per Schiff). Für H₂ wird aufgrund des aufwändigen Transports eine Produktion mit EE Strom in Deutschland angenommen.
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

3.4.2 Sattelzüge

Bei den Sattelzügen dominiert heute noch der Dieselantrieb. Als marktgängige Alternativen gab es bisher vor allem den LNG-Antrieb sowie den dual-fuel LNG/ Diesel. Die Bandbreite alternativer Antriebe wird daher in diesem Projekt erst mit Baujahr 2030 bilanziert. Auf dieses Bezugsjahr fokussiert entsprechend auch die Sensitivitätsanalyse, um einen umfassenden Vergleich zwischen den Technologien zu erlauben. Hier hat sich im Standardfall gezeigt, dass die Kraftstoffverbrennung sowie die Kraftstoff- und Strombereitstellung das Treibhauspotenzial noch deutlich stärker als beim Pkw dominieren. Über 90 % des Treibhauspotenzials entfallen bei den Lkw mit fossilen Kraftstoffen auf diese Lebenswegabschnitte und selbst beim BEV-Sattelzug macht die Strombereitstellung noch 75 % aus. Dies liegt unter anderem an der hohen Lebensfahrleistung der überwiegend im Fernverkehr eingesetzten Sattelzüge, so dass die Herstellungsaufwendungen sehr gut auf den einzelnen Fahrzeugkilometer abgeschrieben werden. Die Nutzungsphase steht daher im Fokus der Sensitivitätsanalyse. Zusätzlich ergeben sich bis 2030 verschiedene mögliche Entwicklungen für die Akkutechnologie und die Energiebereitstellung, die sich bei Sattelzügen besonders stark auswirken können.

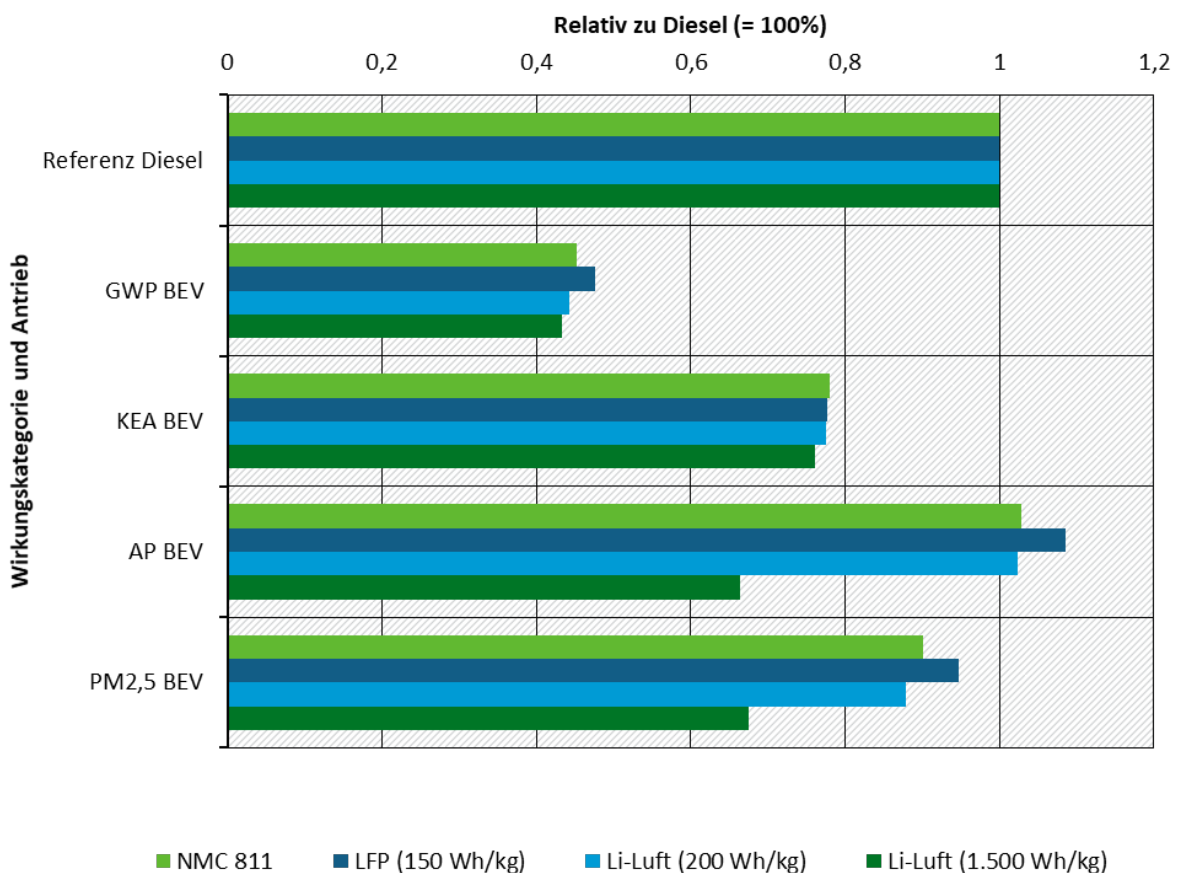
Akkutechnologie

Bezüglich der Akkuparameter (Energiedichte, Herstellungsland, Akkugröße) können prinzipiell ähnliche Auswirkungen wie bei Pkw erwartet werden, die das Gesamtergebnis aufgrund der hohen Lebensfahrleistung weniger stark beeinflussen. Bei BEV stehen aufgrund der großen

Akkukapazitäten jedoch verstärkt verschiedene Akkutechnologien im Fokus der Diskussion. So werden derzeit gerade bei schweren Nutzfahrzeugen verstärkt Lithium-Eisenphosphat (LFP) Akkus eingesetzt. Gegenüber einem kobaltreduzierten NMC Akku ergeben sich damit jedoch 2030 keine Umweltvorteile, da gleichzeitig beim NMC ein Anstieg der Energiedichte auf 200 Wh/kg unterstellt wird. Abbildung 40 zeigt hier auch über den gesamten Lebensweg Nachteile für einen Sattelzug mit LFP Akku beim Treibhauspotenzial, der Versauerung und den Feinstaubemissionen.

Parallel werden neue Akkutechnologien entwickelt, von denen in dieser Studie der Lithium-Luft Akku betrachtet wird. Ein Einsatz in Fahrzeugen mit Baujahr 2030 ist zwar noch fraglich, aber auch nicht ausgeschlossen. Die Umweltbilanz hängt dann vor allem von der bis dahin erreichten Energiedichte, dem zentralen Vorteil dieser neuen Technologie (siehe Kapitel 2.4.3) ab. Bei gleicher Energiedichte, wie 2030 für NMC Akkus erwartet, ergeben sich 2030 nur sehr geringe Umweltvorteile. Werden jedoch bereits die erwarteten hohen Energiedichten im Bereich von 1500 Wh/kg erreicht ergeben sich zumindest deutliche Vorteile bei der Versauerung und Feinstaubemissionen (siehe Abbildung 40). Beim Treibhauspotenzial und dem kumulierten Energieaufwand sind die Vorteile über den Lebensweg dagegen aufgrund der Dominanz der Nutzungsphase begrenzt (siehe auch Kapitel 4.2.2).

Abbildung 40: Variation der Akkutechnologie (Sattelzüge, BJ 2030, GreenLate)



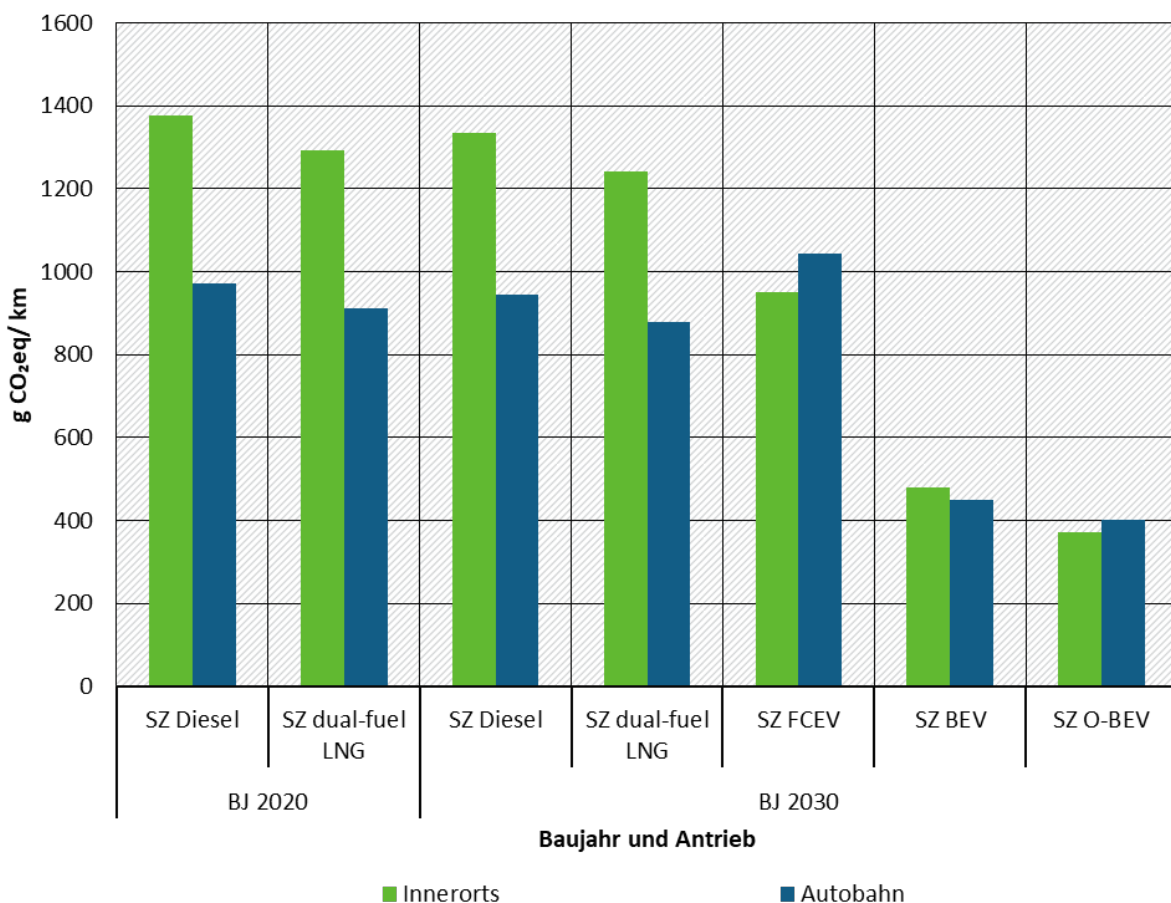
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Nutzungsmuster

Der Standardfall unterstellt eine überwiegende Nutzung der Sattelzüge im Fernverkehr, so dass etwa zwei Drittel der Lebensfahrleistung auf Autobahnen erbracht werden. Sattelzüge können

jedoch auch im Verteilerverkehr eingesetzt werden, der häufig innerorts stattfindet. Ein Einsatz im Innerortsbereich führt dann – bei gleicher Lebensfahrleistung – bei den Antrieben mit Verbrennungsmotor zu einem deutlich höheren Treibhauspotenzial als der reine Einsatz auf Autobahnen (siehe Abbildung 41). Durch die hohe Dynamik in der Betriebsführung (häufiger Wechsel zwischen Voll- und Teillastbetrieb) im Innerortsbereich ist die Effizienz des Verbrennungsmotors dort besonders niedrig. Die Motoreffizienz steigt bei Verbrennungsmotoren bei höherer Last – also z. B. auf Autobahnen – deutlich an und kann vor allem bei höheren Geschwindigkeiten den ebenfalls höheren Luftwiderstand teilweise kompensieren. Bei FCEV, BEV und O-BEV sind die Unterschiede im Treibhauspotenzial bei gleicher Lebensfahrleistung dagegen sehr klein. Hintergrund ist der über weite Bereiche des Lastspektrums hohe Wirkungsgrad des Elektroantriebs. Die direktelektrischen Antriebe (BEV und O-BEV) haben daher gegenüber Verbrennern besonders große Vorteile im städtischen Verteilerverkehr. Zusätzlich kann ein Teil der für die Bewegung aufgebrauchten Energie durch Rekuperation bei Bremsvorgängen wieder zurückgewonnen werden. Dies gilt in der Regel auch für teilelektrische Antriebe (Hybride und Plug-In Hybride, nicht aber für reine Verbrenner. Doch trotz des deutlich höheren Verbrauchs auf Autobahnen liegt das Treibhauspotenzial von BEV und O-BEV 2030 auch dort deutlich unter dem der Verbrenner, die 2030 noch mit überwiegend fossilen Energien betrieben werden. Bei FCEV Sattelzügen ergibt sich im Stadtverkehr eine deutlich positive Bilanz beim Treibhauspotenzial gegenüber den Verbrennern, im Autobahnbetrieb dagegen eine leichte Verschlechterung, da das Emissionsniveau durch die höheren Wandlungsverluste insgesamt höher liegt als bei BEV und O-BEV.

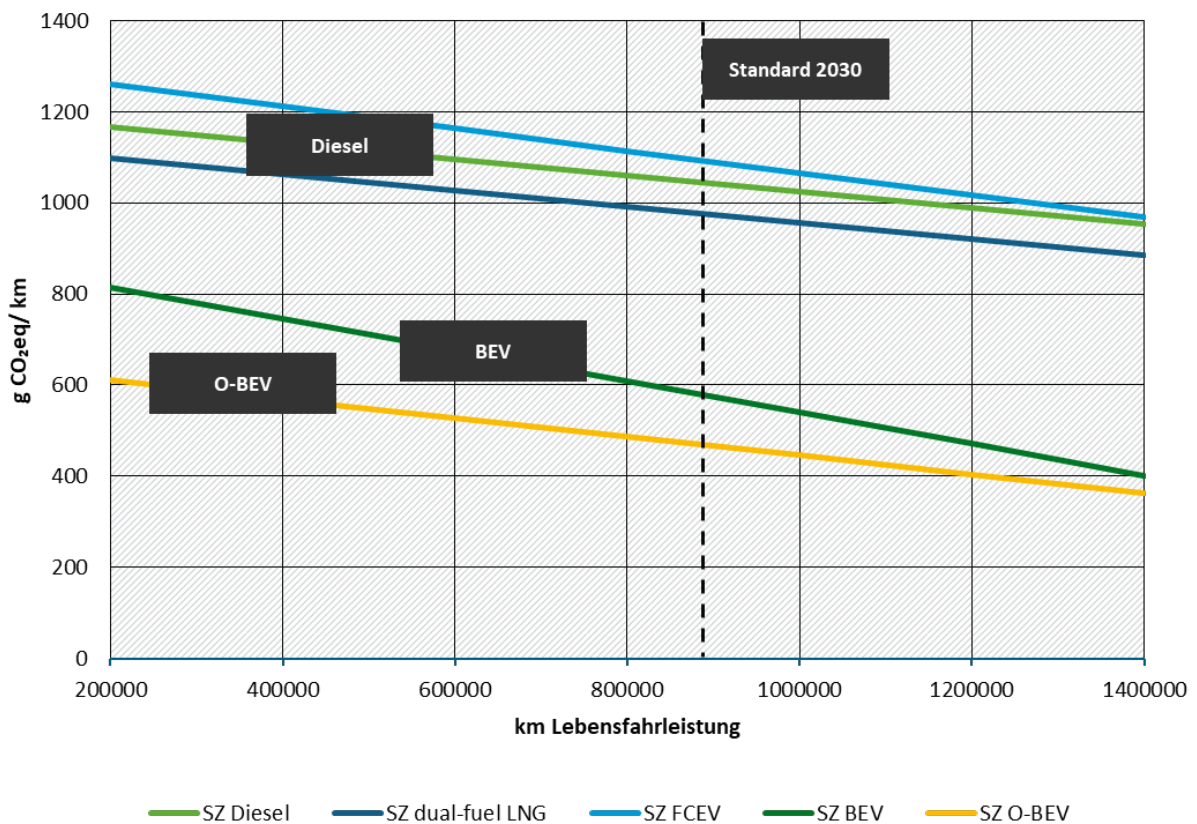
Abbildung 41: Variation der Verkehrssituation (Sattelzug, BJ 2020 und 2030, Green Late)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Ein weiterer relevanter Faktor des Nutzungsmusters ist - wie bei Pkw - die jährliche Fahrleistung bzw. die Lebensfahrleistung. In einer Betrachtung des Treibhauspotenzials pro Fahrzeugkilometer schreibt sich das mit der Fahrzeugherstellung und -entsorgung verbundene Treibhauspotenzial mit steigender Lebensfahrleistung immer besser ab. Besonders hohe Lebensfahrleistungen sind tendenziell eher im Fernverkehr zu erwarten, während die Lebensfahrleistung im städtischen Verteilerverkehr auch deutlich niedriger liegen kann. Abbildung 42 zeigt das Treibhauspotenzial für den Standardfall in Abhängigkeit der Lebensfahrleistung. Bei allen Konzepten nimmt das gesamte Treibhauspotenzial mit der Lebensfahrleistung naturgemäß ab, da der Produktionsaufwand auf mehr Kilometer abgeschrieben wird. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt beim BEV, da hier im Fernverkehr besonders große Akkus erforderlich sind. Bei sehr großen Fahrleistungen konvergiert das Treibhauspotenzial dann jedoch mit dem O-BEV. Auch Diesel- und FCEV liegen dann sehr dicht beieinander. Dennoch kommt es in dem betrachteten Variationsfenster zwischen 200.000 und 1.400.000 km zu keiner Ergebnisumkehr.

Abbildung 42: Variation der Lebensfahrleistung (Sattelzug, BJ 2030, Green Late)

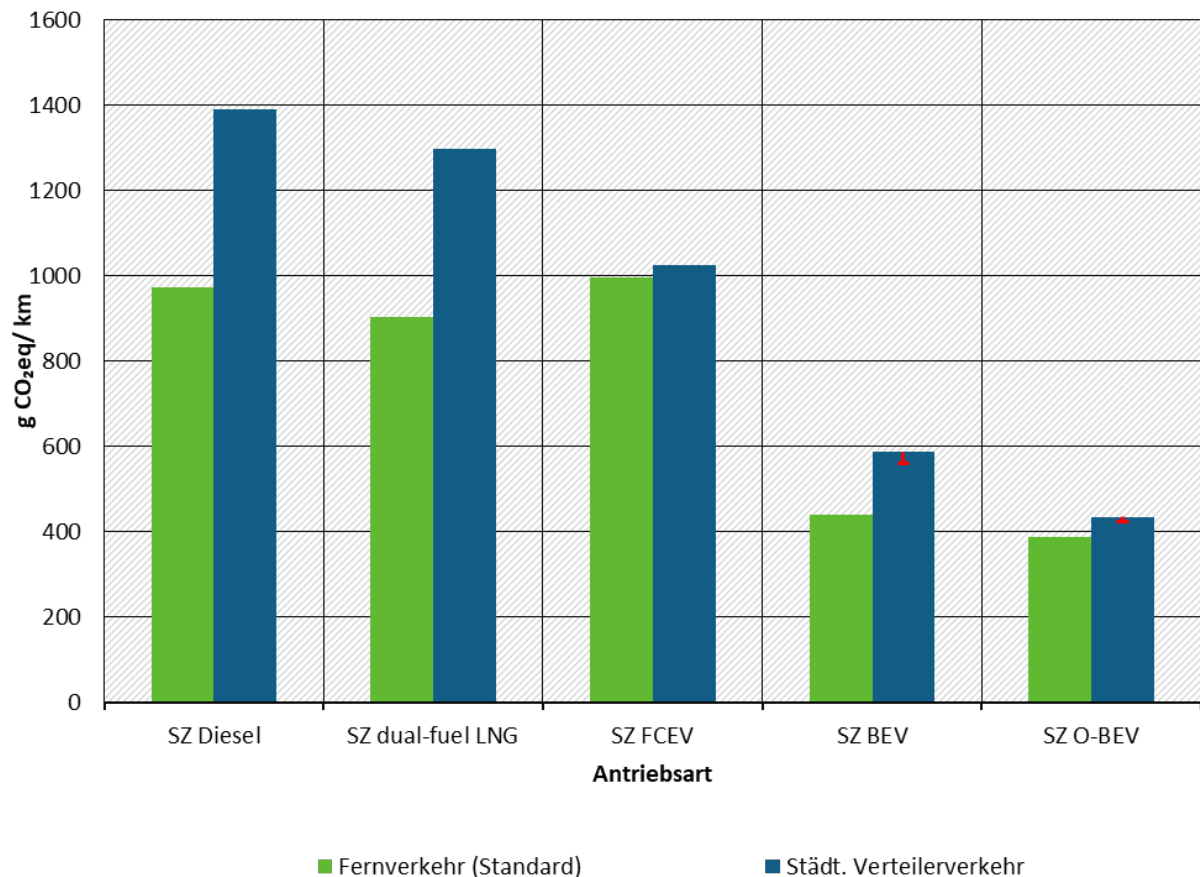


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

In der Praxis ist eine besonders hohe Lebensfahrleistung häufig mit einem Einsatz im Fernverkehr und damit bevorzugt auf Autobahnen verknüpft. Umgekehrt bleibt die Lebensfahrleistung im städtischen Verteilerverkehr dagegen meistens begrenzt. Abbildung 43 vergleicht daher den Standardfall eines Sattelzugs im vornehmlichen Fernverkehr (900.000 km Lebensfahrleistung, davon zweidrittel auf Autobahnen) mit einem Lkw im rein städtischen Verteilerverkehr (450.000 km Lebensfahrleistung). Im Fernverkehr liegt das Treibhauspotenzial dabei durchgehend unter dem städtischen Verteilerverkehr, bei den Verbrennern besonders

deutlich. Beim FCEV und O-BEV liegen dagegen beide Einsatztypen recht nah beieinander. Der höhere Abstand beim BEV erklärt sich aus den hohen Herstellungsemissionen des Akkus, die im Beispiel für den städtischen Verteilerverkehr stärker zum Tragen kommen. Durch einen kleineren Akku (negativer Fehlerbalken (in rot) zeigt die halbe Akkukapazität) kann dieser Nachteil nur teilweise wieder ausgeglichen werden.

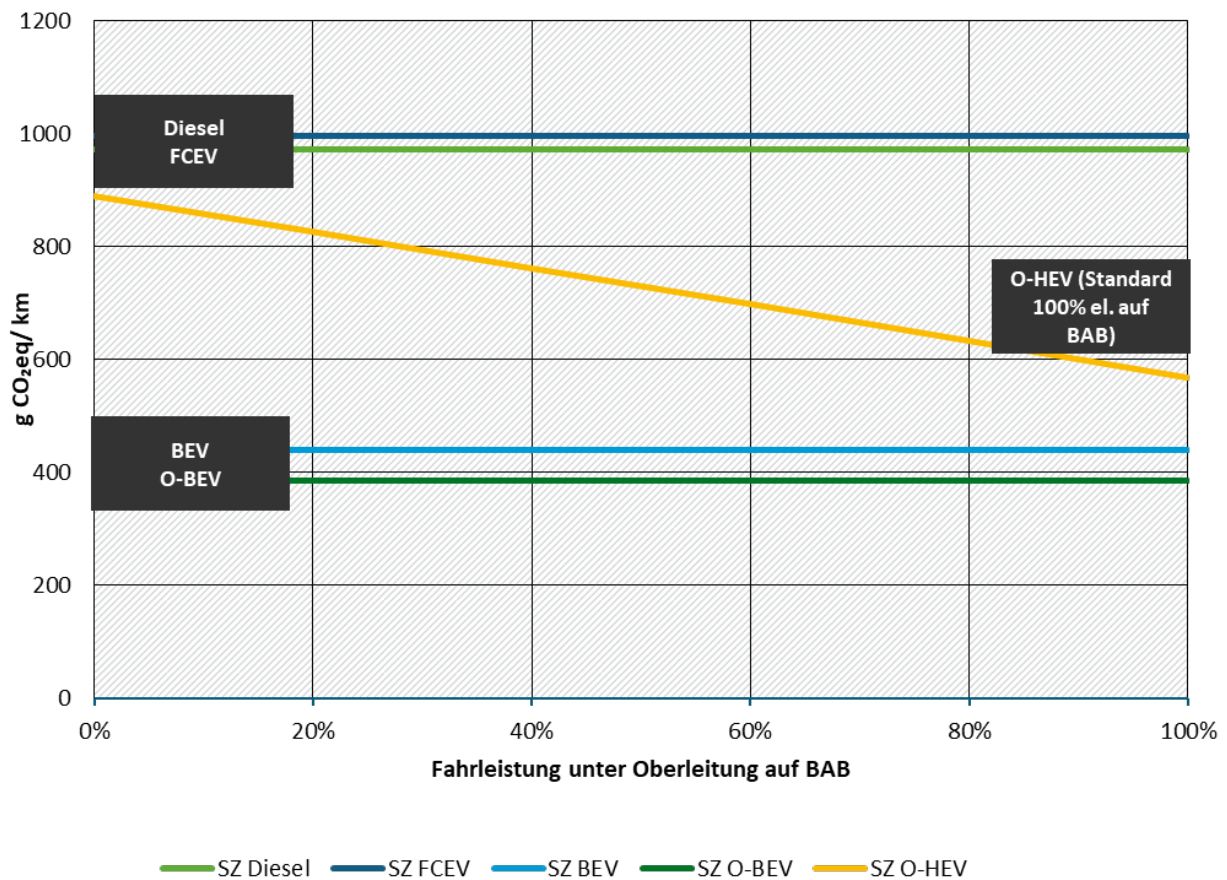
Abbildung 43: Vergleich eines Sattelzugs im Fernverkehr (Standard) mit städtischem Verteilerverkehr (Innerorts, 450.000 km Lebensfahrleistung, Baujahr 2030, Green Late)



Der rote Fehlerbalken zeigt die Bilanz mit einer halbierten Akkukapazität im städtischen Verteilerverkehr an Quelle: eigene Berechnungen ifeu

In der Bilanz profitieren vor allem die direktelektrischen Antriebskonzepte mit Baujahr 2030 von der effizienten Stromnutzung und dem Ausbau erneuerbarer Energien. Ein Mischkonzept sind hier die Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-HEV), die sowohl unter der Oberleitung direktelektrisch fahren können als auch mit Dieselmotor dort, wo keine Oberleitungsinfrastruktur vorhanden ist. Im Standardfall wird eine im Einsatzbereich des O-HEV vollständig elektrifizierte Autobahn unterstellt. Abbildung 44 zeigt eine Variation des elektrischen Fahranteils von O-HEV auf Autobahnen. Während sich das Konzept im Standardfall durch den hohen Autobahnanteil des Sattelzugs den BEV und O-BEV relativ stark annähert, führen geringere elektrische Fahranteile auf Autobahnen zu einem deutlich höheren Treibhauspotenzial des O-HEV. Doch auch ohne jede Elektrifizierung der Autobahn bleiben leichte GWP-Vorteile gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb durch die Hybridisierung des O-HEV Antriebsstrangs.

Abbildung 44: Variation des elektrischen Fahranteils von O-HEV auf Autobahnen (Sattelzug, BJ 2030, Green Late)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

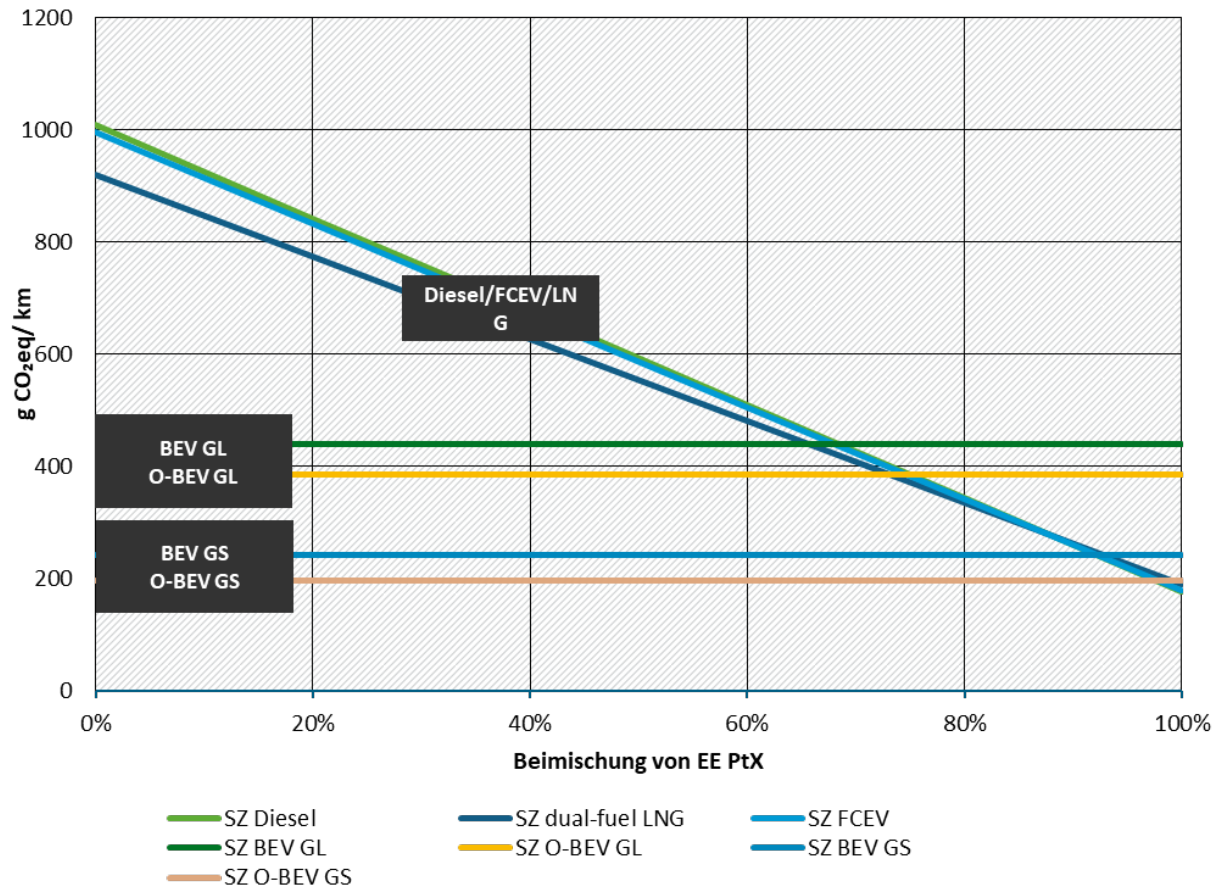
Entwicklung der Energiebereitstellung

Im Standardfall wird bis 2030 bereits ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung unterstellt, während die Verbrennerfahrzeuge noch mit überwiegend fossilem Kraftstoff fahren. Rein erneuerbarer Wasserstoff oder rein synthetische Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien werden im Standardfall mit GreenLate bis 2030 noch nicht berücksichtigt. In der Energiebereitstellung für die Nutzungsphase können jedoch auch deutlich abweichende Entwicklungen stattfinden. So ist einerseits ein noch stärkerer Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung möglich, dies wird zusammen mit Maßnahmen zur Senkung der Endenergienachfrage durch das Szenario GreenSupreme abgebildet, das gleichzeitig für Sattelzüge mit Baujahr 2030 auch eine begrenzte Nutzung von durchschnittlich 10,6 % erneuerbarer PtG/PtL-Kraftstoffe unterstellt.

Trotz der Herausforderungen, die mit einem Hochlauf erneuerbarer PtG/PtL-Produktion verbunden sind, könnten prinzipiell auch schon früher höhere Anteile erreicht werden. Abbildung 45 zeigt die Variation einer Beimischung von EE- PtG/PtL zu den Kraftstoffen für einen Sattelzug mit Baujahr 2030. Für eine mit BEV/O-BEV im Green Late Szenario vergleichbare Bilanz des Treibhauspotenzials müssen bei Verbrennern und FCEV bereits etwa 70 % erneuerbares PtG/PtL genutzt werden. Gegenüber dem GreenSupreme Szenario sind es bereits 90 %.

Diese Optionen setzen jedoch voraus, dass in Deutschland oder den potenziellen Herkunftsländern nicht nur ein hohes Potenzial für die Erzeugung von erneuerbarem Strom besteht, sondern auch die entsprechenden Produktionskapazitäten sowie die verlässlichen und effizienten Transportwege für PtG/PtL bis 2030 aufgebaut werden können. Das Export-Potenzial ist zwar theoretisch groß, allerdings ist dieser Ansatz mit erheblichen geopolitischen Herausforderungen verbunden.

Abbildung 45: Variation der Beimischung von EE-PtX zu Kraftstoffen (Sattelzug, BJ 2030)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Klimabilanz von Pkw und Sattelzügen mit 100 % erneuerbaren Energien 2030

In dieser Studie wird die Einführung von alternativen Kraftstoffen und Antrieben durch die in den Szenarien GreenLate und GreenSupreme abgebildete plausible zeitliche Entwicklung im Energiesystem bestimmt. Im Rahmen der Diskussion um diese Zukunftstechnologien kommt aber immer wieder die Frage auf, wie die verschiedenen Antriebssysteme bei gezieltem frühzeitigem Einsatz erneuerbarer Energien abschneiden würden. Insbesondere bei Verbrennern und Brennstoffzellenfahrzeugen, bei denen erneuerbare Kraftstoffe gegenüber batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen wahrscheinlich erst verzögert zum breiten Einsatz kommen, könnte durch gezielte frühzeitige Nutzung erneuerbarer Energien eine deutliche Verbesserung der Klimabilanz erreicht werden. Dies wäre voraussichtlich entweder über den forcierten Import von grünem Wasserstoff und grünen Kraftstoffen oder durch eine zusätzliche Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland möglich. Letzteres gilt jedoch auch für die Zurechnung von rein erneuerbarem Strom für elektrisch betriebene Fahrzeuge.

Abbildung 46 zeigt das Treibhauspotenzial von strombasiert betriebenen Kompaktklasse-Pkw im Jahr 2030. Für jeden Antriebstyp ist jeweils die Nutzung von rein erneuerbarem deutsch Strom, von deutschem Netzstrom, dem gleitenden Strommix/Kraftstoffmix über die Lebensdauer des Fahrzeugs (nach GreenLate) gegenübergestellt.

Unter Einsatz rein erneuerbaren Stroms bzw. erneuerbarer Kraftstoffe liegen alle betrachteten Antriebstechnologien bei Pkw auf einem sehr niedrigen und nahezu gleichen Niveau. Mehremissionen in der Fahrzeugherstellung von BEV werden durch die höhere Effizienz der Energiebereitstellung ausgeglichen. Die Nutzung synthetischer Kraftstoffe in Verbrenner-Pkw ist gegenüber BEV/PHEV mit einem vielfach höheren Strombedarf verbunden. Ein signifikant niedrigeres Treibhauspotenzial als für BEV lässt sich demnach mit dem Einsatz erneuerbarer synthetischer Kraftstoffe in Verbrennern nicht erreichen. Bei FCEV liegt das Treibhauspotenzial sogar etwas höher, da sich hier sowohl eine aufwändige Fahrzeugherstellung als auch Konversionsverluste in der Energiebereitstellung negativ auswirken.

Bei Sattelzügen (Abbildung 47) reduziert sich das Treibhauspotenzial ebenfalls durch den vollständigen Einsatz erneuerbaren Stroms erheblich - alle Antriebe liegen dann auf einem sehr niedrigen Niveau. Hier ist das Treibhauspotenzial jedoch für den BEV und besonders für den O-BEV weiterhin signifikant niedriger als für die Verbrenner (Diesel sowie dual-fuel-LNG).

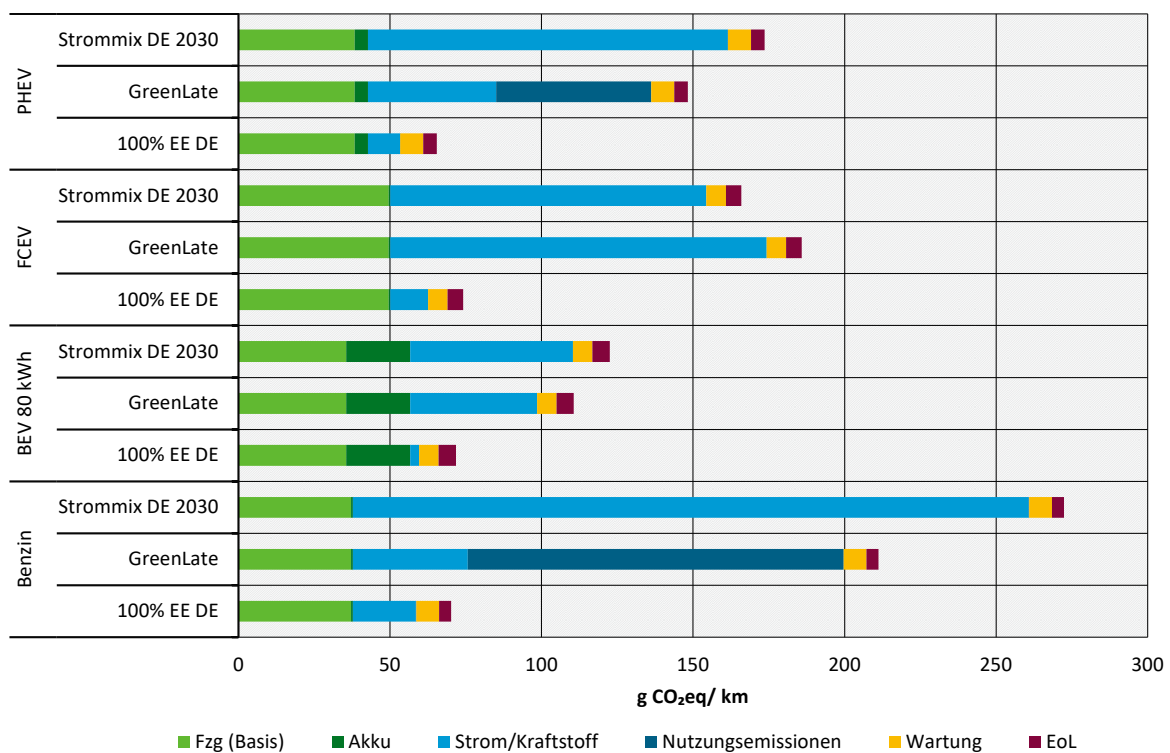
Der Vergleich mit dem als plausible Entwicklung angesehenen Szenario GreenLate und einer Produktion der erneuerbaren Kraftstoffe mit dem deutschen Strommix 2030 zeigt jeweils gleichzeitig das hohe Risiko einer Fokussierung auf die Nutzung von grünem Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe: Muss zur Produktion der Kraftstoffe der deutsche Strommix des Jahres 2030 eingesetzt werden, ist das Treibhauspotenzial deutlich höher als beim BEV. Gleiches gilt für das GreenLate-Szenario. Die Importoptionen setzen voraus, dass in den potenziellen Herkunftsländern nicht nur ein hohes Potenzial für die Erzeugung von erneuerbarem Strom besteht, sondern auch die entsprechenden Produktionskapazitäten sowie verlässliche, effiziente Transportwege für H₂ und PtG/PtL bis 2030 aufgebaut werden können.

Das Export-Potenzial ist zwar theoretisch groß, allerdings ist dieser Ansatz mit erheblichen geopolitischen Herausforderungen und neuen Abhängigkeiten verbunden. Zudem muss sichergestellt werden, dass neben dem wirtschaftlich und technisch anspruchsvollen Technologiehochlauf auch Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich politischer, sozialer und ökologischer Anforderungen eingehalten werden. Hierzu sollte insbesondere das Potenzial zur heimischen Nutzung des erneuerbaren Stroms im Produktionsland bereits genutzt werden, um die

lokale Energieversorgung zur Treibhausgasneutralität zu transformieren, bevor der Strom unter Energieverlusten in Wasserstoff oder PtL umgewandelt und exportiert wird.

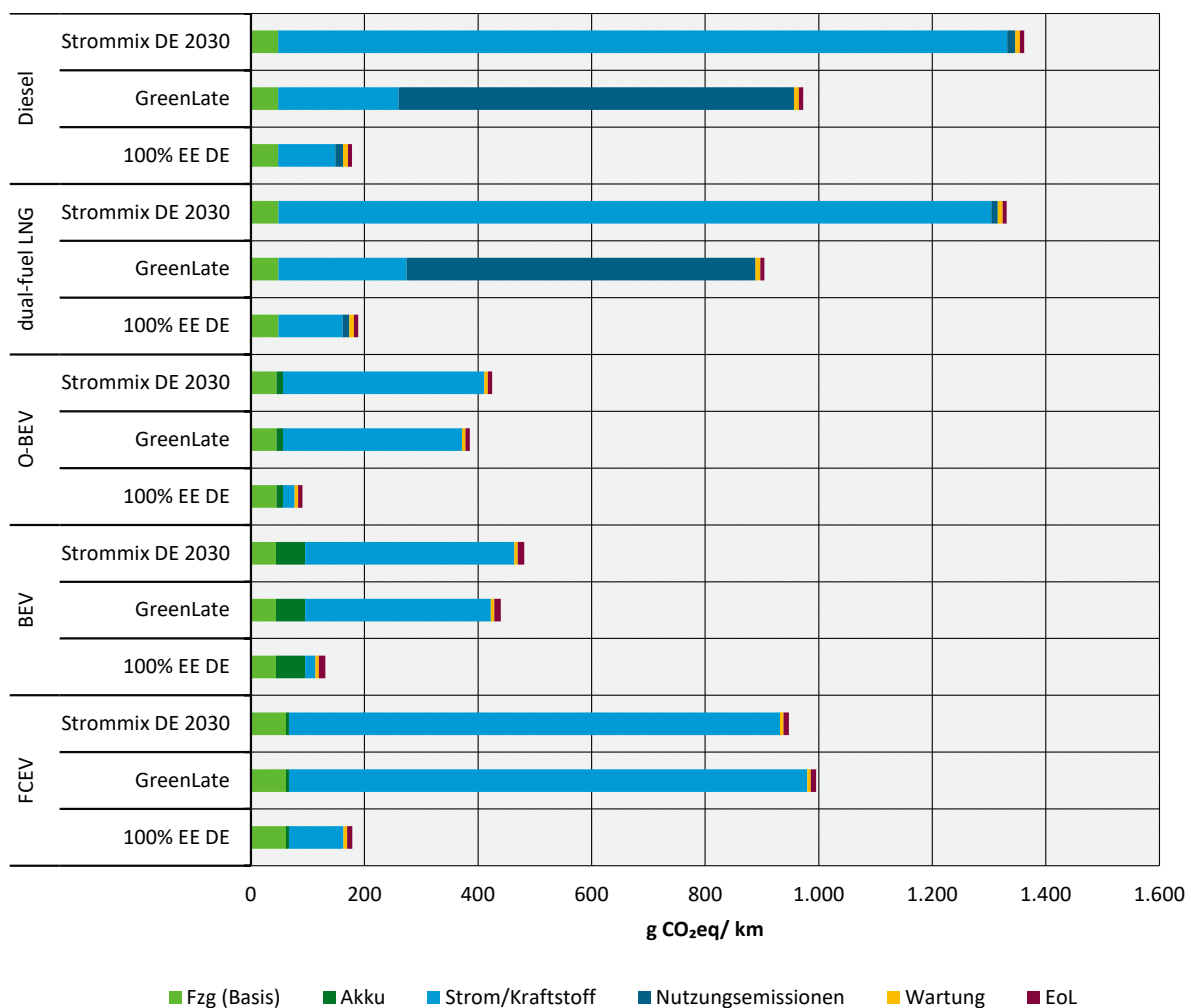
Ähnliche Risiken bestehen bei einer möglichen Produktion in Deutschland. Werden sowohl Wasserstoff als auch synthetische Kraftstoffe nicht mit zusätzlichen erneuerbaren Energien erzeugt, sondern mit dem Strommix fällt das Treibhauspotenzial sogar deutlich schlechter aus als bei fossil betriebenen Fahrzeugen. Genau deswegen sind in der europäischen Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED II und RED III) die Anforderungen für die Anrechnung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen auf die vorgegebenen Quoten für nachhaltige Kraftstoffe sehr hoch. Ein reiner Betrieb mit zusätzlichem erneuerbarem Strom in großen Mengen würde zu sehr hohen Kosten führen, so dass eine schnellere flächendeckende Einführung im Strom- bzw. Kraftstoffmix als in GreenLate angenommen, auch wirtschaftlich sehr unwahrscheinlich erscheint.

Abbildung 46: Treibhauspotenzial von strombasiert betriebenen Pkw mit Strommix 2030, reinem EE-Strom und dem gleitenden Mix nach GreenLate (Pkw Kompaktklasse, BJ 2030)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 47: Treibhauspotenzial von strombasiert betriebenen Sattelzügen mit Strommix 2030, reinem EE-Strom und dem gleitenden Mix nach GreenLate (Sattelzug, BJ 2030)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

3.5 End-of Life Optionen für gebrauchte Traktionsbatterien

3.5.1 EoL: Definition und Systematisierung

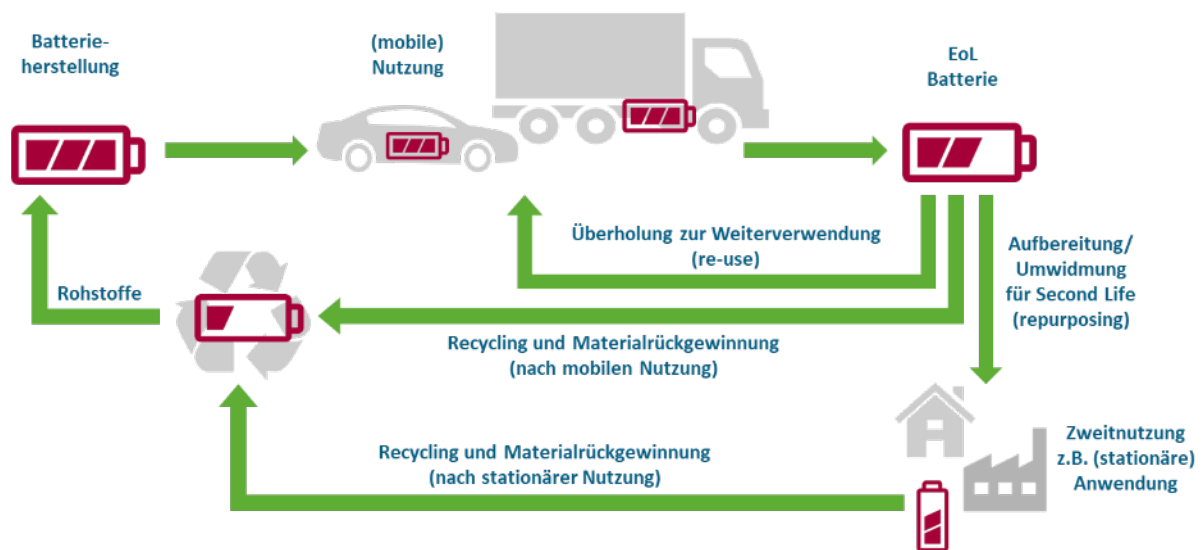
Traktionsbatterien sind die teuerste Komponente von Elektrofahrzeugen und haben einen Anteil von etwa 40 % (BEV Pkw mit 55 kWh Baujahr 2020) an der Klimabilanz der Fahrzeugherstellung. Ein effizientes Recycling oder eine sinnvolle Weiterverwendung von Traktionsbatterien nach der mobilen Nutzungsphase kann potenziell dazu beitragen Kosten und Emissionen der Nutzung im Fahrzeug zu mindern. Dafür bieten sich verschiedene Recyclingwege und Weiternutzungsoptionen an (End-of-Life Optionen, EoL), die unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen jeweils eine andere Kosten- und auch Ökobilanz haben. Diese Sensitivitätsbetrachtung soll daher einen zusammenfassenden Überblick über die Verwertungs- und Weiternutzungsstrategien von gebrauchten Fahrzeugakkus von Elektroautos und Lkw geben.

Der Akku unterliegt einer kalendarischen und einer zyklischen Alterung, die sich beide negativ auf die Kapazität auswirken. Sinkt die Kapazität auf ca. 70 % bis 80 % (State of Health) ist der

Betrieb im Elektrofahrzeug nach Expertenmeinung nicht mehr sinnvoll (Beverungen et al. 2019; Menne et al. 2019). Neuere Einschätzungen gehen allerdings davon aus, dass eine Minderung von 80 % der Reichweite insbesondere für Pkw noch gut tolerierbar ist. Der Grund dafür ist der hohe Reichweitzuwachs (Zhu et al. 2021) der letzten Jahre und unterschiedliche Bedarfsmuster im Gebrauchtwagenmarkt (Börner et al. 2022). Für Lkw liegt diese Toleranzgrenze sicherlich niedriger, da diese ab einer bestimmten Reichweitenbegrenzung nicht mehr ihre Serviceleistung erfüllen können.

Die Traktionsbatterie wird je nach Anwendungsfall und Kapazitätsminderung als unzureichend für mobile Anwendungen eingestuft. Sie hat jedoch nach einer Umwidmung (engl.: repurposing) potenziell noch einen Nutzen für andere Anwendungen, insbesondere im stationären Bereich. Somit hat der Akku nach seinem ersten Leben noch einen beachtlichen Marktwert, der aber eine große Bandbreite zeigt. In der Literatur werden Preise zwischen 40 €/kWh und 270 €/kWh genannt (Casals et al. 2019; Madlener und Kirmas 2017; Melin 2019). Aufgrund der deutlichen Preisreduktion von neuen Lithium-Ionen Akkus in den letzten Jahren ist die obere Grenze der Bandbreite unwahrscheinlicher geworden. Der Restmetallwert für einen NMC und LFP Akku wird von Neef et al. (2021) mit 18,6 € pro kWh bzw. 0,9 € pro kWh angegeben. In diesen Angaben ist allerdings noch keine Lithiumrückgewinnung berücksichtigt, sodass von einem höheren Restmetallwert zukünftig auszugehen ist.

Abbildung 48: Konzept der Akkunutzung nach Ende der ersten mobilen Anwendung



Quelle: eigene Darstellung ifeu.

Es werden verschiedene Nutzungspfade von EoL Traktionsakkus beschrieben, dabei ist es wichtig, einige Begriffe klar zu definieren (vgl. Abbildung 48):

- ▶ Die Weiterverwendung (engl.: **re-use**) von Traktionsbatterien beschreibt die komplette oder teilweise Nutzung für ihre ursprüngliche Erstanwendung nach einer technischen Überholung.
- ▶ Eine Zweitnutzung im Sinne von Second-Life beschreibt die Aufbereitung und Umwidmung (engl.: **repurpose**) der Traktionsbatterie oder Teile dieser für eine andere Anwendung (RECHARGE 2014). Hierfür kommt insbesondere die stationäre Anwendung in Frage. Es können theoretisch aber auch andere Konzepte im mobilen (z. B. Wohnwagen) oder semi-stationären (z. B. bewegliche Baustellenspeicher) Bereich eine Rolle spielen (Menne et al. 2019).

- Ist die weitere Verwendung des Akkus aus ökonomischen oder sicherheitsbedingten Gründen nicht mehr gegeben, erfolgt das **Recycling** und die Materialrückgewinnung unter gesetzlichen Auflagen hinsichtlich der Effizienz und stofflichen Nutzung.

Die europäische (und deutsche) Abfallgesetzgebung betont diesbezüglich eine Zielhierarchie im Umgang mit Abfällen. Hierbei ist nach der „Vermeidung“ (z. B. möglichst lange effektive Nutzung) die Wiederverwendung vor dem Recycling genannt. Eine Wiederverwendung im Sinne von Second-Life wäre entsprechend einem sofortigen Recycling nach dem automobilen Einsatz vorzuziehen.

3.5.2 Rechtlicher Rahmen zur EoL Behandlung von Traktionsakkus

Der konkrete Umgang mit EoL Traktionsakkus ist zwar primär ökonomisch motiviert, aber aus ökologischen und politischen Gründen auch durch eine Reihe von Gesetzen, Richtlinien und Normen reguliert. Reinhardt et al. (2016) haben 170 Gesetze und Richtlinien auf europäischer Ebene identifiziert, die dem Automobilssektor zuzuordnen sind und sich direkt oder indirekt auf Elektroautos und Traktionsbatterien beziehen. Hinzu kommen 230 potentiell einflussnehmende Gesetze im Energiesektor, die relevant für die Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsakkus als Energiespeicher sind. Diese und weitere Gesetze prägen die Ausgestaltung und den Handlungsspielraum der EoL-Strategien (Bräuer und Stieger 2019). Besonders zu betonen ist der aktuelle Vorschlag der EU zur Anpassung der Batterie-Verordnung⁸ (Procedure 2020/0353/COD). Tabelle fasst die wichtigsten deutschen Gesetze und Richtlinien in Bezug auf EoL Behandlung von Traktionsbatterien zusammen.

Tabelle 45: Übersicht zentraler Gesetze, Verordnungen und Übereinkommen zur End-of-Life Behandlung von Traktionsakkus

Bezeichnung	Bezug zur EU-Richtlinie	Bedeutung für Traktionsakkus
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	2008/98/EG	Definiert den Abfallbegriff und priorisiert Verwertungsverfahren
Batteriegesetz (BattG ⁹)	2006/66/EG	Klassifiziert Traktionsbatterien als Industriebatterien und definiert Rücknahmepflichten der Hersteller. Wird derzeit von der EU überarbeitet (Procedure 2020/0353/COD)
Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV ¹⁰)	2000/53/EG	Definiert auf Altfahrzeuge bezogene Zielvorgaben für Wiederverwendung und Verwertung sowie weitere Pflichten
Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)	2008/68/EG	Regelt den nationalen und internationalen Transport von Gefahrgut (wie etwa lithium-basierten Traktionsakkus) und bestimmt Rollen und Pflichten der Beteiligten sowie zu erfüllende Testanforderungen

⁸ COM (2020) 798: Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/HIS/?uri=CELEX:52020PC0798>

⁹ "Batteriegesetz vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 6 Absatz 10 des Gesetzes vom 13. April 2017 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist".

¹⁰ "Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 2. Dezember 2016 (BGBl. I S. 2770) geändert worden ist".

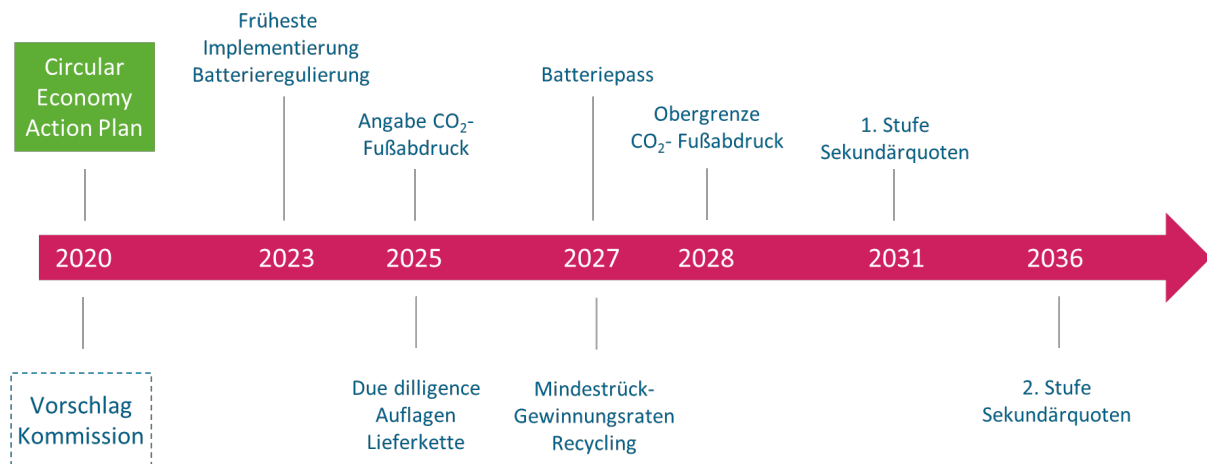
Nach der AltfahrzeugV müssen seit 2015 95 % des Fahrzeugleergewichtes wiederverwendet oder verwertet werden. Darunter fällt auch eine thermische Verwertung als Brennstoff. Mindestens 85 % müssen dabei jedoch wiederverwendet oder stofflich verwertet werden. In Bezug auf ein Akkurecycling sollte dabei jedoch beachtet werden, dass diese Wiederverwendung oder Verwertung nicht unbedingt in ein qualitativ vergleichbares Produkt münden muss (downcycling). Im BattG ist seit 2016 eine Sammelquote von 45 % vorgegeben und die Akkus im Recyclingprozess sind nach „Stand der Technik zu behandeln und stofflich zu verwerten“ (§ 14, BattG), dies entspricht mindestens einer Recyclingeffizienz von 50 % (Richtlinie 2006/66/EG) für die Kategorie „sonstige Batterien“, denen die Lithium-Ionen-Akkus zugeordnet werden. Sofern die Altfahrzeuge nicht in das EU-Ausland exportiert werden ist entsprechend mit einer hohen Sammelquote der Traktionsbatterien zu rechnen.

Das BattG ist noch nicht hinsichtlich der speziellen Eigenschaften der Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge angepasst. Hier sah bereits die EU 2019 Handlungsbedarf. Die Europäische Kommission legte Anfang 2019 einen Bericht über die Batterie-Richtlinie vor, in dem es heißt (Europäische Kommission 2019):

„Das übergeordnete Ziel der Richtlinie, ein hohes Maß an stofflicher Verwertung zu erreichen, wird jedoch nicht erreicht. Die Richtlinie betrifft nur zwei Stoffe -Blei und Cadmium -und lässt andere wertvolle Bestandteile wie Kobalt oder Lithium außer Acht. Darüber hinaus sind die Definitionen der Recyclingeffizienz nicht auf eine Erhöhung der stofflichen Verwertung ausgerichtet. Angesichts des technischen Fortschritts und der gewonnenen praktischen Erfahrungen kann der Schluss gezogen werden, dass die derzeitigen Mindestsammelziele für Geräte-Altballerrien und die Mindestanforderungen für das Recycling nicht angemessen sind. Daher sollten weitere Ziele für die Sammlung und das Recycling von Batterien in Betracht gezogen werden.“

Bereits 2020 machte die Europäische Kommission einen Vorschlag zur Modernisierung der EU-Rechtsvorschriften für Batterien (European Commission 2020). Dies war eine der ersten Initiativen im Zuge des neuen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (New Circular Economy Action Plan) im Hinblick auf die Verwirklichung der Ziele des europäischen Grünen Deals (European Green Deal). Der Vorschlag befasst sich mit den sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Fragen im Zusammenhang mit allen Typen von Batterien. Seitdem befindet sich der Vorschlag im laufenden ordentlichen Gesetzgebungsverfahren und wurde schon in mehreren Runden durch den Rat und weiterer betroffener Dienststellen diskutiert und angepasst. Es wird erwartet, dass er diesen Sommer im Parlament offiziell verabschiedet wird (European Parliament 2023). Mit der Verordnung wird ein allgemeiner Rechtsrahmen geschaffen, dem einige sekundäre Regulierungen (delegierte Rechtsakte und Durchführungsrechtsakte) folgen werden. Diese regeln weitere technische und methodische Details (z. B. Berechnungsvorschriften), damit die Verordnung in vollem Umfang umgesetzt werden kann.

Abbildung 49: Roadmap neue EU Batterie-Verordnung (Stand Juni 2023)



Quelle: angepasst nach (Neef et al. 2021).

Der aktuelle Bearbeitungsstand der EU Batterie-Verordnung¹¹ macht eine notwendige Unterscheidung weiterer Akkutypen für Fahrzeuge in Starterbatterie (SLI: starter, lightning or ignition), Traktionsbatterien ≤ 25 kg (LMT: light means of transport) und Traktionsbatterien > 25 kg (EV Battery). Somit werden nun angepasste Vorgaben nach Akkutyp in der Richtlinie bezüglich Recyclingeffizienz und -quoten gemacht. Sobald das neue Gesetz in Kraft tritt, werden die Nachhaltigkeitsanforderungen in Bezug auf den CO₂-Fußabdruck, den Recyclinganteil sowie die Leistung und Haltbarkeit ab dem Jahr 2024 schrittweise eingeführt (vgl. Abbildung). Neben der Angabe des CO₂-Fußabdruck des Akkus soll auch eine CO₂-Obergrenze ausgearbeitet und festgelegt werden. Wichtige technische Daten sollen in dem Batteriepass gesammelt werden, was eine Reparatur, Repurposing und das Recycling vereinfachen soll.

Ein umfassenderer Rahmen für die erweiterte Herstellerverantwortung (engl.: due dilligence) wird ab Mitte 2025 gelten. Alle gesammelten Akkus müssen recycelt werden und für ausgewählte Wertstoffe müssen Mindest-Rückgewinnungsquoten erreicht werden. Damit wird sichergestellt, dass wertvolle Materialien am Ende ihrer Nutzungsdauer zurückgewonnen und der Wirtschaft wieder zugeführt werden. Die Zielvorgaben für die stoffliche Verwertung von Kobalt, Nickel, Kupfer und Lithium liegen bei 90 % bis 2027 und bei 95 % bis 2031. Es werden außerdem die Sekundärquoten in einem zweistufigen Prozess für ausgewählte Aktivmaterialien angepasst (Tabelle 46).

¹¹ 14.02.2023, ST 6410 2023 INIT.

Tabelle 46: Vorgegebene Sekundäranteile in Aktivmaterialien des Akkus nach neuer EU-Batterie-Verordnung

	Co	Ni	Li	Pb
Erste Stufe, 96 Monate nach Inkrafttreten (vsl. 2031)	16 %	6 %	6 %	85 %
Zweite Stufe, 156 Monate nach Inkrafttreten (vsl. 2036)	26 %	15 %	12 %	85 %

Anmerkung: Stand April 2023.

Die Gefahrgutverordnung (GGVSEB) und das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) stellen in dem EoL-Prozess besondere Anforderungen an den Transport und vorzuhaltende Tests. Diese Auflagen haben starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von verschiedenen EoL-Strategien. Die besondere gesetzliche Behandlung von Akkus macht jedoch weitere Auflagen, was den Transport und die Behandlung von Abfall-Akkus betrifft. Der Fall der Aufbereitung und Umwidmung von Akkus für Second-Life Anwendungen wird in der aktuellen Gesetzgebung noch nicht hinreichend berücksichtigt und orientiert sich eher an der stofflichen Verwertung.

Aktuell ist die Frage nach der Haftung und Entsorgungsverantwortung für die Second-Life Akkus noch nicht hinreichend gesetzlich geklärt. Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz ist der (Akku-)Hersteller verantwortlich für sein Produkt und muss die Rücknahme sowie Entsorgung regeln („erweiterte Herstellerverantwortung“, EPR). Bisher ist noch unklar, ob eine Änderung der Akku-Besitzverhältnisse und die Pflicht zum Recycling an Produzenten von Second-Life Produkten übertragen werden können. Die neue EU Batterie-Verordnung schafft nun auch Klarheit bezüglich eines Wechsels des Verantwortlichen in Bezug auf die Pflichten der EPR. Es ist nun möglich, dass „Wirtschaftsakteure, die zur Wiederverwendung oder zur Umnutzung vorbereitete, umgenutzte oder wiederaufgearbeitete Batterien [...] als Hersteller dieser Batterien“ gelten und somit nun die EPR auf sie übergeht¹². Somit haften sie im Störfall für den Second-Life Akku und sind verpflichtet ein ordnungsgemäßes Recycling zu gewährleisten. Dies ist ein wichtiger Schritt, um Second-Life Anwendungen rechtlich abzusichern und zu ermöglichen.

3.5.3 Recycling von Traktionsbatterien

3.5.3.1 Status quo

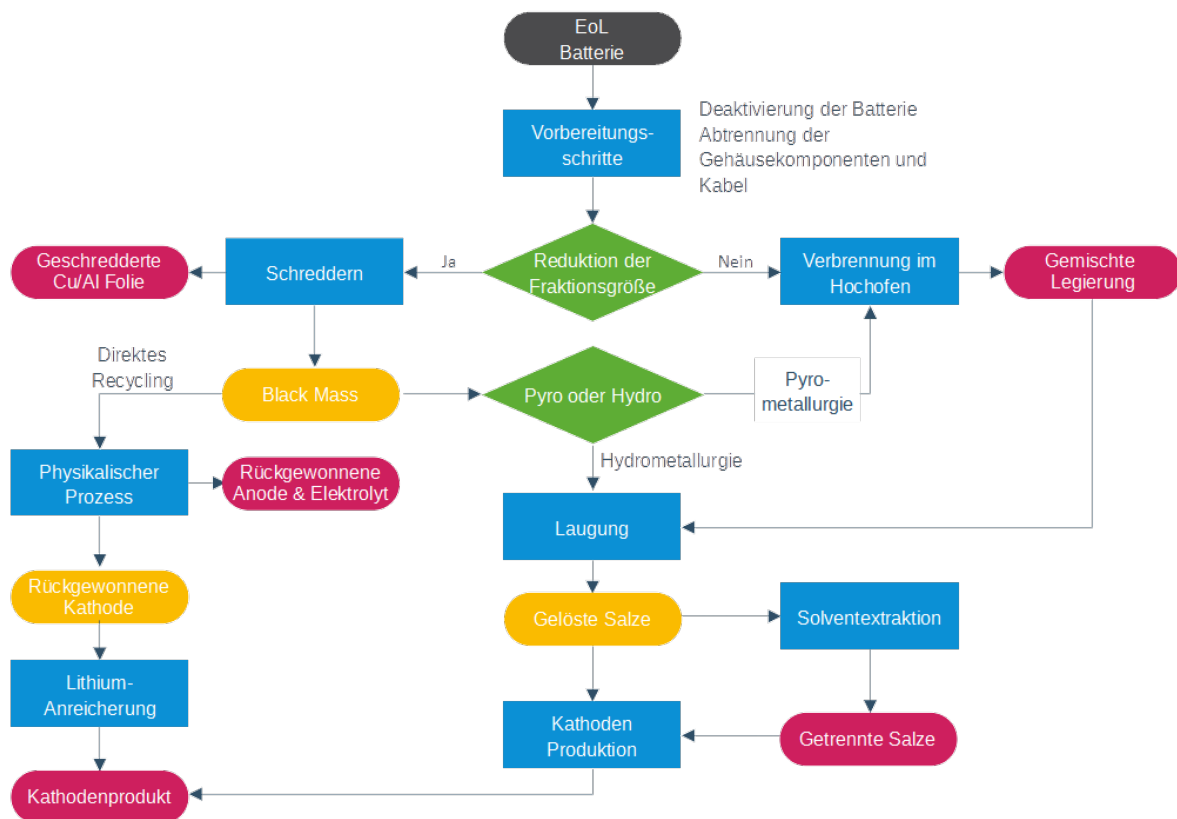
Sobald ein Akku das Ende seiner Verwendung erreicht hat und nicht mehr für eine Weiterverwendung geeignet ist, muss er nach gesetzlichen Vorgaben dem Recycling (und/oder der Beseitigung) zugeführt werden. Es gibt eine Vielzahl von Verfahrensschritten, die mittlerweile beim Akkurecycling eingesetzt werden, darunter auch die Vorbehandlung (einschließlich der Deaktivierung des Akkus). Diese lassen sich jedoch unter drei grundlegende Prozessarten zusammenfassen: Pyrometallurgie (Schmelzen), Hydrometallurgie (Laugung) und direktes Recycling (physikalische/mechanische Prozesse). Mittlerweile kommt es überwiegend

¹² 2020/0353(COD) - Batteries and waste batteries. Vom Parlament angenommener Text, 1. Lesung. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0237_EN.html (21.06.2023)

zu einer Kombination von Verfahrensschritten aus verschiedenen Prozessarten. Häufig kann jedoch noch der Schwerpunkt der Prozessart zugeordnet werden.

Abbildung 50 zeigt die Zusammenhänge zwischen den Prozessarten. Die einzelnen Verfahrensschritte können auf unterschiedliche Weise kombiniert werden, abhängig von Faktoren wie Menge und Eigenschaften des verfügbaren Inputmaterials sowie Menge und Wert der zu verwertenden Materialien (Gaines 2018; Sommerville et al. 2021; Wagner-Wenz et al. 2022).

Abbildung 50: Schematische Darstellung der Recyclingrouten



Blau: Verfahrensschritte, Grün: Entscheidung für Prozessart, Gelb: Zwischenprodukt, Pink: gehandelte Produkte
 Black Mass: Pulverisiertes Aktivmaterial (Gemisch).

Quelle: angepasst nach (Gaines 2018; Sommerville et al. 2021).

Der erste Verfahrensschritt, der für alle Prozessrouten gilt, ist die vorbereitende Behandlung. Hierzu zählt die Deaktivierung des Akkus (Entladung), Abtrennung des Gehäuses und ggf. die Zersetzung der organischen Bestandteile durch Pyrolyse (Wagner-Wenz et al. 2022). Es ist zu beachten, dass der heutige Inputstrom für das Akkurecycling noch stark von kleineren Akkus aus der Konsumerelektronik und Akkus aus der Mikromobilität (z. B. E-Bikes, Scooter) geprägt ist. In den nächsten Jahren ist allerdings damit zu rechnen, dass größere Mengen von Akkus aus Elektrofahrzeugen in den Inputstrom aufgenommen werden, was Einfluss auf die vorbereitenden Behandlungsschritte hat.

Als nächstes entscheidet sich, ob die Zellen direkt der pyrometallurgischen Prozessroute folgen und im Hochofen geschmolzen werden. Die **Pyrometallurgie** nutzt dabei hohe Temperaturen, um die Oxidations- und Reduktionsreaktionen zu erleichtern, bei denen Übergangsmetalle wie Kupfer, Kobalt und Nickel von Oxiden zu Metallen reduziert und in einer Mischmetalllegierung

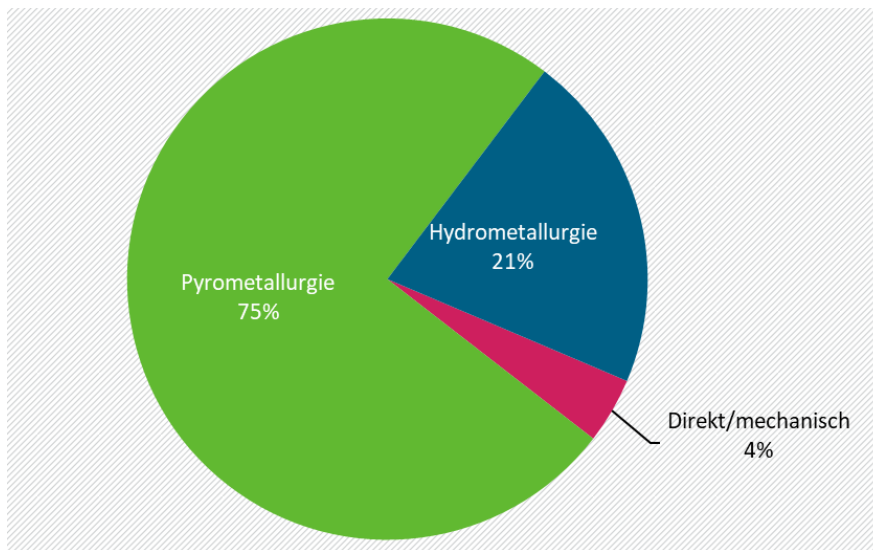
zurückgewonnen werden. Die Metalle können dann noch hydrometallurgisch getrennt und zur Herstellung eines neuen Kathodenmaterials verwendet werden. Andere Materialien, wie Aluminium, die Graphit-Anode und der Elektrolyt, werden in der Schmelze oxidiert und liefern einen Großteil der Prozessenergie. Die Lithiumoxide gehen in die aus dem Verbrennungsprozess verbleibende Schlacke über und wurden in der Vergangenheit aus ökonomischen Gründen nicht weiter zurückgewonnen. Die Schlacke wurde jedoch als Zuschlagsstoff von der Bauwirtschaft abgenommen. Die Vorgaben der neuen EU-Batterie-Richtlinie und die gestiegenen Rohstoffpreise für Lithium erfordern eine Rückgewinnung von Lithium aus der Schlacke, was verfahrenstechnisch möglich ist, jedoch einen weiteren Prozessaufwand nach sich zieht.

Soll nach den vorbereitenden Behandlungsschritten eine hydrometallurgische Prozessroute gewählt werden, müssen die Zellen zunächst geschreddert werden, um die Fraktionsgröße zu verkleinern. An dieser Stelle werden auch schon über mechanische Verfahren die Kupfer- und Aluminiumfolien zurückgewonnen. Übrig bleibt das pulverisierte Aktivmaterial (engl.: Black Mass). Es folgt nun die Behandlung der **Hydrometallurgie**. Sie verwendet Säuren, um die in der Schwarzmasse vorliegenden Wertmetalle herauszulösen und so eine mit den Wertmetallen angereicherte Lösung herzustellen. Diese können durch Fällung oder Solventextraktion gewonnen und mit anderen zurückgewonnenen Materialien in ein neues Kathodenmaterial überführt werden.

Die **direkte Rückgewinnung** trennt die verschiedenen Bestandteile des Aktivmaterials durch physikalische Prozesse (z. B. Schwerkrafttrennung). Die separierten Materialien können ohne chemische Veränderung zurückgewonnen werden, was die direkte Rückgewinnung von Kathodenmaterial mit minimaler Behandlung ermöglicht (Gaines 2018). Nach heutigem Stand der Technik ist das aber noch mit einem Qualitätsverlust verbunden, was zumindest einen Nachbehandlungsschritt zur Qualitätssteigerung erfordert (Zheng et al. 2018). Gleiches gilt für die Rückgewinnung des Elektrolyten und der Anode. Außerdem müssten die Zellen sortenrein nach ihrer chemischen Zusammensetzung recycelt werden, was weitere Anforderungen an die Trennverfahren im Recyclingprozess stellt. Da die Akkus etwa 15 Jahre in der Nutzung bleiben, bevor sie dem Recycling zur Verfügung stehen (Gaines 2018; Neef et al. 2021), können sich in dieser Zeit jedoch die Arten und Zusammensetzung der Kathodenmaterialien verändert haben. Die aktuell sehr dynamische Phase der technologischen Entwicklung der Akkumaterialien macht eine direkte Rückgewinnung des Aktivmaterials uninteressant (Experteninterview Prof. Dr. Friedrich). Dieses Recyclingverfahren ist in Zukunft sinnvoller, wenn sich die Zelltechnologie in ihrer Weiterentwicklung stärker eingeschwungen hat und Zellchemien länger fortbestehen.

Der Hauptgrund für das weitere Recycling von Lithium-Ionen-Akkus nach dem Schreddern der Zellen, war bisher die Rückgewinnung von wertvollen Rohstoffen (Kobalts und Nickel). In den letzten Jahren nahmen jedoch die Kobaltgehalte in den Zellen ab, um Kosten in der Produktion zu sparen. Zusätzlich wird nun der regulatorische Druck der EU höher (vgl. Kapitel 3.5.2). Damit besteht nun Handlungsbedarf weitere Materialien zurückzugewinnen. Nach heutigem Stand der Technik kann zwar theoretisch ein Großteil der Akkumaterialien zurückgewonnen werden, nicht alle Rückgewinnungsschritte sind jedoch ökonomisch oder ökologisch von Vorteil. In den letzten Jahren wurden insbesondere auf nationaler und europäischer Ebene Forschungsinitiativen ins Leben gerufen (z. B. LithoRec, Libri, EcoBatRec), um gegenüber dem schnell wachsenden Recyclingmarkt in Fernost nicht abgehängt zu werden. Der asiatische Recyclingmarkt profitiert von dem geringeren Lohnniveau und macht so sehr arbeitsintensive Prozessrouten wie das hydrometallurgische/direkte Verfahren rentabel.

Abbildung 51: Recyclingrouten nach globalen Kapazitäten



Datengrundlage: (Wagner-Wenz et al. 2022).

Trotz des hohen Energieeinsatzes, der hohen Verlusten und der besonderen Prozessanforderung in der Abgasnachbehandlung während der Pyrometallurgie ist dieser Prozess am weitesten verbreitet und ermöglicht große Kapazitäten von Einzelanlagen. Dies ist auf die hohe Flexibilität zurückzuführen und den nicht-selektiven Charakter des Prozesses (Baltac und Slater 2019; Zheng et al. 2018). Dieser Vorzug spiegelt sich in der globalen Verteilung der Recyclingrouten nach Kapazitäten wieder. Abbildung 51 zeigt, dass ca. 75 % auf das pyrometallurgische Verfahren, 21 % auf die Hydrometallurgie und nur 4 % auf direkte Recyclingrouten entfallen (Wagner-Wenz et al. 2022).

Höhere Effizienzen und eine größere Menge der zurückgewonnenen Materialien erreicht man mit der Hydrometallurgie. Hierbei besteht wiederum die Herausforderung, dass trotz des geringeren Energieeinsatzes die einzelnen Prozesse arbeitsintensiver sind und die Effizienz stark von der Qualität des Input-Materials abhängt. Außerdem werden große Mengen von Reagenzien für die chemischen Prozesse benötigt, was eine aufwändige Behandlung des Prozesswassers nach sich zieht. Dafür gehen bestimmte Materialien nicht als Prozessenergeträger verloren, wie etwa Graphit.

Einige Recycling-Unternehmen gehen bereits dazu über weniger einen ausschließlichen pyrometallurgischen oder hydrometallurgischen Pfad zu verfolgen, sondern individuelle Hybridverfahren zu entwickeln (z. B. EcoBatRec Verfahren von Accurec (Buchert / Sutter 2016a)) oder sich nur auf bestimmte Teilprozesse zu spezialisieren (Experteninterview Prof. Dr. Friedrich).

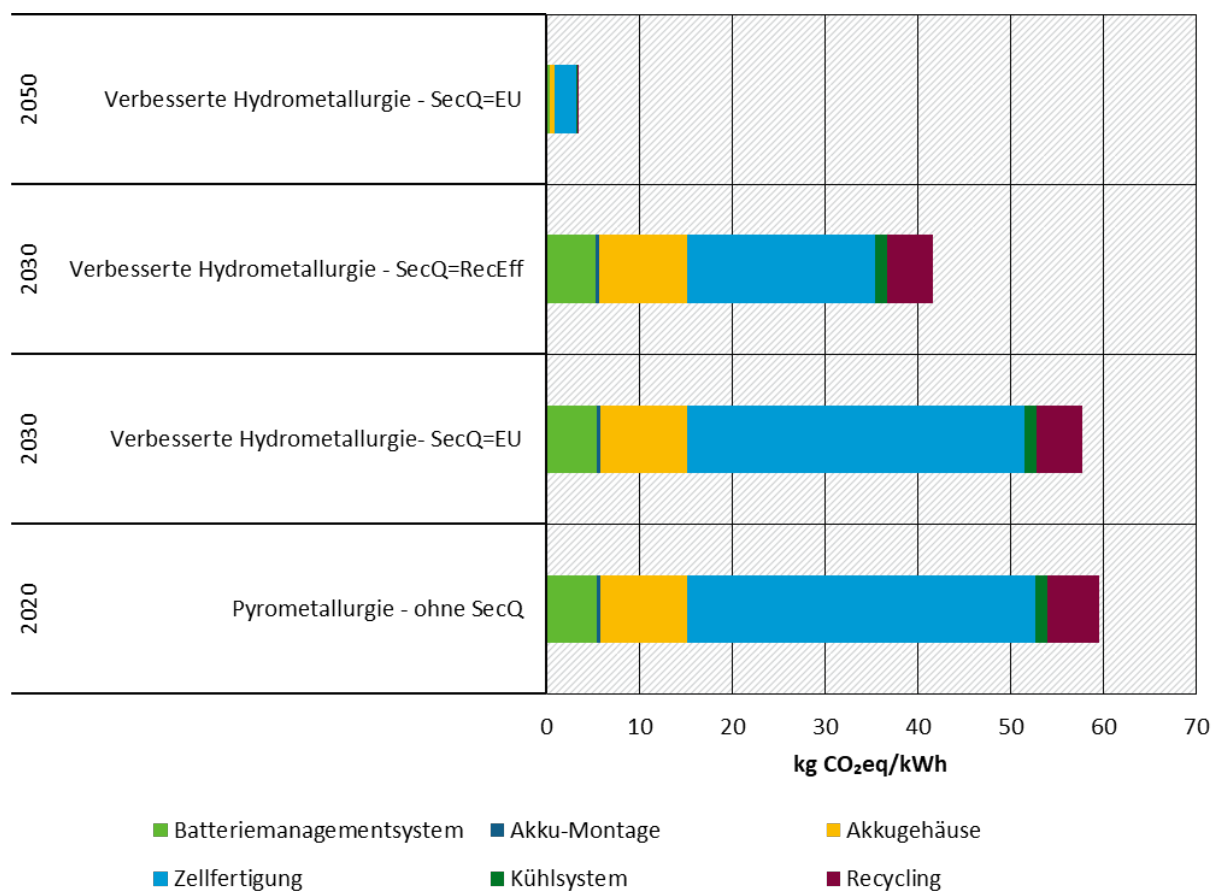
3.5.3.2 Ergebnis verbessertes Recycling

Die Quellen und Annahmen für die Umsetzung im Modell sind in Kapitel 2.4.4 beschrieben. Für die Bilanzierung des Recyclings der Traktionsbatterien wird ab den Szenarien 2030 das erweiterte hydrometallurgische Recycling angenommen. Abbildung 52 zeigt den Vergleich von THG-Emissionen nach unterschiedlichen Recyclingrouten und Annahmen zu Sekundärquoten. Das Szenario 2020 – Pyrometallurgie ohne Sekundärquote (ohne SecQ) ist als Referenzszenario zu betrachten, obwohl in den Gesamtergebnissen der Umweltbewertung für 2020 noch keine NMC-811 bilanziert wurde. Diese Festlegung dient in dieser Betrachtung dazu, den reinen Effekt durch das Akkurecycling darzustellen. Im Vergleich dazu schneidet das verbesserte

hydrometallurgische Recycling etwas besser ab als der Referenzfall. Dies ist auf eine leichte Verbesserung des Recyclingverfahrens zurückzuführen und auf die Einsparung an Primärmaterial, wie sie von der neuen EU Batterie-Verordnung ab 2030 vorgegeben ist (SecQ=EU). Somit ergibt sich eine Verbesserung von 3 % in der Klimawirkung gegenüber dem Referenzfall. Zur Verdeutlichung des gesamten Einsparpotenzials an Primärmaterial, welches sich theoretisch aus dem Recyclingprozess ergibt, wurde die Sekundärquote der entsprechenden Materialien mit der Recyclingeffizienz des Prozesses gleichgesetzt (SecQ=RecEff). In diesem Szenario ergibt sich eine Verbesserung von 30 % gegenüber dem Referenzfall. Diese Gutschriftbetrachtung wird üblicherweise als direkter theoretischer Vergleich von unterschiedlichen Recyclingverfahren verwendet. Da sich unsere Bilanzierung aber in eine Gesamtbetrachtung im Anwendungsfall einfügt, werden die Sekundärquoten über die Vorgaben der EU abgebildet. Selbst wenn sich bis 2030 eine gut funktionierende Kreislaufwirtschaft für Akkumaterialien etabliert, ist der Markt noch in der Hochlaufphase und der Materialbedarf vielfach höher als dies der Sekundärmarkt bedienen kann.

Die Modellierung für das Baujahr 2050 beinhaltet die defossilisierten Vorketten und lässt die Lasten des Recyclings auf 160 g CO₂eq pro kWh zusammenschrumpfen. Damit rücken Aspekte wie die geschlossene Kreislaufführung von Reagenzien aus den Laugungsprozessen und Wasseraufbereitung stärker in den Vordergrund. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Vorkettenemissionen aus den Prozessen (inkl. Stromvorketten) für 2020 und 2030 identisch sind, da das Hintergrundsystem nur für das Jahr 2050 angepasst werden konnte. Es ist daher davon auszugehen, dass der Unterschied zwischen 2020 und 2030 eine noch höhere Verbesserung hat aufgrund der fortschreitenden Verbesserung des Strommixes. Dieser Effekt wird noch weiter verstärkt, da die Akkus wahrscheinlich acht Jahre und mehr in ihrer mobilen Nutzung verbleiben, bevor sie einem Recycling zugeführt werden. Der Effekt eines verbesserten Strommixes über diesen Zeitraum konnte aufgrund von vorgegebenen Modelleigenschaften in dieser Betrachtung nicht abgebildet werden.

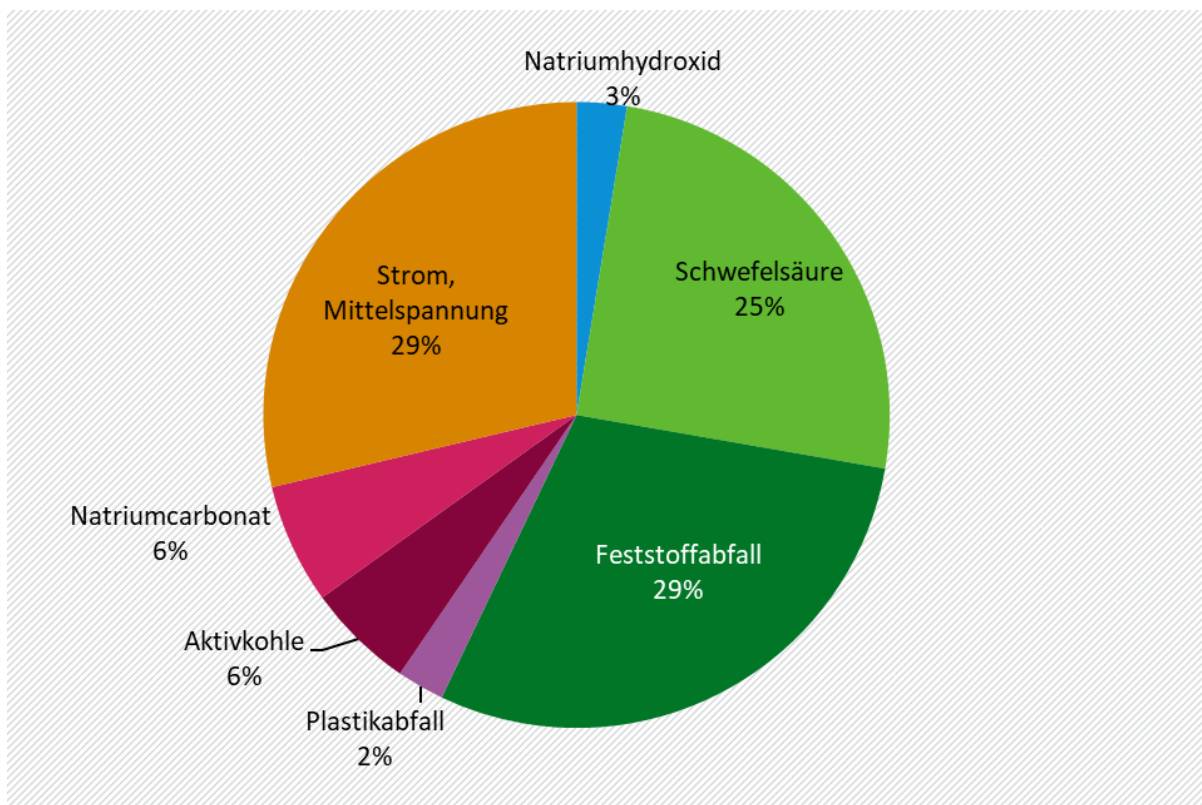
Abbildung 52: Vergleich THG-Emissionen nach unterschiedlichen Recyclingrouten und Annahmen zu Sekundärquoten auf Basis eines NMC811 Akkus



SecQ = Sekundärquote, EU = Vorgaben nach neuer EU Batterie-Verordnung (Stand April 2023), RecEff = Recyclingeffizienz
 Quelle: eigene Berechnung ifeu.

Abbildung 53 zeigt die genauere Analyse der THG-Emissionen innerhalb des Recyclingprozesses „Verbesserte Hydrometallurgie“. Neben dem Energieeinsatz für die einzelnen Verfahrensschritte (29 %) spielen ebenfalls zu jeweils einem Drittel die Reagenzien des Laugungsprozesses eine Rolle (insbesondere Schwefelsäure) aber auch die Abfallbehandlung von den stark belasteten Filtern und Rückständen aus den chemischen Prozesse. Dies macht deutlich, dass trotz der Reduktion des Energieeinsatzes im hydrometallurgischen Prozess noch eine sinnvolle Kreislaufführung der eingesetzten Chemikalien im Blick gehalten werden muss und die Auslegung des Prozesses eine Freisetzung von kritischen Substanzen wie beispielsweise Fluorwasserstoff vermeidet.

Abbildung 53: Verteilung der THG-Emissionen nach Prozessen und Inputmaterialien für das verbesserte hydrometallurgische Recyclingverfahren



Quelle: eigene Berechnung ifeu.

3.5.3.3 Ausblick und zukünftige Entwicklung

Die Recyclingindustrie von Akkus steht vor der Herausforderung ökonomisch rentable Prozesse zu entwickeln, welche die aktuellen Vorgaben zur Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft erfüllt. Hinzu kommt, dass die Entwicklung der Akkutechnologie von einem dynamischen Wandel betroffen ist. So konnte aufgrund der gestiegenen Nachfrage und des Wettbewerbs um neue Batterietechnologiestandorte die Investition in die Forschung stark gesteigert werden. Die signifikante Performance-Verbesserung gehen mit einer stetigen Anpassung der Zellechemie einher. Dabei wurde in der jüngsten Vergangenheit der Kobalt- und Nickelanteil zugunsten anderer Materialien reduziert, um Kosten einzusparen. Tatsächlich sind die aktuell operierenden Recyclinganlagen in der EU nur ökonomisch rentabel für Akkus mit einem hohen Anteil von Kupfer, Kobalt und Nickel. Derzeit werden schon an anderen Zellchemien geforscht, die auf andere und (ökologisch) günstigere Materialien setzen.

Das bedeutet für die Recyclingindustrie, dass sie ihre Prozesse möglichst flexibel plant, damit man in Zukunft gut auf sich verändernde Materialzusammensetzungen der Recyclingströme reagieren kann. Im Zuge der Experteninterviews wurde dargelegt, dass sich die Recyclingindustrie kaum nach reinen Prozessrouten wie pyrometallurgische, hydrometallurgische oder direkte Verfahren aufteilt. Vielmehr wird sich die Recyclingindustrie weiter differenzieren in einzelne Prozessanschnitte aufteilen und spezialisieren. Zwischenprodukte wie Akkuzellen oder die Black Mass (Schwarzmasse: Aktivmaterialgemisch der Zelle) können dann spezialisierten Recyclingfirmen zugeführt werden. So entscheidet sich dann anhand der zugrundeliegenden Zellchemie der Black Mass, ob eine pyrometallurgische, hydrometallurgische oder sogar ein direktes Verfahren gewählt wird und an welchem Standort das rentabel ist. Ein gutes Beispiel für diesen Erhalt der Flexibilität der Recyclingindustrie ist der

LFP-Akku. Dieser Akkutyp erlebt gerade eine Renaissance, nachdem Experten schon glaubten, ihn bald nicht mehr in der mobilen Anwendung zu finden. Wenn es gelingt, das Lithium über eine Pyrolyse und Auswaschung von der Black Mass zu trennen, macht es ökologisch und ökonomisch keinen Sinn den Materialrest noch weiter hydrometallurgisch aufzuarbeiten. Dabei muss jedoch die Recyclingquote von Lithium und dem Akku insgesamt erfüllt werden.

Hinsichtlich der Integration des Recyclings in die ökobilanzielle Betrachtung bedarf es in Zukunft bessere Industriedaten für die Einzelprozesse. In diesem Projekt wurde das Recycling bereits modular angelegt und es ist theoretisch möglich, die Prozesse einzeln zu bilanzieren und sogar einen Mix der Black Mass Behandlung einzustellen. Dafür sind jedoch desaggregierte Daten notwendig. Außerdem sollten Inventardaten vermieden werden, die den Labormaßstab hochskalieren. Dies ist leider heute noch aufgrund der mangelnden Industriedaten gängige Praxis.

Mit der bevorstehenden Verabschiedung der neuen EU Batterie-Verordnung wird es interessant sein zu analysieren, wie gut sich die Vorgaben umsetzen lassen und wie gut es dem Markt gelingt, die Sekundärmaterialien in den Fertigungsprozess zu holen. Es stellt sich hier die Frage, ob damit tatsächlich die Sekundärmaterialproduktion gesteigert wird oder, ob es zu noch nicht absehbaren unerwünschten Effekten am Markt kommt. Außerdem bleibt es spannend, zu sehen, ob es die EU neben Ost-Asien schafft, einen wettbewerbsfähigen Markt für Zellfertigung und Akkurecycling zu etablieren, in dem die nun geschaffenen ökologischen Vorgaben gelten.

3.5.4 Second-Life Anwendung von Traktionsbatterien

Die EoL-Option Aufbereitung/Umwidmung der Traktionsbatterie für einen anderen (stationären) Anwendungsbereich ist nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz einem Recycling vorzuziehen, da längere Nutzung mit ökologischen Vorteilen einhergeht. Damit werden Umweltwirkungen aus der Produktion gesenkt und Ressourcen gespart. Der ökonomische und ökologische Nutzen ist jedoch stark durch den Aufbereitungsaufwand beschränkt. Dieser Aufwand muss geringgehalten werden. Die neuen Vorgaben der EU Batterie-Verordnung bezüglich des Batteriepass sind eine notwendige Hilfestellung, da hier technische Informationen zur Verfügung gestellt werden müssen und auch neue Prüfergebnisse und Sicherheitstest des gebrauchten Akkus hinterlegt werden können. Es kann auch ein neuer Batteriepass mit Verknüpfung zum Vorgänger aufgesetzt werden (Artikel 77 und Anhang XIII¹³). Nichtsdestotrotz gelten Akkus weiterhin im Transport als „Gefahrgut“, was zu einem zusätzlichen Arbeitsaufwand führt, da bestimmte Vorgaben bei einem Gefahrguttransport eingehalten werden müssen. Nicht zu verachten ist der Aspekt, dass gebrauchte Akkus durch die kalendarische Alterung ein höheres Risiko für Defekte haben. Dieses Risiko soll zwar durch Tests und Prüfzyklen in der Aufbereitung gemindert werden. Der neue Anwendungsbereich sollte aber höhere Sicherheitsstandards bezüglich des Brandschutzes erfüllen, die eher in der gewerblichen Nutzung umgesetzt werden können. Das schränkt die Anwendungsfelder in der privaten Nutzung ein. Versicherungsrelevante Fragestellungen spielen hier auch eine wichtige Rolle, falls es zu einem Zwischenfall kommt.

Das Konzept des Second-Life von Traktionsbatterien von Pkw wurde insbesondere vor 2020 in der Wissenschaft und Industrie diskutiert. Die meisten Publikationen befassen sich mit Szenarien für zukünftig erwartete Akkukapazitäten und den ökonomisch sinnvollen Anwendungsfeldern. Neben einigen Forschungsvorhaben entstanden zunehmend auch konkrete Pilotvorhaben, die verstärkt von den Automobilherstellern selbst vorangetrieben wurden (vgl.

¹³ 2020/0353(COD) - Batteries and waste batteries. Vom Parlament angenommener Text, 1. Lesung. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0237_EN.html (21.06.2023)

Tabelle 47). Dabei kommt es zu Kooperationen der Automobilhersteller sowohl mit Speichersystementwicklern als auch mit Recycling-Unternehmen. Aus deutscher Sicht sind insbesondere die Aktivitäten von BMW und Daimler hervorzuheben, die sowohl Pilotprojekte für Speicher im Stromnetz als auch für gewerbliche und industrielle Speicher gestartet hatten (Daimler AG 2016a; Rößiger 2018; Schwierz 2017). Auch Volkswagen und Audi haben den Einsatz von Second-Life Akkus in Speichern und anderen Anwendungen untersucht (Audi AG 2019; Volkswagen AG 2018). Damit werden die Autobauer über Tochterunternehmen und Joint Ventures zunehmend Akteure auf dem nationalen und internationalen Energiemarkt für die Entwicklung von Speichersystemen (BMW Group 2016; Daimler AG 2016b, 2019). In den letzten Jahren gibt es außerdem verstärkt Aktivitäten der Autohersteller direkt in den Recyclingmarkt als Akteur einzusteigen¹⁴.

In den letzten Jahren hat sich die Diskussion von Second-Life Akkus aus dem Pkw-Segment deutlich abgeschwächt. Grund dafür sind die stark fallenden Preise für neue Akkus und die größere Toleranz gegenüber einer Reichweitenreduktion im Pkw-Segment. Daraus ergibt sich, dass der Marktpreis für ein gebrauchtes Elektrofahrzeug mit reduzierter Reichweite gegenüber einem umgenutzten Akku in der stationären Anwendung noch deutlich höher ist. Außerdem weisen die Traktionsbatterien von Pkw eine geringere Zyklenfestigkeit im Bereich von 500 bis 800 Zyklen auf. Dieser Bereich ist für die private Mobilität völlig ausreichend, für stationäre Speicher jedoch nicht (Experteninterview Prof. Dr. Sauer).

Es gibt theoretisch noch andere rentable Inputströme für Second-Life aus mobilen gewerblichen Anwendungen mit sehr großen Akku-Kapazitäten. Dazu zählen insbesondere Traktionsbatterien aus Lkw und Fährschiffen. Diese Akkus könnten in einer relevanten Menge anfallen, da die Toleranz gegenüber einer Reichweitenreduktion aktuell in diesem Segment kaum gegeben ist¹⁵. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bestimmte Reichweiten zur Erfüllung der Serviceleistung vorgegeben sind. Hinzu kommt, dass es sich um relativ großformatige Akkus handelt, bei denen sich die Spezialisierung eines Umwidmungsprozesses lohnt. Die größere Diversität der Akkus im Pkw-Segment erschwert einen standardisierten Umwidmungsprozess (Experteninterview Prof. Dr. Sauer).

Tabelle 47: Auswahl Second-Life Strategien der Automobilhersteller

Hersteller	Second-Life Strategien
BJEV	Ladestationen, Notstromversorgung
BMW	Energiespeicher für das Stromnetz, stationärer Stromspeicher
BYD	Energiespeicher für das Stromnetz, Notstromversorgung
Chengan	Notstromversorgung
Daimler	Energiespeicher für das Stromnetz, Gewerbliche und industrielle Energiespeicher
General Motors	Wiederaufbereitung
Great Wall Motor	Notstromversorgung
Hyundai	Energiespeicher für das Stromnetz, gewerbliche und industrielle Energiespeicher
Nissan	Wiederaufbereitung, gewerbliche und industrielle Energiespeicher, Ladestationen

¹⁴ Unter anderem Mercedes-Benz (Mercedes-Benz Group 2023), Volkswagen (Volkswagen Group 2021), Renault (Renault 2022).

¹⁵ Mit fortschreitender Digitalisierung kann jedoch zukünftig von einer intelligenteren Disposition ausgegangen werden, sodass auch Lkw mit unterschiedlichen Reichweiten optimaler eingesetzt werden können.

Hersteller	Second-Life Strategien
Mitsubishi	Gewerbliche und industrielle Energiespeicher
PSA	Gewerbliche und industrielle Energiespeicher
Renault	Ladestationen, Energiespeicher für Wohngebäude, Energiespeicher für das Stromnetz
Tesla	Wiederaufbereitung
Toyota	Gewerbliche und industrielle Energiespeicher, Energiespeicher für das Stromnetz (bisher Nickel-Metallhydrid)
SAIC	Notstromversorgung
Volkswagen (Audi)	Gewerbliche und industrielle Energiespeicher
Volvo und Volvo Cars	Energiespeicher für Wohngebäude
Yin-Long	Notstromversorgung, gewerbliche und industrielle Energiespeicher

Quelle: Angepasst nach (Melin 2019).

Theoretisch bietet sich ein breites Feld an Anwendungsfeldern für Second-Life Akkus an. Aus wirtschaftlicher und sicherheitsrelevanter Sicht hat sich dieses Feld hingegen früherer Studien ziemlich reduziert (vgl. Abbildung 54). So gingen noch einige Experten von der besonderen Relevanz des Anwendungsfeldes „Erhöhung des Eigenverbrauches von erneuerbaren Energien im privaten Bereich“ aus (Casals et al. 2017; Fischhaber et al. 2016; Menne et al. 2019; Reid und Julve 2016). Dabei geht es um die Kombination von eigener PV-Anlage mit direkter Zwischenspeicherung von überschüssig erzeugter Energie und deren Ausspeicherung zu Zeiten hohen Energiebedarfs. Die sinkenden Akkupreise für stationäre Speichersysteme und der erhöhte Sicherheitsbedarf im privaten (Wohn)bereich macht Second-Life Akkus unattraktiv. Hinzu kommt, dass die Zyklenlebensdauer von aktuellen Traktionsbatterien zu klein ist für ein Hausspeichersystem. Außerdem machen die Zellen nur einen geringeren Anteil an den Gesamtkosten für ein Hausspeichersystem gegenüber den Zellen in einer Traktionsbatterie aus. Die Ersparnis durch eine gebrauchte Zelle schlägt sich deshalb nicht so deutlich im Gesamtpreis nieder. Tatsächlich ist es wahrscheinlicher, dass die direkte Nutzung des Fahrzeugakkus bei eigener PV-Anlage zunehmen wird. Die Speicherkapazität von Fahrzeugakkus übersteigt Hausspeicher um das Fünf- bis Zehnfache und ist im Elektroauto bereits vorhanden (Experteninterview Prof. Dr. Sauer).

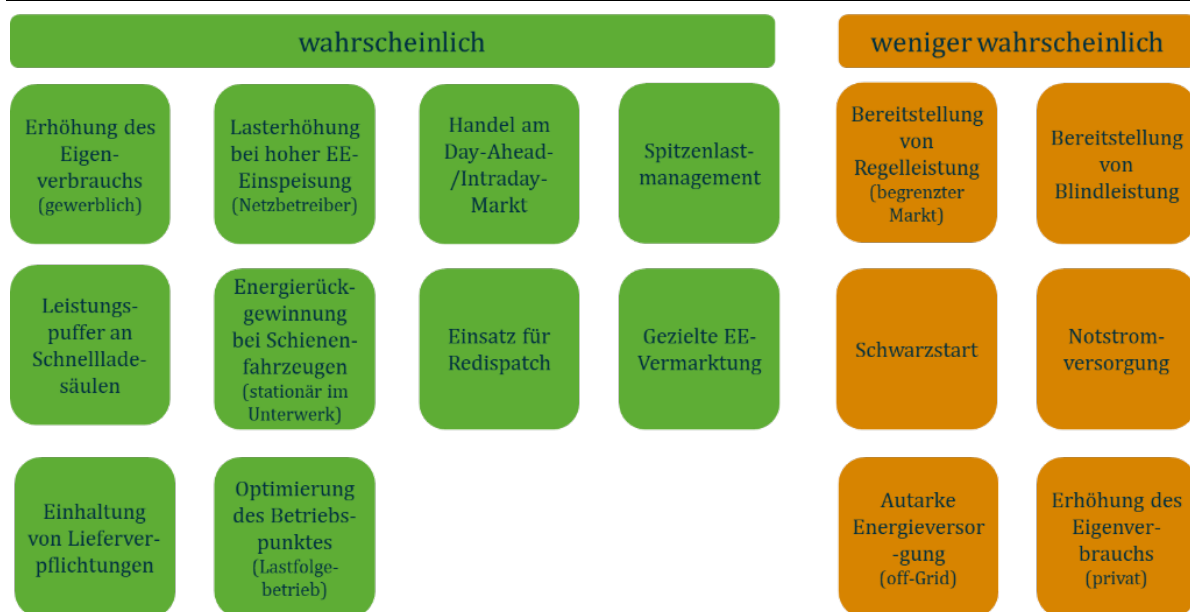
Auch der Einsatz für die Erhaltung der Primärregelleistung im Energiesystem wird nicht mehr als bedeutendstes Anwendungsfeld diskutiert. Das hängt damit zusammen, dass das Anwendungsfeld nur überschaubare Mengen zukünftig abnehmen kann. Der Markt für Primärregelleistung umfasst in Deutschland rund 600 MW mit abnehmender Tendenz seit 2019 (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2022). Dieser Bedarf ist bereits weitgehend durch bestehende Speicher abgedeckt (insb. Pumpspeicherkraftwerke). Selbst wenn theoretisch der ganze Markt durch Speicher aus gebrauchten Traktionsbatterien¹⁶ deckt wird, würde dies nur ca. 12.000 Fahrzeuge umfassen. Gemessen an dem Gesamtfahrzeugmarkt und der zukünftigen

¹⁶ Unter der Annahme von 50 kWh verbleibender Kapazität pro Fahrzeugakku.

Elektrifizierung der Fahrzeuge ist selbst diese maximale theoretische Menge irrelevant klein um als bedeutendes Anwendungsfeld zu gelten (Experteninterview Prof. Dr. Sauer).

Als besonders relevant aus wirtschaftlicher Sicht ist der Einsatz von Akkuspeichern in gewerblichen Speichersystemen zur Erhöhung des Eigenverbrauchs, Verschiebung des Lastbedarfs über den Speicher in Zeiten hoher EE-Einspeisung, Leistungspuffer an Schnellladesäulen, Spitzenlastmanagement und Energierückgewinnung bei Schienenfahrzeugen (stationär im Unterstellwerk) (Experteninterview Prof. Dr. Sauer). Die Bedeutung von Second-Life Akkus als Energiespeicher für das Stromnetz hat in der aktuellen Diskussion abgenommen. Die sinnvollere Integration wäre laut Experten die direkte netzdienliche Einbindung der Fahrzeugakkus in das Energiesystem über ein intelligentes „Vehicle-to-Grid“ Konzept. Bereits 2021 waren 32 GWh in rein batterieelektrischen Fahrzeugen (8 GWh in PHEV) in Deutschland verbaut. Damit ziehen die Akkus in den BEV und PHEV Systemen mit den derzeit etwa 39 GWh an Pumpspeicherkraftwerken gleich (Hecht et al. 2022). „Bis 2030 könnte so ein steuerbares Potenzial von dutzenden bis hunderten Gigawatt entstehen, das die Spitzenlast im Stromsystem übersteigen dürfte“ (Hecht und Figgner 2021).

Abbildung 54: Anwendungsfelder für gebrauchte Traktionsbatterien



Anmerkung: Dabei bedeutet „wahrscheinlich“ unter der Einschränkung, dass SecondLife-Akkus über ihre Restlebensdauer günstigere Lebenszykluskosten aufweisen als Neuaakkus.

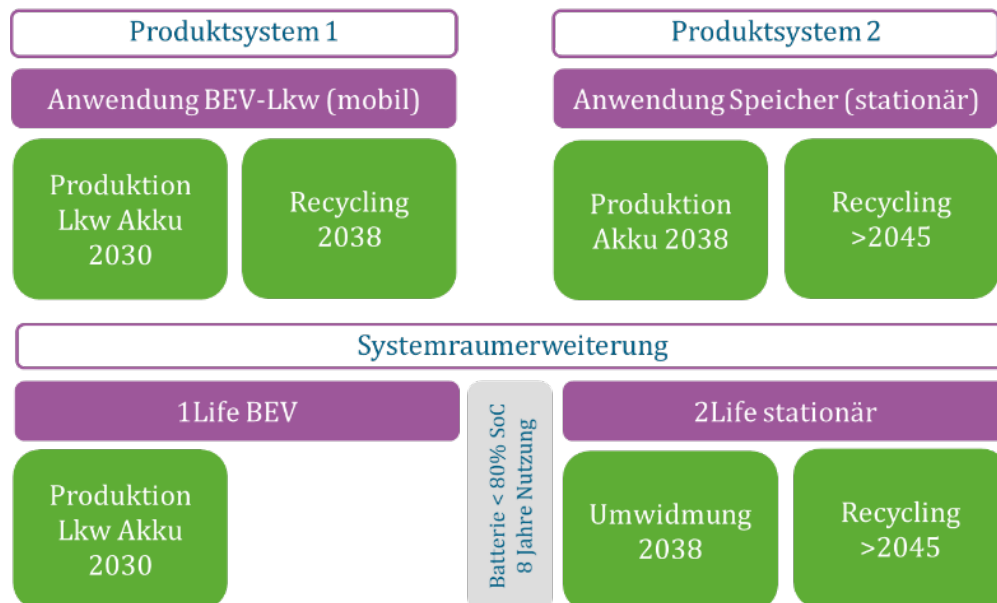
Quelle: eigene Darstellung nach (Experteninterview Prof. Dr. Sauer).

3.5.4.1 Sensitivitätsanalyse Second-Life von Lkw Akkus

Diese Sensitivitätsanalyse soll die EoL Option „Umwidmung eines Lkw-Akkus“ für eine andere Anwendung darstellen und somit eine Verlängerung der Lebensdauer dieses Produktsystems. Abbildung 55 ist eine schematische Darstellung der beiden Vergleichsszenarien. Das Referenzszenario ist die Annahme von zwei getrennten Produktsystemen, das zwei Neuaakkus für die mobile und stationäre Anwendung bilanziert (vgl. Abbildung 55). Das erste Produktsystem beschreibt die Herstellung und das Recycling eines Lkw Akkus (NMC811) mit 876 kWh installierter Kapazität für das Produktionsjahr 2030. Ein Recycling wird nach acht Jahren Fahrzeuglebensdauer bilanziert. Es wird davon ausgegangen, dass der Akku nach dieser Zeit noch 80 % seiner Kapazität besitzt. Das entspricht ungefähr 700 kWh. Das zweite

Produktsystem ist ein stationärer Speicher im gewerblichen Betrieb. Dieser wird 2038 produziert und nach 2045 recycelt. Für diesen Speicher wird der gleiche THG-Faktor pro kWh bilanziert. Dies folgt der vereinfachten Annahme, dass der stationäre Speicher zwar eine geringere Energiedichte aufweist (z. B. LFP- oder Natriumzellen), die Bilanz jedoch von einem verbesserten Energiemix in der Herstellung profitiert. Diese beiden Produktsysteme werden als Referenzszenario mit einem Szenario „Systemraumerweiterung durch Second-Life Akkus“ verglichen, welches nur eine Akku-Produktion und ein Recycling über zwei Anwendungen bilanziert. Hinzu kommt noch der Aufwand des Umwidmungsprozesses.

Abbildung 55: Konzept Bilanzierung Second-Life mit Systemraumerweiterung



Quelle: eigene Darstellung ifeu.

Das Ergebnis fällt für das Treibhausgaspotenzial sehr deutlich zugunsten der Second-Life Option (-45 %) gegenüber dem Referenzfall mit zwei Neuakkus aus. Diese Emissionsreduktion ist höher als erwartet und hängt mit den geringen Lasten aus dem Umwidmungsprozess zusammen, die in der Literatur mit nur 3 % verglichen mit den Treibhauspotenzialen aus der Produktion angegeben sind (Bobba et al. 2018). In dieser Betrachtung könnte der Aufwand aus der Umwidmung bis zu 92 % der Emissionen aus der Akku-Produktion betragen, um gegenüber dem System mit zwei Neuakkus noch einen Vorteil beim Treibhauspotenzial zu haben.

In der Second-Life Option wird die Klimawirkung auf die beiden Anwendungen nach einer ökonomischen Allokation verteilt. Dabei wird die Preisentwicklung von Akkus für 2030 mit einer neuen Akkutechnologie für stationäre Speichersysteme (2038) ins Verhältnis gesetzt. Für 2030 wird von einem Preis von unter 100 € pro kWh ausgegangen (BloombergNEF 2022). Für den stationären Speicher wird die Preisentwicklung von Natrium-Akkus mit 40 bis 50 € pro kWh berücksichtigt (Experteninterview Prof. Dr. Sauer, (Osmanbasic 2022)). Daraus ergibt sich eine Verteilung der Klimawirkung der Akku-Produktion zu ungefähr zwei Drittel (32 t CO₂eq) auf die mobile Anwendung und zu einem Drittel (15 t CO₂eq) auf die stationäre Anwendung.

Insgesamt ist die Systemraumerweiterung mit der Second-Life Option deutlich klimaschonender als die Referenzbetrachtung mit zwei Neuakkus. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Fall sehr starken ökonomischen Restriktionen unterliegt, da insbesondere der Arbeitsaufwand in Personalkosten die Umwidmung des Akkus bestimmt und weniger der Energieeinsatz. So gibt

Rallo et al. (2020) Arbeitskosten von 90 \$ pro kWh allein für die Rückgewinnung der Zellen an. Das liegt ungefähr in der Dimension der Preise für neue Akkus nach 2030 (BloombergNEF 2022). Damit sich diese Option lohnt muss der Prozess zu einem Großteil standardisiert und automatisiert ablaufen und der Inputstrom möglichst homogen sein.

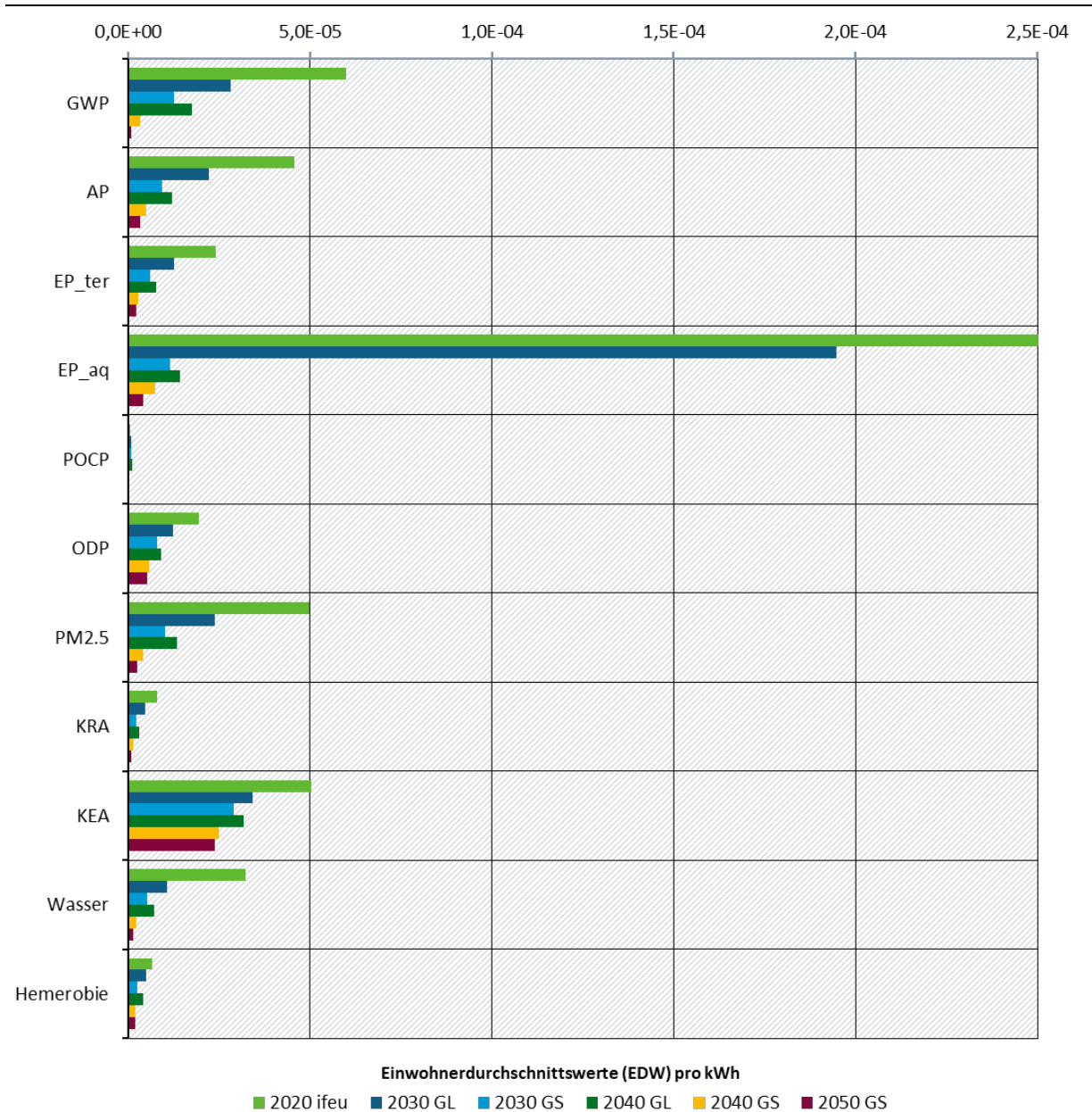
4 Detailergebnisse und Beitragsanalyse

4.1 Kraftstoff- und Strombereitstellung

4.1.1 Netzstrommixe

Die deutschen Netzstrommixe werden als Standardfall in dieser Studie für den Antrieb von Elektrofahrzeugen sowie für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen im Jahr 2050 eingesetzt. Ihr Treibhauspotenzial wird bereits in Kapitel 3.1 dargestellt und diskutiert. Abbildung 56 zeigt den Überblick über alle Wirkungskategorien.

Abbildung 56: Normierte Ergebnisse der Netzstrommische im Jahr 2020 und den Szenariojahren 2030, 2040 (GreenLate (GL) und GreenSupreme (GS)) und 2050 (GreenSupreme (GS)) in Einwohnerdurchschnittswerten pro kWh



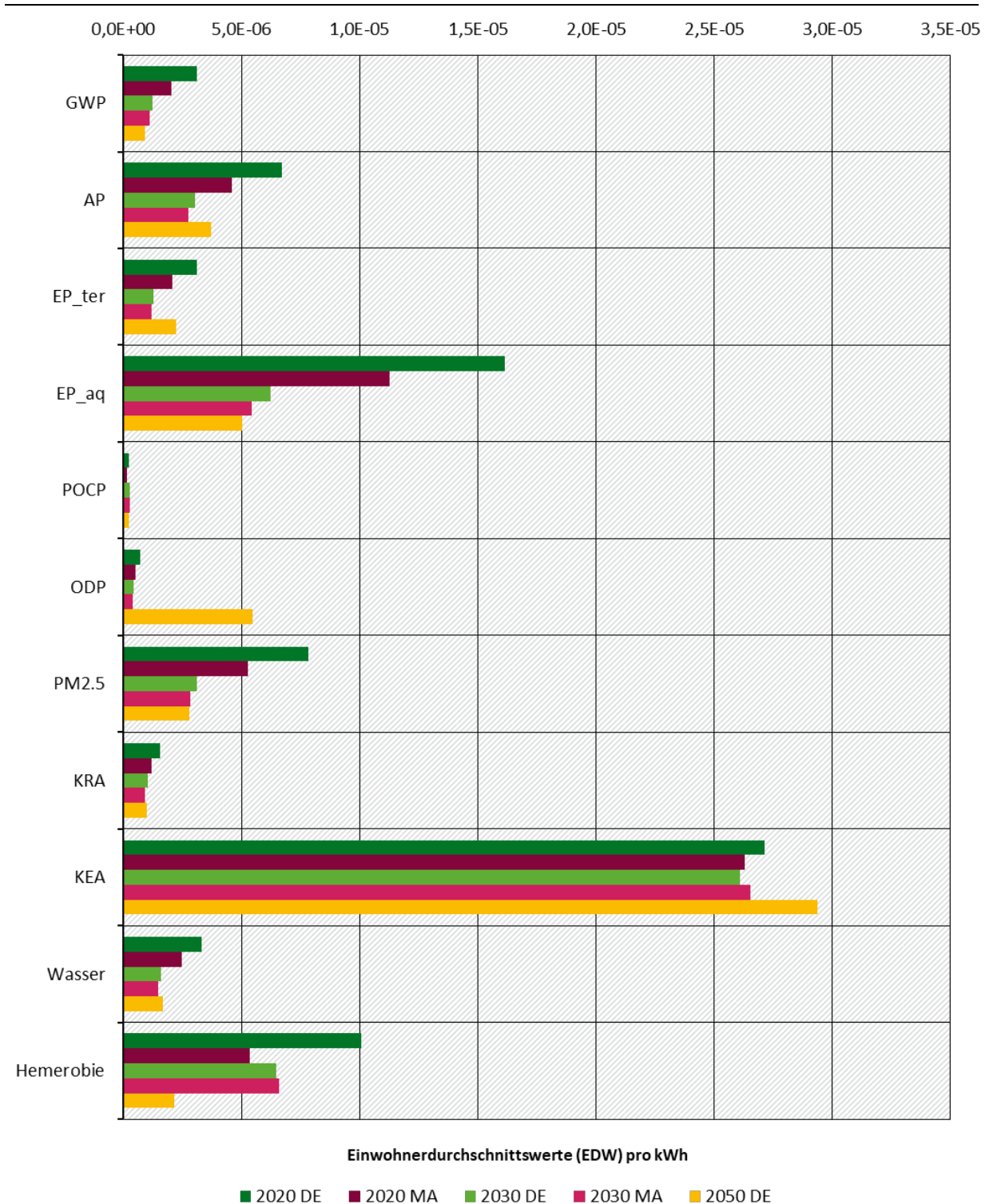
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Umweltwirkungen sind 2020 und im Szenario GreenLate auch 2030 noch stark durch den fossilen Anteil, insbesondere aus der Kohleverstromung, bestimmt. So tragen Auswaschungen aus dem Kohlebergbau die größten Lasten in der Kategorie aquatische Eutrophierung bei. Auch zur Versauerung und zur Feinstaubbelastung trägt Strom aus Kohle erheblich bei. Emissionen aus der Kupfergewinnung und -verarbeitung spielen bei der Versauerung ebenfalls eine signifikante Rolle (siehe Kapitel 4.3.2.3). Im Jahr 2050 sind im Szenario GreenSupreme in vielen Wirkungskategorien die Werte auf unter 10 % derjenigen von 2020 gesunken. Nicht ganz so stark ist der Rückgang in den Kategorien POCP, ODP und Hemerobie, die aber – bezogen auf die heutige Gesamtbelastung in diesen Kategorien – weniger wichtig sind. Der kumulierte Energieaufwand der Netzstromerzeugung sinkt auf rund die Hälfte.

4.1.2 Erneuerbare Strommixe

Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in den Jahren vor 2050 werden in dieser Studie Mixe von erneuerbaren Stromquellen eingesetzt, die sich für Deutschland und den modellierten Auslandsstandort Marokko unterscheiden. Die Zusammensetzung der Mixe ist in Kapitel 2.5.3 beschrieben und ihr Treibhauspotenzial wird bereits in Kapitel 3.1 dargestellt und diskutiert. Abbildung 57 zeigt den Überblick über alle Wirkungskategorien für das Szenario GreenSupreme. Die vollständig erneuerbaren Mixe unterscheiden sich nicht sehr stark zwischen den Szenarien, sodass die Ergebnisse für GreenLate hier nicht gezeigt werden.

Abbildung 57: Normierte Ergebnisse der erneuerbaren Strommixe zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe in den Jahren 2020, 2030 und 2050 (Szenario GreenSupreme) in Einwohnerdurchschnittswerten pro kWh



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die wichtigsten Wirkungskategorien sind Versauerung (AP), aquatische Eutrophierung (EP_aq), Feinstaubbelastung (PM2.5) und die Naturraumbeanspruchung (Hemerobie). Die Werte in diesen Kategorien sinken 2030 gegenüber 2020 ab, was auf bessere Wirkungsgrade und Veränderungen im Hintergrundsystem zurückzuführen ist. Für das Jahr 2050 setzt sich dieser

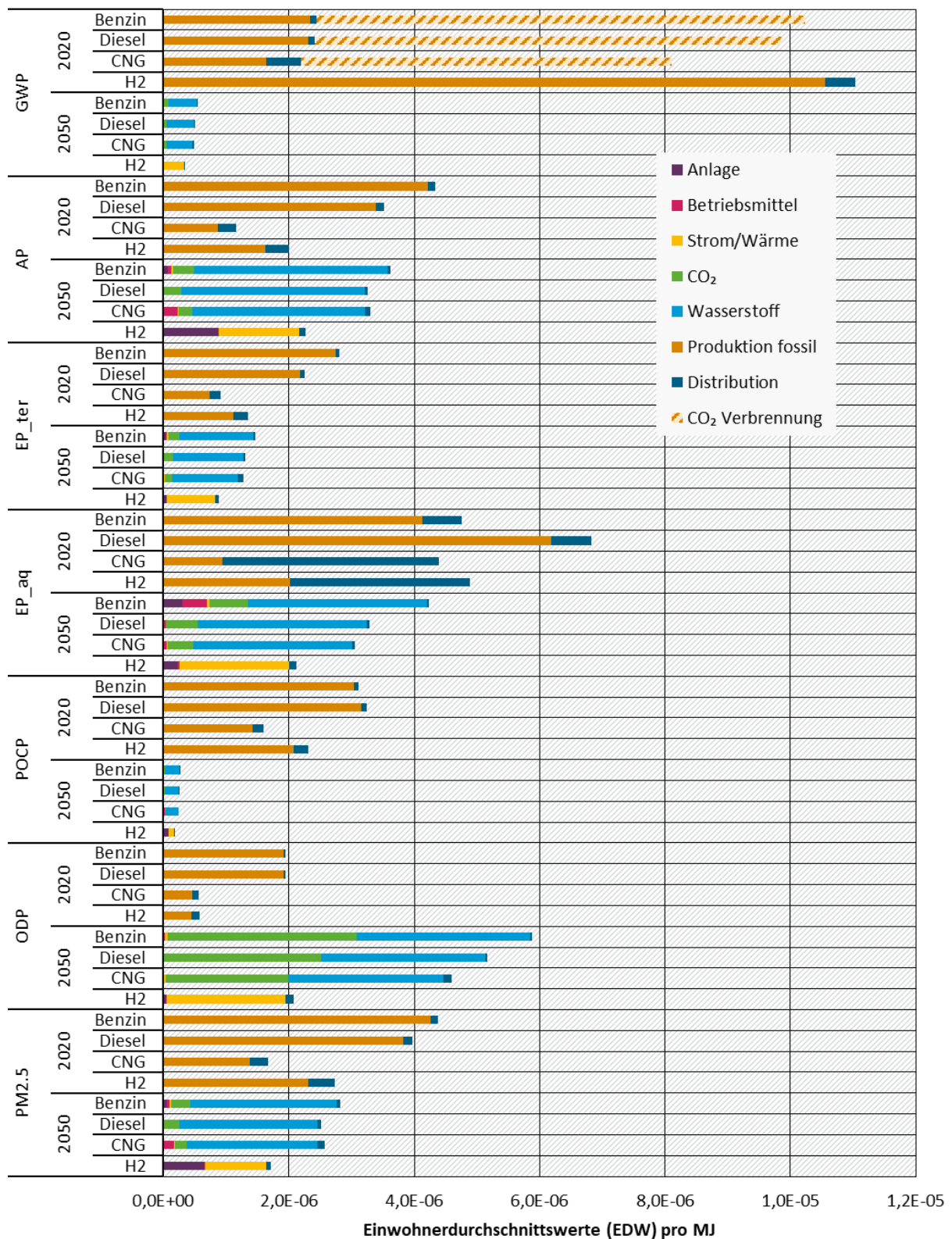
Trend für EP_{aq} und PM_{2.5} fort. Die Versauerung nimmt wieder leicht zu und das Ozonabbaupotenzial liegt 2050 deutlich höher. Das ist darauf zurückzuführen, dass für dieses Jahr der deutsche Strommix für 2050 eingesetzt wird. Dieser enthält im Gegensatz zu dem hier in den Jahren 2020 und 2030 eingesetzten noch Strom aus Biomasse und aus Geothermiekraftwerken. Wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben werden als Stromquellen für die Produktion der synthetischen Kraftstoffe in 2020 und 2030 nur WEA, PV und CSP angenommen. Bei der Vergärung von Biomasse entstehen in geringem Umfang Lachgas-, Schwefelwasserstoff und Ammoniak-Emissionen, in geothermischen Kraftwerken Schwefelwasserstoffemissionen. Darüber hinaus wird in 2050 angenommen, dass ein größerer Anteil des eingesetzten Stroms auch über Hochspannungsleitungen bezogen wird; diese verursachen ebenfalls Lachgasemissionen. Diese genannten zusätzlichen Emissionen führen zu den Erhöhungen in 2050 der Kategorien AP und ODP.

4.1.3 Kraftstoffmixe

Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen die normierten Ergebnisse aller untersuchten Umweltwirkungen für die Bereitstellung der Kraftstoffmixe in den Jahren 2020 und 2050. Für das Jahr 2020 sind dies fossile Kraftstoffe mit verschiedenen biogenen Anteilen, für das Jahr 2050 ist dies der vollständig defossilisierte Mix nach GreenSupreme. Details zur Zusammensetzung der Mixe finden sich in Kapitel 2.6.4 und ihr Treibhauspotenzial wird ebenfalls bereits in Kapitel 3.1 dargestellt und diskutiert. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Kraftstoffen herzustellen, ist bei der Berechnung des GWP die vollständige Oxidation (Verbrennung) des Kohlenstoffs zu CO₂ hinzugerechnet.

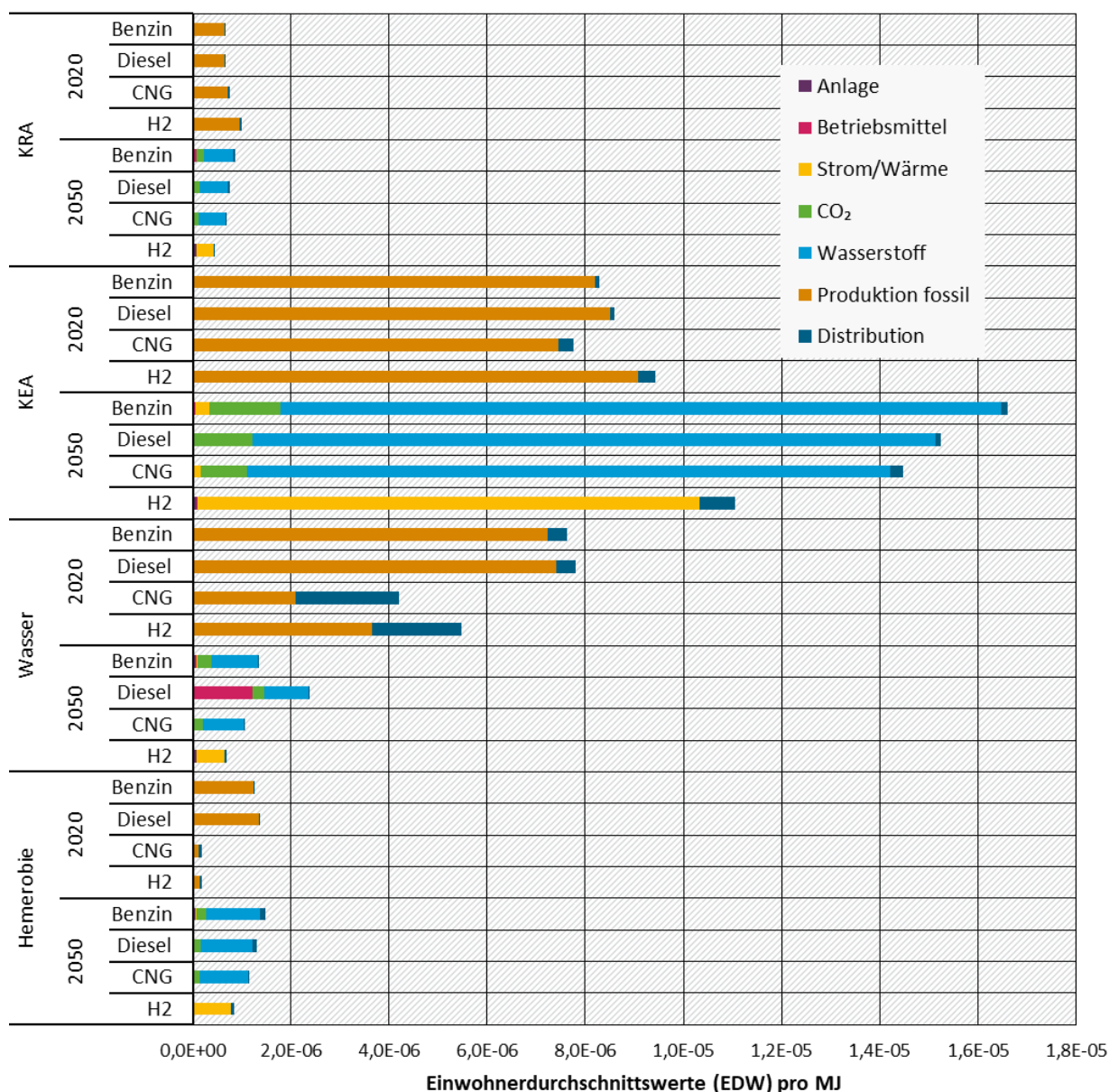
Für das Jahr 2020 ist die aquatische Eutrophierung die Umweltwirkung mit dem höchsten Anteil an ihrer Kategorie in Deutschland. Alle anderen Wirkungskategorien liegen auf ähnlichem Niveau, mit Ozonabbau als Kategorie mit dem geringsten Beitrag zur Gesamtbelastung. Beim Treibhauspotenzial sticht die Bereitstellung von Wasserstoff heraus. Wird wie in Kapitel 3.1 die vollständige Verbrennung des Kohlenstoffs zu CO₂ hinzugerechnet, liegen alle Kraftstoffe auf ähnlichem Niveau und machen das Treibhauspotenzial zur Kategorie mit dem höchsten Beitrag zur Gesamtbelastung in Deutschland. Bei den Inventargrößen tragen der kumulierte Energieaufwand und der Frischwasserbedarf signifikante Umweltlasten bei, Rohstoffaufwand und Hemerobie sind weniger gewichtig.

Abbildung 58: Normierte Ergebnisse aller untersuchten Umweltindikatoren für die Bereitstellung der Kraftstoffmixe in den Jahren 2020 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 59: Normierte Ergebnisse aller untersuchten Ressourcenindikatoren für die durchschnittlichen Kraftstoffmixe in den Jahren 2020 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei den Unterschieden zwischen den Kraftstoffen ist für 2020 ein durchgehendes Muster zu beobachten. Während Benzin und Diesel in allen Wirkungskategorien auf ähnlichem Niveau liegen, zeigen Erdgas und Wasserstoff meist niedrigere Werte. Grund ist der höhere Biokraftstoffanteil im Benzin bzw. Diesel. Für alle Kraftstoffe trägt die Produktion (Förderung, Import und ggf. Raffinerung) den größten Teil zu den Umweltlasten bei. Transport und Distribution innerhalb Deutschlands spielt nur für Erdgas und Wasserstoff in der Kategorie aquatische Eutrophierung und Frischwasserbedarf eine größere Rolle. Dies ist die Folge der Stromnutzung zur Kompression an der Tankstelle.

Für das Jahr 2050 ist für die meisten Wirkungskategorien eine Abnahme gegenüber 2020 zu beobachten. Ausnahmen sind die Versauerung und das Ozonabbaupotenzial, das zur Umweltwirkung mit dem höchsten Anteil an ihrer Kategorie in Deutschland aufsteigt.

Versauerung, aquatische Eutrophierung und Feinstaubbelastung liegen auf ähnlichem Niveau und gehören ebenfalls noch zu den relevanten Kategorien. Das Treibhauspotenzial und die photochemische Ozonbildung spielen in der Bereitstellung der Kraftstoffe 2050 nur eine untergeordnete Rolle. Bei den Inventargrößen trägt nur noch der kumulierte Energieaufwand signifikante Umweltlasten bei. Frischwasserbedarf, Rohstoffaufwand und Hemerobie sind weniger gewichtig.

Bei den Unterschieden zwischen den Kraftstoffen ist für 2050 ein ähnliches, wenn auch abgeschwächtes Muster wie 2020 zu beobachten. In den meisten Kategorie zeigt Benzin leicht höhere Werte als Diesel, synthetisches Erdgas und Wasserstoff etwas niedrigere. Grund sind die beiden Hauptbeiträge, die alle Wirkungskategorien dominieren: (der Strom für) Wasserstoff und die Lasten der CO₂-Abscheidung (Anlagenbau und Adsorptionsmaterial). In der Kategorie Ozonabbau trägt die CO₂-Abscheidung ebenfalls durch die Herstellung des Adsorptionsmaterials erheblich zu den Umweltlasten bei.

Auch bei den Inventargrößen dominiert die Stromerzeugung 2050 die Ergebnisse. Lediglich in der weniger signifikanten Kategorie Frischwasserbedarf spielt auch der Wasserbedarf der Fischer-Tropsch-Synthese eine Rolle.

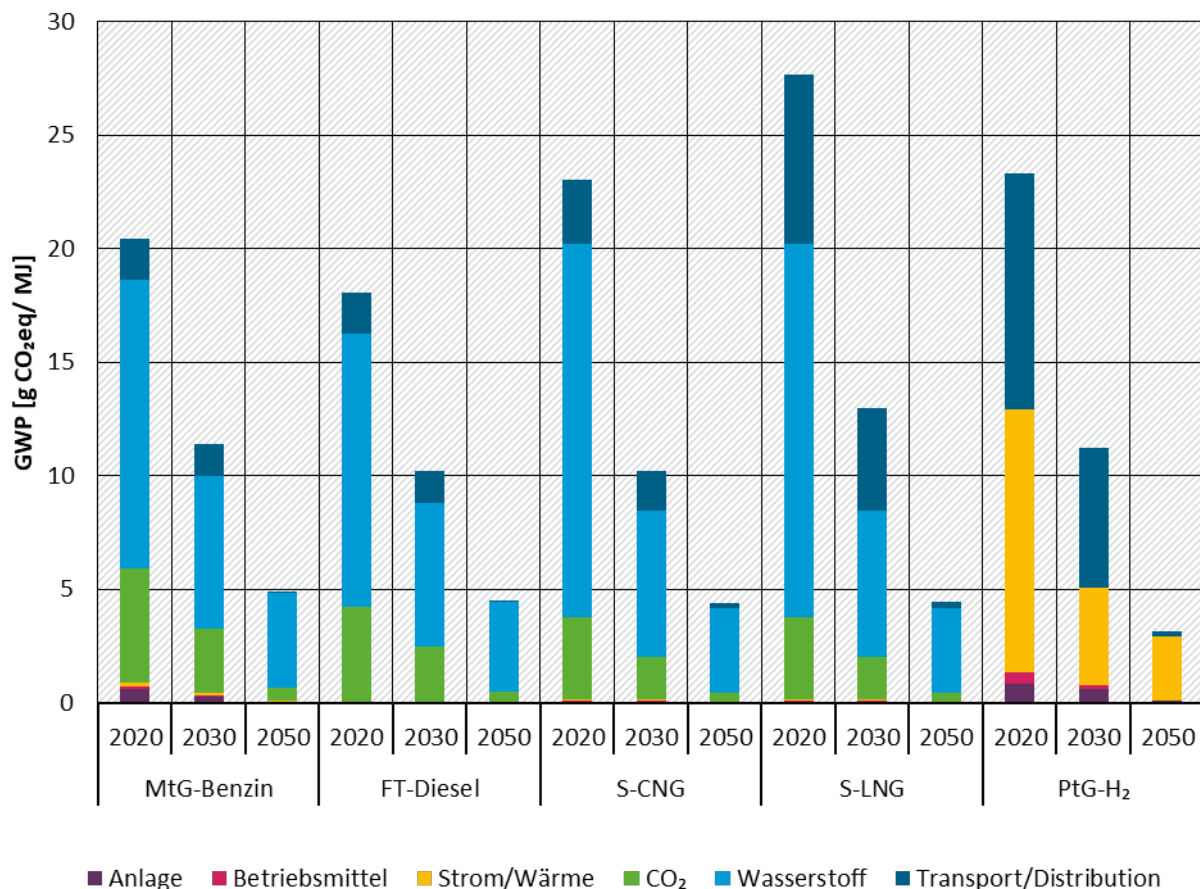
4.1.4 Einfluss einzelner Prozessschritte auf das Treibhauspotenzial von synthetischen Kraftstoffen

Für die Modellierung der Standardfälle zur Bereitstellung von synthetischen Kraftstoffen werde eine Reihe von Festlegungen getroffen, die sich überwiegend aus den UBA-RESCUE -Szenarien ergeben. Dazu gehört die ausschließliche Produktion mit erneuerbarem Strom und die Annahme, dass gasförmige Kraftstoffe (CNG, LNG, Wasserstoff) in Deutschland produziert werden, während flüssige (Diesel, Benzin) vor dem Jahr 2050 aus dem Ausland importiert werden. Erst für 2050 wird auch für diese eine Produktion in Deutschland angenommen.

Außerdem werden dabei folgende technologischen Rahmenbedingungen über die Jahre konstant gehalten: Benzin wird im Methanol-to-Gasoline-Verfahren hergestellt, Diesel über die Fischer-Tropsch-Route, CNG/LNG über direkte Methanisierung. Es kommt durchgehend die alkalische Elektrolyse für die Produktion von Wasserstoff zum Einsatz. CO₂ wird mittels DAC aus der Luft gewonnen. Weitere Details zur Modellierung von Strom und Kraftstoffen finden sich in den Kapiteln 2.5.3 und 2.6.4.

In diesem Unterkapitel wird anhand des Treibhauspotenzials untersucht, welchen Einfluss die Wahl der Parameter auf die Ergebnisse hat.

Abbildung 60: Treibhauspotenzial der synthetischen Kraftstoffe in dieser Studie



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 60 zeigt das Treibhauspotenzial der synthetischen Kraftstoffe in dieser Studie je Megajoule Heizwert für die Jahre 2020, 2030 und 2050. Das mit dem zweistufigen Methanol-to-Gasoline-Verfahren (MtG) in Marokko hergestellte Benzin zeigt etwas schlechtere Werte als der FT-Diesel. Komprimiertes und verflüssigtes Erdgas werden in Deutschland hergestellt und schneiden 2020 noch schlechter ab als die flüssigen Kohlenwasserstoffe. Komprimierter elektrolytischer Wasserstoff liegt 2020 etwa gleichauf mit S-CNG. Im Laufe der Jahre wird das Treibhauspotenzial aller Kraftstoffe deutlich besser und sinkt im Jahr 2050 auf 13 % (H₂) bis 25 % (FT-Diesel) der Werte von 2020. Im Jahr 2050 weisen alle strombasierten Kraftstoffe Treibhauspotenziale von 3-5 g CO₂eq/MJ auf. Hauptbeiträge sind für alle Kraftstoffe der steigende Anteil an EE im Strom für die Wasserstoffproduktion und die CO₂-Abscheidung. Für S-LNG und komprimierten Wasserstoff hat in den Jahren 2020 und 2030 zusätzlich noch der Strom für die Verflüssigung (deutscher Netzstrom nach GreenLate) größere Bedeutung.

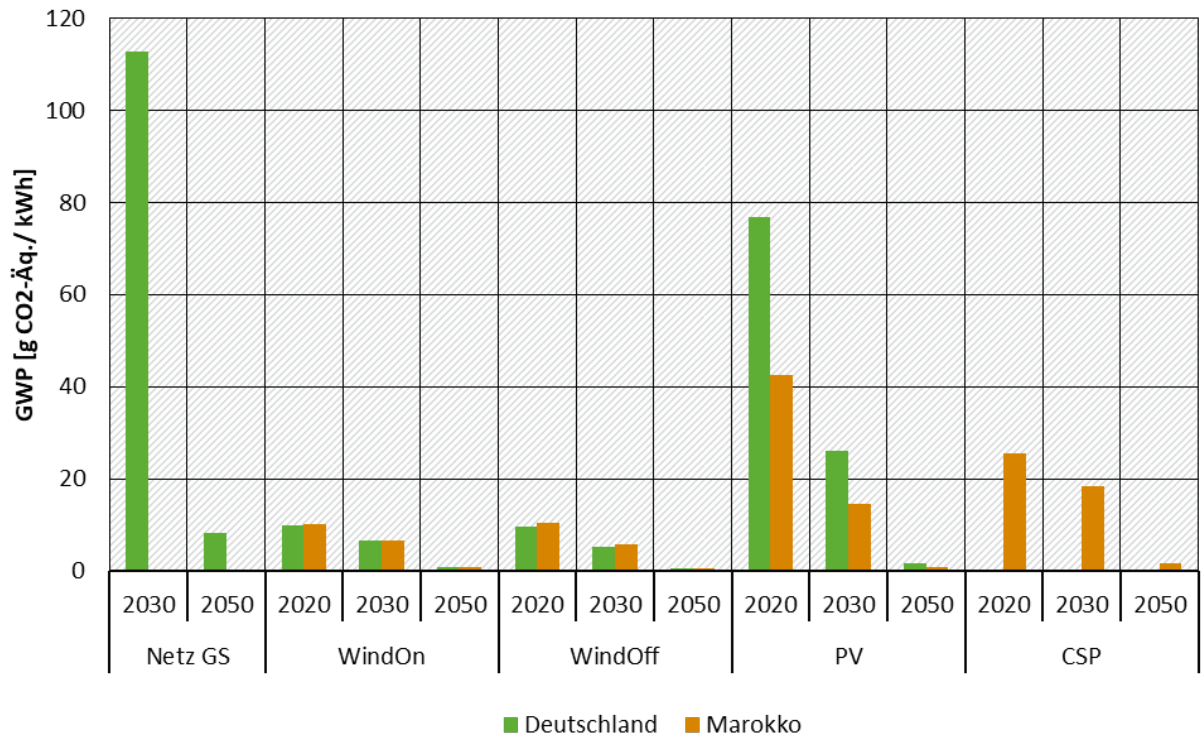
In den folgenden Unterkapiteln wird der Einfluss der Auswahl der in Tabelle 38 aufgelisteten Standardparameter untersucht.

4.1.4.1 Erneuerbare Stromquellen und Standorte

In Abbildung 61 sind die Treibhauspotenziale der Stromerzeugung aus unterschiedlichen erneuerbaren Quellen in Deutschland und Marokko für die Szenariojahre 2020, 2030 und 2050 dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Werte für den deutschen Netzstrommix 2030 und 2050 nach GreenSupreme aufgeführt. Die stark sinkenden Belastungen im Laufe der Zeit sind für alle

betrachteten Quellen vor allem auf die Defossilisierung des Hintergrundes (Kapitel 1.3) zurückzuführen.

Abbildung 61: Treibhauspotenzial der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Deutschland und Marokko

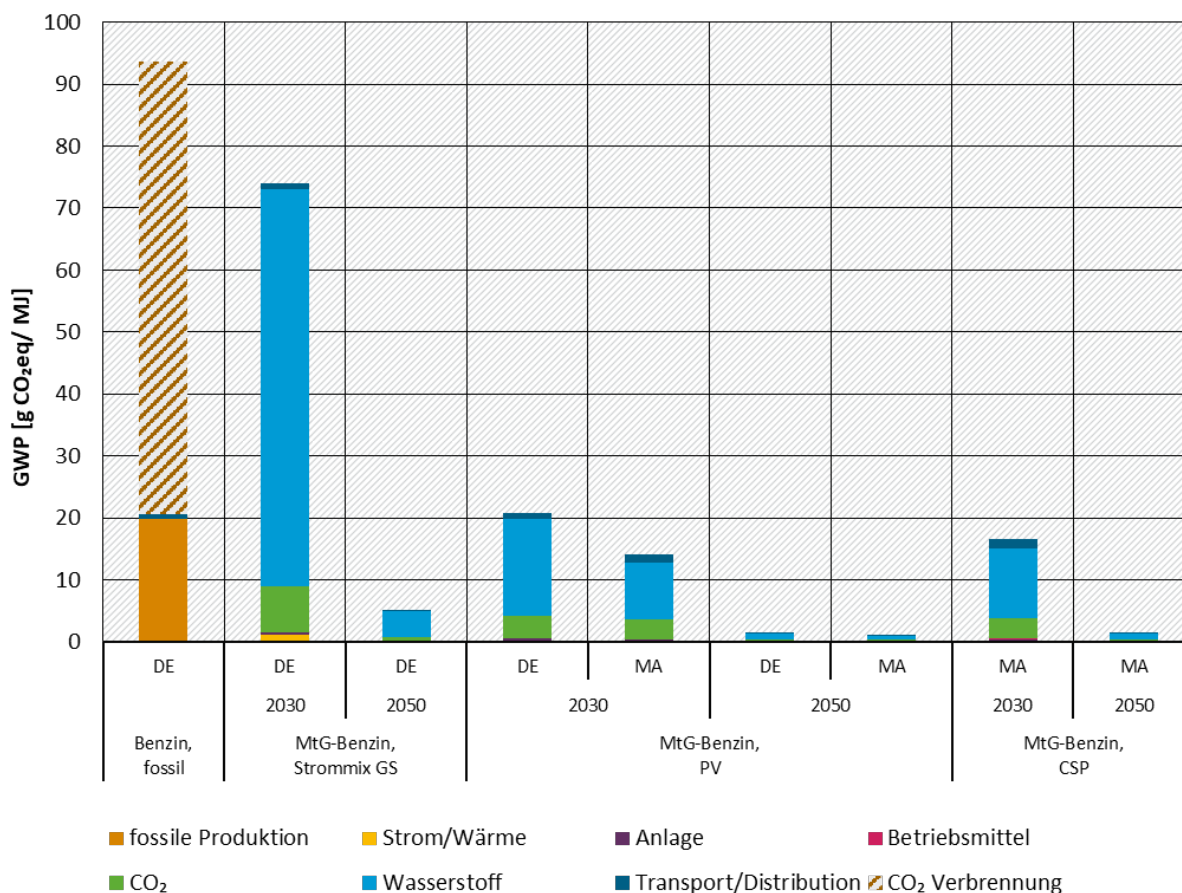


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Im Falle von Strom aus PV-Freiflächenanlagen wird dieser Trend durch einen steigenden Wirkungsgrad der Module unterstützt. Für alle Anlagen wird außerdem eine steigende Lebensdauer angenommen. Für die Erzeugung von Strom aus PV-Anlagen sind die Werte aufgrund höherer Volllaststunden in Marokko rund 40 % besser als in Deutschland. Strom aus konzentrierender Solarkraft (CSP) verbessert sich aufgrund von konstant angenommenen Leistungsdaten nicht ganz so stark wie Strom aus PV.

Das verbleibende Treibhauspotenzial im Netzmix 2050 (8 g CO₂eq/kWh), das höher liegt als das aller hier gezeigten erneuerbaren Quellen (1-2 g CO₂eq/kWh), ist auf den verbleibenden Rest Biomasse in der Stromerzeugung und auf Transmissionsemissionen (Umspannwerke und Hochspannungsleitungen) zurückzuführen.

Abbildung 62: Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Marokko und Deutschland mit unterschiedlichen EE-Quellen (2030/2050; AEL, DAC)



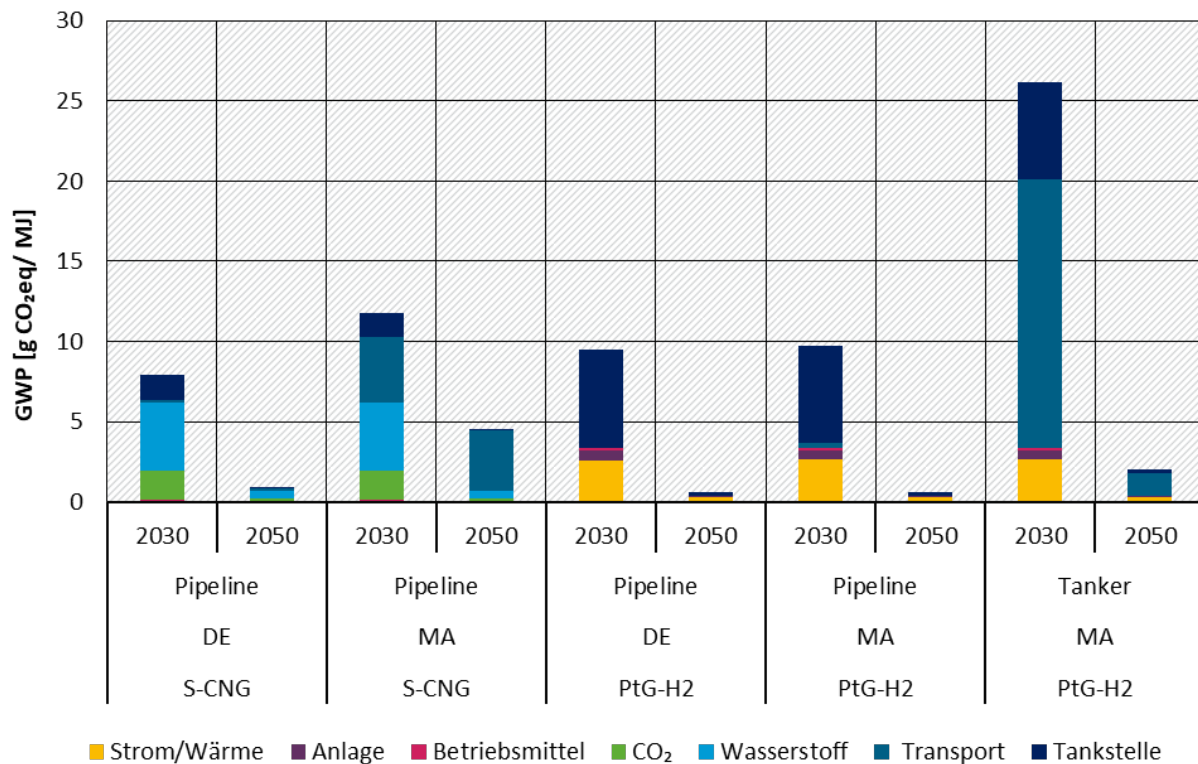
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 62 zeigt die Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Marokko und Deutschland mit den erneuerbaren Quellen aus Abbildung 61. Zusätzlich sind die Treibhauspotenziale von fossilem Benzin inklusive Verbrennung und die Herstellung mit deutschem Netzstrom nach GreenSupreme dargestellt. Da der Strom für die Elektrolyse und die CO₂-Abscheidung die bestimmenden Faktoren für das Treibhauspotenzial sind, folgen die Ergebnisse direkt dem Muster der Stromquellen. Im Jahr 2050 hat MtG-Benzin ein Treibhauspotenzial von nur noch 1-2 g CO₂eq/MJ. Die Produktion mit Netzstrom führt 2030 noch zu Belastungen die bei rund 80 % von denen fossilen Benzins liegen.

4.1.4.2 Transportmodus synthetisches Erdgas und Wasserstoff

In Abbildung 63 sind die Treibhauspotenziale der Bereitstellung von synthetischem, komprimiertem Erdgas (S-CNG) und Wasserstoff aus Marokko und Deutschland auf unterschiedlichen Transportwegen für die Jahre 2030 und 2050 dargestellt.

Abbildung 63: Treibhauspotenziale der Bereitstellung von S-CNG und Wasserstoff aus Marokko und Deutschland auf unterschiedlichen Transportwegen (2030/2050; WindOn, AEL)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Für synthetisches CNG aus Deutschland liefert 2030 neben dem Strom zur Herstellung der Transport durch Kompression mit Netzstrom an der Tankstelle einen erheblichen Beitrag. Noch größer ist im selben Jahr der Beitrag des Transports per Pipeline aus Marokko. Grund sind Methanemissionen aus Kompressorstationen und Leckagen. Die Kompression an der Tankstelle mit Netzstrom im Jahr 2030 steuert dann noch rund 30 % der Transportemissionen bei.

Für die Herstellung von Wasserstoff in Deutschland liefert 2030 die Kompression mit Netzstrom an der Tankstelle sogar den Hauptbeitrag zum Treibhauspotenzial. Unter den Annahmen dieser Studie liegt Wasserstoff aus Marokko per Pipeline 2030 nur geringfügig schlechter. Analog zum Transport von Erdgas wird ein Betrieb der Kompressorstationen mit dem transportierten Gas angenommen. Emissionen an diesen Kompressoren und mögliche Leckagen haben keinen Einfluss auf das Treibhauspotenzial, da nach aktuellem Stand der IPCC-Charakterisierung Wasserstoff trotz seiner sekundären Treibhausgaswirkung rechnerisch nicht zum Treibhauseffekt beiträgt. Der Betrieb mit netzelektrischen Kompressorstationen würde die Treibhausbilanz deutlich verschlechtern.

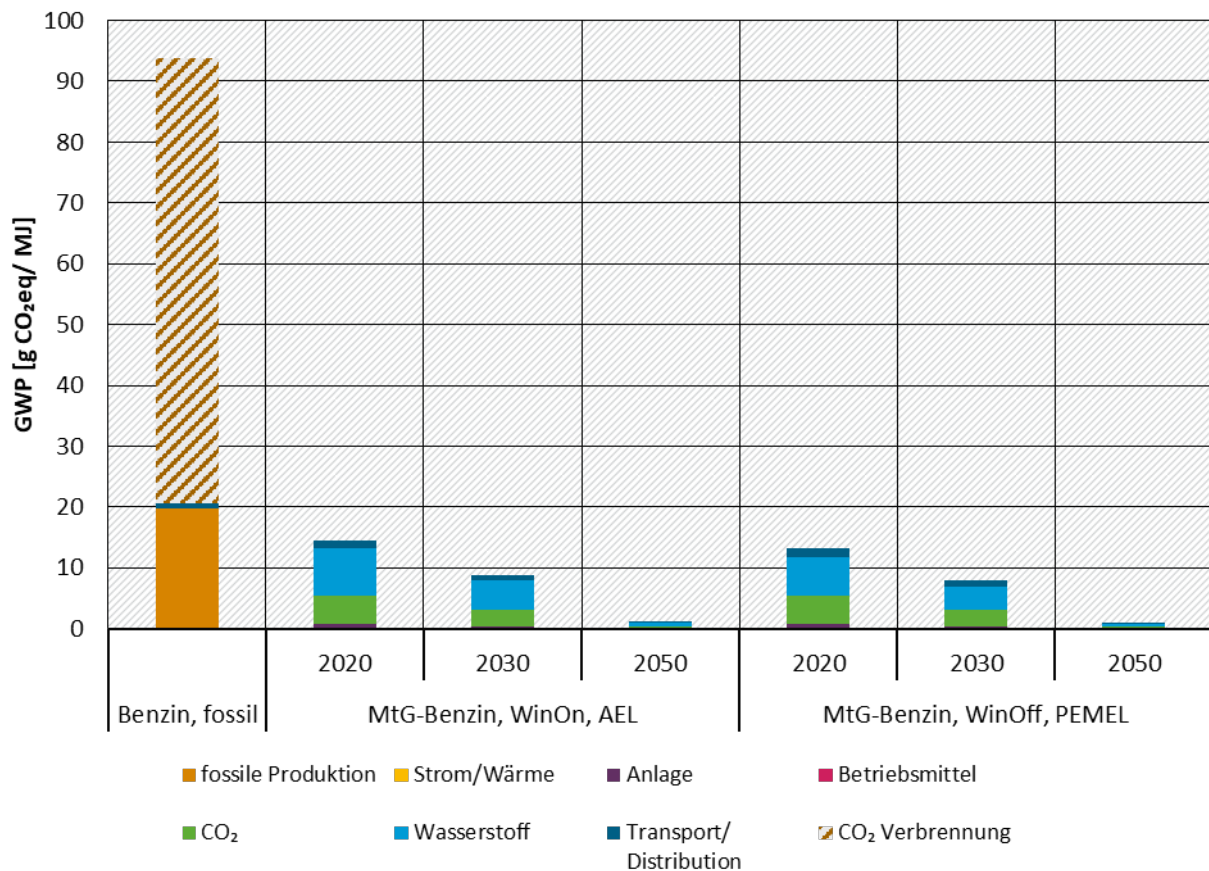
Wesentlich ungünstiger fallen die Ergebnisse für den Transport aus Marokko per Tanker aus. Im Jahr 2030 dominiert die Verflüssigung mit marokkanischem Netzstrom das Resultat. Die Kompression an der Tankstelle machen rund 30 % der Transportaufwendungen aus. Auch hier würden andere technische Annahmen, etwa Verflüssigungsenergie aus Verbrennung von Wasserstoff, zu anderen Ergebnissen führen.

Für 2050 sinken die Treibhauspotenziale mit der Defossilisierung des Hintergrundes und damit auch der Stromerzeugung auf 1-5 g CO₂eq/MJ. Größter Beitrag für S-LNG aus Marokko bleiben die Methanemissionen des Ferntransports per Pipeline.

4.1.4.3 Elektrolysetechnologien

Abbildung 64 zeigt die Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen Elektrolysetechnologien für die Jahre 2020, 2030 und 2050. Als Stromquelle wird in allen Fällen Windkraft an Land angenommen. Zum Vergleich ist noch das Treibhauspotenzial fossilen Benzins inklusive vollständiger Verbrennung dargestellt.

Abbildung 64: Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen Elektrolysetechnologien (2020/2030/2050)



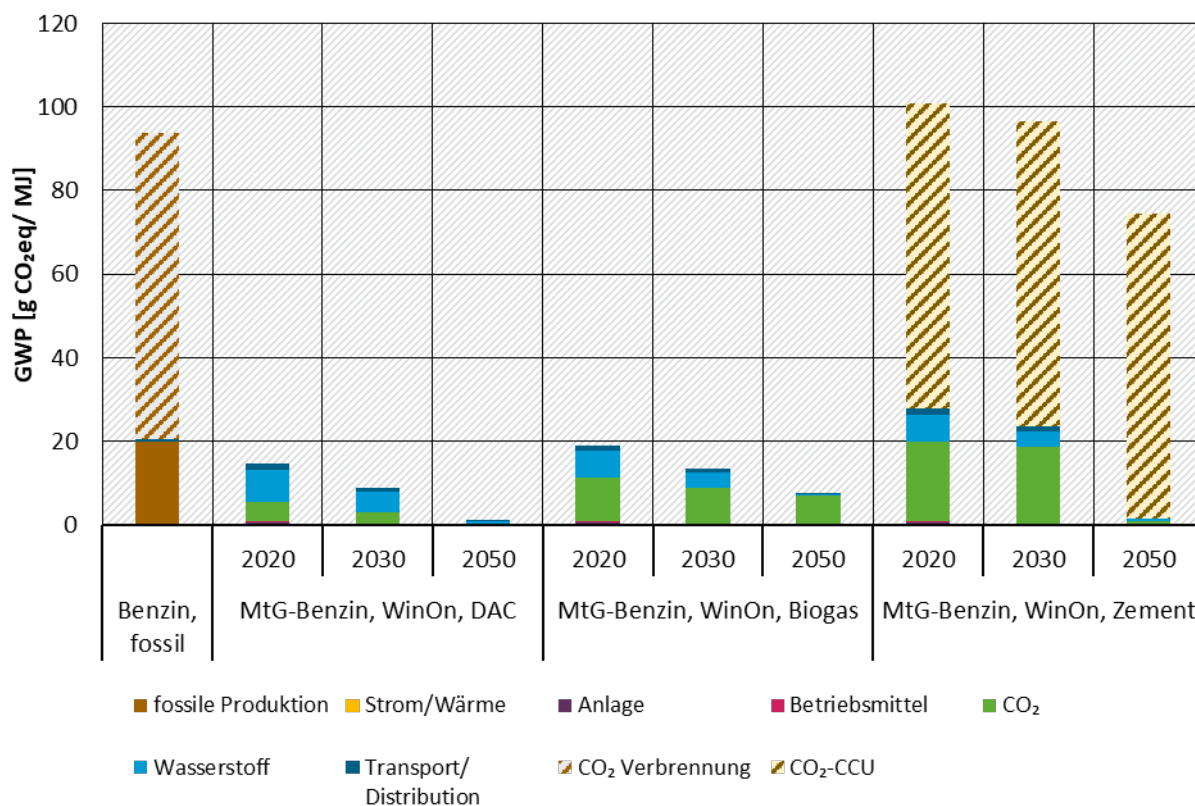
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Zwischen den Elektrolysetechnologien gibt es keine signifikanten Unterschiede. Wirkungsgrade und Lebensdauern liegen schon im Jahr 2020 nicht weit auseinander und gleichen sich bis 2050 weiter an. Die unterschiedlichen Materialien der Elektrolyseure haben fast keinen Einfluss.

4.1.4.4 CO₂-Quellen

In Abbildung 65 werden die Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen CO₂-Quellen für die Jahre 2020, 2030 und 2050 gezeigt. Als Stromquelle wird auch hier in allen Fällen Windkraft an Land angenommen. Zum Vergleich ist wieder das Treibhauspotenzial fossilen Benzins inklusive vollständiger Verbrennung dargestellt.

Abbildung 65: Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen CO₂-Quellen (2020/2030/2050)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Gewinnung von CO₂ aus der Luft (DAC), der Standardfall in dieser Studie, macht über alle Jahre rund 30 % des Treibhauspotenzials der mit ihr modellierten Herstellung aus. Ursachen sind hauptsächlich die Materialien für den Anlagenbau und die Herstellung von Betriebsmitteln, vor allem des Adsorptionsvlieses. Die Wärme für die Desorption kommt lastenfrei als Abwärme aus der Synthesanlage. Der Strombedarf trägt nur etwa 10 % zu den Lasten der Abscheidung bei.

Die Gewinnung von CO₂ aus der Aufbereitung von Biogas zeigt höhere Werte, die auch im Laufe der Jahre kaum absinken. In den Jahren 2020 und 2030 macht diese Abscheidetechnologie rund 60 % des Treibhauspotenzials der mit ihr modellierten Herstellung aus, im Jahr 2050 sogar über 90 %. 2020 kommt ein Drittel davon aus dem Bau der Anlage und zwei Drittel aus direkten Methanemissionen. 2030 sinkt der Anlagenanteil und die direkten Emissionen machen 80 % aus, 2050 sogar 98 %.

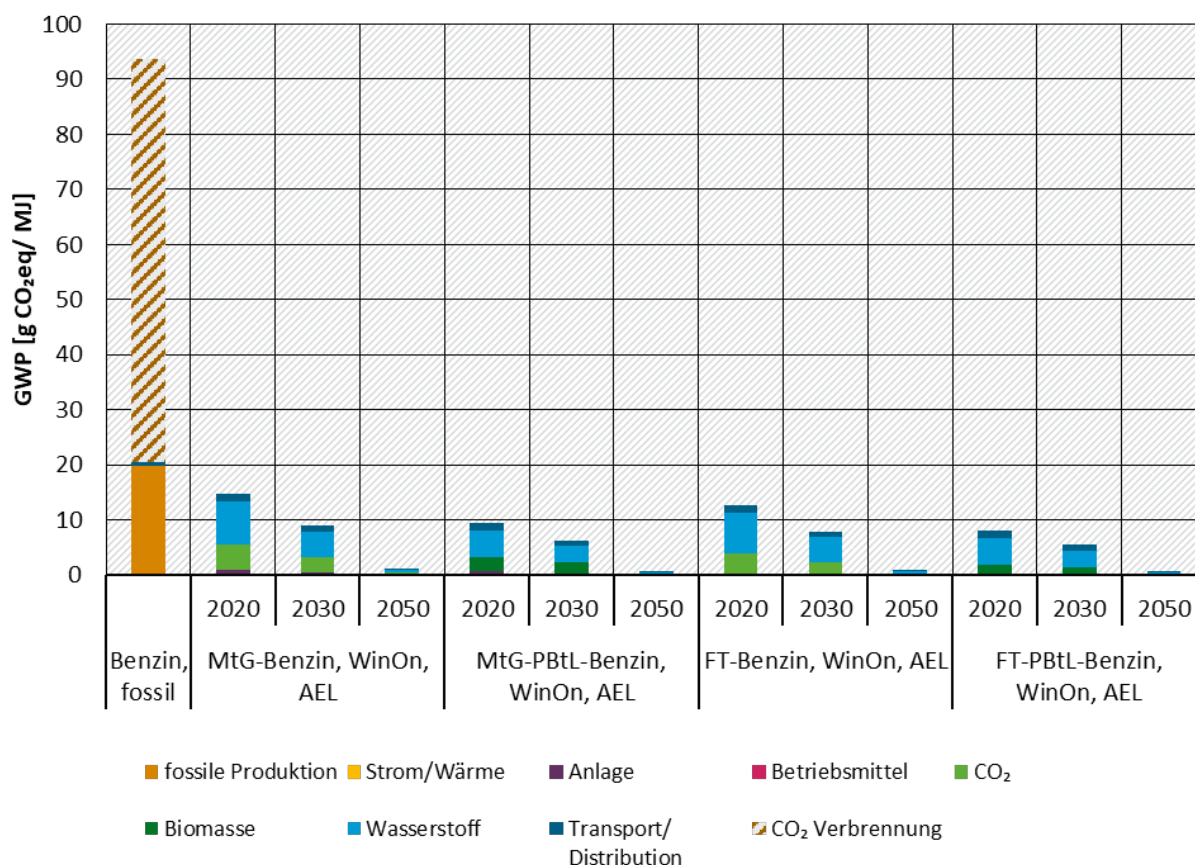
Das Treibhauspotenzial der Gewinnung von CO₂ aus der Zementherstellung liegt noch höher als das der anderen beiden Verfahren. Über alle Jahre macht sie rund 60-80 % des Treibhauspotenzials der mit ihr modellierten Herstellung aus (ohne die in der Grafik nachrichtlich ausgewiesenen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung des Benzins). Für 2020 und 2030 ist dabei die Bereitstellung der Wärme zur Desorption dominierend. In den technologischen Annahmen dieser Studie wird die Abscheideanlage in diesem Fall nicht durch Abwärme versorgt, sondern räumlich getrennt von der Synthesanlage durch externe Brennstoffe. Erst mit der weitestgehenden Defossilisierung des Hintergrundsystems 2050 gehen auch diese Emissionen sehr stark zurück.

Das fossile CO₂ aus der Zementherstellung (in der Grafik als ‚CO₂-CCU‘ bezeichnet) verbleibt in dieser Studie wie schon in der Vorgängerstudie SYSEET bilanziell beim Zementwerk und wird hier nur nachrichtlich ausgewiesen.

4.1.4.5 Synthesetechnologien

Abbildung 66 zeigt die Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen Elektrolysetechnologien für die Jahre 2020–2050. Als Stromquelle wird auch hier in allen Fällen Windkraft an Land angenommen. Zum Vergleich ist wieder das Treibhauspotenzial fossilen Benzins inklusive vollständiger Verbrennung dargestellt.

Abbildung 66: Treibhauspotenziale der Bereitstellung von MtG-Benzin aus Deutschland mit unterschiedlichen Synthesetechnologien (2020/2030/2050)



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Zwischen den beiden rein strombasierten Synthesewegen Methanol-to-Gasoline und Fischer-Tropsch gibt es nur geringe Unterschiede. Die MtG-Route weist 2020 zwar ein um rund 15 % höheres Treibhauspotenzial je Megajoule Heizwert aus, der absolute Abstand zwischen den Synthesen beträgt aber nur 2 g CO₂eq/MJ. Beide Verfahren haben 2020 nur rund 15 % des GWP fossilen Benzins, im Jahr 2050 sogar nur noch rund 1 %.

Die beiden Syntheserouten unter Einsatz von Biomasse und Wasserstoff (PbTL) liegen 2020 rund 35 % unter den rein strombasierten. Der absolute Abstand beträgt rund 4-5 g CO₂eq/MJ. 2050 liegen alle Verfahren bei rund 1 g CO₂eq/MJ.

Für die strombasierten Varianten sind der Strom für die Wasserstoffherstellung und der Bau und Betrieb der CO₂-Anlagen die wichtigsten Quellen für das Treibhauspotenzial. In den PBTL-Routen liegt der Wasserstoffbedarf niedriger und die Bereitstellung der Biomasse übernimmt die Rolle des Kohlenstofflieferanten – mit niedrigeren Lasten als die Abscheidung aus der Luft.

4.2 Fahrzeugbereitstellung

Für die Fahrzeugherstellung werden jeweils drei verschiedene Baujahre unterschieden: 2020 („Startpunkt“), 2030 („Übergangsphase“) sowie 2050 („THG-Neutralität“). Um die Beiträge der unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten aufzuschlüsseln, werden verschiedene Bauteile teilweise getrennt ausgewiesen.

Unterschieden wird in:

- ▶ Fahrzeugumpf (bzw. Zugfahrzeugumpf sowie Trailer beim Sattelzug), dieser ist jeweils bei den Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antrieben relativ ähnlich
- ▶ Konventioneller Antriebsstrang (bestehend aus Verbrennungsmotor, Getriebe, Abgasreinigung und Abgasanlage, Diesel-, LNG- bzw. Benzintank sowie der Starterbatterie)
- ▶ Elektrischer Antriebsstrang (bestehend aus Elektromotor mit Zusatzbauteilen und Elektronik sowie Getriebe)
- ▶ Brennstoffzelle (nur für FCEV-Fahrzeuge), wird aufgrund der Relevanz getrennt gezeigt
- ▶ Tank (nur für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben extra ausgewiesen), unterschieden nach Wasserstofftank sowie CNG-Tank
- ▶ Traktionsbatterie (für Fahrzeuge mit teil- (z. B. Hybride) oder vollelektrischem Antrieb (z. B. BEV))

Dabei werden insbesondere bei den antriebsspezifischen Bauteilen mit größerem Einfluss auf die Umweltwirkungen auch technologische Weiterentwicklungen bzw. verbesserte Herstellungsverfahren für die Baujahre 2030 und 2050 angesetzt (siehe auch Kapitel 2.1). Das Baujahr 2050 wird zudem mit einem komplett defossilisiertem Hintergrundsystem gerechnet.

Ein besonderer Fokus liegt bei den Analysen auf den Lithium-Ionen-Akkus, welche als Traktionsbatterien eingesetzt werden. Dabei werden folgende drei Akkutypen je nach Baujahr der Fahrzeuge eingesetzt:

- ▶ 2020: NMC622-Akku mit einer Energiedichte von 150 Wh/kg und einem Treibhauspotenzial in der Herstellung von 84 kg CO₂eq pro kWh
- ▶ 2030: NMC811-Akku mit einer Energiedichte von 200 Wh/kg und einem Treibhauspotenzial in der Herstellung von 53 kg CO₂eq pro kWh
- ▶ 2050: Lithium-Luft-Akku mit einer Energiedichte von 1.500 Wh/kg (und vollständig defossilisiertem Hintergrundsystem) und einem Treibhauspotenzial in der Herstellung von 0,5 kg CO₂eq pro kWh

Die Akkus werden in der Fahrzeugherstellung aufgrund ihrer Relevanz immer getrennt ausgewiesen. Zusätzlich wird in einem gesonderten Unterkapitel auf die wichtigsten Einflussfaktoren für deren Herstellung und ihre Umweltwirkungen näher eingegangen.

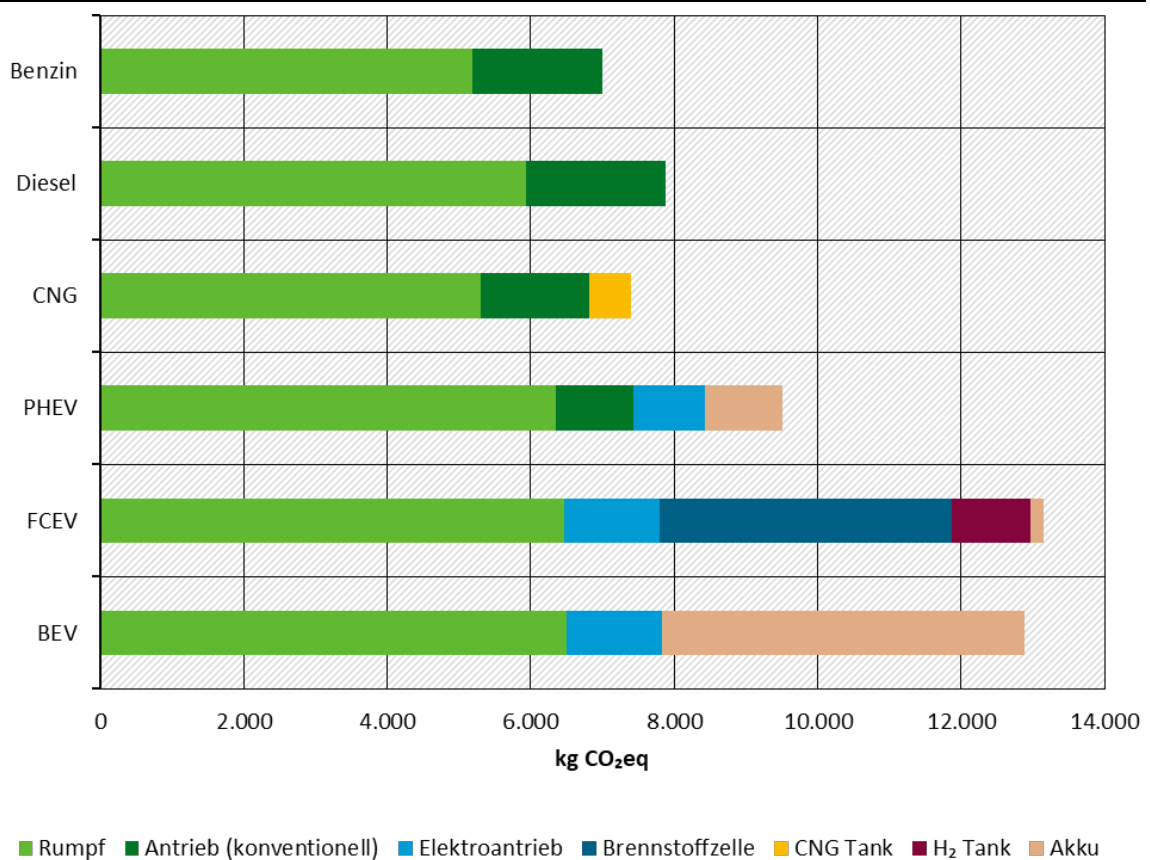
4.2.1 Fahrzeugherstellung

4.2.1.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Treibhauspotenziale

Beim Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung im Jahr 2020 (siehe Abbildung 67) zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Fahrzeugen mit reinem Verbrennungsmotor und den Pkw mit alternativen Antrieben sowie dem Plug-In Hybrid. Von den konventionellen Pkw schneidet der Benzin-Pkw bei der Herstellung etwas besser ab als der CNG- und Diesel-Pkw. Dies liegt an den Zusatzaufwänden für den CNG-Tank bzw. am höheren Leergewicht des Diesel-Pkws. Der Plug-In Hybrid Pkw liegt zwischen konventionellem Pkw und BEV, da er zwar einen doppelten Antriebsstrang braucht, aber mit einem deutlich kleineren Akku auskommt als das BEV. FCEV-Pkw und BEV-Pkw schneiden sehr ähnlich ab, dies liegt beim BEV-Pkw am Akku und beim FCEV-Pkw an der Brennstoffzelle mit ihrer aktuell noch relativ hohen Platinbeladung sowie dem mit einem hohen Energieaufwand hergestellten H₂-Tank aus CFK.

Abbildung 67: Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung mit Baujahr 2020

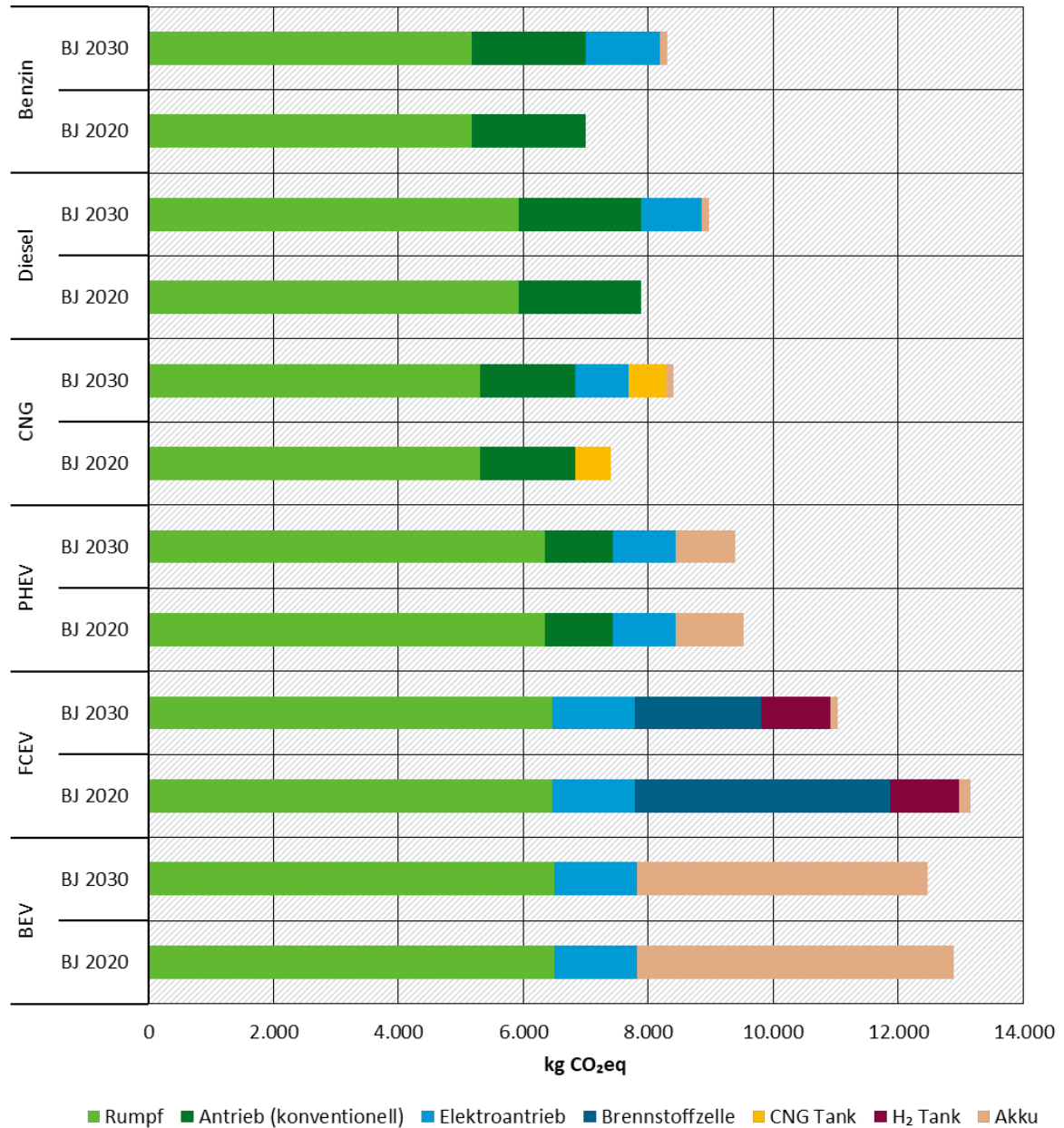


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei den ermittelten Treibhauspotenzialen der Pkw-Herstellung im Jahr 2030 zeigt sich, dass bei den konventionellen Fahrzeugen aufgrund der Zusatzbauteile für die erwartete Hybridisierung das Treibhauspotenzial steigt. Der FCEV-Pkw hingegen hat im Vergleich zu 2020 ein geringeres Treibhauspotenzial, da sich die Brennstoffzelle weiterentwickelt und eine deutlich geringere Platinbeladungen aufweist als bisher. Beim BEV-Pkw ergeben sich zwei gegenläufige Effekte, deren Wirkungen sich in etwa kompensieren: Einerseits verbessert sich die Akkuherstellung wie

in Kapitel 4.2.2 gezeigt, andererseits hat der BEV-Pkw 2030 einen deutlich größeren Akku (80 kWh anstelle von 55 kWh).

Abbildung 68: Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung 2020 und 2030

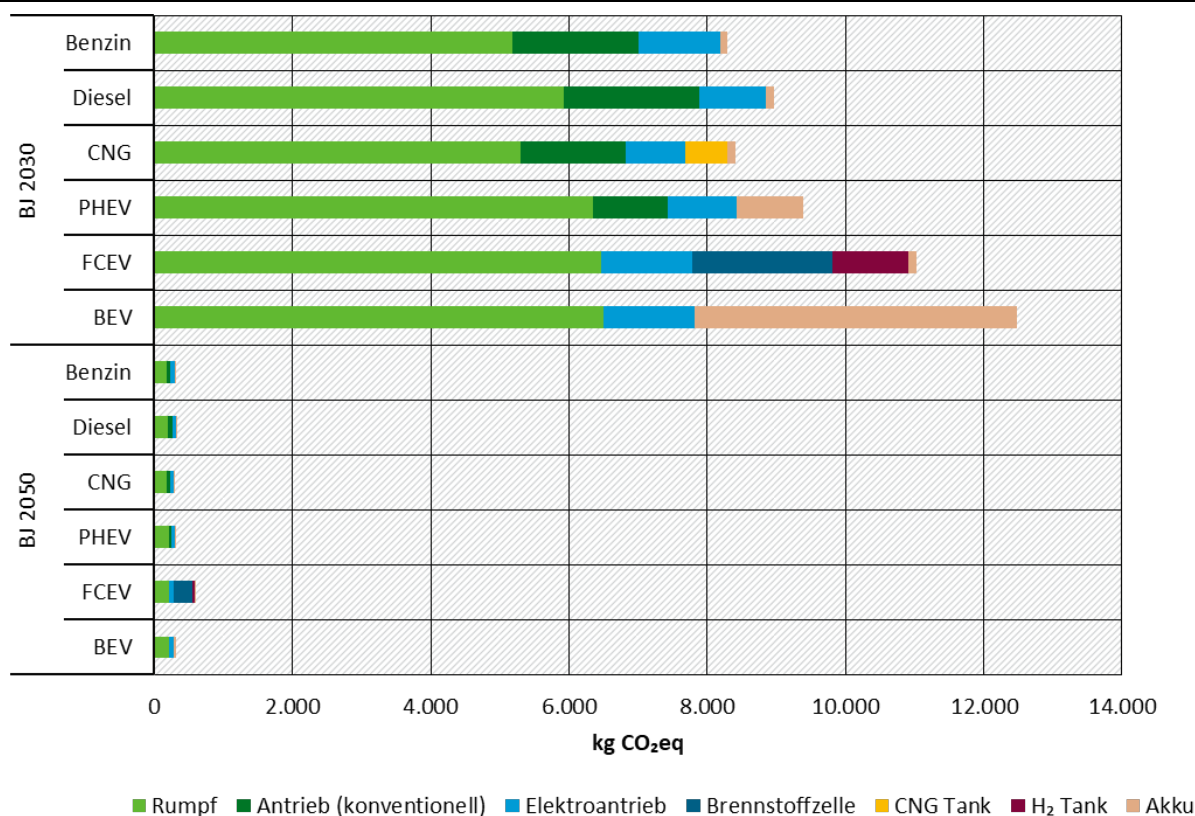


Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Wird das Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung 2050 analysiert zeigt sich, dass hier das defossilisierte Hintergrundsystem den größten Einfluss hat. Die in Abbildung 69 gezeigten Treibhauspotenziale der Pkw-Herstellung liegen in 2050 damit um mindestens 95 % unter denen in 2030. Damit verringern sich auch deutlich die Abstände zwischen den verschiedenen Antriebsvarianten. Lag der BEV-Pkw in 2030 noch um 50 % höher in der Herstellung als der Benzin-Pkw, verringert sich dieser Unterschied auf unter 10 %. Einzige Ausnahme ist der FCEV-

Pkw, da das in der Brennstoffzellenherstellung für die Membran verwendete Tetrafluoroethylen weiterhin ein relativ hohes Treibhauspotenzial mitbringt.

Abbildung 69: Treibhauspotenzial der Pkw-Herstellung 2030 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei der Herstellung der leichten Nutzfahrzeuge sind dieselben Trends und ein sehr ähnliches Abschneiden der verschiedenen Antriebsvarianten untereinander zu beobachten, da diese auf teilweise denselben oder sehr ähnlichen Bauteilen wie die Personenkraftwagen aufbauen. Daher wird hier auf eine gesonderte Detailauswertung verzichtet.

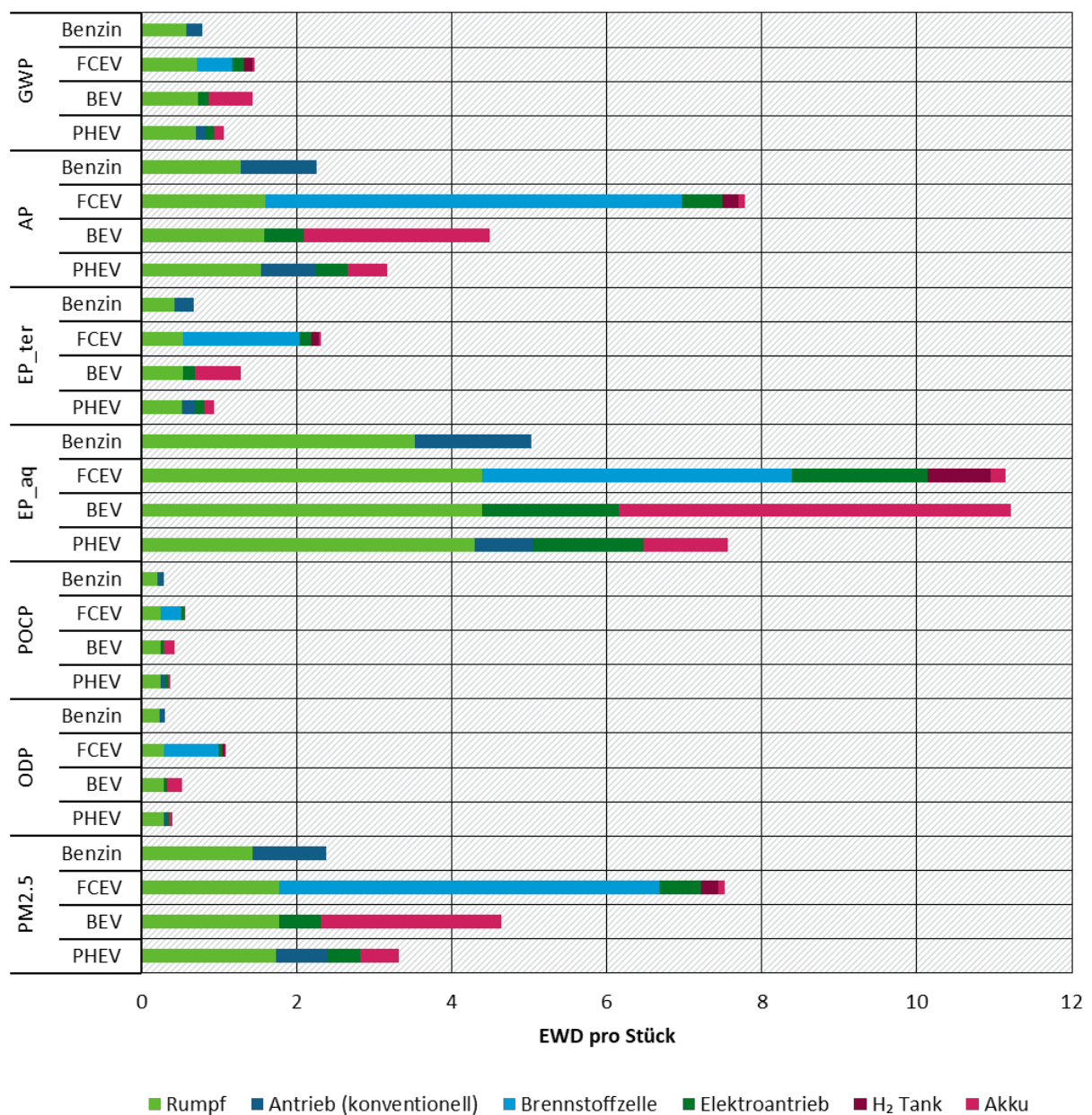
Normierte Umweltwirkungen

Bei den sonstigen LCIA Ergebnissen der Fahrzeugherstellung werden zwei verschiedene Schwerpunkte untersucht: zum einen die umweltbezogenen Wirkungskategorien (Versauerung, Eutrophierung, Ozonbildung, Ozonabbau sowie Feinstaub) und zum anderen die eher ressourcenbezogenen Indikatoren (Energie- und Rohstoffaufwand sowie Wasser und Fläche). Für alle LCIA Kategorien werden dabei jeweils die anhand der Einwohnerdurchschnittswerte normierten Umweltwirkungen verwendet.

Die normierten Umweltwirkungen pro Personenkraftwagen mit Baujahr 2020 zeigt Abbildung 70. Zur Einordnung der Relevanz ist hier auch das Treibhauspotenzial als Referenz aufgeführt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass bei der Pkw-Herstellung andere Umweltwirkungen wichtiger sind als das Treibhauspotenzial, insbesondere die aquatische Eutrophierung sowie die Versauerung und die Feinstaubbelastung sind relevante Wirkungskategorien. Die terrestrische Eutrophierung sowie die photochemische Ozonbildung und der Ozonabbau sind weniger relevant.

Werden die Unterschiede im Vergleich zur Herstellung eines Benzin-Pkw betrachtet, zeigt sich, dass die anderen Antriebskonzepte in allen Wirkungskategorien höhere Umweltwirkungen verursachen. Besonders groß ist der Unterschied zum konventionellen Pkw beim FCEV-Pkw aufgrund der Umweltwirkungen der Brennstoffzelle mit ihrer heute noch hohen Platinbeladung sowie beim BEV-Pkw aufgrund des Akkus; dies gilt insbesondere für die Versauerung sowie die aquatische Eutrophierung. Die höchsten Werte bei allen Umweltindikatoren haben der BEV-Pkw bzw. der FCEV-Pkw bei der Versauerung. Nicht in der Grafik gezeigt sind der CNG-Pkw, der jeweils in allen Kategorien leicht über dem Benzin-Pkw liegt, sowie der Diesel-Pkw, der noch einmal etwas über dem CNG-Pkw liegt.

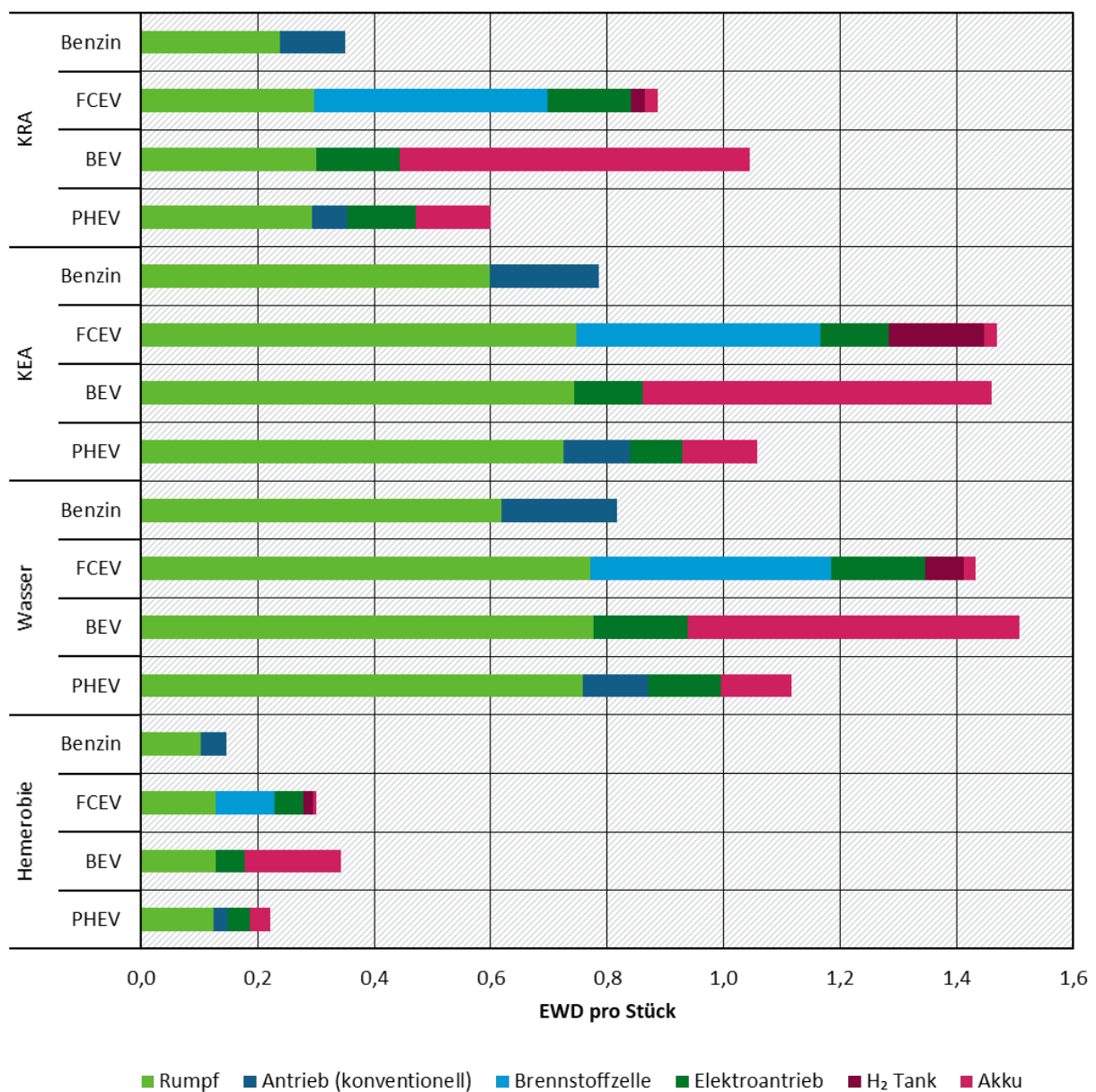
Abbildung 70: Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2020 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Auch bei den ressourcenbezogenen Indikatoren, gezeigt in Abbildung 71, liegen die Pkw mit alternativen Antrieben über denen mit konventionellem Antrieb. Hier zeigt sich insbesondere auch die heute noch recht energieintensive Herstellung des Akkus bzw. der Platingewinnung für die Brennstoffzelle durch einen höheren kumulierten Energieaufwand, sowie der erhöhte Ressourcenbedarf für die Akkumaterialien bzw. durch das in der Brennstoffzelle verwendete Platin in einem höheren kumulierten Rohstoffaufwand. Auch der Frischwasserbedarf sowie die Hemerobie werden maßgeblich von den antriebspezifischen Bauteilen beeinflusst, mit einem großen Einfluss der Brennstoffzelle und des Akkus.

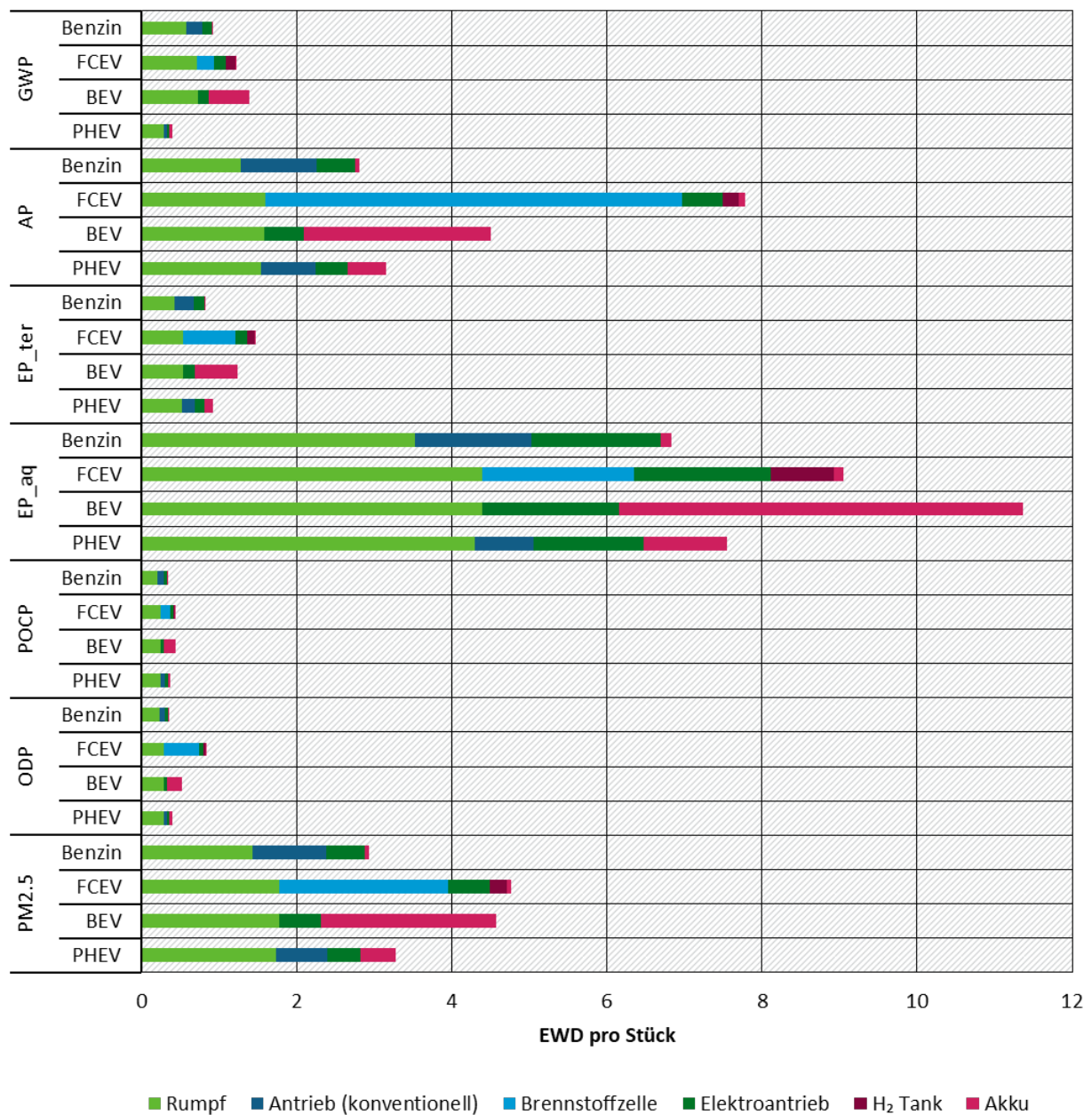
Abbildung 71: Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2020 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug



Anmerkung: KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

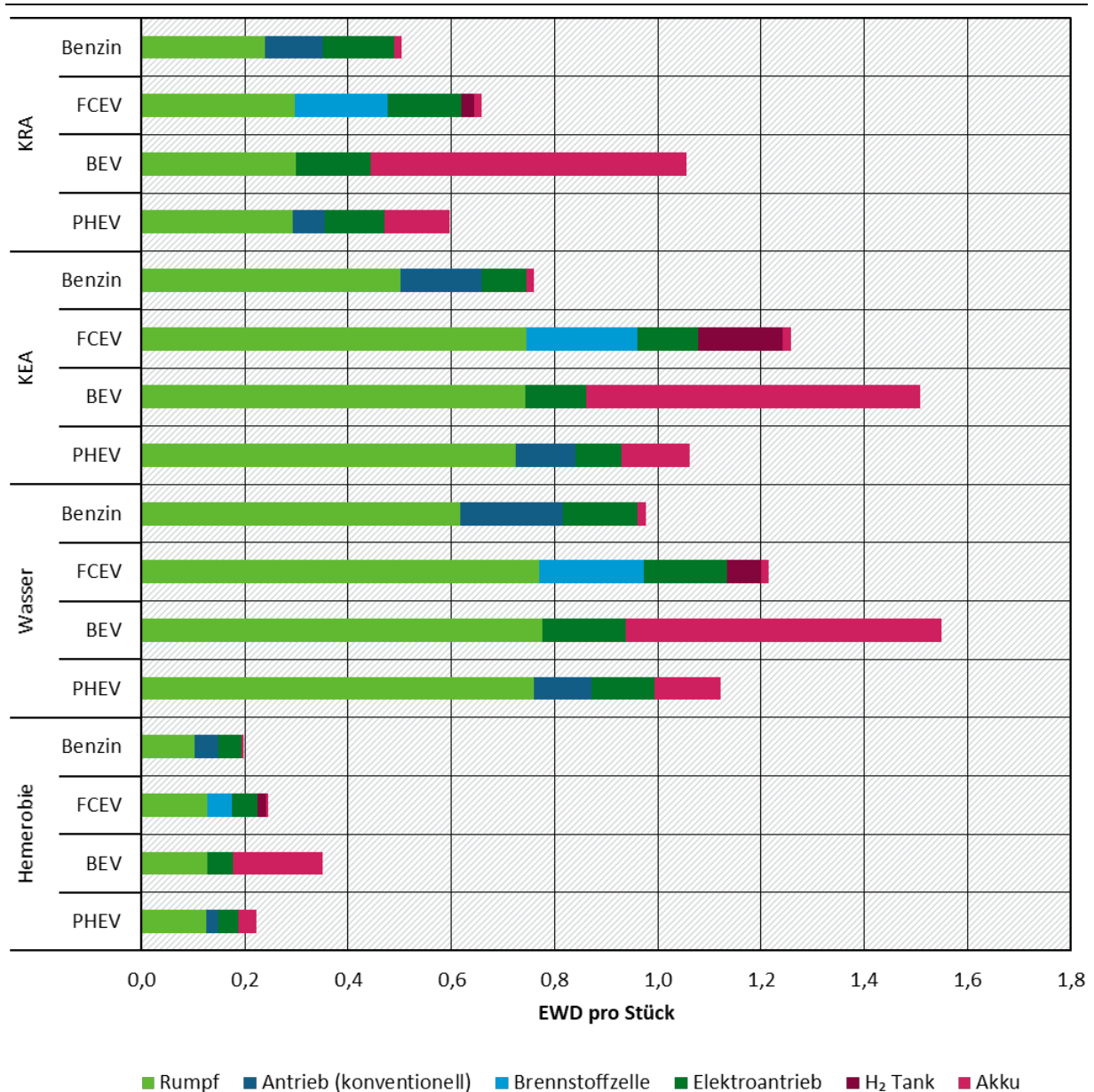
Bei der Analyse der Pkw-Herstellung 2030 (zu sehen in Abbildung 72 und Abbildung 73) zeigen sich ähnliche Trends bei den weiteren LCIA Kategorien wie beim Treibhauspotenzial. Für die Benzin-, Diesel- und CNG-Pkw steigen die Werte durchgängig etwas an, da durch die Hybridisierung weitere Fahrzeugkomponenten benötigt werden, welche mit Lasten verbunden sind. Der FCEV-Pkw verbessert sich dagegen in allen LCIA Kategorien durch die geringere Platinbeladung der Brennstoffzelle. Beim BEV-Pkw hingegen bleiben alle Wirkungskategorien annähernd gleich, da sich die verbesserte Akkuherstellung und der deutlich größere Akku näherungsweise ausgleichen.

Abbildung 72: Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2030 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung
 Quelle: eigene Berechnungen ifeu

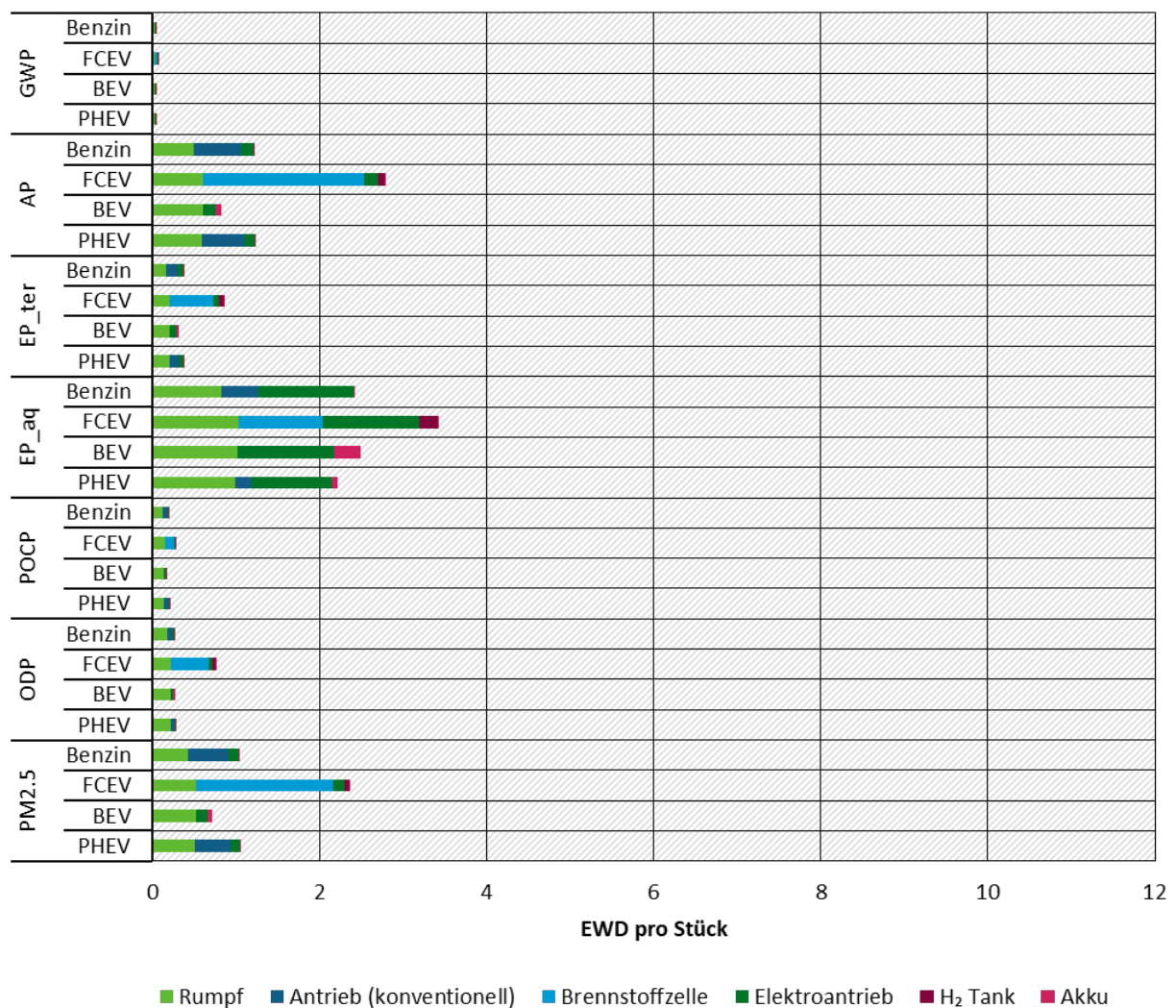
Abbildung 73: Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2030 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug



Anmerkung: KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Deutliche Veränderungen ergeben sich vor allem mit Blick auf die THG-Neutralität im Baujahr 2050. Hier kommt es bei allen in Abbildung 74 gezeigten Umweltindikatoren und bei allen Antriebsvarianten zu sehr deutlichen Rückgängen, wobei das Treibhauspotenzial die größten Rückgänge zeigt. Bei der Relevanz der Umweltindikatoren bleiben weiterhin die aquatische Eutrophierung, die Versauerung und die Feinstaubbelastung am wichtigsten. Weiterhin liegen die Pkw mit alternativem Antrieb über den konventionellen Pkw. Insbesondere der BEV-Pkw zeigt jedoch deutliche Rückgänge, welche unter anderem durch die Umstellung auf den Lithium-Luft-Akku bedingt sind. Damit ist im Baujahr 2050 der Brennstoffzellen-Pkw das Konzept mit den höchsten Lasten aus der Fahrzeugherstellung.

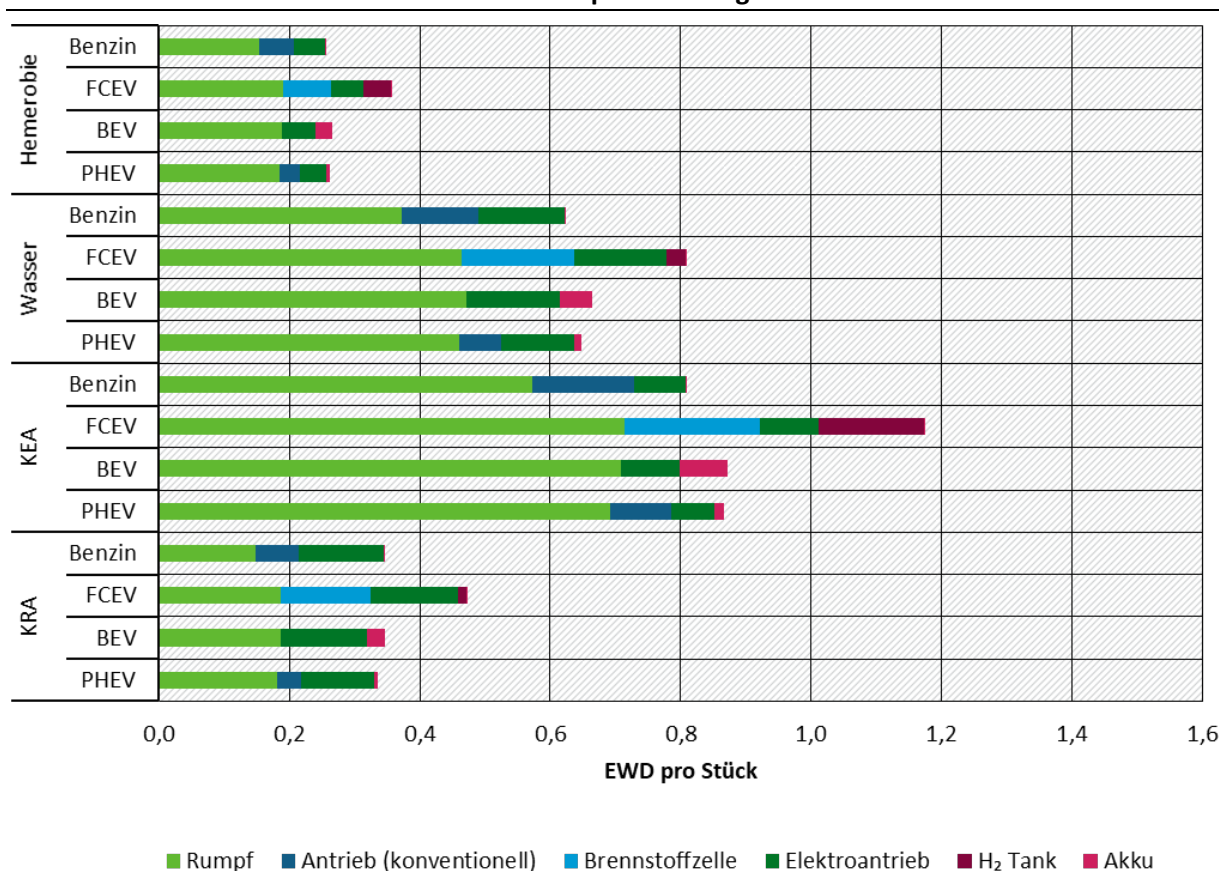
Abbildung 74: Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2050 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Bei den Ressourcenindikatoren (zu sehen in Abbildung 75) kommt es ebenfalls bei allen Kategorien und Antriebsoptionen zu Rückgängen gegenüber der heutigen Fahrzeugherstellung, diese fallen jedoch deutlich geringer aus als bei den Umweltindikatoren. Insbesondere der kumulierte Energieaufwand der Pkw-Herstellung sinkt nur wenig ab, allerdings besteht dieser im Jahr 2050 fast ausschließlich aus erneuerbaren Energien und ist damit (unter der Voraussetzung, dass die erneuerbaren Energien ausreichend ausgebaut sein werden) vor allem vor dem Hintergrund möglicher Knappheiten bei erneuerbaren Energien als Indikator zu sehen.

Abbildung 75: Normierte LCIA Ergebnisse der Pkw-Herstellung 2050 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug



Anmerkung: KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

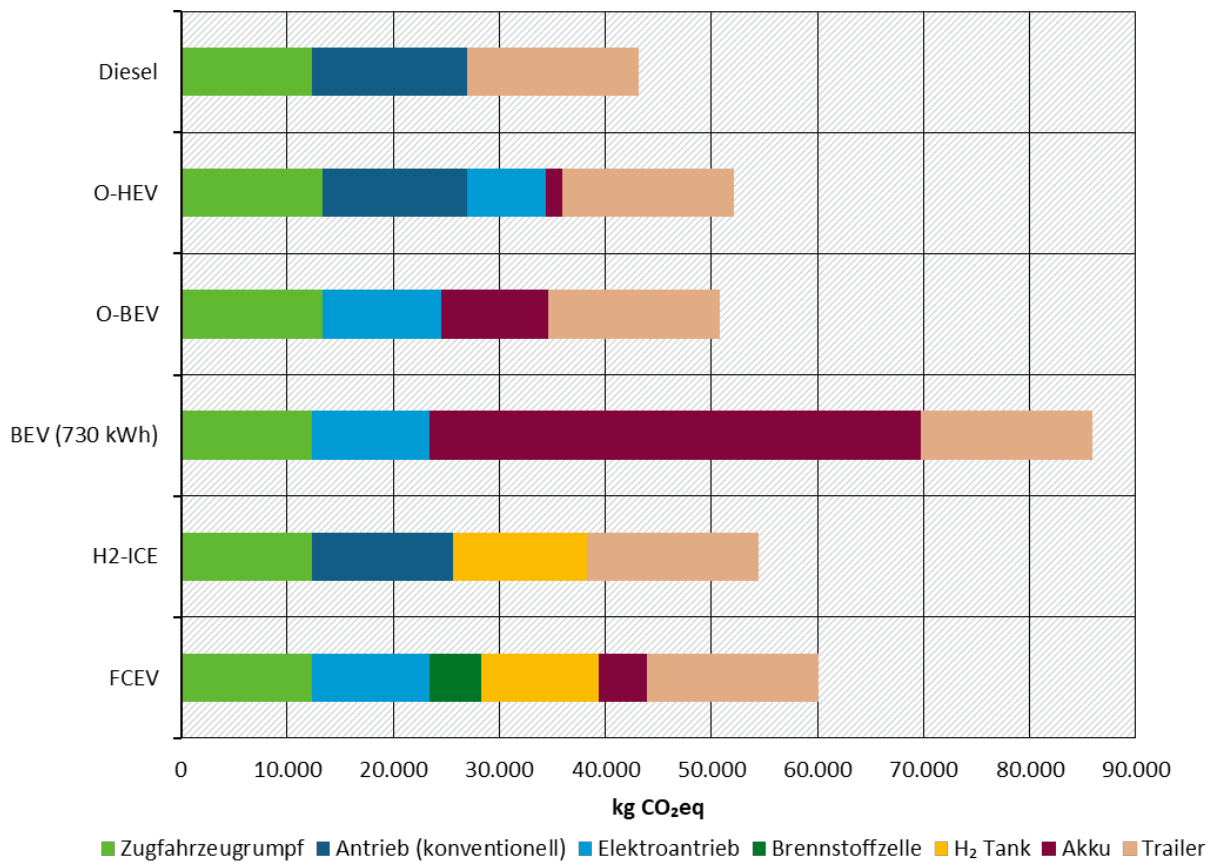
4.2.1.2 Sattelzüge

Treibhauspotenziale

Auch bei der Sattelzugherstellung zeigt sich, dass das Treibhauspotenzial der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben über denen mit konventionellem Antrieb liegt. Hier wird für alternative Antriebe nur 2030 bilanziert, da viele Konzepte 2020 noch gar nicht am Markt verfügbar waren. Bei der Herstellung schneidet der konventionelle Diesel-Sattelzug am besten ab, am schlechtesten der batterieelektrische Sattelzug (vor allem auf Grund seines großen Akkus), der ein etwa doppelt so hohes Treibhauspotenzial in der Herstellung aufweist wie der Diesel-Lkw.

Die Beiträge der unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten zum Treibhauspotenzial der Fahrzeugherstellung zeigt Abbildung 76. Bei allen Antriebsarten haben der Zugfahrzeugrumpf (hier inklusive des Stroms zur Zugfahrzeugherstellung) sowie der Trailer fast dieselben Umweltwirkungen. Unterschiede treten vor allem beim Antrieb auf, hier schneidet der verbrennungsmotorische Antriebsstrang (bestehend aus Motor, Getriebe, Tank, Bleibatterie sowie Abgasreinigung) schlechter ab als der reine Elektroantriebsstrang. Den höchsten Beitrag beim Antriebsstrang hat der Oberleitungs-Hybrid-Lkw, da er beide Antriebsstränge benötigt. Bei den spezifischen Komponenten der Sattelzüge mit alternativen Antrieben sind wiederum vor allem der Akku, aber auch der H₂ Tank und die Brennstoffzelle Treiber der Treibhauspotenziale. Der Pantograph der Oberleitungs-Lkw hat nur einen geringen Einfluss.

Abbildung 76: Treibhauspotenzial der Sattelzugherstellung 2030



Anmerkung: Herstellung von Diesel, LNG und dual-fuel sehr ähnlich und im Jahr 2020 gleich zu 2030 (daher hier nicht dargestellt)

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Gegenüber 2030 geht bei den Sattelzügen das Treibhauspotenzial im Jahr 2050 bei allen Antriebsvarianten, aufgrund des defossilisiert angenommenen Hintergrundsystems, sehr stark zurück und wird hier nicht gesondert gezeigt.

Normierte Umweltwirkungen

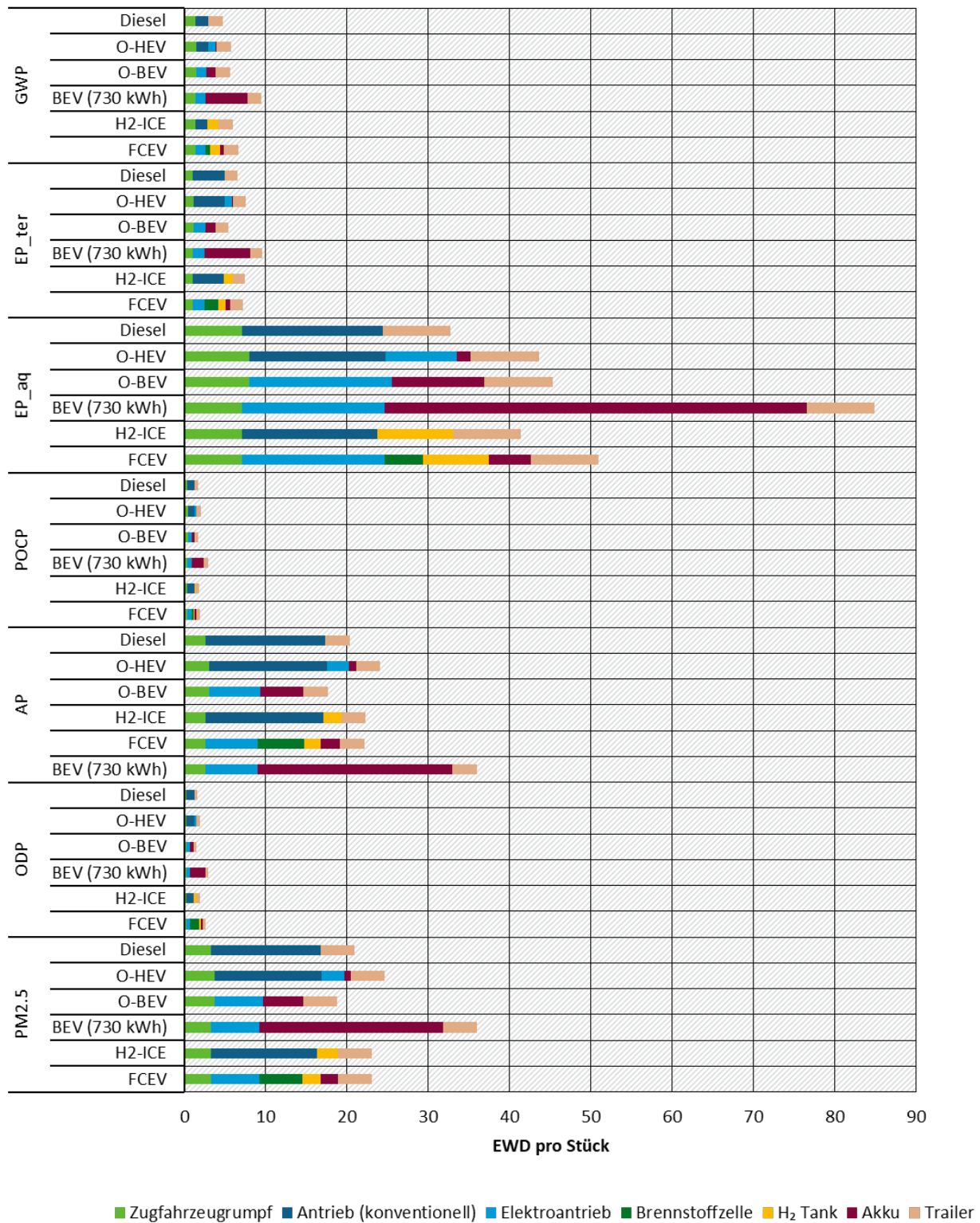
Bei den Sattelzügen werden hier nur die Ergebnisse mit Baujahr 2030 gezeigt, da für das Baujahr 2020 noch keine Sattelzüge mit alternativen Antrieben bilanziert werden. Zudem werden der LNG sowie der dual-fuel Sattelzug nicht gesondert dargestellt, da ihre Umweltwirkungen sehr ähnlich zum Diesel-Sattelzug sind.

Auch bei den normierten Umweltwirkungen der Sattelzug-Herstellung in Abbildung 77 zeigt sich, dass andere Umweltwirkungskategorien größere Bedeutung haben als das Treibhauspotenzial. Besonders auffällig sind hier, wie beim Pkw, die aquatische Eutrophierung, die Versauerung und die Feinstaubbildung. Besonders hoch sind die Umweltwirkungen der rein batterieelektrischen Sattelzüge mit ihrem 730 kWh großen Akku. Ähnlich wie beim Treibhauspotenzial haben die Sattelzüge mit alternativen Antrieben höhere Umweltwirkungen als der Diesel-Sattelzug, einzige Ausnahme ist der O-BEV. Dies liegt vor allem am Wegfall des konventionellen Antriebstranges bei gleichzeitig verhältnismäßig kleinem Akku. Die größten Umweltwirkungen treten beim batterieelektrischen Sattelzug auf, diese liegen zwischen +48 % bei der terrestrischen Eutrophierung und +159 % bei der aquatischen Eutrophierung gegenüber dem Diesel-Sattelzug. Auch der H₂-ICE und FCEV-Sattelzug zeigen erhöhte

Herstellungsemissionen in allen betrachteten Kategorien, diese sind allerdings weniger ausgeprägt als beim BEV. Der O-BEV hingegen weist beim Feinstaub sowie beim Ozonabbau, der terrestrischen Eutrophierung sowie der Versauerung geringere Emissionen auf als der Diesel. In anderen Kategorien liegen die Emissionen zwar höher, aber in den meisten Fällen unterhalb derer anderer Antriebskonzepte.

Ein Vergleich der Beiträge unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten zu den Gesamtemissionen der Sattelzugherstellung zeigt, dass es zu deutlichen Verschiebungen bei den Beiträgen kommt, je nachdem welche Wirkungskategorie untersucht wird. Im Vergleich zum Treibhauspotenzial ist der Einfluss des Antriebsstranges bei Versauerung, Eutrophierung und beim Feinstaub bei den verbrennungsmotorischen Konzepten höher. Aber auch der Akku beim BEV sowie die Brennstoffzelle beim FCEV werden wichtiger, während der H₂ Tank tendenziell weniger beiträgt.

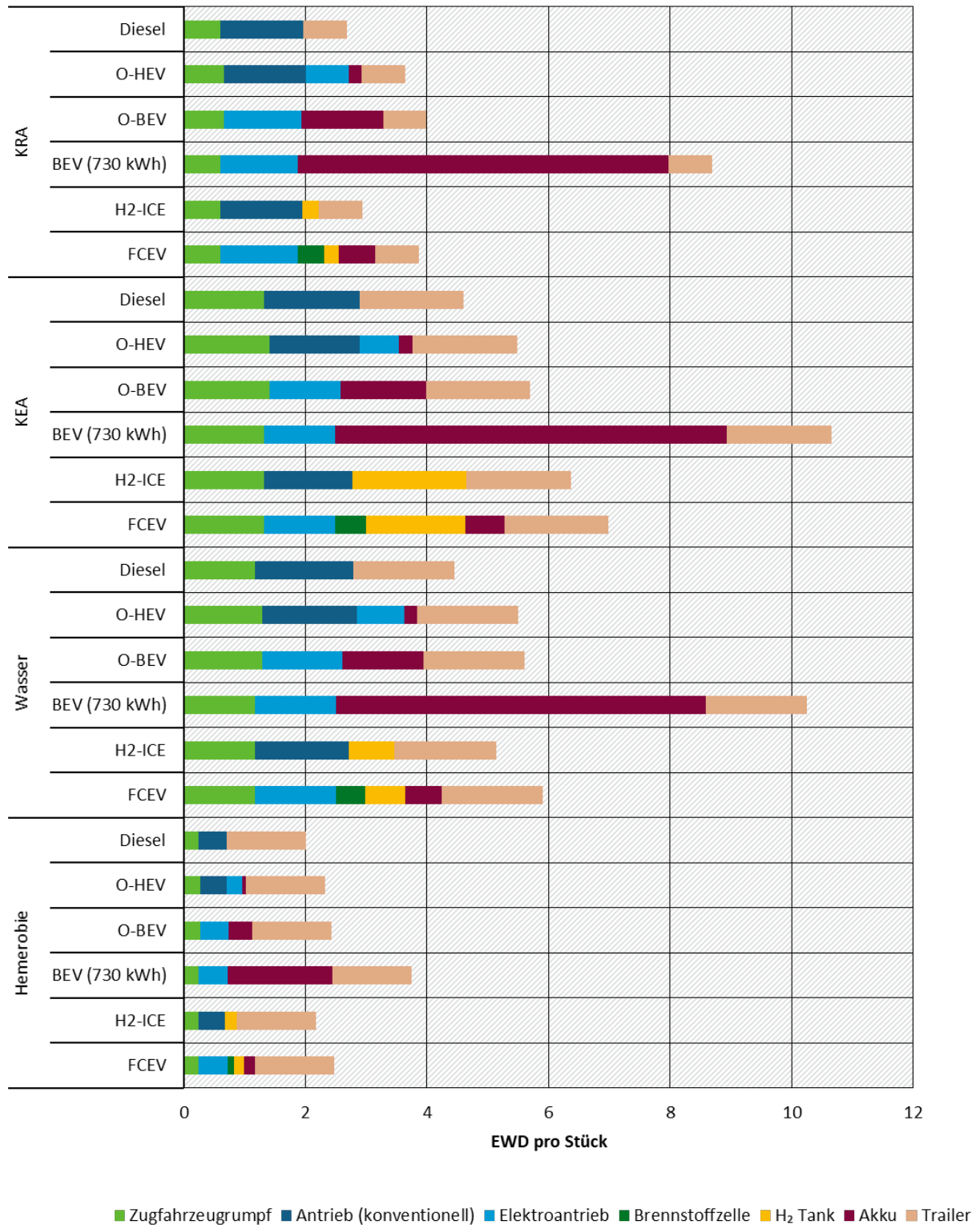
Abbildung 77: Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2030 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Trends bei den Ressourcenindikatoren in Abbildung 78 folgen im Wesentlichen den Umweltindikatoren, auch hier liegen die alternativen Antriebskonzepte höher als der Diesel-Sattelzug. Besonders hohe Werte weist dabei der BEV-Sattelzug in den Kategorien Frischwasserbedarf, kumulierter Rohstoffaufwand sowie kumulierter Energieaufwand auf, wobei diese maßgeblich durch den Akku beeinflusst werden.

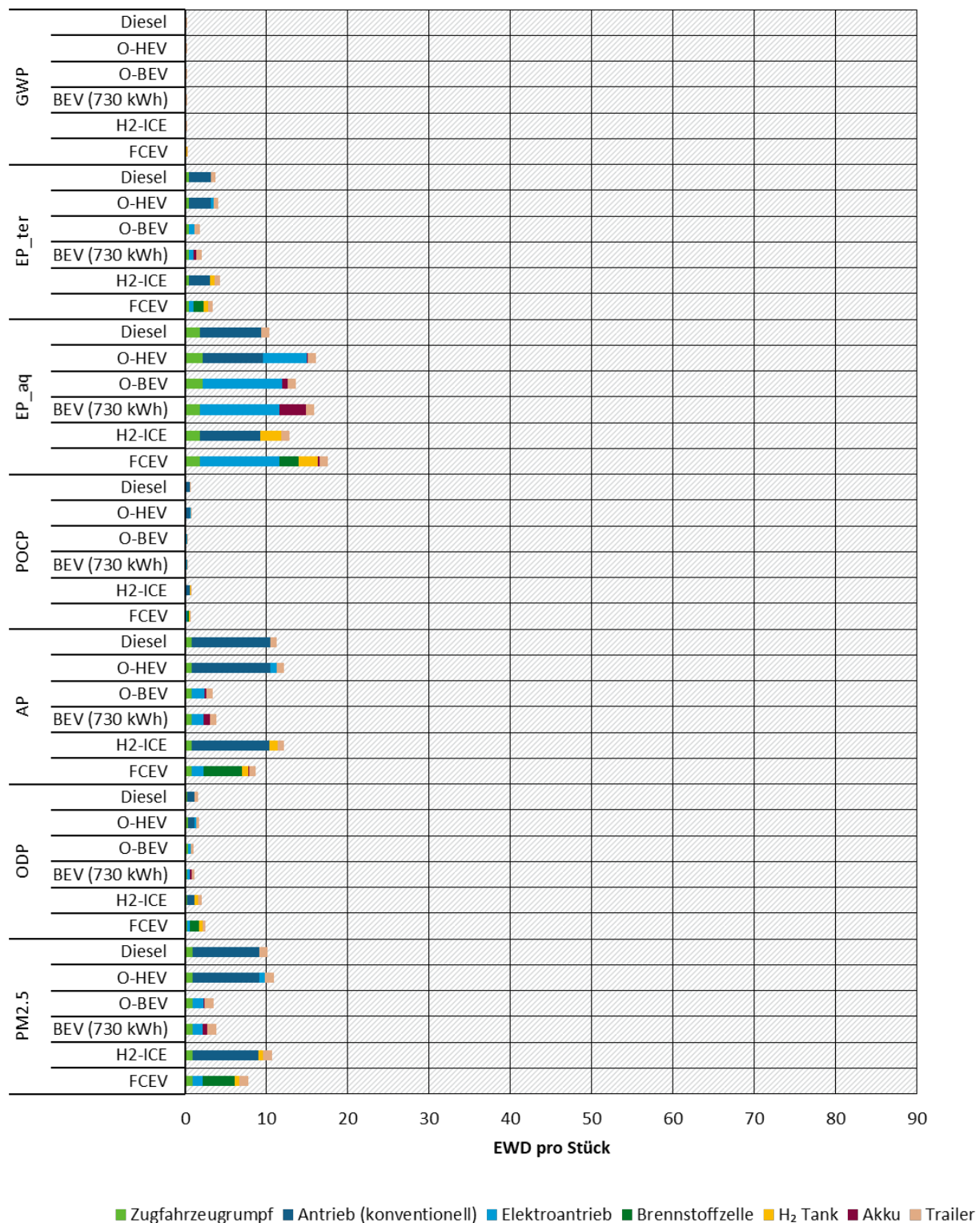
Abbildung 78: Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2030 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug



Anmerkung: KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf
 Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Werden die Umweltindikatoren der Sattelzugherstellung im Baujahr 2050 für eine THG-Neutralität betrachtet, zeigt sich, dass diese durchgehend um fast eine Zehnerpotenz niedriger liegen als heute. Auch hier sind allerdings die Rückgänge bei den anderen Kategorien deutlich geringer ausgeprägt als beim Treibhauspotenzial.

Abbildung 79: Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2050 (Umweltindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW) pro Fahrzeug

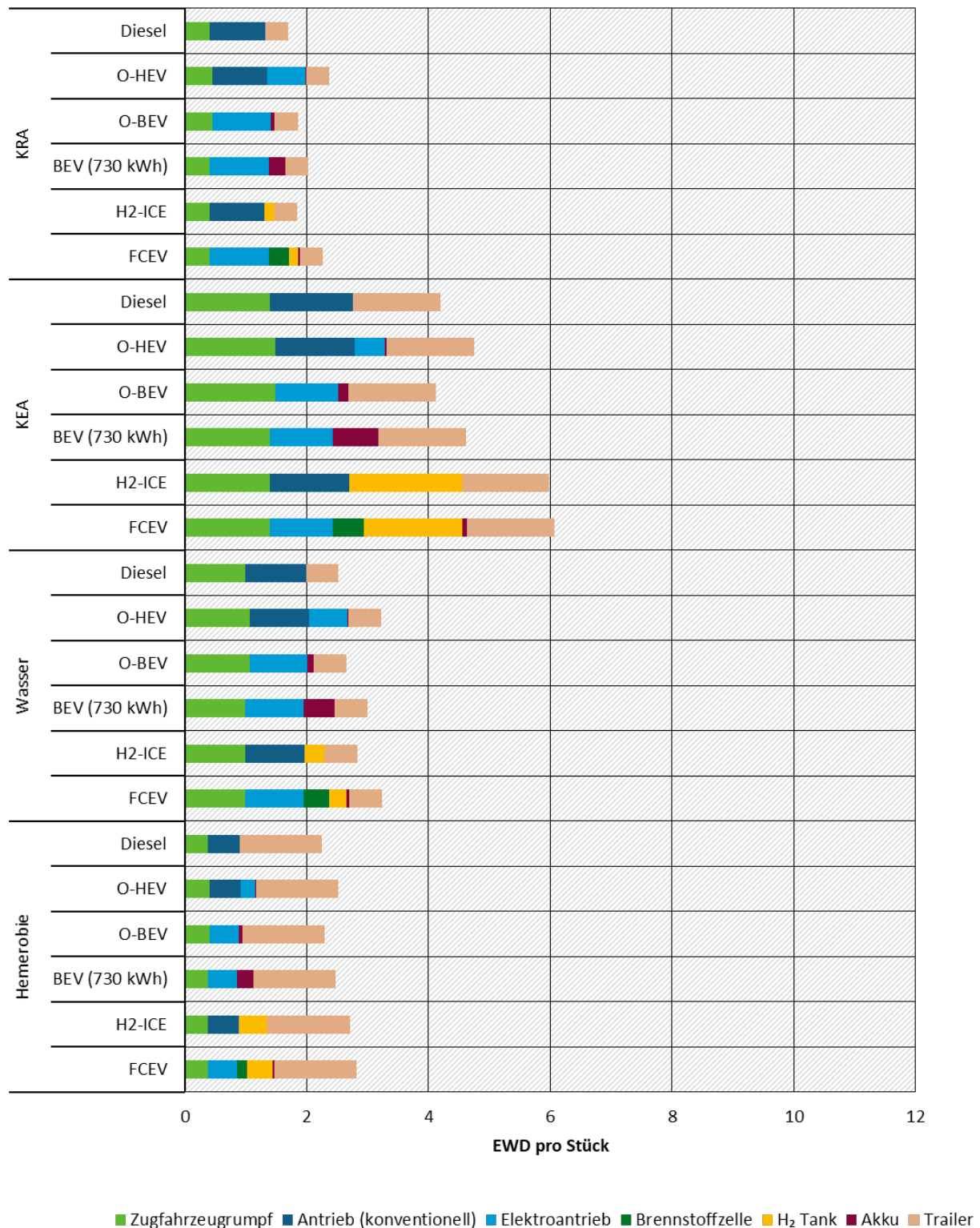


Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung
 Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Auffällig ist, dass es im Baujahr 2050 teilweise zu einer Trendumkehr in der Reihenfolge der Antriebe kommt: die Antriebsvarianten ohne konventionellen Antriebsstrang (FCEV, BEV sowie O-BEV) schneiden jeweils in allen Umweltindikatoren außer dem GWP und der aquatischen Eutrophierung besser ab als der Diesel-Sattelzug. Dies liegt vor allem an der Abgasnachbehandlung im konventionellen Antriebsstrang in diesen Kategorien.

Der Rückgang im Baujahr 2050 gegenüber dem Baujahr 2030 ist bei den Ressourcenindikatoren (siehe Abbildung 80) weniger stark ausgeprägt als bei den Umweltindikatoren. Zudem liegen hier, analog zu 2030, jeweils die Sattelzüge mit alternativen Antrieben über dem Diesel-Sattelzug.

Abbildung 80: Normierte LCIA Ergebnisse der Sattelzug-Herstellung 2050 (Ressourcenindikatoren) in Einwohnerdurchschnittswerten pro Fahrzeug



Anmerkung: KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf
 Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Zu beachten ist hierbei, dass der kumulierte Energieaufwand im Jahr 2050 fast ausschließlich erneuerbar ist.

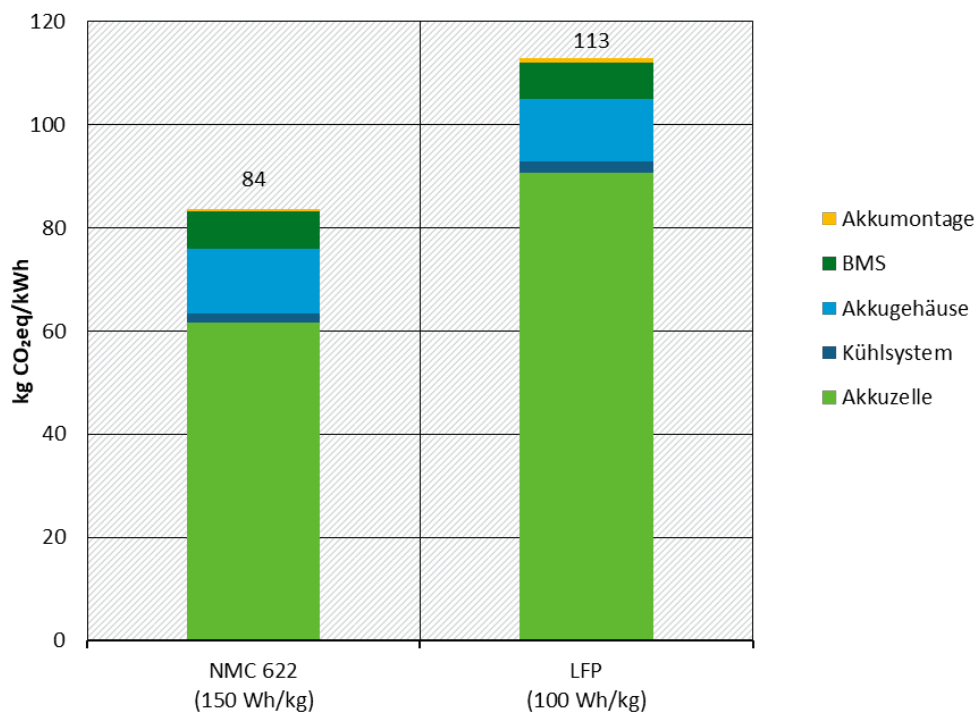
4.2.2 Akkuherstellung

4.2.2.1 Treibhauspotenziale

Der Standard-Akku für das Baujahr 2020 in dieser Studie ist der NMC622-Akku mit einer Energiedichte auf Systemebene von 150 Wh/kg und einem Treibhauspotential von 84 kg CO₂eq pro kWh verbaute Akkukapazität (siehe Abbildung 81). Wird zum Vergleich ein heutiger LFP-Akku mit 100 Wh/kg (heutige durchschnittliche Energiedichte auf Systemebene) betrachtet, liegt dieser beim Treibhauspotential mit 113 kg CO₂eq/kWh deutlich über dem NMC622-Akku. Die beiden Akkutypen unterscheiden sich dabei nur in der Gesamt-Energiedichte auf Systemebene sowie hinsichtlich der Zellmaterialien, nicht aber bei den sonstigen Akkubestandteilen sowie dem Ort der Zellfertigung.

Das höhere Treibhauspotential des LFP-Akkus liegt dabei hauptsächlich in der geringeren Energiedichte gegenüber dem NMC-Akku begründet. Bilanziert man den LFP-Akku als Sensitivität mit gleicher Energiedichte wie beim NMC622-Akku (150 Wh/kg), liegt das Treibhauspotential sogar 10 % unter dem NMC-Akku.

Abbildung 81: Treibhauspotential der Akkus mit Baujahr 2020: NMC622 und LFP



Anmerkung: Die Zellfertigung erfolgt jeweils zu 42% in den USA, zu 29% in China, zu 13% in Japan, zu 7% in Korea zu 6% in der EU sowie zu 3% im Rest der Welt. Für das Hintergrundsystem wird die originale ecoinvent-Datenbank Version 3.8 verwendet.

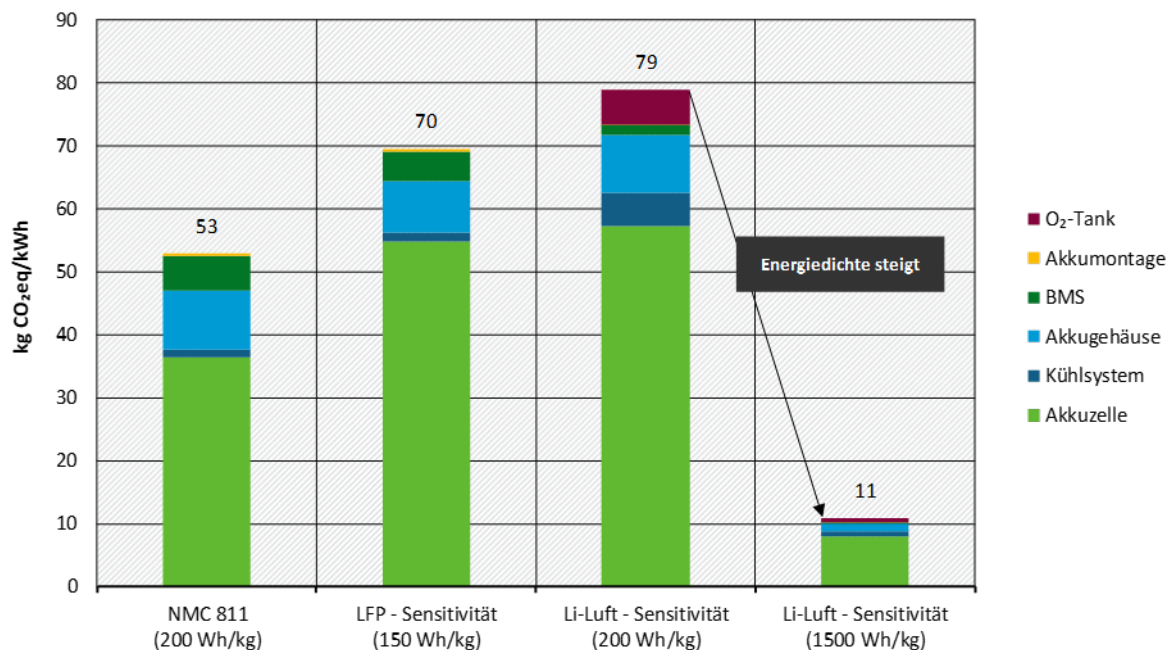
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 82 zeigt den Akku-Vergleich bezüglich des Treibhauspotentials für das Baujahr 2030. Der Standard-Akku ist im Baujahr 2030 der NMC811-Akku mit einer Energiedichte von 200 Wh/kg und einem Treibhauspotential von 53 kg CO₂eq/kWh. Der LFP-Akku mit einer Energiedichte von 150 Wh/kg, wie sie im Jahr 2030 erwartbar ist, liegt mit 70 kg CO₂eq/kWh

weiterhin über dem NMC-Akku. Dies ist analog zum Vergleich der beiden Akkutechnologien mit Baujahr 2020 überwiegend auf die Differenz bei der Energiedichte zurückzuführen.

Als Sensitivität wird zudem der Li-Luft-Akku betrachtet, auch wenn diese Zelltechnologie aufgrund der technologischen Reife in 2030 noch nicht auf dem Markt erwartet wird. Der Li-Luft-Akku würde bei gleicher Energiedichte wie der NMC811-Akku (200 Wh/kg, Wert pro kg Akkusystem abgeleitet aus (Wang et al. 2020a)) ein deutlich höheres Treibhauspotenzial von 79 kg CO₂eq/kWh aufweisen. Prognostiziert werden zukünftig jedoch Energiedichten von bis zu 1500 Wh/kg. Damit sinkt das Treibhauspotenzial deutlich auf 11 kg CO₂eq/kWh. Der Vorteil bezüglich des Treibhauspotenzials liegt beim Li-Luft-Akku also nicht in der Zellchemie an sich, sondern in der deutlich höheren erreichbaren theoretischen Energiedichte.

Abbildung 82: Treibhauspotenzial der Akkus mit Baujahr 2030: NMC811, LFP und Li-Luft

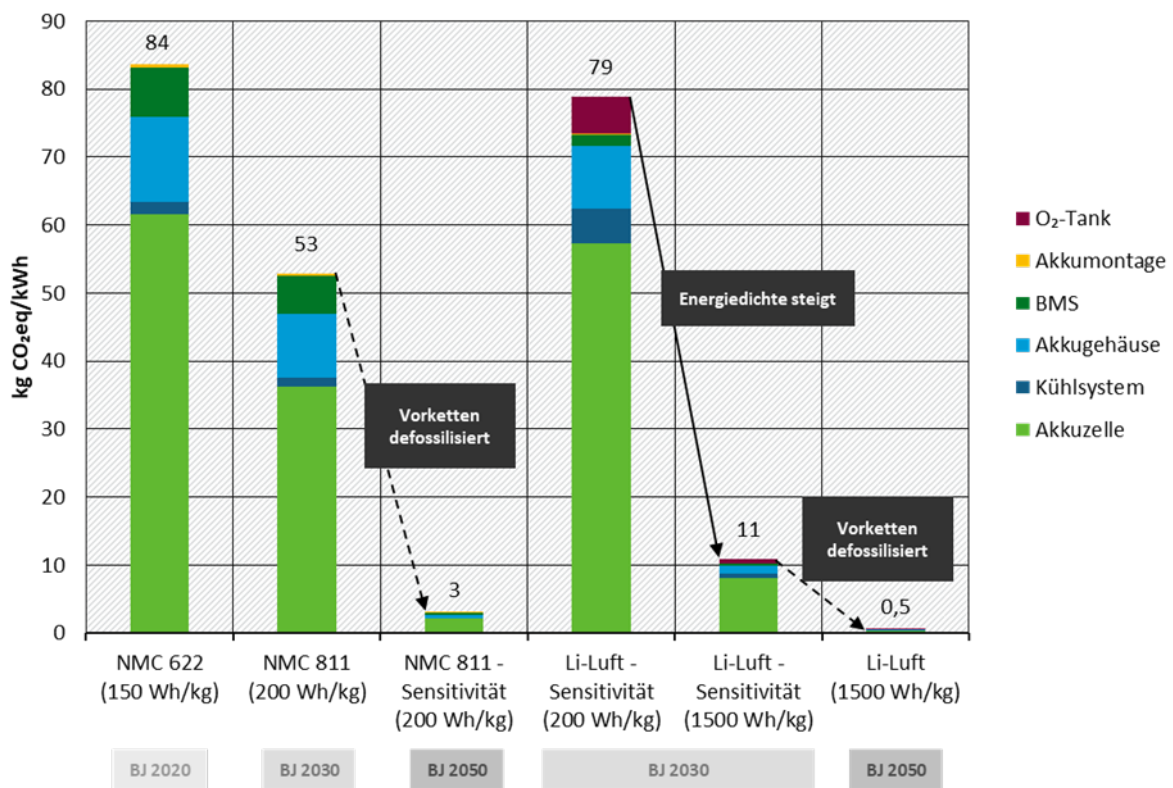


Anmerkung: Die Zellfertigung erfolgt in der EU. Für das Hintergrundsystem wird die originale ecoinvent-Datenbank Version 3.8 verwendet.

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Den Vergleich der Treibhauspotenziale über die Baujahre 2020 bis 2050 hinweg zeigt Abbildung 83. Die Abnahme der Treibhauspotenziale pro kWh verbaute Akkukapazität bei den Standard-Akkus ist zum einen auf die Erhöhung der Energiedichte (NMC622 im BJ 2020 mit 150 Wh/kg, NMC811 im BJ 2030 mit 200 Wh/kg, Li-Luft im BJ 2050 mit 1500 Wh/kg) sowie auf eine Reduktion der energiebedingten Emissionen der Zellfertigung (durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien) zurückzuführen. Ein weiterer Einflussfaktor, der die Abnahme der THG-Emissionen pro kWh verbaute Akkukapazität um eine Größenordnung bestimmt, ist die Defossilisierung der Materialvorketten im Baujahr 2050. So weist der NMC811-Akku bei konstanter Energiedichte von 200 Wh/kg einen Sprung von 53 kg CO₂eq/kWh (BJ 2030) auf 3 kg CO₂eq/kWh (BJ 2050) auf. Die THG-Emissionen des Li-Luft-Akkus fallen bei einer Energiedichte von 1500 Wh/kg von 11 kg CO₂eq/kWh (BJ 2030) auf 0,5 kg CO₂eq/kWh (BJ 2050). Betrachtet man die gesamte Entwicklung vom heutigen NMC622-Akku mit 150 Wh/kg bis zum zukünftigen Li-Luft-Akku mit 1500 Wh/kg, verbleibt durch die Steigerung der Energiedichte (Faktor 10) und die Defossilisierung des Hintergrundsystems nicht mal ein Prozent der ursprünglichen THG-Emissionen.

Abbildung 83: Treibhauspotenzial der Akkus - Vergleich Baujahr 2020-2050

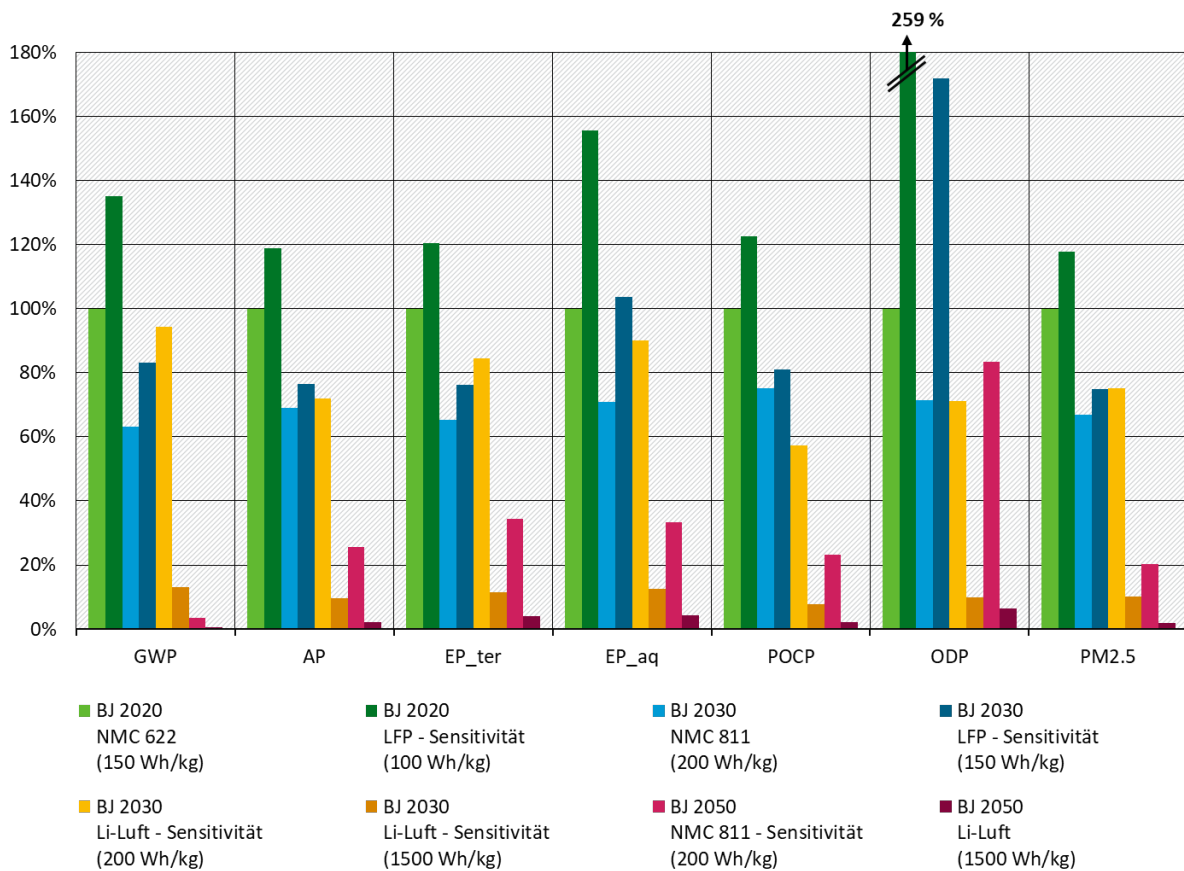


Anmerkung: Für das Hintergrundsystem wird für das Baujahr 2020 und 2030 die originale ecoinvent-Datenbank Version 3.8 verwendet. Für das Baujahr 2050 wird die gemäß dem GreenSupreme-Szenario angepasste ecoinvent-Datenbank genutzt. Quelle: eigene Berechnungen ifeu

4.2.2.2 Sonstige LCIA-Ergebnisse

Um dem Treibhauspotenzial die anderen Wirkungskategorien gegenüberzustellen, werden die LCIA-Ergebnisse für die verschiedenen Akkutechnologien mit Baujahr 2020 bis 2050 relativ zum NMC622-Akku (= 100 %; BJ 2020) aufgetragen (siehe Abbildung 84).

Abbildung 84: LCIA-Ergebnisse (Umweltindikatoren) der Akkus mit Baujahr 2020-2050



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Für die Akkus mit Baujahr 2020 sieht der Vergleich zwischen NMC- und LFP-Akkus bei den anderen Umweltwirkungen ähnlich aus wie beim Treibhauspotenzial. Deutlich größer ist der Unterschied bei der aquatischen Eutrophierung und insbesondere beim Ozonabbaupotenzial, bei dem der LFP-Akku ca. 160 % über dem NMC622-Akku liegt. In diesen beiden Wirkungskategorien liegt der LFP-Akku mit Baujahr 2030 immer noch über dem NMC622-Akku mit Baujahr 2020. Beim Ozonabbau ist beim LFP-Akku überwiegend Tetrafluorethylen in der Kathode verantwortlich. Das aquatische Eutrophierungspotenzial wird beim LFP-Akku vom Aktivmaterial (u.a. Kupfer und Phosphorsäure) bestimmt.

Die übrigen Akkutechnologien mit Baujahr 2030 und 2050 liegen jeweils unter dem NMC622-Akku mit Baujahr 2020. Während der NMC811-Akku beim Treibhauspotenzial um 37 % besser als der NMC622-Akku abschneidet, ist der Unterschied in den meisten der weiteren Wirkungskategorien etwas geringer. Die über die Wirkungskategorien hinweg ähnlich großen Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass beide Akkutypen aus denselben Materialien bestehen und es lediglich leichte Verschiebungen bei der Zusammensetzung des Kathodenaktivmaterials sowie verringerte Materialeinsätze und Energiebedarfe beim NMC811-Akku mit Baujahr 2030 gibt.

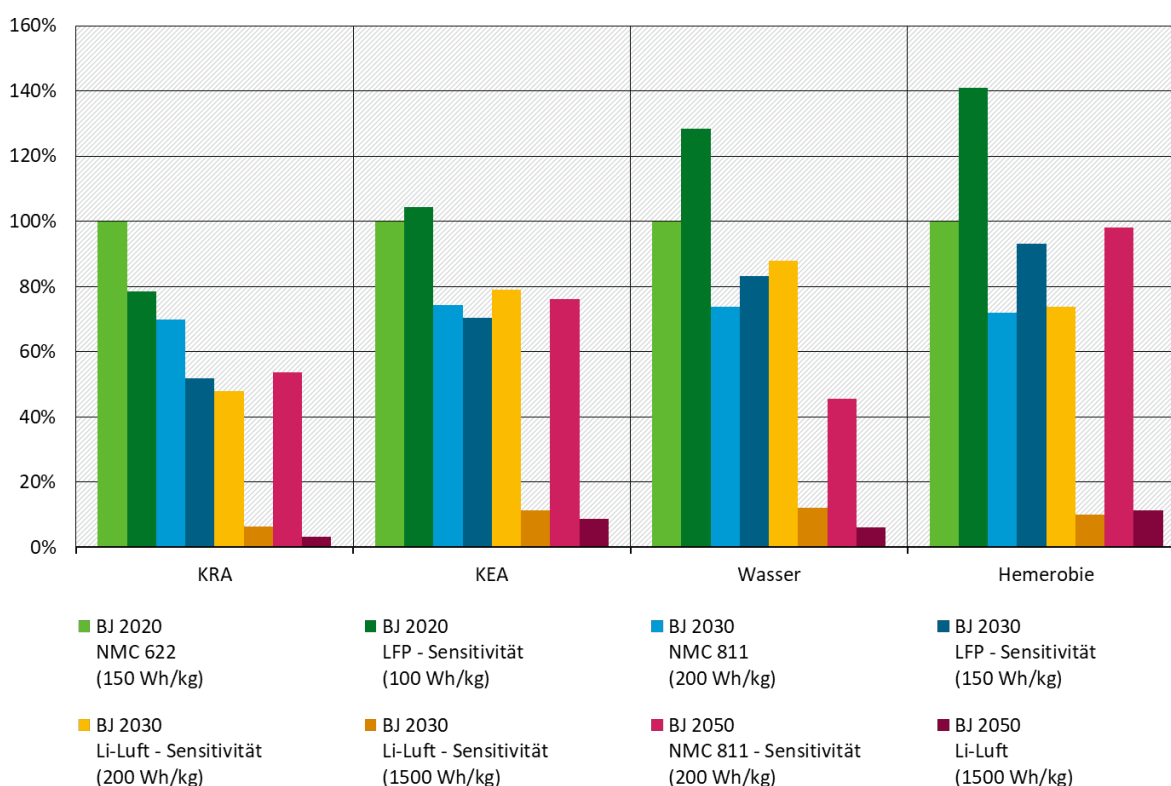
Auffällig beim Vergleich zwischen den Akkus mit Baujahr 2030 und Baujahr 2050 ist vor allem die Wirkungskategorie, deren Ergebnis von 2030 auf 2050 steigt. Dies betrifft beim NMC811-

Akku das Ozonabbaupotenzial, das in 2030 vornehmlich auf Lachgasemissionen und in 2050 auf Lachgas- und Tetrachlormethan-Emissionen zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse der Ressourcenindikatoren sind in Abbildung 85 dargestellt. Beim Vergleich zwischen dem NMC622- und dem LFP-Akku fällt auf, dass der kumulierte Rohstoffaufwand die einzige Wirkungskategorie ist, bei dem der LFP-Akku geringere Werte aufweist. Dies ist auf einen geringeren Rohstoffaufwand beim Aktivmaterial als beim NMC-Akku zurückzuführen.

Auch bei den Ressourcenindikatoren fallen LCIA-Ergebnisse auf, die von Baujahr 2030 auf Baujahr 2050 steigen. Beim NMC811-Akku ist dies zum einen der kumulierte Energieaufwand, der für beide Baujahre annähernd gleich hoch ist. Jedoch ist hier für die Ergebnisse in 2030 maßgeblich die Energieerzeugung durch Erdgas, Wasserkraft, Kohle, Erdöl und Uran (in absteigender Reihenfolge) verantwortlich, während in 2050 die Energieerzeugung überwiegend durch Solar- und Windkraft (und in geringerem Maße Geothermie und Wasserkraft) erfolgt. Die Hemerobie-Kategorie wird 2030 von der Naturraumbeanspruchung durch Deponien dominiert, während diese 2050 an Bedeutung verliert und dafür andere Prozesse relevanter werden. Die Hemerobie ist zudem die einzige Kategorie, in der auch beim Li-Luft-Akku eine leichte Steigung von Baujahr 2030 auf Baujahr 2050 zu verzeichnen ist.

Abbildung 85: LCIA-Ergebnisse (Ressourcenindikatoren) der Akkus mit Baujahr 2020-2050

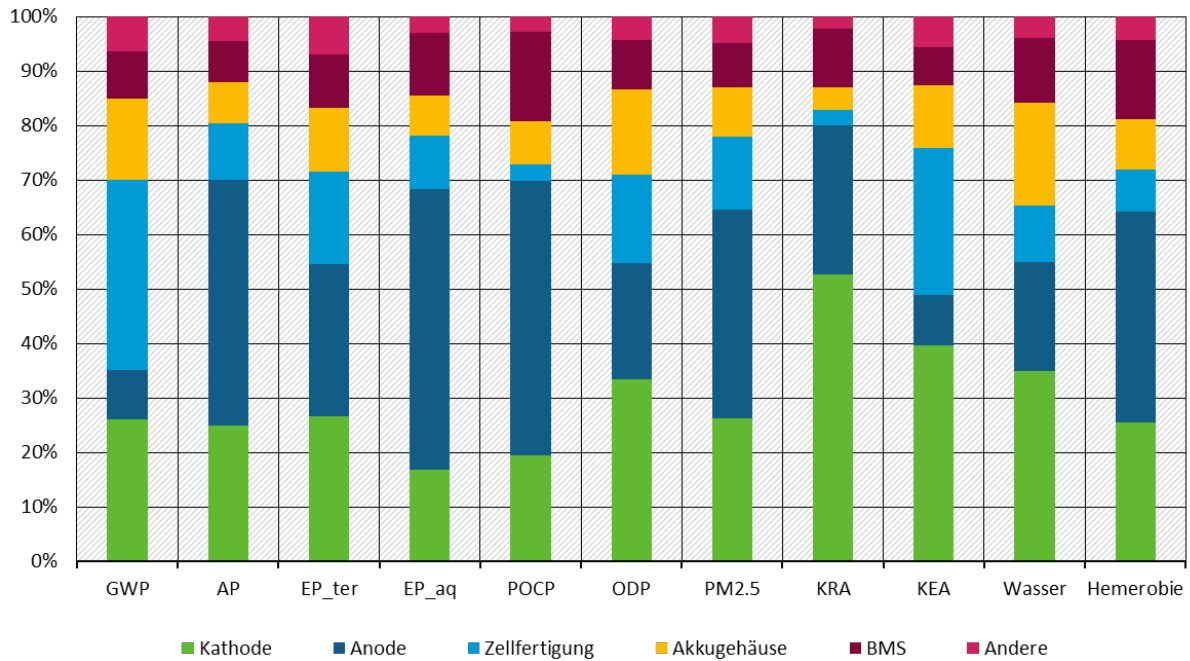


Anmerkung: KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

In Abbildung 86 werden für den NMC622-Akku die Beiträge der Akkubestandteile zu den verschiedenen Wirkungskategorien im Detail dargestellt. Beim Treibhauspotenzial trägt die Zellfertigung entscheidend bei, während bei den anderen Wirkungskategorien der Einfluss der Zellmaterialien (insbesondere bei der Anode) größer ist als beim Treibhauspotenzial. Dies liegt neben dem Aktivmaterial auch am Stromabnehmer aus Aluminium in der Kathode sowie am

Kupferstromabnehmer in der Anode. Neben der Akkuzelle und der Zellfertigung haben auch das Akkugehäuse sowie die benötigte Elektronik im BMS einen relevanten Einfluss.

Abbildung 86: LCIA-Ergebnisse - NMC622-Akku (150 Wh/kg) BJ 2020

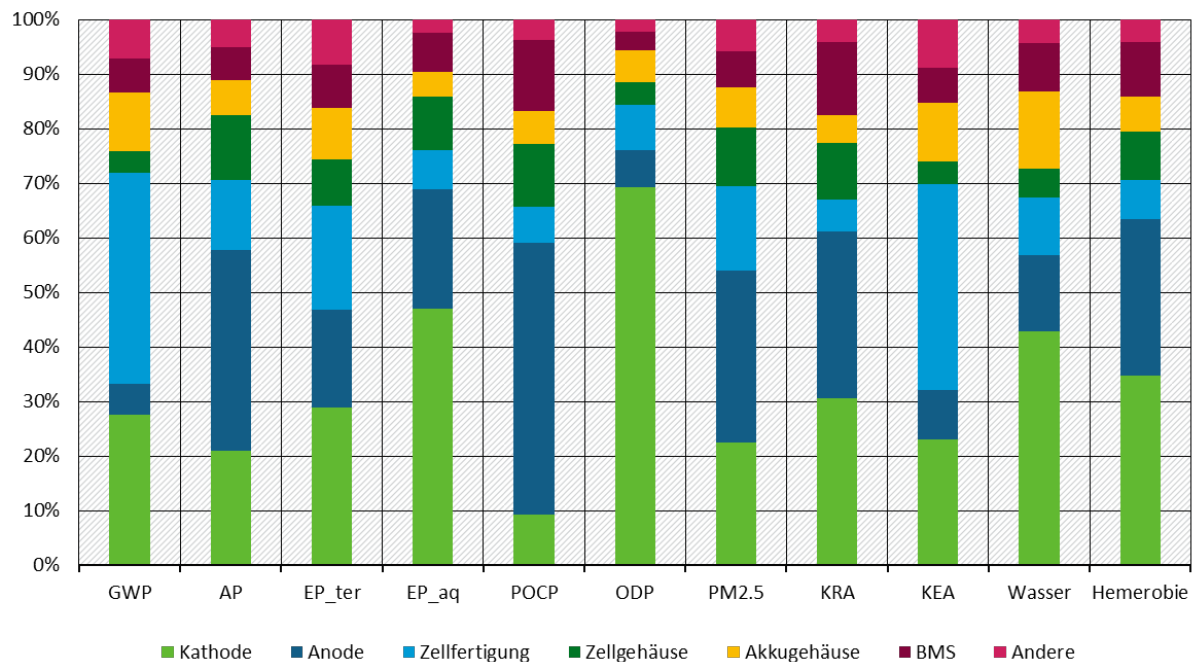


Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung; KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Dem NMC622-Akku (Abbildung 86) wird für das Baujahr 2020 der LFP-Akku als Sensitivität gegenübergestellt. Die Beiträge der Akkukomponenten des LFP-Akkus sind in Abbildung 87 dargestellt.

Abbildung 87: LCIA-Ergebnisse - LFP-Akku (100 Wh/kg) BJ 2020



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung; KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die Kathode trägt zu vielen Wirkungskategorien entscheidend bei, was überwiegend auf Lithiumhydroxid und in geringerem Maße auf Phosphorsäure zurückzuführen ist. Beim Ozonabbau ist hingegen vor allem Tetrafluorethylen für den hohen Beitrag der Kathode verantwortlich. Tetrafluorethylen ist in dem für Lithium-Ionen-Akkus gängigen Polyvinylidendifluorid (PVDF)-Bindemittel enthalten (Peters et al. 2016). In den Wirkungskategorien Versauerung, photochemische Ozonbildung und Feinstaubbelastung ist ein hoher Beitrag der Anode erkennbar, der zu großen Teilen auf das Kupfer der Stromabnehmer zurückzuführen ist. Die Zellfertigung zeigt vor allem beim Treibhauspotenzial und beim kumulierten Energieaufwand einen hohen Beitrag auf. Die verwendete Wärmeenergie ist hier die entscheidende Ursache.

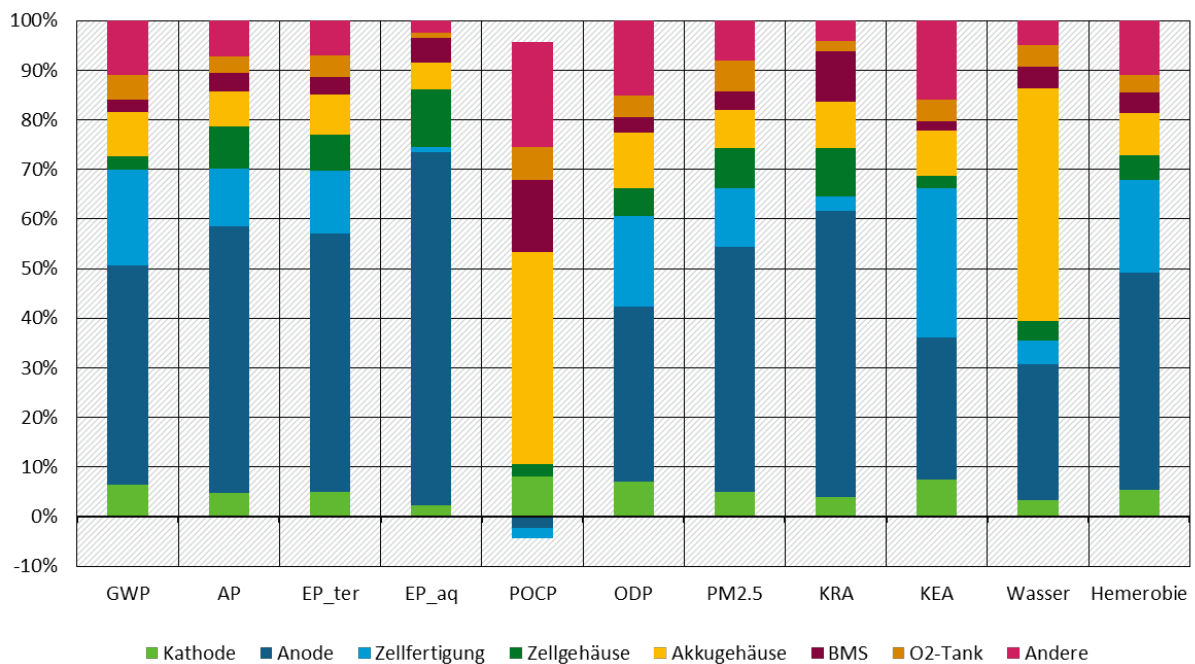
Für das Baujahr 2030 wird in dieser Detailübersicht kein Akku gezeigt. Dies liegt daran, dass die relativen Beiträge zu den Wirkungskategorien sich beim NMC811-Akku nur unmerklich vom NMC622-Akku unterscheiden. Auffällig ist lediglich, dass der Beitrag der Zellfertigung über alle Wirkungskategorien hinweg etwas kleiner wird, insbesondere beim Treibhauspotenzial, bei dem der Beitrag von 35 % auf 23 % sinkt. Dies ist auf die Veränderung im Energiemix von Baujahr 2020 auf 2030 (Zellfertigung in der EU) zurückzuführen. Die Verschiebung beim Aktivmaterial (mehr Nickel, weniger Mangan und Kobalt) hat keine sichtbaren Auswirkungen auf die relativen Beiträge der Akkukomponenten (z. B. der Beitrag der Kathode zum kumulierten Rohstoffaufwand bleibt konstant bei 53 %).

Für das Baujahr 2050 wird der Li-Luft-Akku in Abbildung 88 im Detail dargestellt. Im Vergleich zu den Lithium-Ionen-Akkus (NMC, LFP) fällt auf, dass die Relevanz der Kathode in allen Wirkungskategorien stark sinkt, während der Beitrag der Anode in den meisten Wirkungskategorien dominant ist. So kehrt sich z. B. beim Treibhauspotenzial das Beitragsverhältnis von Kathode und Anode um. Bei den Lithium-Ionen-Akkus hat die Kathode

einen entscheidenden Beitrag zum GWP, während beim Li-Luft-Akku der Beitrag der Anode überwiegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Lithium-Ionen-Akkus die Kathode aus stärker klimawirksamen Materialien (u.a. Lithiumhydroxid) besteht als die Anode (v.a. Graphit), während die Kathode beim Li-Luft Akku lediglich durch ein mit Katalysator bestäubtes Kohlenstoffskelett gebildet wird und das Lithium als Metall in der Anode steckt. Neben dem Lithium ist das Kupfer des Stromabnehmers eine Ursache für die Umweltwirkung der Anode, insbesondere bei den anderen Wirkungskategorien wie Versauerung und Eutrophierung.

Der hohe Beitrag des Akkugehäuses zur photochemischen Ozonbildung ist überwiegend der Leiterplatte zuzuschreiben. Der negative Beitrag wird durch Stickoxid-Emissionen verursacht, die einen negativen Charakterisierungsfaktor (-0,095 kg Ethen-eq/kg NO_x) in dieser Wirkungskategorie aufweisen. Beim Frischwasserbedarf ist der Beitrag des Akkugehäuses zu großen Teilen auf Aluminium (insbesondere durch die Anodisierung als Oberflächenbehandlung) und Kupfer zurückzuführen.

Abbildung 88: LCIA-Ergebnisse - Li-Luft-Akku (1500 Wh/kg) BJ 2050



Anmerkung: AP = Versauerung; EP_ter = Eutrophierung (terrestrisch); EP_aq = Eutrophierung (aquatisch); POCP = photochemische Ozonbildung; ODP = Ozonabbau; PM2.5 = Feinstaubbelastung; KRA = kumulierter Rohstoffaufwand; KEA = kumulierter Energieaufwand; Wasser = Frischwasserbedarf

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

4.3 Analyse der umweltrelevanten Materialien, Basisprozesse und Emissionen

Die Treibhausgasbilanz von Kraftfahrzeugen wird heute von Nutzung und Bereitstellung fossiler Energieträger dominiert. In vielen anderen Umweltwirkungskategorien sind die Herstellungsprozesse der Fahrzeuge relevanter. Die Ergebnisse werden dabei durch wenige Materialien, Prozesse oder Emissionen verursacht. Mit zunehmender Defossilisierung nimmt die Bedeutung des GWP als Leitindikator ab (s. a. Kap. 3.2 und 3.3) und gleichzeitig die Relevanz der Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung zu. Schwerpunkt dieses Unterkapitels ist, die relevanten Ursachen von Umweltbelastungen der Bereitstellungsprozesse heute und in einem defossilisierten Produktionssystem 2050 zu identifizieren und darzustellen.

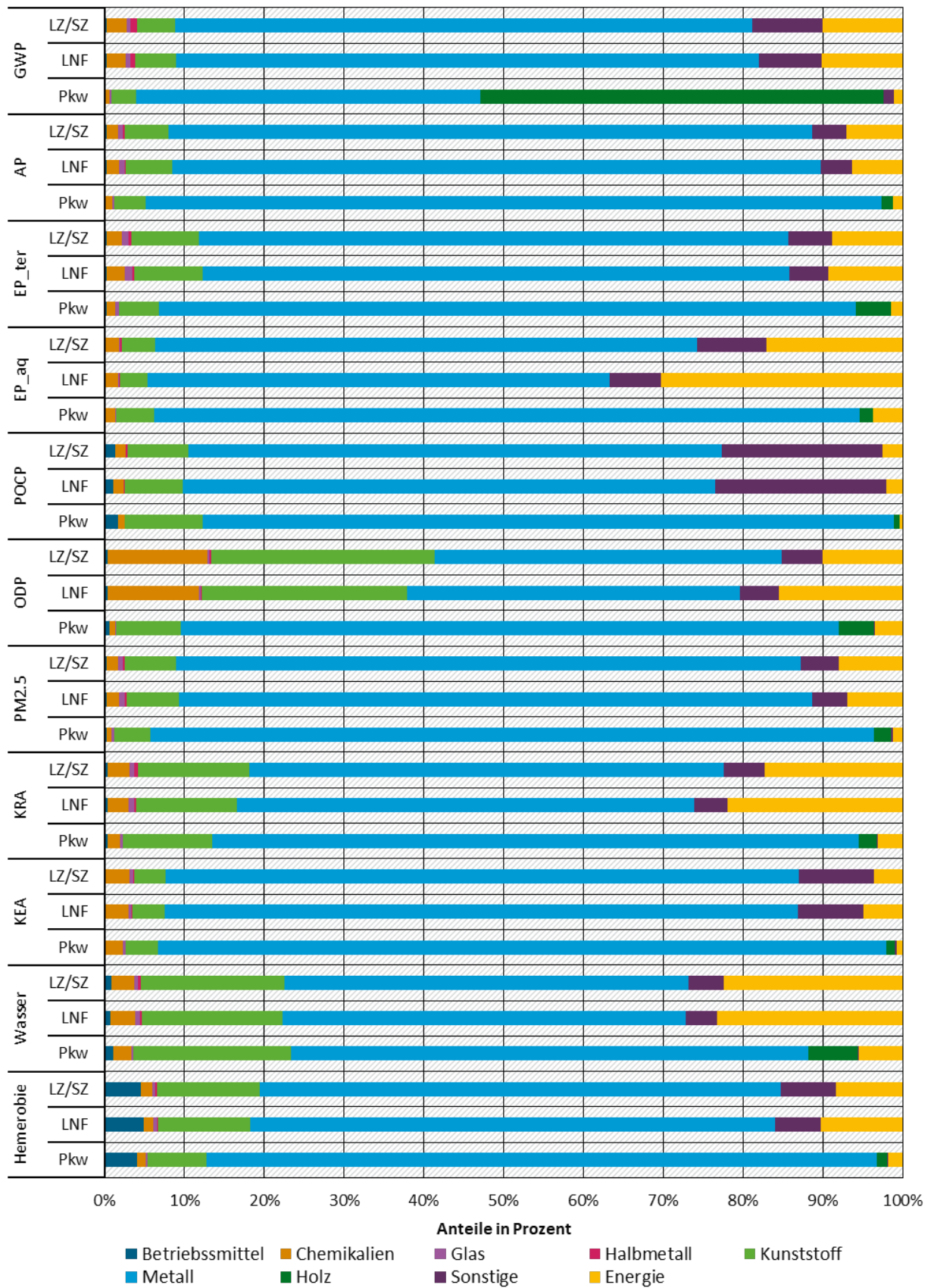
4.3.1 Umweltrelevante Materialien

4.3.1.1 Fahrzeugherstellung

Die Umweltbelastungen der Fahrzeugherstellung werden für die meisten Wirkungskategorien durch die Herstellung des Fahrzeugrumpfes dominiert, insbesondere die Ergebnisse von konventionellen Pkw und LNF (Kapitel 4.2.1.1); bei SNF trägt die Herstellung des Anhängers (Trailer) ebenfalls relevant bei (Kapitel 4.2.1.2).

In den folgenden Abbildungen werden die wichtigsten Beiträge von Materialgruppen der Fahrzeugherstellung zu den Umweltwirkungen dargestellt; zwecks Übersichtlichkeit werden die Umweltwirkungen für alle Antriebstechnologien für einen Fahrzeugtyp zusammenaddiert.

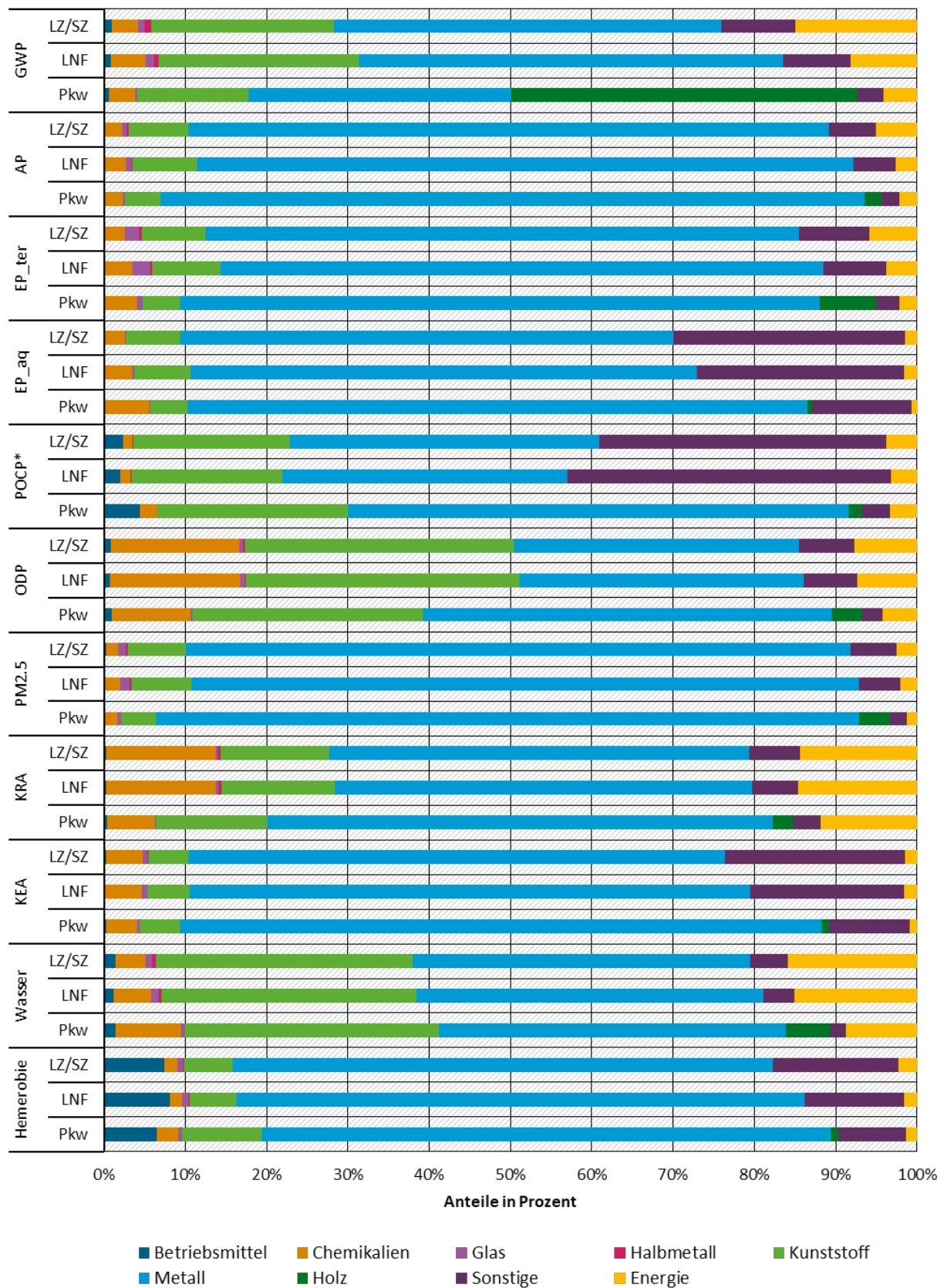
Abbildung 89: Beiträge von Materialgruppen zu Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2020



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 89 zeigt die Beiträge von Materialgruppen zu Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2020. Die Umweltlasten der Metallherstellung dominieren in allen Wirkungskategorien, aber auch die Kunststoffherstellung und die Energiebereitstellung verursachen relevante Beiträge. In einzelnen Kategorien spielt auch die Chemikalienherstellung (in der Kategorie ODP) und die Holzbereitstellung (Hemerobie) eine Rolle.

Abbildung 90: Beiträge von Materialgruppen zu Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2050



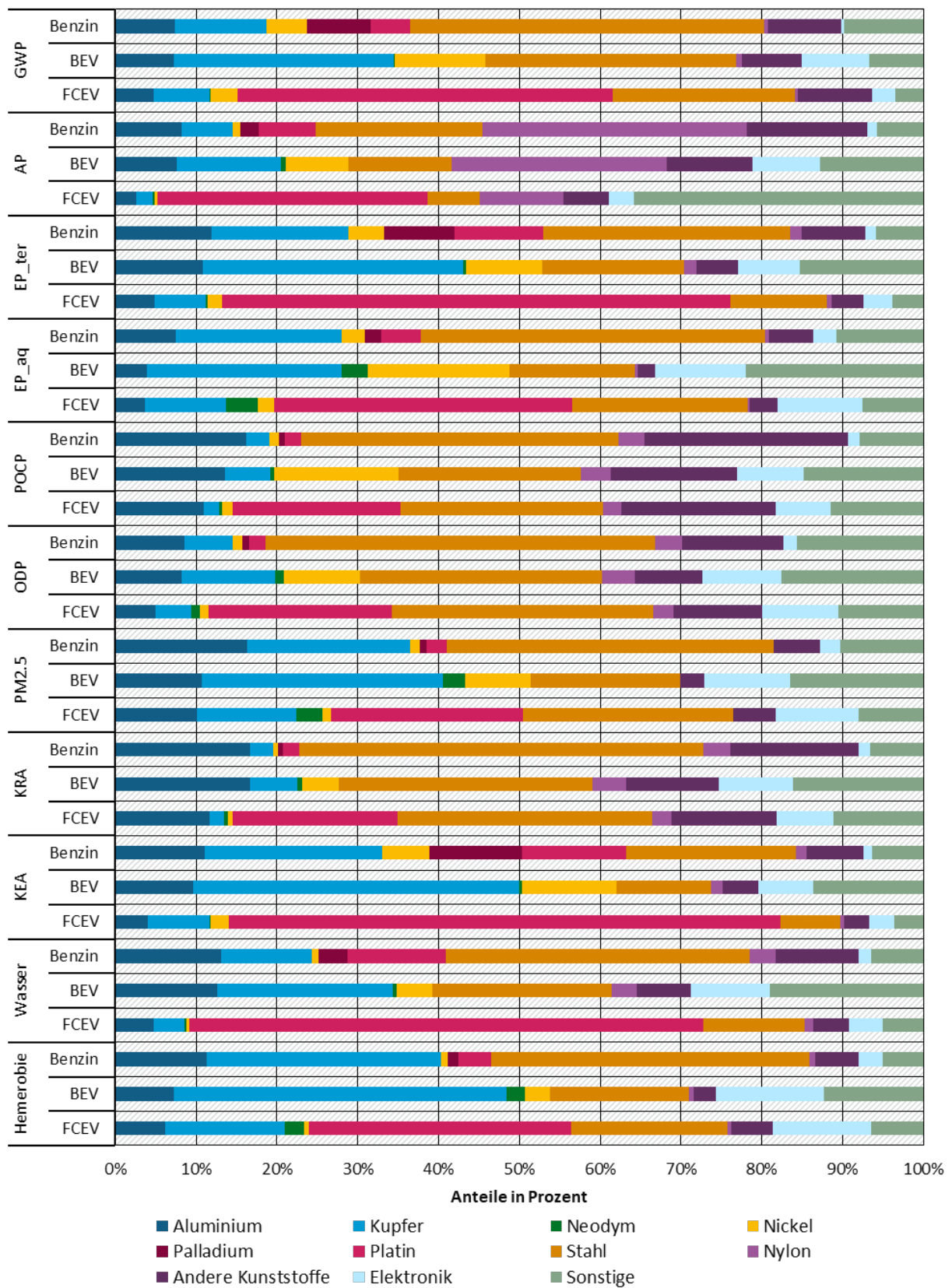
*POCP: Netto-negative Beiträge (aus NO_x-Emissionen) werden nicht dargestellt (<1 %)

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Im Jahr 2050 (Abbildung 90) dominiert weiterhin die Metallbereitstellung die Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung. Die Relevanz der Chemikalien- und Kunststoffherstellung sowie der sonstigen Materialien nimmt jedoch in einer angenommenen defossilisierten Zukunft zu. Herauszuheben ist insbesondere die Chemikalie Tetrafluorethylen (TFE) als Grundstoff für die Brennstoffzellenmembran-Herstellung. Sie verursacht einen Beitrag zum Ozonabbau von 33 % bzw. 42 % in den Jahren 2020 und 2050.

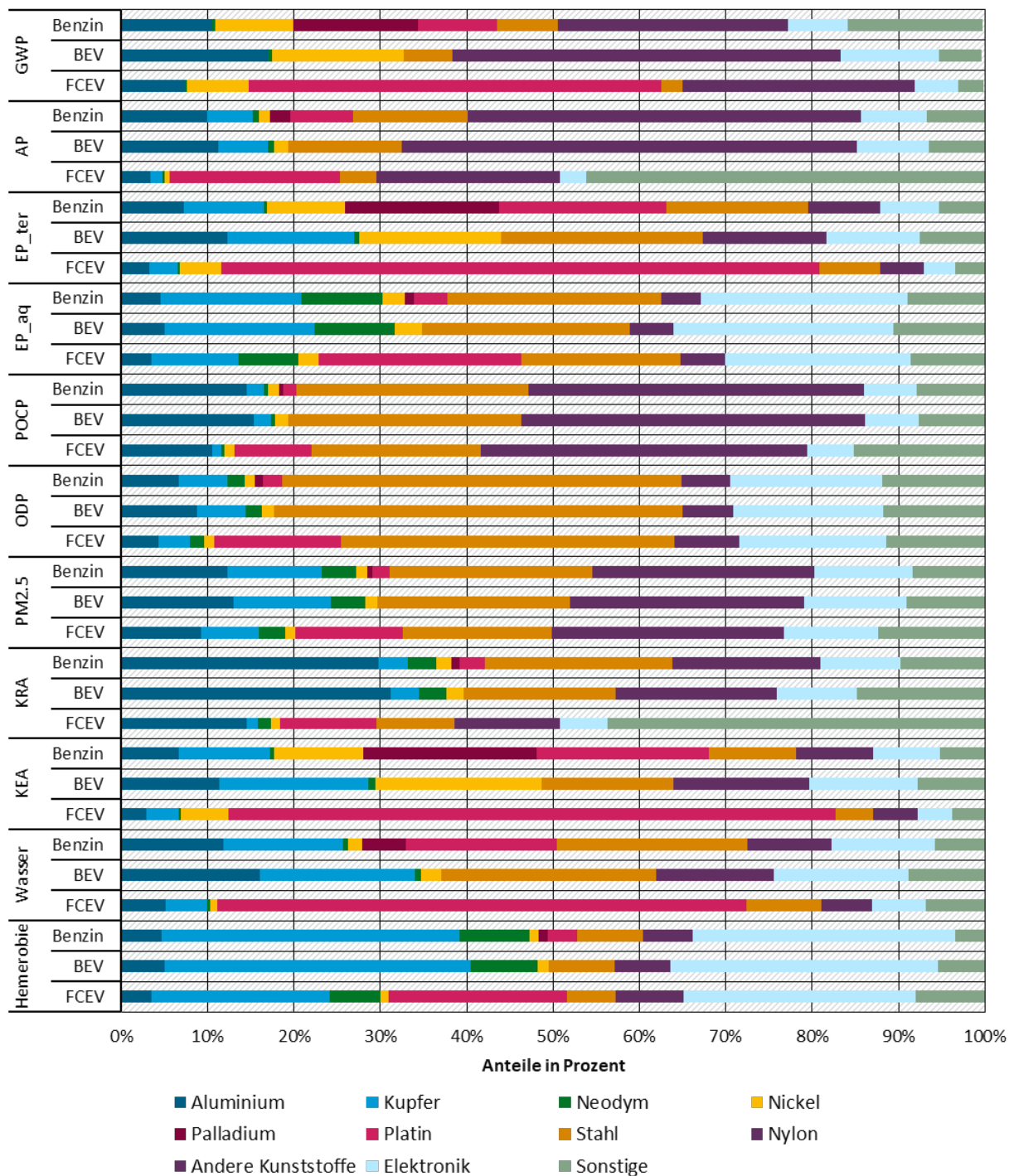
Im Vergleich der Fahrzeugkategorien Pkw, LNF und LZ/SZ sind die Materialbeiträge zu den Umweltwirkungen in beiden Baujahren ähnlich. Exemplarisch wird für die weitere Analyse der Pkw-Bereich genauer untersucht und dort zwischen Benzin-, BEV- und FCEV-Fahrzeugen differenziert.

Abbildung 91: Beiträge einzelner Materialien zu den Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2020 für Pkw und die Antriebstechnologien Benzin, BEV und FCEV



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Abbildung 92: Beiträge einzelner Materialien zu den Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung 2050 für Pkw und die Antriebstechnologien Benzin, BEV und FCEV



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

In Abbildung 91 und Abbildung 92 sind die Beiträge einzelner Materialien zu den Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung für Pkw mit den Antriebstechnologien Benzin, BEV und FCEV für die Jahre 2020 und 2050 dargestellt. Da, wie oben gezeigt, die Gruppe der Metalle alle Umweltwirkungen dominiert, ist es naheliegend, dass Metalle auch die Rangliste der Beiträge individueller Materialien anführen. Gemittelt über alle Wirkungskategorien steht Stahl

in den Jahren 2020 und 2050 (26 % bzw. 18 %) an der Spitze, gefolgt von Platin (15 % bzw. 14 %), Kupfer (14 % bzw. 9,1 %), Aluminium (9,2 % bzw. 10,1%), Nickel (4,3 % bzw. 4,0 %), Palladium (1,2 % bzw. 2,0 %) und Neodym (0,75 % bzw. 1,6 %). Erst an achter Stelle folgt das erste Nichtmetall: Der Kunststoff Nylon/Polyamide ist 2020 im Mittel für 3,6 % (2050: 3,7 %) der Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung verantwortlich. Andere Standardkunststoffe (z. B. PET, PE, PP, PVC) tragen 2020 gemeinsam 8,5 % (2050: 15 %) im Mittel bei. Elektronikbauteile, überwiegend Leiterplatten und Kondensatoren, sind 2020 für 5,9 % (2050: 12 %) der Umweltlasten verantwortlich. Die restlichen Materialien, die hier nicht weiter analysiert und aufgeführt werden, tragen 2020 im Mittel 11 % (2050: 10 %) bei.

Die Materialien der Akkuherstellung sind in allen Aufstellungen in Abbildung 89 bis Abbildung 92 enthalten. Eine eingehendere Analyse zeigt, dass diese auch nicht separat ausgewiesen werden müssen. Es dominieren auch bei allen Akkutypen, in allen Jahren und Wirkungskategorien, die Herstellung der Metalle mit durchschnittlich 61 % und die Energiebereitstellung liegt im Mittel bei 17 %. Auch unter den Akkumetallen liegen die gleichen Materialien vorn wie bei den Gesamtfahrzeugen: Kupfer, Alu, Stahl und Nickel sind im Mittel für 70 % der Akkumetalllasten verantwortlich. Spezifische Metalle wie Lithium (15 %) und Kobalt (4 %) spielen eine untergeordnete Rolle.

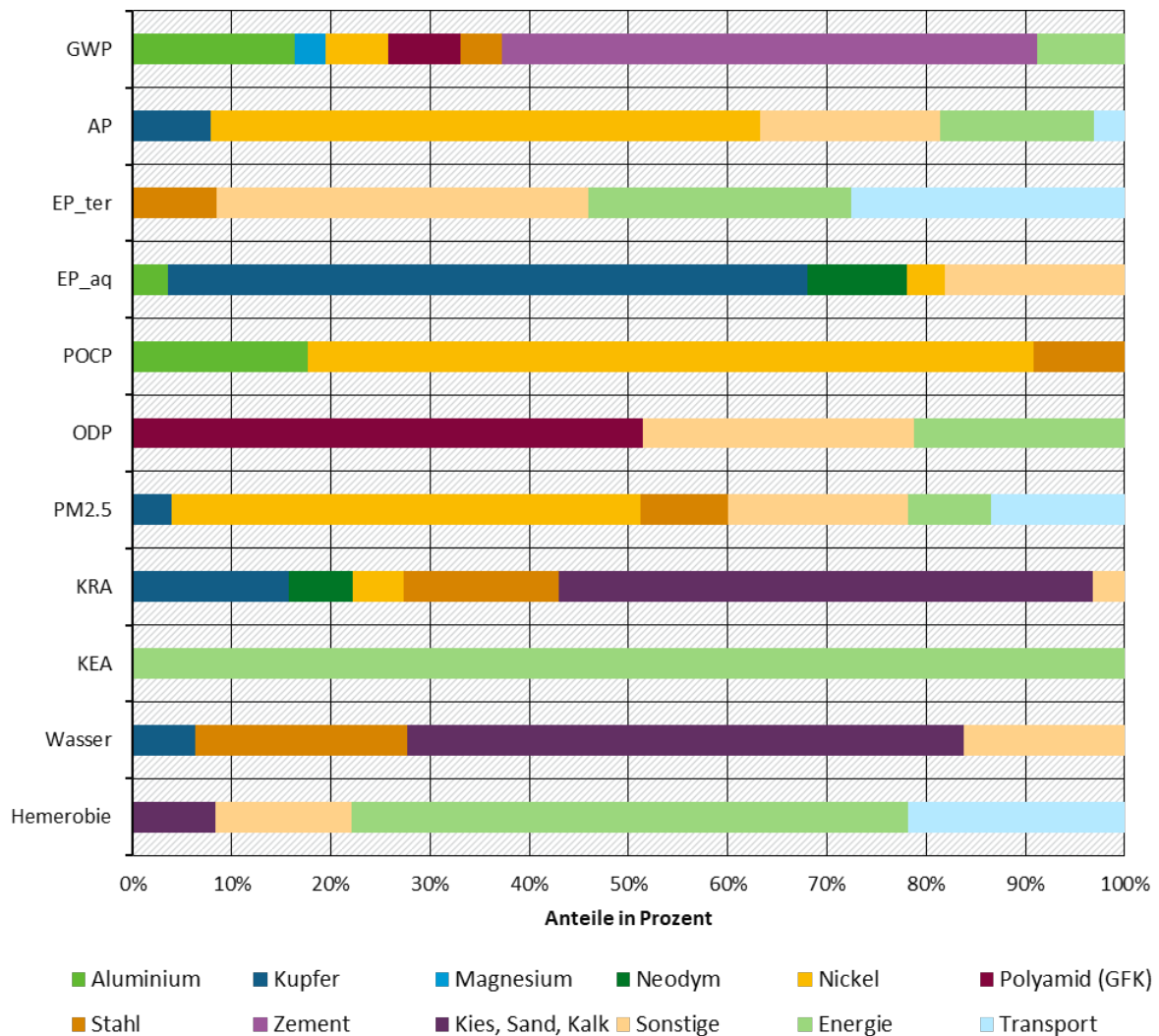
4.3.1.2 Kraftstoffe

Die Umweltwirkungen der Bereitstellung konventioneller Kraftstoffe (Benzin, Diesel, CNG) sind überwiegend auf die Nutzung von fossilen Energieträgern bei Förderung, Transport und Verarbeitung zurückzuführen. Neben den verbrennungsbedingten Emissionen CO₂, SO₂ und NO_x tragen Methanverluste relevant zu den Belastungen der Kraftstoffbereitstellung bei.

Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen ist die regenerative Stromgewinnung aus Windkraft- und PV-Anlagen für die grüne Wasserstoffherzeugung dominierend für alle Wirkungskategorien (Abbildung 58). Die CO₂-Bereitstellung spielt dagegen eine untergeordnete Rolle, außer für ODP.

Die Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus Windkraftanlagen sind auf den Bau der Anlagen zurückzuführen, insbesondere auf die Herstellung der Baumaterialien für Fundament, Turm, Gondel, Rotoren und Netzanschluss. Die Beiträge (inkl. Energieeinsatz und Transporte) zu den Wirkungskategorien im Jahr 2050 sind in Abbildung 93 dargestellt. Neben der Materialherstellung sind auch der Energieeinsatz und die Transporte von Bedeutung (EP_{ter}, KEA, Hemerobie). Materialeitig sind diejenigen Metalle für die Ergebnisse relevant, die auch die Umweltwirkungen des Fahrzeugbaus bestimmen: Besonders auffällige Beiträge kommen von Nickel insbesondere zu AP, PM_{2.5} und POCP, Kupfer zu EP_{aq}, Nylon/Polyamid für die GFK-Rotorblätter zu ODP und Stahl zu EP_{ter}. Die Betonherstellung (Zement) verursacht trotz Defossilisierung CO₂-Emissionen im Klinkerprozess, das in der Kalzinierung aus den Karbonaten entweicht und für den Hauptteil des GWP verantwortlich ist. Für die Betonherstellung wird Kies, Sand und Kalk verwendet, welche die Wirkungskategorien KRA und Frischwasserbedarf dominieren.

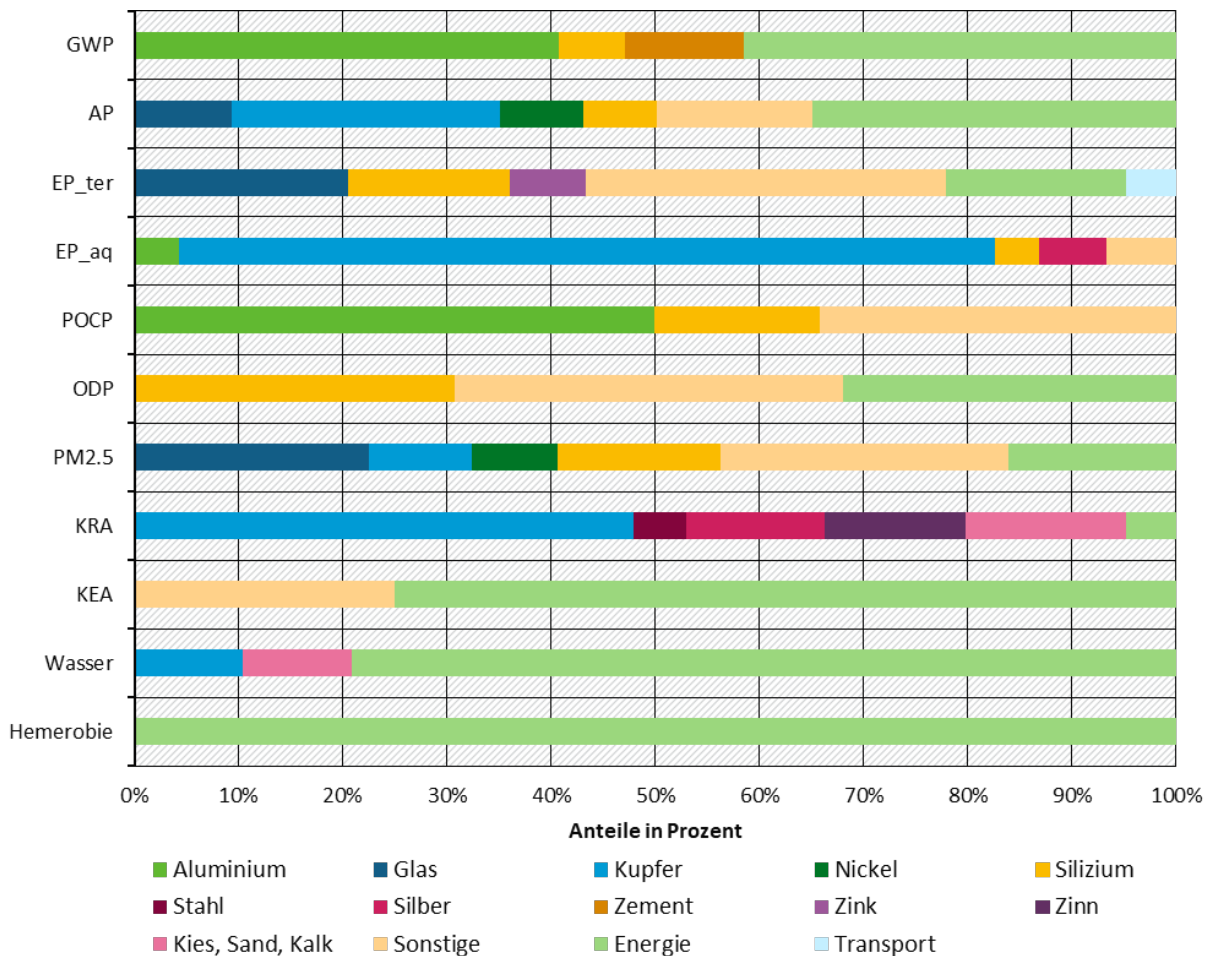
Abbildung 93: Beiträge einzelner Materialien, des Energieeinsatzes und von Transporten zu den Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus Windenergieanlagen (76 % onshore, 24 % offshore) 2050



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

In Abbildung 94 werden die Beiträge der Umweltbelastungen der Stromerzeugung aus Photovoltaik-Anlagen im Jahr 2050 für die Wirkungskategorien gezeigt. In den meisten Kategorien dominiert der Energieeinsatz für die Aluminium- und Siliziumherstellung (im Mittel 36 %). Die Siliziumherstellung ist für ODP besonders relevant, Kupfer für EP_aq, AP und KRA, Aluminium für GWP und POCP und die Glasherstellung für PM2.5 und EP_ter. Der Betrieb der PV-Anlage dominiert aufgrund seines Flächenbedarfs die Wirkungskategorie Hemerobie.

Abbildung 94: Beiträge einzelner Materialien, des Energieeinsatzes und von Transporten zu den Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus PV-Anlagen 2050



Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Die CO₂-Bereitstellung für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe hat in den meisten Umweltwirkungen eine untergeordnete Bedeutung außer für ODP. In dieser Kategorie dominiert der CO₂-Beitrag gegenüber der Wasserstoffbereitstellung, die, (wie in Kapitel 4.1.3) beschrieben, auf die Stromerzeugung zurückgeführt werden kann (Abbildung 58). Der potentielle stratosphärische Ozonabbau wird durch Emissionen von Tetrachlormethan (R-10) in der Trichlormethanproduktion hervorgerufen, welches für die Herstellung des Adsorbens (Anionenharz) eingesetzt wird. Es gibt alternative Adsorbensmaterialien und Möglichkeiten zur Reduktion von R-10-Emissionen in diesem Prozess (Deutz und Bardow 2021). Die hohe potentielle ozonabbauende Wirkung ist daher als konservatives Ergebnis zu bewerten und sollte entsprechend gewürdigt werden.

4.3.2 Wichtige Prozessschritte und Emissionen aus der Bereitstellung der Materialien

In diesem Abschnitt analysieren wir die Ursachen der Umweltwirkungen hinsichtlich der Prozesse und Elementarflüsse (Emissionen und Ressourcen) für die wichtigsten Materialien, die in Kapitel 4.3.1 herausgearbeitet werden. Dabei konzentrieren wir uns auf die Wirkungskategorien, deren normierte Umweltwirkungen (EDW-Werte) in 2020 und/oder 2050 eine hohe (Mengen-)Relevanz besitzen: Dies sind insbesondere Treibhauspotenzial (GWP), Versauerung (AP), aquatische Eutrophierung (EP_aq) und Feinstaubbelastung (PM2.5).

4.3.2.1 Eisen/Stahl

Stahl und Gusseisen sind zu hohen Anteilen für Umweltwirkungen in allen Fahrzeugkategorien und Jahren verantwortlich.

Im Jahr 2020 verursacht die Roheisenherstellung hohe Emissionen insbesondere im Hochofen, in der Kokerei und in der Sinterlage aus fossilen Energieträgern. Diese sind besonders umweltrelevant für die emissionsbedingten Wirkungen der Primärroute aus Eisenerzen im Jahr 2020. Die Sekundärroute setzt Schrotte im Elektrolichtbogenofen ein, die über die Stromerzeugung 2020 wesentlich Umweltlasten verursacht. Der GWP der Stahlherstellung wird durch Kohlendioxid-Emissionen dominiert, die Versauerung durch Schwefeldioxid und Stickoxide, die aquatische Eutrophierung durch langfristige Phosphatmissionen aus Kohleabraum und die Feinstaubbelastung durch Sekundärpartikelbildung aus Stickoxiden und Schwefeldioxid.

In der defossilisierten Eisen- und Stahlherstellung wird eine Ablösung der Hochofentechnologie durch ein Direktreduktionsverfahren mit dem Reduktionsmittel Wasserstoff angenommen. Gegenüber der heutigen Stahlerzeugung reduzieren sich die THG-Emissionen um rund 97 %. Es verbleiben noch Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Emissionen aus der Kalzinierung von Carbonaten, Lachgas (N₂O) und Schwefelhexafluorid aus verschiedenen anderen Prozessen, u.a. aus der Stromübertragung. Beiträge zu dem Versauerungspotential im Jahr 2050 stammen überwiegend aus thermischen Vorbehandlungsprozessen der Erze bis hin zu Pellets (Stickoxide, Schwefeldioxid) und aus der geothermischen Stromerzeugung mit Schwefelwasserstoff-Emissionen aus dem Thermalwasser. Aus der Abwasserbehandlung der Eisenpellettherstellung kommen Phosphat- und Nitrat-Emissionen, welche die aquatische Eutrophierung dominieren. Für die Feinstaubbelastung sind Stickoxid-Emissionen aus der Eisenerzförderung und -aufbereitung bestimmend.

4.3.2.2 Platin/Palladium

Platin und Palladium sind Edelmetalle der Platingruppe (PGM), die erheblich zu den Ökobilanzergebnissen beitragen. Platin und Palladium wird in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in Abgaskatalysatoren verwendet. Auch in Brennstoffzellen wird Platin als Katalysator für die kalte Oxidation von Wasserstoff und Erzeugung von elektrischer Energie benötigt. Obwohl angenommen wird, dass im Jahr 2030 und 2050 die spezifische Platinbelastung der Brennstoffzellen sich mehr als halbiert (s. a. Kapitel 3.1), verursacht die Platinbereitstellung immer noch große Beiträge zu Umweltbelastungen der Fahrzeugherstellung in 2050 (GWP 11 %, AP 61 %, EP_aq 48 % und PM2.5 23 %).

Die Umweltrelevanz und die -beiträge der Platin- und Palladiumbereitstellung für die Fahrzeugherstellung im Jahr 2020 sind vergleichbar mit 2050 – hinzukommen insbesondere Kohlendioxid- und weitere Emissionen aus der Kohleverbrennung. Durch die Defossilisierung der Platinherstellung verringert sich der GWP um 93 %. Die anderen Umweltwirkungen vermindern sich aber nur um bis zu 20 % (KRA). Der Wert für die Naturraumbeanspruchung (Hemerobie) erhöht sich zwischen 2020 und 2050 sogar um 33 %.

Im Jahr 2050 sind die Lachgas-Emissionen der Sprengstoffbereitstellung und -nutzung für den PGM-Abbau die Hauptursache für Treibhausgasemissionen der PGM-Bereitstellungskette. Bei der Verarbeitung der sulfidischen PGM-Erze entstehen sehr hohe Schwefeldioxid-Emissionen, die maßgeblich für die Wirkungskategorien AP, POCP (Sommersmog) und PM2.5 sind. Das Bergematerial der PGM-Erzverarbeitung führt zu langfristigen Phosphatauswaschungen, welche die aquatische Eutrophierung bestimmen.

4.3.2.3 Kupfer

Der Kupferbedarf von BEV mit NMC-Akkus in den Jahren 2020 und 2030 ist drei bis viermal so hoch wie von Verbrenner- und Brennstoffzellen-Pkw und verursacht auch entsprechend höhere Umweltlasten. Im Jahr 2050 liegt die kupferbedingte Umweltwirkung des BEV mit Li-Luft-Akku auf dem Niveau der anderen Fahrzeugtechnologien.

Der GWP der Kupferherstellung im Jahr 2020 wird deutlich durch die Stromerzeugung und die zugehörigen Kohlendioxid-Emissionen für die elektrolytische Raffination dominiert. Das Versauerungspotential (AP) ist auf Schwefeldioxid-, Stickoxid- und Ammoniak-Emissionen zurückzuführen, wobei Schwefeldioxid überwiegend in den Verarbeitungsprozessen des sulfidischen Erzes freigesetzt wird. Das Sprengen für den Abbau des Kupfererzes verursacht Stickoxid- und Ammoniak-Emissionen. Die Stickoxid- und die Schwefeldioxid-Emissionen sind auch die Grundlage für eine Sekundärpartikelbildung und Hauptbeitrag der Kupferherstellung zu PM_{2.5}. Phosphatauswaschungen aus dem Bergematerial der Kupfererzaufbereitung treten langfristig auf und sind maßgeblich für die aquatische Eutrophierung verantwortlich.

Der GWP von Kupfer reduziert sich im Jahr 2050 um 95 % gegenüber 2020. Die anderen Umweltbelastungen sinken um ungefähr 40 bis 50 %. Die verbleibenden THG-Emissionen der Kupferherstellung in der defossilisierten Welt sind Lachgas aus der Salpetersäureherstellung als Ausgangschemikalie für die Sprengstoffherstellung (Ammoniumnitrat/Calciumnitrat); es entstehen auch Kohlendioxid und -monoxid aus Karbonaten in der Kupfererzverarbeitung und im Klinkerprozess. Für die anderen Umweltwirkungen bleiben die nicht-energiebedingten Ursachen auch im Jahr 2050 bestehen. Der angenommene höhere Sekundäranteil an Kupfer von global 58 % gegenüber 45 % in Europa und 16 % im Rest der Welt führt insgesamt zu einer Reduktion der Umweltbelastungen, die wesentlich mit der primären Kupferproduktion aus Erzen zusammenhängt.

4.3.2.4 Aluminium

Aluminium ist ein wichtiger Werkstoff für die Fahrzeugherstellung, für Rumpf, Motoren aber auch für Akkus und Brennstoffzellen. Der GWP in 2020 der Pkw-Fahrzeugherstellung wird zu ungefähr 10 % durch die Aluminiumherstellung bestimmt, davon 4,1 % durch Strom- und 2,2 % durch die Prozesswärme-Bereitstellung; zusätzlich entsteht Kohlendioxid aus der Graphitelektrode der Schmelzflusselektrolyse. Die Beiträge zum Versauerungspotential liegen 2020 mit 4 % (FCEV), 8 % (BEV) und 10 % (Benzin) etwas niedriger als beim GWP. Die Schwefeldioxid- (69 %) und Stickoxidemissionen (26 %) sind für die Wirkungskategorie AP dominierend und entstehen überwiegend bei der Strom- und Wärmeerzeugung. Diese sind auch maßgeblich für die Sekundärpartikelbildung verantwortlich und dominieren auch die Kategorie PM_{2.5} mit 48 % respektive 41 %. Die aquatische Eutrophierung wird von Phosphatmissionen aus dem Abraum des Kohlebergbaus (76 %) und zu 18 % aus Rotschlamm aus Bauxitaufschluss verursacht.

Die Defossilisierung der Primär-Aluminiumproduktion führt zu einer Reduktion des GWP um 89 % im Vergleich zu 2020; die anderen Umweltwirkungen verringern sich weniger stark um 10 % bis 77 % bzw. erhöhen sich leicht für ODP und Hemerobie um 3 % respektive 9 %. Das GWP in 2050 wird durch direkte Kohlenmonoxid- und Tetrafluormethan-Emissionen aus der Schmelzflusselektrolyse bestimmt. Wesentliche Beiträge zur Kategorie Versauerung kommen durch die geothermische Stromerzeugung für die Aluminium-Herstellung und den damit verbundenen Schwefelwasserstoffemissionen sowie durch Schwefeldioxid-Emissionen aus der Aluminiumhydroxidherstellung. Die aquatische Eutrophierung wird in 2050 (fast) nur noch durch die Phosphatmissionen aus Rotschlammdeponien verursacht. Auch die Feinstaubbildung verringert sich in 2050 stark um 72 % gegenüber 2020, da die Schwefeldioxid- und

Stickoxidemissionen aus der Kohlenutzung wegfallen. Wesentliche Beiträge kommen noch von Schiffstransportprozessen mit zugehörigen Stickoxidemissionen.

4.3.2.5 Nickel

Nickel wird allgemein für die Edelstahlherstellung benötigt, die in der konventionellen Fahrzeugherstellung nicht relevant ist. Nickel wird aber in erheblichen Mengen in BEV in dem Aktivmaterial der NMC-Zellen verwendet. Dies führt für die BEV-Pkw in 2020 und 2030 zu erheblichen Beiträgen der Nickelgewinnung in der Fahrzeugherstellung in den Kategorien GWP (2020: 3,4 % bzw. 2030: 4,7 %), AP (2020: 10 % bzw. 2030: 13 %), PM2.5 (2020: 8,2 % bzw. 2030: 11 %) und KRA (2020: 17 % bzw. 2030: 23 %). Im Jahr 2050 spielt Nickel insgesamt für die Fahrzeugherstellung eine untergeordnete Rolle, da als Zellchemie für die BEV-Akkus ein Li-Luft-System ohne Nickel angenommen wird.

Im Jahr 2020 (und 2030) werden die Umweltlasten überwiegend durch Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger verursacht. Darüber hinaus fallen Schwefeldioxidemissionen an, die bei der Verhüttung von sulfidischen PGM-Erzen mit Nickel als Begleitmetall auftreten. Letztere verursachen über 70 % der Versauerung und der Feinstaubbelastung bei der Nickelherstellung.

4.3.2.6 Kunststoffe

Die Kunststoffherstellung hat, wie bereits in Kapitel 4.3.1.1 gezeigt, einen erheblichen Einfluss auf die Umweltbelastungen der Fahrzeugherstellung. Dabei liegen die Beiträge im Mittel der Fahrzeugkategorien und Umweltwirkungen im Jahr 2020 zwischen 3,2 % und 20 %. Für den Ozonabbau liegt der Beitrag sogar höher, bei 8,1 % bis 28 %, was auf den Einsatz von Polyamiden (Nylon) zurückzuführen ist. Bei ihrer Herstellung wird Adipinsäure und Salpetersäure verwendet, bei deren Herstellung Lachgasemissionen entstehen, die nicht nur zum GWP beitragen, sondern auch das hohe ODP-Ergebnis bestimmen. Es werden viele weitere Kunststoffarten im Fahrzeugbau verwendet, die alle bei der Detailanalyse nicht besonders hervorstechen. Beispielhaft wird im Folgenden Polypropylen (PP) hinsichtlich der Wirkungsbeiträge der Kunststoffe analysiert.

Im Jahr 2020 dominieren erwartungsgemäß die Nutzung fossiler Energieträger die Umweltwirkungen der Polypropylenherstellung. Dazu tragen insbesondere Kohlendioxid (GWP), Schwefeldioxid und Stickoxide (AP, PM2.5) sowie Phosphatauswaschungen aus Kohleabraum (EP, aquatisch) bei.

Infolge der angenommenen Defossilisierung im Jahr 2050 reduziert sich der GWP um 97 % im Vergleich zu 2020, wobei sich der KEA gleichzeitig um 65 % erhöht. Die Erhöhung ist auf die ineffizientere Prozessroute zurückzuführen, die zunächst aus erneuerbarem Wasserstoff und Kohlendioxid über einen Fischer-Tropsch-Prozess synthetisches Naphtha erzeugt, das dann im Steamcracker weiterverarbeitet wird. Eine alternative Prozessroute über Methanol wird (bisher) nicht betrachtet. Die anderen emissionsbedingten Umweltwirkungen reduzieren sich geringfügiger als das GWP – AP um 43 %, EP_aq um 51 % und PM2.5 um 59 %. Relevant sind hierbei insbesondere Prozesse, die mit der erneuerbaren Stromerzeugung aus Windkraft- und PV-Anlagen verknüpft sind.

4.3.2.7 Elektronik

In Fahrzeugen sind viele unterschiedliche elektronische Baugruppen verbaut. Ihre Herstellung ist für alle Wirkungskategorien relevant, wobei die Beiträge für Pkw und LNF ähnlich hoch liegen und die für Lkw deutlich niedriger. Bei BEV-Pkw liegt der mittlere Anteil an den Umweltwirkungen 2020 und 2050 bei 9,4 % bzw. 15 %, für FCEV-Pkw bei 6,7 % bzw. 10 % und

für Benzin-Pkw bei 1,7 % bzw. 13 %. Dominiert werden die Ergebnisse durch die Baugruppe der Leiterplatten, die über das ecoinvent-Modul „printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free [GLO]“ abgebildet und im Folgenden betrachtet wird.

Im Jahr 2020 sind die Umweltwirkungen maßgeblich auf den hohen Strombedarf bzw. die Bereitstellung des Stroms aus fossilen Energieträgern für das Produktionssystem der Leiterplattenherstellung zurückzuführen. Die Kategorien aquatische Eutrophierung und der kumulierte Rohstoffaufwand werden durch die Goldvorkette dominiert – Gold hat einen Masseanteil von circa 0,2 % an den Leiterplatten.

Infolge der Defossilisierung im Jahr 2050 reduziert sich der GWP von 372 kg CO₂eq/kg Leiterplatte auf 12 kg CO₂eq/kg um 97 %. Die anderen emissionsbedingten Wirkungen reduzieren sich um 33 % bis 74 % und die Ressourcenindikatoren um 12 % bis 48 % im Vergleich zu 2020. Die GWP-Emissionen im Jahr 2050 werden von Hexafluorethanemissionen aus der Siliziumwafer- und Chipfertigung mit 36 % dominiert. Die verbleibenden THG-Emissionen sind überwiegend auf die Stromerzeugung und -übertragung zurückzuführen (mit Emissionen von Kohlendioxid, Lachgas, Schwefelhexafluorid und Methan). Das Versauerungspotential wird hauptsächlich durch Schwefelwasserstoff aus Behandlung von sulfidischen Bergematerialien aus dem Goldminenbetrieb verursacht. Darüber hinaus treten Stickoxidemissionen beim Abbau (Sprengen und Baumaschinen) von Erzen auf und es entstehen Schwefeldioxidemissionen bei der Verhüttung von sulfidischen Gold-, Silber-, Kupfer- und PGM-Erzen. Aus der Ablagerung des Bergematerials der Erzgewinnung treten langfristig Phosphatmissionen auf, die für die aquatische Eutrophierung maßgeblich sind. Die Stickoxidemissionen aus dem Erzabbau beim Sprengen und der Nutzung von Baumaschinen mit Verbrennungsmotoren bewirken den Hauptanteil der sekundären Partikelbildung; die PM_{2.5}-Ergebnisse der Leiterplatten-Herstellung im Jahr 2050 bleiben mit 74 % des 2020-Wertes auf einem hohen Niveau.

5 Fazit und Ausblick

Der forcierte Umstieg auf alternative Antriebe und Kraftstoffe ist in den nächsten Jahren dringend notwendig, um sowohl das Zwischenziel einer näherungsweise Halbierung der Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr bis 2030 gegenüber 1990, sowie das langfristige Ziel eines nahezu treibhausgasneutralen Verkehrs bis 2045 zu erreichen. Zur Debatte stehen dabei sehr unterschiedliche Kombinationen von Antrieben und Kraftstoffen. Deswegen werden in dieser Studie die verschiedenen Optionen hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen umfassend über den gesamten Lebensweg bewertet. Die Ergebnisse erlauben einen Vergleich verschiedener Antriebsoptionen zu verschiedenen Zeitpunkten über eine breite Palette an Wirkungskategorien.

In Tabelle 48 und Tabelle 49 sind für die Wirkungskategorien mit besonders relevantem Beitrag (siehe Kapitel 3.3) die Abweichungen gegenüber der heute vorherrschenden Referenztechnologie (Benzin-Pkw und Diesel-Sattelzug) mit jeweils gleichem Baujahr dargestellt und farblich kodiert. Das Baujahr 2050 steht dabei für eine defossilisierte Welt. Dies betrifft sowohl die Energiebereitstellung für die Nutzungsphase als auch die Materialvorketten. Entsprechend wird die verbrennungsmotorische Referenz dann bereits mit ausschließlich erneuerbaren synthetischen Kraftstoffen betrieben. Die Umweltwirkungen liegen dann bereits auf einem sehr niedrigen Niveau (siehe Kapitel 3).

Tabelle 48: Abweichungen ausgewählter Umweltwirkungen von Kompaktklasse-Pkw je Fahrzeugkilometer gegenüber dem Fahrzeug mit Benzinantrieb des jeweils gleichen Baujahres (2020 und 2030 GreenLate, 2050 GreenSupreme)

Baujahr	Wirkungskategorie	Benzin (Vergleich zum Benzin 2020 als Referenz)	Diesel	FCEV	BEV	PHEV
2020	GWP	0%	1%	-16%	-41%	-20%
	KEA	0%	4%	-12%	-23%	-12%
	AP	0%	5%	70%	25%	10%
	EP_aq	0%	20%	60%	221%	96%
	PM2.5	0%	10%	60%	23%	13%
2030	GWP	-11%	3%	-12%	-48%	-30%
	KEA	-8%	4%	-9%	-21%	-14%
	AP	0%	6%	10%	11%	-5%
	EP_aq	+11%	8%	23%	78%	28%
	PM2.5	+2%	9%	8%	8%	0%
2050	GWP	-96%	23%	-34%	-67%	-38%
	KEA	+56%	-7%	-41%	-67%	-38%
	AP	-36%	9%	8%	-66%	-29%
	EP_aq	-47%	-6%	0%	-27%	-18%
	PM2.5	-44%	13%	6%	-58%	-17%

hellgrün/-ocker = leichte Vor- bzw. Nachteile (> +/- 10 %);
 dunkelgrün/-ocker = deutliche Vor- bzw. Nachteile (> +/- 40 %)
 grau = ähnliche Belastung (< +/- 10 %))
 Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Beim Pkw (Tabelle 48) zeigt sich folgendes Bild:

- Die Bilanz für den Diesel ist über fast alle Baujahre weitgehend vergleichbar mit dem Benzinfahrzeug. Beim Treibhauspotenzial hat der Diesel durch die höheren N₂O-Emissionen im Baujahr 2050 jedoch leichte Nachteile gegenüber dem Benziner. Benzin- und Diesel-Pkw mit Baujahr 2050 haben gleichzeitig deutliche Nachteile gegenüber den anderen Technologien, da die Defossilisierung über synthetische Kraftstoffe mit hohen Konversionsverlusten verbunden ist. Durch die angenommene weitestgehende Defossilisierung ist das Treibhauspotenzial 2050 jedoch trotzdem bereits auf sehr niedrigem Niveau (durchschnittlich -96 % gegenüber 2020).
- FCEV haben mittelfristig (bis 2030) nur leichte Vorteile beim GWP und KEA gegenüber den Verbrennern. Auch mit Baujahr 2050 bleibt der Vorteil deutlich hinter dem von BEV zurück. Die heute (Baujahr 2020) noch deutlich negative Bilanz bei anderen Umweltwirkungen (Versauerung, aquatische Eutrophierung und Feinstaubbelastung) gehen mittel- und langfristig vor allem durch eine Verringerung der Platinbelastung der Brennstoffzelle zurück.

Die Bilanz konvergiert dann für die Umweltwirkungen jenseits von GWP und KEA mit den verbrennungsmotorischen Referenztechnologien.

- Das BEV zeigt über alle Baujahre das geringste Treibhauspotenzial und hat auch den niedrigsten KEA. Deutliche Nachteile zeigt das BEV vor allem kurzfristig (Baujahr 2020) in anderen Wirkungskategorien, insbesondere bei der aquatischen Eutrophierung. Grund dafür ist größtenteils der Beitrag von Kohlestrom im deutschen Netzmix. Diese Wirkungen gehen zwar bis zum Baujahr 2030 deutlich zurück, sind dann aber immer noch relevant. Erst in einer defossilisierten Welt hat das BEV dann in allen relevanten Wirkungskategorien Vorteile gegenüber den anderen Technologien: Die Umweltwirkungen betragen dann in fast allen relevanten Wirkungskategorien (Ausnahme aquatische Eutrophierung) nur ein Drittel derjenigen beim Benzin-Pkw.
- Das PHEV liegt in allen Bereichen erwartungsgemäß zwischen Benzin-Pkw und BEV. Zwar bleiben die negativen Auswirkungen bei AP, EP_ter und PM2,5 durch die kleineren Akkus begrenzt, das Treibhauspotenzial liegt durch die verbrennungsmotorischen Fahranteile jedoch deutlich über dem BEV, auch wenn dabei mit Baujahr 2050 vollständig erneuerbare synthetische Kraftstoffe genutzt werden.

Tabelle 49: Abweichungen ausgewählter Umweltwirkungen von Sattelzügen je Fahrzeugkilometer gegenüber dem Fahrzeug mit Dieselantrieb des gleichen Baujahres (2030 GreenLate, 2050 GreenSupreme)

Baujahr	Wirkungskategorie	Diesel (Vergleich zum Diesel 2030 als Referenz)	Dual-fuel LNG	FCEV	BEV	O-BEV
2030	GWP	0%	-6%	2%	-55%	-60%
	KEA	0%	-1%	5%	-22%	-31%
	AP	0%	-17%	-36%	3%	-23%
	EP_aq	0%	20%	9%	221%	197%
	PM2.5	0%	-10%	-33%	-10%	-29%
2050	GWP	-94%	-6%	-47%	-76%	-77%
	KEA	+71%	-4%	-30%	-69%	-70%
	AP	-17%	-16%	-46%	-82%	-76%
	EP_aq	-52%	-22%	-9%	-36%	16%
	PM2.5	-29%	-10%	-49%	-73%	-69%

hellgrün/-ocker = leichte Vor- bzw. Nachteile (> +/- 10 %);
 dunkelgrün/-ocker = deutliche Vor- bzw. Nachteile (> +/- 40 %)
 grau = ähnliche Belastung (< +/- 10 %)

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

Beim Sattelzug wird erst ab Baujahr 2030 mit der vollen Bandbreite der alternativen Antriebstechnologien gerechnet. Die Abweichungen gegenüber dem Diesel-Sattelzug des jeweiligen Baujahrs (Tabelle 49) zeigen:

- ▶ Mittel- und langfristig gibt es für den dual-fuel-LNG-Lkw nur geringe Vorteile beim GWP und KEA gegenüber der Diesel-Referenz. Auch bei anderen Umweltwirkungen bleiben die Vor- und Nachteile begrenzt. Die höheren Belastungen für das Baujahr 2030 bei der aquatischen Eutrophierung resultieren überwiegend aus der Nutzung von kohlehaltigem Netzstrom zur Verflüssigung an der Tankstelle.
- ▶ Sattelzüge mit Brennstoffzelle haben mittelfristig (Baujahr 2030) auch keinen Vorteil beim GWP und KEA gegenüber der Dieselreferenz. Hintergrund ist der Einsatz von fossilem Erdgas in der Produktion des Wasserstoffs. Erst in einer defossilisierten Welt hat auch das FCEV deutliche Vorteile beim GWP und KEA gegenüber der Dieselreferenz, die aber immer noch deutlich hinter denen von BEV und O-BEV zurückbleiben.
- ▶ Lkw mit Traktionsbatterien (BEV) haben bereits mittelfristig ein deutlich niedrigeres Treibhauspotenzial. Dies ist bereits mit Baujahr 2030 nur noch weniger als halb so hoch wie bei der Dieselreferenz. Auch beim KEA sind die Vorteile bereits mittelfristig deutlich. Dagegen ergeben sich bei der aquatischen Eutrophierung zunächst noch große Nachteile durch den großen Akku und den verbleibenden Anteil von Kohlestrom im Netzmix, die erst langfristig (BJ 2050) mit einer globalen Defossilisierung weitgehend vermieden werden können.
- ▶ Lkw mit Traktionsbatterie und dynamischer Lademöglichkeit (O-BEV) haben eine ähnliche Bilanz bzgl. GWP und KEA wie das BEV, vermeiden oder reduzieren gleichzeitig aber schon mittelfristig die negativen Umweltwirkungen des BEV in anderen Bereichen. Nur die aquatische Eutrophierung bleibt durch die Kupferproduktion wegen Abnutzung und Erneuerung des Fahrdrachtes gegenüber der Diesel-Referenz negativ.

Insgesamt zeigen sich damit die batterieelektrischen Fahrzeugkonzepte sowohl bei den Pkw als auch bei den Sattelzügen durchweg als überlegene Lösung bezüglich GWP und KEA, die aber mittelfristig noch mit deutlichen negativen Wirkungen bei anderen relevanten Umweltwirkungen verbunden sind, insbesondere der aquatischen Eutrophierung. In einer defossilisierten Welt liegen alle Technologien auf niedrigerem Niveau bezüglich ihrer Umweltbelastung, doch die meisten Umweltwirkungen gehen nicht so stark zurück wie das Treibhauspotenzial. Während das GWP je Fahrzeugkilometer bei den Pkw durchschnittlich um 96 % gegenüber 2020 sinkt, verringern sich Versauerung und Feinstaubbelastung nur um 40-60 %. Auch in diesen Umweltwirkungen zeigen sich deutliche Vorteile des BEV gegenüber den anderen Antrieben.

Zentrale Treiber der Entwicklung zu niedrigen Umweltwirkungen sind die Szenarienannahmen zur Defossilisierung der Strombereitstellung in Deutschland sowie langfristig der Import erneuerbarer synthetischer Kraftstoffe und der Defossilisierung des globalen Energie- und Produktionssystems. Zusätzlich zeigt die Sensitivitätsanalyse noch zentrale Stellschrauben zu kurz- und mittelfristigen Verbesserungen, die auch durch politisches Handeln realisiert werden können. Hier gilt es auf der einen Seite die mit alternativen Antrieben verbundenen negativen Auswirkungen – insbesondere bei der aquatischen Eutrophierung – zukünftig zu vermeiden. Diese sind vor allem mit der Herstellung von Kupfer, Stahl, Platingruppenmetallen und Aluminium für die Fahrzeuge und den Anteilen von Kohlestrom im Netzmix verbunden.

Auf der anderen Seite bleibt die Reduktion von Klimagasemissionen aus dem Verkehr die zentrale Herausforderung und unterliegt auch mittel- und langfristigen Zielen. Hier konnten wichtige Hebel zur Verbesserung identifiziert werden:

1. Insbesondere beim Pkw bleibt die **Energieeffizienz** eine wichtige Stellschraube. Die Analyse der Bandbreite des Verbrauchs am Markt zeigt hier ein deutliches Potenzial zur Verbesserung des GWP über den gesamten Lebensweg, da der Fahrstrom mittelfristig noch mit deutlichen fossilen Anteilen erzeugt wird. Dies gilt für den Kompakt-Pkw, vor allem aber für das Segment der SUV, in dem der Verbrauch auch um den Faktor 2 divergieren kann. Beim PHEV kann zudem eine Erhöhung des elektrischen Fahranteils die GWP-Bilanz auch bereits kurzfristig deutlich verbessern. Beim Sattelzug deuten die Daten auf eine aufgrund des Kostendrucks tendenziell geringere Bandbreite beim Energieverbrauch hin.
2. Die **Energiebereitstellung** ist mittel- und langfristige das zentrale Thema der GWP-Bilanz, wobei der einzelne Fahrzeugnutzer nur wenige Möglichkeiten hat individuell zusätzliche erneuerbare Energie einzusetzen. Umso wichtiger ist es, dass der ambitionierte Ausbau der erneuerbaren Energie fortgesetzt wird, um mindestens den im Standardfall (GreenLate) zugrunde gelegten Pfad der Defossilisierung der Strombereitstellung in Deutschland zu realisieren oder diesen möglichst noch zu beschleunigen (GreenSupreme). Eine gezielte Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien zum Laden von Elektrofahrzeugen ist im derzeitigen energiewirtschaftlichen Rahmen in Deutschland dagegen kaum möglich. Für Verbrenner und Brennstoffzellenfahrzeuge kann die Bilanz für das Baujahr 2030 nur über einen höheren Anteil erneuerbarer Importkraftstoffe verbessert werden, um die Lücke zur Entwicklung im Strombereich zu schließen. Dann wären jedoch sehr hohe Anteile (> 70 %) erneuerbarer Kraftstoffe notwendig, um eine gegenüber BEV vergleichbare GWP-Bilanz zu erreichen. Die damit verbundenen Herausforderungen sind erheblich. Bei Importen von gasförmigen synthetischen Kraftstoffen ist zudem der Import über Pipelines aus Perspektive der Klimawirkung deutlich dem verflüssigten Transport vorzuziehen. Gleiches gilt für die Distribution in Deutschland. Wird synthetisches Erdgas oder elektrolytischer Wasserstoff per Schiff transportiert, so sollte die Verflüssigung zumindest mit erneuerbaren Energien erfolgen. Eine Verflüssigung mit teilweise fossilem Netzstrom verschlechtert die Umweltbilanz erheblich. Gleiches gilt für die Kompression oder Verflüssigung an der Tankstelle. Auch hier ist der Betrieb mit Netzstrom mittelfristig noch mit deutlichen Nachteilen verbunden.
3. Die **Optimierung der Herstellung antriebsspezifischer Komponenten** hat einen Einfluss auf das Treibhauspotenzial über den gesamten Lebensweg und vor allem die Unterschiede zwischen den Technologien. Hier stehen akkuseitig angepasste Reichweiten im Vordergrund, die alle mit der Zellherstellung und dem EoL der Zellen verbundenen Prozesse reduzieren. Aber auch Verbesserungen bei der Energiedichte und die Zellfertigung mit überwiegend erneuerbarem Strom können die Treibhausbilanz verbessern. Bei FCEV gelingt dies über eine Reduktion der Platinbeladung der Brennstoffzelle. Über den Lebensweg der Fahrzeuge bleibt der Effekt auf den GWP jedoch begrenzt, da das Treibhauspotenzial heute vor allem von der Antriebsenergie dominiert wird. Auch der Einsatz anderer Akkutechnologien (LFP) hat beim GWP nur einen kleinen Effekt auf die Gesamtbilanz. Deutlicher sind die Effekte jedoch bei anderen Umweltwirkungen (Versauerung, Feinstaubbelastung). Hier können durch diese Maßnahmen deutliche Verbesserungen erzielt werden.
4. Schlussendlich tragen **geschlossene Rohstoffkreisläufe und eine verlängerte Nutzungsdauer**, insbesondere des Fahrzeugakkus, zu einer Verbesserung der Gesamtbilanz bei. Ein flexibles und optimiertes Recyclingsystem reduziert Umweltwirkungen und kann den Bedarf an Primärrohstoffen zumindest abmildern. Die neue EU-Batterie-Verordnung

macht hier wichtige Vorgaben bezüglich Recyclingeffizienz, Sekundärquoten und CO₂-Fußabdruck. Hier besteht noch weiteres Potenzial, die Energie- und Materialeffizienz von Recyclingprozessen zu verbessern, damit sich diese deutlicher in der Gesamtbilanz niederschlagen. Die geforderten Datenangaben in einem Batteriepass sollen u.a.

Reparaturarbeiten und Umwidmungsprozesse vereinfachen, was die Langlebigkeit und eine sinnvolle Weiterverwendung von Akkus (Second-Life) ermöglicht. Inwiefern solche Anwendungskonzepte in Zukunft ökonomisch rentabel sind, lässt sich nach heutigem Kenntnisstand noch nicht abschließend beantworten.

Die Studie bestätigt klimaschutzseitig damit über weite Teile den bereits am Markt eingeschlagenen Kurs hin zu einer vorwiegenden Nutzung batterieelektrische Antriebe im Verkehr. Gleichzeitig zeigen sich jedoch vor allem kurzfristig noch deutliche negative Auswirkungen bei anderen relevanten Umweltwirkungen. Diese entstammen vor allem der Produktion antriebsrelevanter Komponenten (Akku, Brennstoffzellen) und teilweise ihrer Infrastruktur (Abrieb der Oberleitung) sowie den verbliebenen Anteilen von Kohlestrom. Neben einem baldigen Kohleausstieg sollten hier die Lieferketten und Produktionsprozesse verbessert werden. Einen Ansatz hierzu bietet die neue EU-Batterieverordnung.

Zwar haben auch Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe bei weitestgehend defossilisierten Energievorketten das Potential, eine deutliche Verbesserung beim Treibhauspotenzial von Fahrzeugen erreichen. Die Herausforderungen, die entsprechenden Energiemärkte so zu entwickeln, dass der Straßenverkehr weitestgehend THG-neutrale Energieträger zu akzeptablen Kosten erhält, sind angesichts der erwarteten großen Nachfrage in anderen Sektoren jedoch enorm. Hier ist gegenüber der Defossilisierung der nationalen Strombereitstellung, von der batterieelektrische Fahrzeuge direkt profitieren, mit einer deutlichen Verzögerung und entsprechend negativen Auswirkungen auf die bis 2050 kumulierten Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr zu rechnen.

Unter den Bedingungen einer defossilisierten Welt haben BEV zudem weiterhin Umweltvorteile gegenüber den anderen Antrieben, dann auch über alle relevanten Wirkungskategorien. Zudem muss bei erneuerbaren Kraftstoffen sichergestellt werden, dass neben dem wirtschaftlich und technisch anspruchsvollen Technologiehochlauf auch Nachhaltigkeitskriterien hinsichtlich politischer, sozialer und ökologischer Anforderungen eingehalten werden. Hierzu gehört insbesondere, dass das Potenzial zur direkten Nutzung des erneuerbaren Stroms in den Erzeugerländern genutzt wird, bevor der Strom unter Energieverlusten zu PtL oder Wasserstoff umgewandelt und exportiert wird. Detaillierte Kriterien dazu werden im UBA-Projekt „Kriterien für eine nachhaltige Bereitstellung und klimagerechte Integration von strombasierten erneuerbaren Energieträgern“ (FKZ 3722435060) entwickelt, das im Juni 2023 begonnen hat und bei dem das ifeu einer der beiden Hauptauftragnehmer ist.

Generell beruhen die Ergebnisse dieser Studie auf robusten Annahmen, wie auch die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen. Es stellen sich jedoch einige methodische Fragen, die in nachfolgenden Forschungsprojekten beleuchtet werden sollten:

- Zukünftig ist es wichtig, insbesondere in dynamischen Bereichen, wie bei den Traktionsbatterien, auch neue Entwicklungen (z. B. Produktionsverfahren, Zellchemien, Energiedichten) abzubilden und die bisherigen Bilanzen zu verbessern, nachzuführen oder zu verifizieren. Bei den Traktionsbatterien wird hier die EU-Batterieverordnung wichtig sein. Hier sollte einerseits die Methodenentwicklung für die im Rahmen der Regulierung geplante Bilanzierung des CO₂-Fußabdrucks beobachtet und verfolgt werden, andererseits sind im Zuge der Umsetzung neue Daten und Entwicklungen zu erwarten.

- ▶ Die Daten zur Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe beruhen weitgehend auf ingenieurtechnischen Modellierungen aus der Fachliteratur bzw. von uns durchgeführten Studien. Primärdaten aus den zurzeit entstehenden ersten kommerziellen Anlagen wären wertvoll, um diese Modellierungen zu überprüfen. Eine geringere Effizienz, z. B. durch wenig ambitionierte Wärmeintegration und höhere direkte Emissionen könnten die Bilanz synthetischer Kraftstoffe verschlechtern.
- ▶ Die Vorkettenemissionen für fossile Kraftstoffe wurden in dieser Studie noch ohne die erhöhten Methanemissionen berechnet, die mittlerweile in die Umweltziele der vereinten Nationen und wichtige Ökobilanzdatenbanken Einzug gehalten haben (Kapitel 2.6.1). Für die Kommunikation der Ergebnisse ist dies zu berücksichtigen. In künftigen Forschungsvorhaben sollten diese Umweltlasten berücksichtigt werden.
- ▶ Die dieser Studie an etlichen Stellen zugrunde gelegten Szenarien GreenLate und GreenSupreme sind ebenfalls einem Abgleich mit der realen Entwicklung zu unterziehen. Zum einen wurden sie ursprünglich mit einem Startzeitpunkt 2015 entworfen und sollten aktualisiert werden. Zum anderen gehen diese Szenarien von einer – wenn auch zeitlich gestaffelten – ähnlichen Defossilisierung in der ganzen Welt aus. Da die deutsche und europäische Umweltpolitik nur begrenzten Einfluss auf die Regularien außerhalb ihrer Jurisdiktion haben, sollte geprüft werden, welche Konsequenzen eine stark verzögerte oder unvollständige außereuropäische Defossilisierung auf die Umweltbilanz von Fahrzeugen und Kraftstoffen hätte.
- ▶ Eine Stärke dieser Studie ist die Rückverfolgung der Umweltlasten des Verkehrs bis auf die Ebene spezifischer Emissionen aus der Gewinnung und Bereitstellung von Materialien und Rohstoffen. In nachfolgenden Forschungsprojekten sollte geprüft werden, wie belastbar die Ökobilanzdaten in diesen Punkten z. B. zu Emissionen aus dem Erzbergbau und aus Kohleabraumhalden sind. Daraus könnten sich Handlungsempfehlungen für die (internationale) Umweltpolitik ableiten lassen.

6 Quellenverzeichnis

- Agora Verkehrswende (2019a): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Durchgeführt von ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Berlin. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf (07.05.2019).
- Agora Verkehrswende (2019b): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. Durchgeführt von ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Berlin. S. 56. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeugen/32_Klimabilanz_strombasierten_Antrieben_Kraftstoffen_WEB.pdf (06.09.2023).
- Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Fehrenbach, H.; Heidt, C.; Knörr, W.; Kräck, J. (2022): Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMODO)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMODO-MM)“ 2021. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes., Heidelberg.
- Alvarez, R. A.; Zavala-Araiza, D.; Lyon, D. R.; Allen, D. T.; Barkley, Z. R.; Brandt, A. R.; Davis, K. J.; Herndon, S. C.; Jacob, D. J.; Karion, A.; Kort, E. A.; Lamb, B. K.; Lauvaux, T.; Maasakkers, J. D.; Marchese, A. J.; Omara, M.; Pacala, S. W.; Peischl, J.; Robinson, A. L.; Shepson, P. B.; Sweeney, C.; Townsend-Small, A.; Wofsy, S. C.; Hamburg, S. P. (2018): Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. In: *Science*. Vol. 361, No. 6398, S. 186–188. DOI: [10.1126/science.aar7204](https://doi.org/10.1126/science.aar7204).
- Antonini, C.; Treyer, K.; Streb, A.; van der Spek, M.; Bauer, C.; Mazzotti, M. (2020): Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage – A techno-environmental analysis. In: *Sustainable Energy & Fuels*. Vol. 4, No. 6, S. 2967–2986. DOI: [10.1039/D0SE00222D](https://doi.org/10.1039/D0SE00222D).
- Argonne National Laboratory (2021): GREET database 2021.
- Audi AG (2019): Audi nutzt gebrauchte Lithium-Ionen-Batterien in Flurförderfahrzeugen (3.6.2019). In: *Audi MediaCenter*. <https://www.audi-mediacyber.com:443/de/pressemitteilungen/audi-nutzt-gebrauchte-lithium-ionen-batterien-in-flurfoerderfahrzeugen-11371>. (22.10.2019).
- Baltac, S.; Slater, S. (2019): Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond. Element Energy. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_06_Batteries_on_wheels_TE_briefing.pdf (03.09.2019).
- Baumann, M.; Schuller, O. (2021): Emissionsfaktoren der Stromerzeugung-Betrachtung der Vorkettenemissionen von Erdgas und Steinkohle. No. 61/2021. Climate Change. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/emissionsfaktoren-der-stromerzeugung-betrachtung> (31.01.2023).
- Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2017): Fahrleistungserhebung 2014 - Inländerfahrleistung. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen Verkehrstechnik Heft V 290 IVT Research GmbH. Institut für Verkehrsforschung, DLR. Fachverlag NW, Bremen.
- Beverungen, D.; Menne, S.; Nowak, S.; Obeidi, S.; Plenter, F.; Hindersmann, C. (2019): Einführung in die Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien. In: J. BECKER: / D. BEVERUNGEN: / M. WINTER: / S. MENNE: *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. S. 1–20. DOI: [10.1007/978-3-658-21021-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21021-2_1).
- Biemann, K.; Heidt, C.; Knörr, W.; Althaus, H.-J.; Notter, B.; Dobers, K.; Anthes, R.; Schmidt, A. (2023): EcoTransIT World Environmental Methodology and Data - Update 2020. ifeu, infras und Fraunhofer IML im Auftrag der EWI. https://www.ecotransit.org/wp-content/uploads/20230612_Methodology_Report_Update_2023.pdf (06.09.2023).

BLE (2021): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2020.

https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2020.html (21.11.2022).

BloombergNEF (2022): Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. In: *BloombergNEF*. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>. (23.06.2023).

BMW Group (2016): Pressemitteilung: BMW Group und Viessmann Group gründen Joint Venture „Digital Energy Solutions“ für Energiemanagement (13.01.2016).

<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0250185DE/bmw-group-und-viessmann-group-gruenden-joint-venture-„digital-energy-solutions“-fuer-energiemanagement?language=de>. (21.10.2019).

Bobba, S.; Mathieux, F.; Ardente, F.; Blengini, G. A.; Cusenza, M. A.; Podias, A.; Pfrang, A. (2018): Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows. In: *Journal of Energy Storage*. Vol. 19, S. 213–225. DOI: [10.1016/j.est.2018.07.008](https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.008).

BolidenForum (2021a): BMW investiert in US-Batteriehersteller Our Next Energy.

<https://www.bolidenforum.de/artikel/batterie-und-brennstoffzelle/1465057-bmw-investiert-in-us-batteriehersteller-our-next-energy>. (01.06.2023).

BolidenForum (2021b): Daimler setzt ab 2024 LFP-Zellen ein. <https://www.bolidenforum.de/artikel/batterie-und-brennstoffzelle/1466808-daimler-setzt-ab-2024-lfp-zellen-ein>. (01.06.2023).

Bongartz, L.; Shammugam, S.; Gervais, E.; Schlegl, T. (2021): Multidimensional criticality assessment of metal requirements for lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary storage applications in Germany by 2050. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 292, S. 126056. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.126056](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126056).

Börner, M. F.; Frieges, M. H.; Späth, B.; Spütz, K.; Heimes, H. H.; Sauer, D. U.; Li, W. (2022): Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries. In: *Cell Reports Physical Science*. Vol. 3, No. 10, S. 101095. DOI: [10.1016/j.xcrp.2022.101095](https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101095).

Bracker, Joß; Seebach, Dominik; Pehnt, Martin (2019): Strombilanzierung im Verkehrssektor. Teilbericht des Projektes „Ökologische Bewertung von Verkehrsarten“. Öko-Institut e.V., Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_texte_134-2019_strom-verkehrsmittelvergleich_0.pdf (06.09.2023).

Bräuer, S.; Stieger, A. (2019): End-of-Life-Strategien für Traktionsbatterien. In: J. BECKER: / D. BEVERUNGEN: / M. WINTER: / S. MENNE: *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. S. 21–123. DOI: [10.1007/978-3-658-21021-2_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21021-2_2).

Bundesnetzagentur; Bundeskartellamt (2022): Monitoringbericht 2022. Bonn.

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (01.09.2023).

Buttermann, H. G.; Nickel, M.; Maassen, U. (2023): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2022.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB). https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/06/AGEB_Jahresbericht2022_20230615_dt.pdf (14.08.2023).

Casals, L. C.; Amante García, B.; Canal, C. (2019): Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. In: *Journal of Environmental Management*. Vol. 232, S. 354–363. DOI: [10.1016/j.jenvman.2018.11.046](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046).

Casals, L. C.; García, B. A.; Aguesse, F.; Iturrondobeitia, A. (2017): Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 22, No. 1, S. 82–93. DOI: [10.1007/s11367-015-0918-3](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0918-3).

- Cleanthinking.de (2022): Sila Nano baut Gigawattstunden-Fabrik: Silizium-Anoden für BMW und Daimler. <https://www.cleanthinking.de/sila-nano-batterie-anoden-silizium-bmw-daimler-fabrik-washington/>. (01.06.2023).
- Cretzmeyer, J. W. (1963): US3075827A. Process for producing anhydrous lithium perchlorate. <https://patents.google.com/patent/US3075827A/en?q=US3075827>.
- Cusworth, D. H.; Thorpe, A. K.; Ayasse, A. K.; Stepp, D.; Heckler, J.; Asner, G. P.; Miller, C. E.; Yadav, V.; Chapman, J. W.; Eastwood, M. L.; Green, R. O.; Hmiel, B.; Lyon, D. R.; Duren, R. M. (2022): Strong methane point sources contribute a disproportionate fraction of total emissions across multiple basins in the United States. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 119, No. 38, S. e2202338119. DOI: [10.1073/pnas.2202338119](https://doi.org/10.1073/pnas.2202338119).
- Dai, Q.; Dunn, J.; Kelly, J. C.; Elgowainy, A. (2017): Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Systems Assessment Group. Energy Systems Division. Argonne National Laboratory (ANL). https://greet.es.anl.gov/files/Li_battery_update_2017 (19.11.2018).
- Dai, Q.; Kelly, J. C.; Dunn, J.; Benavides (2018a): Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Argonne National Laboratory. https://greet.es.anl.gov/files/update_bom_cm (06.09.2023).
- Dai, Q.; Kelly, J. C.; Elgowainy, A. (2018b): Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET Model. Argonne National Laboratory. https://greet.es.anl.gov/files/update_cobalt (22.11.2022).
- Daimler AG (2016a): Weltweit größter 2nd-Use-Batteriespeicher geht ans Netz (13.9.2016). <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Weltweit-groesster-2nd-Use-Batteriespeicher-geht-ans-Netz.xhtml?oid=13634457>. (22.10.2019).
- Daimler AG (2016b): Daimler gründet Mercedes-Benz Energy GmbH für stationäre Energiespeicher (02.06.2016). <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Daimler-gruendet-Mercedes-Benz-Energy-GmbH-fuer-stationaere-Energiespeicher.xhtml?oid=11025299>. (22.10.2019).
- Daimler AG (2019): Mercedes-Benz Energy und Beijing Electric Vehicle starten Entwicklungspartnerschaft zu 2nd-Life-Batteriespeichern. <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-Energy-und-Beijing-Electric-Vehicle-starten-Entwicklungspartnerschaft-zu-2nd-Life-Batteriespeichern.xhtml?oid=44092165>. (22.10.2019).
- De Leeuw, F. A. A. M. (2002): A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. In: *Environmental Science & Policy*. Vol. 5, S. 135–145. DOI: [10.1016/S1462-9011\(01\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(01)00042-9).
- Destatis (2021): Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Gesamtwirtschaftliches Materialkonto - Berichtszeitraum 1994 - 2019/2020. Wiesbaden. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/gesamtwirtschaftliches-materialkonto-pdf-5851315.html> (14.08.2023).
- DESTATIS (2022): Wassernutzung in der Wirtschaft. In: *Statistisches Bundesamt*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2022/PD22_34_p002.html. (15.08.2023).
- DESTATIS (2023): Eigengewinnung und Fremdbezug von Wasser sowie Einleitung von Abwasser und ungenutztem Wasser. In: *Statistisches Bundesamt*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ww-03-eigengewinnung-fremdbezug-einleitung-abwasser-2019.html>. (15.08.2023).
- Deutz, S.; Bardow, A. (2021): Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. In: *Nature Energy*. Vol. 6, No. 2, S. 203–213. DOI: [10.1038/s41560-020-00771-9](https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9).

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020a): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. UBA Climate Change 05/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_05-2020_endbericht_greensupreme.pdf (12.11.2020).

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_02-2020_endbericht_greenlate.pdf (12.11.2020).

Dittrich, M.; Liebich, A.; Müller, J.; Schoer, K.; Limberger, S.; Ewers, B.; Leuser, L.; Keppner, B. (in Bearbeitung): Die Grenzen des Konsums: Nachhaltiger Konsum unter der Berücksichtigung von Planetaren Grenzen und globalen Wachstumsdynamiken. Umweltbundesamt (UBA).

Dittrich, M.; Liebich, A.; Müller, J.; Schoer, K.; Loibl, A. (in Bearbeitung): „Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland (RTD II/REFINE)“, in Bearbeitung. Umweltbundesamt (UBA).

Doose, S.; Mayer, J. K.; Michalowski, P.; Kwade, A. (2021): Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. In: *Metals*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 11, No. 2, S. 291. DOI: [10.3390/met11020291](https://doi.org/10.3390/met11020291).

Ellingsen, L. A.; Majeau-Bettez, G.; Singh, B.; Srivastava, A. K.; Valøen, L. O.; Strømman, A. H. (2014): Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. In: *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 18, No. 1, S. 113–124. DOI: [10.1111/jiec.12072](https://doi.org/10.1111/jiec.12072).

EU-Parlament; EU-Kommission (2019): Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC.

Europäische Kommission (2019): BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS-UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG – Umsetzung der Richtlinie sowie Auswirkungen auf die Umwelt und das Funktionieren des Binnenmarktes. COM(2019) 166 final vom 9.4.2019 Brüssel. <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2019/DE/COM-2019-166-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF> (10.09.2019).

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR.). <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/deu> (16.08.2023).

European Commission (2020): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. COM (2020) 798 final 2020/0353 (COD), Brussels. https://www.batteriegesetz.de/wp-content/uploads/www.batteriegesetz.de_eu_batterieverordnung_2020_0353_vorschlag_20221210.pdf (09.01.2023).

European Parliament (2023): New Batteries Regulation | Legislative Train Schedule (20.04.2023). In: *European Parliament*. [https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-the-eu-battery-directive-\(refit\)](https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-the-eu-battery-directive-(refit)). (23.05.2023).

Eurostat (2022): Energy – Yearly statistics 2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database>. (19.11.2022).

Fehrenbach, H.; Grahl, B.; Giegrich, J.; Busch, M. (2015): Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 20, No. 11, S. 1511–1527. DOI: [10.1007/s11367-015-0955-y](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0955-y).

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S.; Vogt, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). In: *Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Texte, 09/2016)*.

Fehrenbach, H.; Liebich, A.; Fröhlich, T.; Abdalla, N. (2022): ELMO - ifeu-Stromerzeugung/Kraftwerkspark-Modell. <https://www.ifeu.de/projekt/stromerzeugungkraftwerkspark-modell/> (21.11.2022).

Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Reinhardt, G.; Busch, M. (2019): Festlegung des Indikators für die Bilanzierung der Ressource Fläche bzw. von Naturraum in Ökobilanzen. ifeu Hintergrundpapiere ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg. <https://www.ifeu.de/publikation/festlegung-des-indikators-fuer-die-bilanzierung-der-ressource-flaeche-bzw-von-naturraum-in-oekobilanzen/> (15.08.2023).

Fischhaber, S.; Regett, A.; Schuster, S. F.; Hesse, H. (2016): Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) Ergebnispapier Nr. 18. Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) e. V.; Technische Universität München (TUM), Berlin. <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2016/06/StudieSecondLifeKonzepte1.pdf> (01.09.2023).

Gaines, L. (2018): Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course. In: *Sustainable Materials and Technologies*. Vol. 17. DOI: [10.1016/j.susmat.2018.e00068](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00068).

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhard, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. Texte Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/indikatoren-kennzahlen-fuer-den-rohstoffverbrauch> (14.08.2023).

Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J.; Van Zelm, R. (2009): ReCiPe 2008. S. 1–126. https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/ReCiPe%202008_A%20Icia%20method%20which%20comprises%20harmonised%20category%20indicators%20at%20the%20midpoint%20and%20the%20endpoint%20level_First%20edition%20Characterisation.pdf (29.10.2020).

Griffke, P. (2023): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2021 EU-Resubmission: 15.03.2023. *Tabelle*, Umweltbundesamt.

Günther, D.; Gniffke, P.; Tarakji, Y. (2023): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021. *Climate Change*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. S. 981. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-8> (14.08.2023).

Harloff, T. (2023): Elektro-Kleinwagen BYD Seagull - Chinas VW ID.1 für 10.400 Euro. In: *auto motor und sport*. <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/byd-seagull-elektro-kleinwagen-natrium-ionen-batterie/>. (01.06.2023).

Hauschild, M. Z.; Huijbregts, M. A. J.; Jolliet, O.; Macleod, M.; Margni, M. D.; van de Meent, D.; Rosenbaum, R. K.; McKone, T. E. (2008): Building a Model Based on Scientific Consensus for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: The Search for Harmony and Parsimony. In: *Environmental Science and Technology*. Vol. 42, S. 7032–7037. DOI: [10.1021/es703145t](https://doi.org/10.1021/es703145t).

- Hauschild, M. Z.; Wenzel, H. (1998): Environmental Assessment of products. Volume 2: Scientific background ISBN: 978-0-412-80810-4. Chapman & Hall, London.
- Hecht, C.; Figgenger, J. (2021): Wann und wie nutzen wir die Gigawattstunden in Elektroautobatterien? In: *PV Magazine*. Vol. 2021– 05.
- Hecht, C.; Figgenger, J.; Sauer, D. U. (2022): Bereits fast 40 Gigawattstunden an Batterien in 1,3 Millionen Elektroautos verbaut. In: *PV Magazine*. Vol. 2022–03, No. 15.
- Heijungs, R.; Guinée, J. B.; Huppes, G.; Lankreijer, R. M.; de Haes, H. A. U.; Wegener Sleeswijk, A.; Ansems, A. M. M.; Eggels, P. G.; van Duin, R.; Goede, H. P. de (1992): Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds.
- Helms, H.; Jöhrens, J.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Liebich, A.; Vogt, R.; Lambrecht, U. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. UBA Texte ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-vertiefte-analyse-der> (12.05.2018).
- Helms, H.; Kräck, J. (2016): Energy savings by light-weighting - 2016 Update.
- Hill, N.; Amaral, S.; Morgan-Price, S.; Nokes, T.; Bates, J.; Helms, H.; Fehrenbach, H.; Biemann, K.; Abdalla, N.; Jöhrens, J.; Cotton, E.; German, L.; Harris, A.; Ziem-Milojevic, S.; Hays, S.; Sim, C.; Bauen, A. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final Report for the European Commission, DG Climate Action Ricardo Energy & Environment, ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung, E4tech, Didcot.
https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/2020_study_main_report_en.pdf (16.10.2020).
- Holst, M.; Stefan Aschbrenner; Tom Smolinka; Christopher Voglstätter; Gunter Grimm; Fraunhofer Ise (2021): Cost Forecast for Low-Temperature Electrolysis - Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems. S. 79. DOI: [10.24406/publica-1318](https://doi.org/10.24406/publica-1318).
- IEA (2022): Global Methane Tracker 2022 – Analysis. <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>. (16.10.2022).
- IEA (2023): Global EV Outlook 2023 - Catching up with climate ambitions. International Energy Agency.
- IPCC (2014): Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. DOI: [10.1017/CBO9781107415324](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324).
- IPCC (2023): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. DOI: [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
- Irakulis-Loitxate, I.; Guanter, L.; Liu, Y.-N.; Varon, D. J.; Maasackers, J. D.; Zhang, Y.; Chulakadabba, A.; Wofsy, S. C.; Thorpe, A. K.; Duren, R. M.; Frankenberg, C.; Lyon, D. R.; Hmiel, B.; Cusworth, D. H.; Zhang, Y.; Segl, K.; Gorroño, J.; Sánchez-García, E.; Sulprizio, M. P.; Cao, K.; Zhu, H.; Liang, J.; Li, X.; Aben, I.; Jacob, D. J. (2021): Satellite-based survey of extreme methane emissions in the Permian basin. In: *Science Advances*. Vol. 7, No. 27, S. eabf4507. DOI: [10.1126/sciadv.abf4507](https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4507).
- Iturrondobeitia, M.; Akizu-Gardoki, O.; Minguez, R.; Lizundia, E. (2021): Environmental Impact Analysis of Aprotic Li–O₂ Batteries Based on Life Cycle Assessment. In: *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. American Chemical Society. Vol. 9, No. 20, S. 7139–7153. DOI: [10.1021/acssuschemeng.1c01554](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01554).
- Jackson, R. B.; Saunio, M.; Bousquet, P.; Canadell, J. G.; Poulter, B.; Stavert, A. R.; Bergamaschi, P.; Niwa, Y.; Segers, A.; Tsuruta, A. (2020): Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and

fossil fuel sources. In: *Environmental Research Letters*. IOP Publishing. Vol. 15, No. 7, S. 071002. DOI: [10.1088/1748-9326/ab9ed2](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2).

Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030 Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotential des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. ifeu, PTV group. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2022-02-04_-_My_eRoads_-_Potentiale_Lkw-Antriebstechnologien_-_final_01.pdf.

Kondori, A.; Esmailirad, M.; Harzandi, A. M.; Amine, R.; Saray, M. T.; Yu, L.; Liu, T.; Wen, J.; Shan, N.; Wang, H.-H.; Ngo, A. T.; Redfern, P. C.; Johnson, C. S.; Amine, K.; Shahbazian-Yassar, R.; Curtiss, L. A.; Asadi, M. (2023): A room temperature rechargeable Li₂O-based lithium-air battery enabled by a solid electrolyte. In: *Science*. American Association for the Advancement of Science. Vol. 379, No. 6631, S. 499–505. DOI: [10.1126/science.abq1347](https://doi.org/10.1126/science.abq1347).

Kramer, U.; Bothe, D.; Gatzen, C.; Pfannenschmidt, A.; Baum, C.; Schrogl, F.; Mahmood, O.; Dünnebeil, F.; Dittrich, M.; Biemann, K.; Liebich, A. (2022): Future Fuels: FVV Fuels Study IVb Project no. 1452 Transformation of Mobility to the GHG Neutral Post-Fossil Age Technical subreport.

Kramer, Ulrich; Bothe, David; Gatzen, Christoph; Reger, Maximiliane; Lothmann, Marion; Dünnebeil, Frank; Biemann, Kirsten; Liebich, Axel; Dittrich, Monika; Limberger, Sonja; Rosental, Marian; Fröhlich, Thomas (2021): Future Fuels: FVV Fuels Study IV - Transformation of Mobility to the GHG-neutral Post-fossil Age. FVV, Frankfurt a. M. https://www.fvv-net.de/fileadmin/Storys/020.50_Sechs_Thesen_zur_Klimaneutralitaet_des_europaeischen_Verkehrssektors/FV_V_Future_Fuels_StudyIV_The_Transformation_of_Mobility_H1269_2021-10_EN.pdf (14.11.2022).

Leichsenring, S. (2021): Festkörperbatterie: 2025 könnte ein entscheidendes Jahr werden. In: *InsideEVs Deutschland*. <https://insideevs.de/news/549535/festkorperbatterie-einfuehrung-2022-nio-2025/>. (01.06.2023).

Li, B.; Gao, X.; Li, J.; Yuan, C. (2014): Life Cycle Environmental Impact of High-Capacity Lithium Ion Battery with Silicon Nanowires Anode for Electric Vehicles. In: *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society. Vol. 48, No. 5, S. 3047–3055. DOI: [10.1021/es4037786](https://doi.org/10.1021/es4037786).

Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münster, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Dünnebeil, F.; Knörr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F.; Pregger, T.; Schillings, C.; Moser, M.; Reißner, R.; Hosseiny, S.; Jungmeier, G.; Beermann, M.; Frieden, D.; Bird, N. (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. UBA TEXTE ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), JOANNEUM RESEARCH. Umweltbundesamt, Dessau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_2020_68_systemvergleich_speicherbarer_energietraeger_aus_erneuerbaren_energien.pdf (13.10.2020).

Madlener, R.; Kirmas, A. (2017): Economic Viability of Second Use Electric Vehicle Batteries for Energy Storage in Residential Applications. In: *Energy Procedia*. 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China Vol. 105, S. 3806–3815. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.890](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.890).

Matzer, C.; Weller, K.; Dippold, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S. (2019): Update of emission factors for HBEFA Version 4.1. Graz. S. 138. https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf (14.11.2022).

Mauler, L.; Duffner, F.; Leker, J. (2021): Economies of scale in battery cell manufacturing: The impact of material and process innovations. In: *Applied Energy*. Vol. 286, S. 116499. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.116499](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116499).

Melin, H. E. (2019): The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study. For the Global Battery Alliance. Circular Energy Storage. http://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf (10.10.2019).

Menne, S.; Obeidi, S.; Hindersmann, C.; Bräuer, S.; Monhof, M.; Nowak, S. (2019): Die Umwidmung gebrauchter Traktionsbatterien in der Detailbetrachtung. In: J. BECKER: / D. BEVERUNGEN: / M. WINTER: / S. MENNE: *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien*. S. 125–178.

Mercedes-Benz Group (2023): Mercedes-Benz legt Grundstein für nachhaltige Batterie-Recyclingfabrik im süddeutschen Kuppenheim (03. März 2023). In: *Mercedes-Benz Group*. <https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/news/recyclingfabrik-kuppenheim.html>. (23.06.2023).

Mohr, M.; Peters, J. F.; Baumann, M.; Weil, M. (2020): Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. In: *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 24, No. 6, S. 1310–1322. DOI: [10.1111/jiec.13021](https://doi.org/10.1111/jiec.13021).

Mordor Intelligence (2022): Lithium-Air Battery Market - Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2023-2028). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/li-air-battery>. (16.03.2023).

Neef, C.; Schmaltz, T.; Thielmann, A. (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. *Kurzstudie im Auftrag der IMPULS-Stiftung*, Fraunhofer ISI, Karlsruhe. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf (01.09.2023).

Osmanbasic, E. (2022): The Promise of Sodium-Ion Batteries. In: *Engineering.com*. <https://www.engineering.com/story/the-promise-of-sodium-ion-batteries>. (22.06.2023).

Peters, J.; Baumann, M.; Binder, J.; Weil, M. (2021): On the environmental competitiveness of Sodium-Ion batteries under a full life cycle perspective – A cell-chemistry specific modelling approach. In: *Sustainable Energy & Fuels*.

Peters, J.; Buchholz, D.; Passerini, S.; Weil, M. (2016): Life cycle assessment of sodium-ion batteries. In: *Energy & Environmental Science*. The Royal Society of Chemistry. Vol. 9, No. 5, S. 1744–1751. DOI: [10.1039/C6EE00640J](https://doi.org/10.1039/C6EE00640J).

Plötz, P.; Moll, C.; Bieker, G.; Mock, P.; Li, Y. (2020a): Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. ICCT White Paper The International Council on Clean Transportation (icct). Fraunhofer ISI, Beijing, Berlin, San Francisco, Sao Paulo, Washington. S. 57. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/PHEV_ICCT_FraunhoferISI_white_paper.pdf (28.10.2020).

Plötz, P.; Moll, C.; Bieker, G.; Mock, P.; Yaoming, L. (2020b): REAL-WORLD USAGE OF PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLES - FUEL CONSUMPTION, ELECTRIC DRIVING, AND CO2 EMISSIONS.

Porzio, J.; Scown, C. D. (2021): Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. In: *Advanced Energy Materials*. Vol. 11, No. 33, S. 2100771. DOI: [10.1002/aenm.202100771](https://doi.org/10.1002/aenm.202100771).

Posseme, B.; Boillet, C. (2023): Battery Market Analysis - European Market - Current status and perspectives. Enerdata.

Prussi, M.; Yugo, M.; De Prada, L.; Padella, M.; Edwards, R. (2020): JEC Well-To-Wheels report v5. EUR 30284 EN Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/100379> (30.10.2020).

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE Studie. Climate Change Umweltbundesamt (UBA), Dessau. S. 444. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue> (13.10.2020).

Rallo, H.; Benveniste, G.; Gestoso, I.; Amante, B. (2020): Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries. In: *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 159, S. 104785. DOI: [10.1016/j.resconrec.2020.104785](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104785).

Reid, G.; Julve, J. (2016): Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies. Kurzstudie im Auftrag von Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE) und Hannover Messe, Jena. S. 46. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/201604_Second_Life-Batterien_als_flexible_Speicher.pdf (10.10.2019).

Reinhardt, R.; Garcia, B. A.; Casals, L. C.; Domingo, S. G. (2016): Critical evaluation of European Union legislation on the second use of degraded traction batteries. In: *2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, Porto, Portugal. S. 1–5. DOI: [10.1109/EEM.2016.7521207](https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521207).

Renault (2022): The Future is Neutral: Renault Group gründet neues Unternehmen für Kreislaufwirtschaft (13.10.2022). In: *Renault Presse-Service*. <https://www.renault-presse.de/main-2838-1>. (23.06.2023).

Rosenbaum, R. K.; Bachmann, T. M.; Gold, L. S.; Huijbregts, M. A. J.; Jolliet, O.; Jurasko, R.; Koehler, A.; Larsen, H. F.; MacLeod, M.; Margni, M. D.; McKone, T. E.; Payet, J.; Schuhmacher, M.; van de Meent, D.; Hauschild, M. Z. (2008): USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 13, S. 532–546. DOI: [10.1007/s11367-008-0038-4](https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4).

Rößiger, M. (2018): Stromspeicher: Vattenfall baut mehr BMW-Batterien ein. https://bizz-energy.com/stromspeicher_vattenfall_baut_mehr_bmw_batterien_ein. (21.10.2019).

Sacchi, R.; Bauer, C.; Cox, B. (2021): Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles. Vol. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55, 8, 5224–5235.

Saouter, E.; Biganzoli, F.; Ceriani, L.; Versteeg, D.; Crenna, E.; Zampori, L.; Sala, S.; Pant, R. (2020): Environmental footprint: update of Life Cycle Impact Assessment Methods : ecotoxicity freshwater, human toxicity cancer, and non-cancer. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Saunio, M.; Stavert, A. R.; Poulter, B.; Bousquet, P.; Canadell, J. G.; Jackson, R. B.; Raymond, P. A.; Dlugokencky, E. J.; Houweling, S.; Patra, P. K.; Ciais, P.; Arora, V. K.; Bastviken, D.; Bergamaschi, P.; Blake, D. R.; Brailsford, G.; Bruhwiler, L.; Carlson, K. M.; Carrol, M.; Castaldi, S.; Chandra, N.; Crevoisier, C.; Crill, P. M.; Covey, K.; Curry, C. L.; Etiope, G.; Frankenberg, C.; Gedney, N.; Hegglin, M. I.; Höglund-Isaksson, L.; Hugelius, G.; Ishizawa, M.; Ito, A.; Janssens-Maenhout, G.; Jensen, K. M.; Joos, F.; Kleinen, T.; Krummel, P. B.; Langenfelds, R. L.; Laruelle, G. G.; Liu, L.; Machida, T.; Maksyutov, S.; McDonald, K. C.; McNorton, J.; Miller, P. A.; Melton, J. R.; Morino, I.; Müller, J.; Murguía-Flores, F.; Naik, V.; Niwa, Y.; Noce, S.; O'Doherty, S.; Parker, R. J.; Peng, C.; Peng, S.; Peters, G. P.; Prigent, C.; Prinn, R.; Ramonet, M.; Regnier, P.; Riley, W. J.; Rosentreter, J. A.; Segers, A.; Simpson, I. J.; Shi, H.; Smith, S. J.; Steele, L. P.; Thornton, B. F.; Tian, H.; Tohjima, Y.; Tubiello, F. N.; Tsuruta, A.; Viovy, N.; Voulgarakis, A.; Weber, T. S.; van Weele, M.; van der Werf, G. R.; Weiss, R. F.; Worthy, D.; Wunch, D.; Yin, Y.; Yoshida, Y.; Zhang, W.; Zhang, Z.; Zhao, Y.; Zheng, B.; Zhu, Q.; Zhu, Q.; Zhuang, Q. (2020): The Global Methane Budget 2000–2017. In: *Earth System Science Data*. Copernicus GmbH. Vol. 12, No. 3, S. 1561–1623. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.

Schaal, S. (2021): Solid Power nennt Details zu Festkörperakku-Plattform. In: *electrive.net*. <https://www.electrive.net/2021/05/25/solid-power-nennt-details-zu-festkoerperakku-plattform/>. (01.06.2023).

Schaal, S. (2022): Gotion High-Tech baut LFP-Zellen mit 210 Wh/kg in Serie. In: <https://www.electrive.net/>. <https://www.electrive.net/2022/04/01/gotion-high-tech-baut-lfp-zellen-mit-210-wh-kg-in-serie/>. (12.06.2023).

Schmaltz, T.; Wicke, T.; Weymann, L.; Voß, P.; Neef, C.; Thielmann, A. (2022): Solid-State Battery Roadmap 2035+. Fraunhofer ISI.

- Schwierz, P. (2017): BMW i3 jetzt Mitglied im Club der 100.000er. In: *electrive.net*.
<https://www.electrive.net/2017/10/26/bmw-i3-jetzt-mitglied-im-club-der-100-000er/>. (21.10.2019).
- Sommerville, R.; Zhu, P.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O.; Goodship, V.; Kendrick, E. (2021): A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. In: *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 165, S. 105219. DOI: [10.1016/j.resconrec.2020.105219](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105219).
- Statista Research Department (2014): Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>.
(25.09.2020).
- Stegmaier, G.; Hebermehl, G. (2021): Reichweiten-Rekord beim Mercedes EQS: Das Geheimnis der Super-Akkus. In: *auto motor und sport*. <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/mercedes-eqs-probleme-farasis-batteriezellen-eigene-fertigung-2021/>. (01.06.2023).
- Teske, S. (2019): Achieving the Paris Climate Agreement Goals. ISBN 978-3-030-05843-2.
- Umweltbundesamt, P. (2020): Stickstoff- und Phosphoreinträge aus Punktquellen und diffusen Quellen in die Oberflächengewässer in Deutschland. *Tabelle*, Umweltbundesamt.
- UNEP (2019): Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Volume 2. United Nations Environment Programme. <https://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-volume-2/> (26.09.2022).
- Volkswagen AG (2018): Second Life Energiespeicher: VHH und MAN testen zweites Leben von Batterien als Ladestation für eBusse (16.3.2018). https://www.volkswagenag.com/de/news/2018/03/MAN_VHH.html.
(22.10.2019).
- Volkswagen Group (2021): Aus alt mach neu – Batterierecycling in Salzgitter (29.01.21). In: *Volkswagen Newsroom*. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/aus-alt-mach-neu-batterierecycling-in-salzgitter-6782>. (23.06.2023).
- Wagner-Wenz, R.; van Zuilichem, A.-J.; Göllner-Völker, L.; Berberich, K.; Weidenkaff, A.; Schebek, L. (2022): Recycling routes of lithium-ion batteries: A critical review of the development status, the process performance, and life-cycle environmental impacts. In: *MRS Energy & Sustainability*. DOI: [10.1557/s43581-022-00053-9](https://doi.org/10.1557/s43581-022-00053-9).
- Wang, F.; Deng, Y.; Yuan, C. (2020a): Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 264, S. 121339. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.121339](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121339).
- Wang, L.; Hu, J.; Yu, Y.; Huang, K.; Hu, Y. (2020b): Lithium-air, lithium-sulfur, and sodium-ion, which secondary battery category is more environmentally friendly and promising based on footprint family indicators? In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 276, S. 124244. DOI: [10.1016/j.jclepro.2020.124244](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124244).
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 21, No. 9, S. 1218–1230.
- Werwitzke, C. (2021): „Wir sind der eigentliche Pionier der Feststoffbatterie“. In: *electrive.net*.
<https://www.electrive.net/2021/03/03/wir-sind-der-eigentliche-pionier-der-feststoffbatterie/>. (01.06.2023).
- WHO (2006): Health risk of particulate matter from long-range transboundary air pollution. World Health Organization (WHO).
- WMO (2014): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. World Meteorological Organization (WMO), Geneva.
- Wolf, S.; Seidenfus, M.; Gordon, K.; Alvarez, S.; Kalt, S.; Lienkamp, M. (2020): Scalable Life-Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicle Production. In: *sustainability*. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12135396>.

- Xu, C.; Dai, Q.; Gaines, L.; Hu, M.; Tukker, A.; Steubing, B. (2020): Future material demand for automotive lithium-based batteries. In: *Communications Materials*. Vol. 1, No. 1, S. 1–10. DOI: [10.1038/s43246-020-00095-x](https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x).
- Zackrisson, M.; Fransson, K.; Hildenbrand, J.; Lampic, G.; O'Dwyer, C. (2016): Life cycle assessment of lithium-air battery cells. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 135, S. 299–311. DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.06.104](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.104).
- Zheng, X.; Zhu, Z.; Lin, X.; Zhang, Y.; He, Y.; Cao, H.; Sun, Z. (2018): A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. In: *Engineering*. Vol. 4, No. 3, S. 361–370. DOI: [10.1016/j.eng.2018.05.018](https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018).
- Zhu, J.; Mathews, I.; Ren, D.; Li, W.; Cogswell, D.; Xing, B.; Sedlatschek, T.; Kantareddy, S. N. R.; Yi, M.; Gao, T.; Xia, Y.; Zhou, Q.; Wierzbicki, T.; Bazant, M. Z. (2021): End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. In: *Cell Reports Physical Science*. Vol. 2, No. 8, S. 100537. DOI: [10.1016/j.xcrp.2021.100537](https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537).

A Anhang

A.1 Verweis auf Datenanhang

Eine Datei mit den Ergebnissen aller Standardfälle findet sich auf der Internetseite des Umweltbundesamtes.

A.2 Bereitstellungspfade

Zu Anfang dieses Forschungsvorhabens war geplant einen Teil der im UBA-Projekt SYSEET (Liebich et al. 2020) untersuchten Bereitstellungspfade in dieser Studie erneut zu betrachten und einige neue Varianten hinzuzufügen. Dieser Ansatz wurde im Verlauf des Projektes zugunsten der Festlegung von Standardfällen (Kapitel 3.1) und Sensitivitätsrechnungen (Kapitel 3.4 und 4.1.4) aufgegeben. Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Ökobilanzmodell erlaubt jedoch eine effiziente Berechnung für die ausgewählten und in Tabelle 50 aufgeführten Bereitstellungspfade. Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Datendatei auf der Internetseite des Umweltbundesamtes enthalten, werden aber nicht weiter diskutiert und bewertet.

Tabelle 50: Liste der ausgewählten Bereitstellungspfade

Nr	Synthese	Standort	CO ₂ -Quelle	Stromquelle	Elektrolyse	Transport & Distribution	Pfadnr. SYSEET
1	FT-PtL	D	DAC	WindOff	AEL	Lkw	11
2	FT-PtL	D	DAC	PV	AEL	Lkw	10
3	FT-PtL	D	DAC	WindOff	AEL	Lkw	19
4	FT-PtL	D	Zementwerk	WindOn	AEL	Lkw	Neu
5	FT-PtL	D	Biogas	WindOn	AEL	Lkw	Neu
6	FT-PtL	M	DAC		AEL	Tanker+ Lkw	14
7	FT-PtL	M	DAC	WindOn	AEL	Tanker+ Lkw	13
8	FT-PtL	M	DAC		AEL	Tanker+ Lkw	12
9	FT-BtL	D	Stroh			Lkw	1
10	FT-PBtL	D	Stroh	WindOn	AEL	Lkw	2
11	MtG-PtL	D	DAC	WindOff	AEL	Lkw	33
12	MtG-PtL	D	DAC		AEL	Lkw	32
13	MtG-PtL	D	Zementwerk	WindOn	AEL	Lkw	Neu
14	MtG-PtL	D	Biogas	WindOn	AEL	Lkw	Neu
15	MtG-PtL	M	DAC		AEL	Tanker+ Lkw	35
16	MtG-PtL	M	DAC	WindOn	AEL	Tanker+ Lkw	36
17	MtG-PtL	M	DAC		AEL	Tanker+ Lkw	34
18	MtG-BtL	D	Stroh			Lkw	23
19	MtG-PBtL	D	Stroh	WindOn	AEL	Lkw	24
20	PtG-CH ₄	D	DAC	WindOff	AEL	Gasnetz	49
21	PtG-CH ₄	D	Zementwerk	WindOn	AEL	Gasnetz	Neu
22	PtG-CH ₄	D	Biogas	WindOn	AEL	Gasnetz	Neu
23	PtG-CH ₄	M	DAC		AEL	Pipeline	51
24	Bio-CH ₄	D	Bioabfall/ Grünschnitt			Gasnetz	60
25	PtG-H ₂	D		WindOn	AEL	Gasnetz	55
26	PtG-H ₂	M		WindOn	AEL	Pipeline	Neu
27	PtG-H ₂	M		WindOn	AEL	Tanker+Pipeline	Neu
28	PtG-H ₂	M		WindOn	PEM	Pipeline	Neu