



wbh

**WILHELM BÜCHNER
HOCHSCHULE**

Ökobilanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe im PKW-Sektor der Europäischen Union: Eine Lebenszyklusanalyse

Pedar Knežić, Ralf Isenmann, Klaus-Michael Ahrend



**Schriftenreihe der
Wilhelm Büchner Hochschule**

Band 22/2026

Pedar Knežić, Ralf Isenmann, Klaus-Michael Ahrend

Schriftenreihe der Wilhelm Büchner Hochschule

Herausgeber:

Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule

09.04.2025

Impressum

ISSN (Online) 2751-0514

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

©Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt 2026

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Werden Personenbezeichnungen aus Gründen der besseren Lesbarkeit nur in der männlichen oder weiblichen Form verwendet, so schließt dies das jeweils andere Geschlecht mit ein.

Herausgeber: Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule

Layout und Satz: Jan Hartmayer, Natascha Christl

Projektkoordination: Prof. Steffen Rümpler

E-Mail: Forschung@wb-fernstudium.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Kurzbeschreibung

Die Automobilindustrie befindet sich in einem tiefgreifenden Transformationsprozess hin zu nachhaltigeren Antriebstechnologien. Aus diesem Kontext heraus ergeben sich wichtige Fragestellungen in Bezug auf Lebenszyklusemissionen, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch und weiteren wichtigen Aspekten. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde eine Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus von PKWs im Kontext der Europäischen Union erstellt. Diese basiert auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und analysiert vergleichend verschiedene Antriebstechnologien. Zudem wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen und Parameter auf die Ergebnisse zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) die höchste Energieeffizienz und zugleich ein hohes Potenzial zur Reduktion von CO₂e-Emissionen ermöglichen. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) bieten ein hohes Potenzial zur Minderung der verkehrsbedingten CO₂e-Emissionen, jedoch mit Limitierungen aufgrund der Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff. Verbrennungsmotoren (ICEVs), deren Betrieb fossile Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel erfordert, verursachen die höchsten direkten CO₂e-Emissionen und weisen die geringste Energieeffizienz auf. Der Einsatz von alternativen Kraftstoffen, wie eFuels oder HVO100 in Verbrennungsmotoren, ermöglicht ein hohes Potenzial zur signifikanten Minderung der verkehrsbedingten Emissionen, allerdings mit Einschränkungen bezüglich der Verfügbarkeit. Auch Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEVs) können bei hohem elektrischen Fahranteil zur Minderung von CO₂e-Emissionen beitragen. Um die Klimaziele der Europäischen Union und des Pariser Klimaschutzabkommens zu erreichen, müssen die CO₂e-Gesamtemissionen im PKW-Sektor drastisch reduziert werden. Diese Potenziale lassen sich nur in Verbindung mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien verwirklichen. Alternative Antriebstechnologien haben derzeit höhere Stickoxid- und Feinstaubemissionen als klassische Verbrennungsmotoren, vor allem wegen der herstellungsbedingten Emissionen. Zusätzlich erhöhen alternative Antriebstechnologien den Bedarf an kritischen Rohstoffen, welche mit Versorgungsrisiken verbunden sind. Die Ergebnisse der Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 zeigen auf, dass alle Antriebstechnologien zu einer signifikanten Senkung von Treibhausgasemissionen beitragen können.

Schlüsselwörter: Alternative Antriebstechnologien, Lebenszyklusanalyse, Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe, kritische Rohstoffe

Abstract

The automotive industry is undergoing an extensive transformation towards more sustainable powertrains to reduce CO₂e emissions. Within this context, important questions arise regarding life cycle emissions, energy efficiency, resource consumption, and other significant aspects. This study offers a life cycle assessment (LCA) approach that analyzes all life cycle phases of passenger cars within the European Union framework. It takes into consideration latest scientific data and compares different powertrains. Additionally, a sensitivity analysis was conducted to evaluate how different assumptions and parameters influence the results.

The findings demonstrate that battery electrical vehicles (BEVs) result in the highest efficiency and offer significant potential for CO₂e emission reduction. Fuel cell electric vehicles (FCEVs) also reveal significant potential to reduce CO₂e emissions but are currently limited by the availability of green hydrogen. Internal Combustion Engine Vehicles (ICEVs), powered by fossil fuels like gasoline and diesel, emit the highest direct CO₂e emissions among all propulsion systems while simultaneously operating at low energy efficiency levels. Combustion engines using alternative fuels, such as eFuels or HVO100, also offer significant potential for reducing CO₂e emissions but face limitations concerning fuel availability. Plug-in-Hybrid vehicles (PHEVs) can also contribute to the reduction of CO₂e emissions when a high proportion of driving is done electrically. This analysis underscores the urgency of significant CO₂e emission reductions in the European Union's passenger car sector to meet transportation decarbonization objectives. Finally, it highlights the critical role of renewable energy development in achieving these goals.

Regarding nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter (PM_x), current alternative powertrains face challenges as they exceed the emission values of conventional vehicles, powered by internal combustion engines, due to their higher manufacturing-phase emissions. Furthermore, alternative powertrains increase the demand for critical raw materials, which are associated with supply risks. The scenario results for 2035 and 2050 demonstrate that all powertrains can contribute to a significant reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: alternative powertrains, life cycle assessment, greenhouse gas emissions, air pollutants, critical raw materials

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	23
1.1 Motivation und Zielsetzung: Warum diese Masterarbeit im Kontext der Nachhaltigkeit wichtig ist	23
1.2 Wissenschaftliche Methoden und Literatur: Bewertung von alternativen Antrieben anhand einer Lebenszyklusanalyse	26
1.3 Aufbau der Masterarbeit: Ein Überblick über die Struktur	30
2 Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen zur LCA der Antriebstechnologien und Kraftstoffe für PKWs und verwendete Annahmen	32
2.1 Grundbegriffe zur Ökobilanz für PKWs	32
2.2 Marktüberblick und technologische Merkmale von BEV, FCEV, ICEV und PHEV Antriebstechnologien	34
2.3 Unterschiede und Herausforderungen bei der Nutzung von Strom und Wasserstoff als Energieträger für BEV und FCEV	37
2.4 Eigenschaften, Herstellungsmethoden und Herausforderungen alternativer Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren: Synthetische und Biokraftstoffe im Kontext der EU-Klimaziele	41
2.5 Umweltwirkungen: Treibhausgas-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Bedarf an kritischen Rohstoffen	45
2.6 Verwendete Studien, Metastudien, Fachliteratur, Statistiken und getroffene Annahmen zur Lebenszyklusanalyse	50
3 Well-to-Wheel-Analyse (WtW): Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen in der Nutzungsphase von PKWs	64
3.1 Definition der Well-to-Wheel-Phase (WtW) und verwendete .. Methoden zur Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für PKWs.....	64
3.2 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von BEVs.....	67
3.3 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von FCEVs	70

3.4 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von ICEVs	73
3.5 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von PHEVs.....	79
3.6 Zusammenfassender Vergleich des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien	85
4 Vergleichende Well-to-Wheel-Analyse (WtW): Energieverbrauch und THG-Emissionen in der Nutzungsphase von PKWs	88
4.1 Aktueller Vergleich des Energieverbrauchs und der ... THG-Emissionen verschiedener Antriebsarten	88
4.2 Alternative Antriebstechnologien und Kraftstoffe: Wie die Energiewende den Verkehrssektor transformiert.....	92
4.3 Energieeffizienz im Vergleich: Emissionen vs. Energieeinsatz der Antriebstechnologien und Energieträger.....	94
4.4 Einfluss der PKW-Erneuerungsraten auf die Minderung von THG-Emissionen ausgewählter EU-Länder.....	97
4.5 Verbrennungsmotoren mit eFuels als alternativem Kraftstoff: . Chancen und Herausforderungen	99
4.6 Szenarien der THG-Emissionen: Vergleichende Analyse der Nutzungsphase von PKWs in den Jahren 2025, 2035 und 2050	108
5 Vergleichende Lebenszyklusanalyse (LCA): THG-Emissionen verschiedener Antriebstechnologien von PKWs in den Jahren 2025, 2035 und 2050 im Kontext der Europäischen Union	114
5.1 Vergleichende Cradle-to-Gate-Analyse (CtG): . THG-Emissionen in der Herstellungsphase von PKWs	114
5.2 Vergleichende End-of-Life-Analyse (EoL): THG-Emissionen beim Nutzungsende von PKWs	120
5.3 Lebenszyklusanalyse (LCA) von BEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050	122
5.4 Lebenszyklusanalyse (LCA) von FCEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050	124
5.5 Lebenszyklusanalyse (LCA) von ICEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050	126

5.6 Lebenszyklusanalyse (LCA) von PHEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050	128
5.7 Zusammenfassung der Lebenszyklusanalyse (LCA): THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien in den Jahren 2025, 2035 und 2050.....	132
6 Umweltbelastungen durch Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Einsatz kritischer Rohstoffe über die gesamte Lebenszyklusphase eines PKWs	140
6.1 Vergleich der Stickoxidemissionen der verschiedenen Antriebstechnologien	140
6.2 Vergleich der Feinstaubemissionen der verschiedenen Antriebstechnologien	151
6.3 Vergleichende Betrachtung zum Einsatz kritischer Rohstoffe für alternative Antriebstechnologien	158
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	169
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse: Energieverbrauch und Potenzial zur Reduzierung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien.....	169
7.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse: Umweltbelastungen durch Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Einsatz kritischer Rohstoffe.....	172
7.3 Zusammenhang zwischen den 17 Sustainable Development Goals der UN und den Umweltfaktoren: Treibhausgase, Stickoxide, Feinstaub und kritische Rohstoffe	176
7.4 Grenzen der Lebenszyklusanalyse: Kritische Würdigung der Lebenszyklusanalyse	178
Literaturverzeichnis	CLXXXII
KI-Tools-Verzeichnis	CXCV
Datei-Anhangsverzeichnis zur Masterarbeit	CXCVII
Anlage I: Methodische Instrumente und Literaturrecherche	CXCVIII
Anlage II: Berechnungen zu Kapitel 3 bis 6.....	CCI

Abkürzungsverzeichnis

ACEA	European Automobile Manufacturers' Association (Verband der europäischen Automobilhersteller)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.
Al	Aluminium (kritischer Rohstoff), engl. Aluminum
ATZ	Automobiltechnische Zeitschrift (Springer Verlag)
BC	Rußpartikel, engl. Black Carbon (Luftschadstoff)
BEV hicle	Batterieelektrisches Fahrzeug, engl. Battery Electrical Ve-
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMK	Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Um- welt, Energie, Mobilität und Technologie
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CEO	Oberste Führungskraft, engl. Chief Executive Officer
CH ₄	Methan (Treibhausgas)
CNG	Liquified Petroleum Gas (Erdgas)
Co	Kobalt (kritischer Rohstoff), engl. Cobalt
COP	UN-Klimakonferenz, engl. Conference of the Parties
CO ₂	Kohlenstoffdioxid (Treibhausgas), engl. Carbon Dioxide
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente, engl. CO ₂ e equivalents
Concawe	Conservation of Clean Air and Water in Europe (Organisation der Europäischen Mineralölindustrie)
CtG	Cradle-to-Gate (Lebenszyklusphase)

Cu	Kupfer, engl. Copper (kritischer Rohstoff)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN ISO	Deutsche Norm, Europäische Norm, Internationale Organisation für Normung
DAC	Direct Air Capture (Technologie zur Reduzierung von Kohlendioxid in der Atmosphäre)
DE	Deutschland
DENA	Deutsche Energie-Agentur GmbH
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DNR	Deutscher Naturschutzring
DUH	Deutsche Umwelthilfe
EE	Erneuerbare Energien
EF	Emissionsfaktor
EFI	Expertenkommission Forschung und Innovation
eFuels	Elektronischer Kraftstoff oder synthetischer Kraftstoff
EoL	End-of-Life (Lebenszyklusphase)
EREV	Extended Range Electric Vehicle (Antriebstechnologie)
EU	Europäische Union
EU27	27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union
EUCAR	European Council for Automotive R&D
Euro 6	Abgasnorm der Europäischen Union
Euro 7	Abgasnorm der Europäischen Union

EV	Elektrofahrzeug, engl. Electrical Vehicle
η	Wirkungsgrad (griechischer Buchstabe „Eta“)
FCEV cle	Brennstoffzellenfahrzeug, engl. Fuel Cell Electrical Vehicle
FEMG	Concawe Fuels and Emissions Management Group
FR	Frankreich
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese (Methode zur Herstellung von eFuels)
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.
FVT	Forschungsgesellschaft für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik
Fzg.	Fahrzeug
g	Gramm (Einheit der Masse)
GFEI	Global Fuel Economy Initiative
GHG	Greenhouse Gas (Treibhausgas)
Gr	Grafit (kritischer Rohstoff)
GWP	Global Warming Potential (Globales Erderwärmungspotenzial)
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H2-ICE	Wasserstoffverbrennungsmotor, engl. Hydrogen Internal Combustion Engine
HVO	Hydriertes Pflanzenöl, engl. Hydrotreated Vegetable Oil (Biokraftstoff)
HFC	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (Treibhausgas)

ICCT	International Council on Clean Transportation
ICE	Verbrennungsmotor, engl. Internal Combustion Engine
ICEV	Verbrennungsmotorenfahrzeug, engl. Internal Combustion Engine Vehicle
ICEV-D	Diesel-Verbrennungsmotorenfahrzeug, engl. ICEV Diesel
ICEV-G	Benziner-Verbrennungsmotorenfahrzeug, engl. ICEV Gasoline
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
JRC	Joint Research Centre (Einrichtung der Europäischen Kommission)
K	Kritischer Rohstoff (EU-Liste kritischer Rohstoffe)
KI	Künstliche Intelligenz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde (Einheit für Energie)
l	Liter (Einheit des Volumen)
LCA	Lebenszyklusanalyse, engl. Life Cycle Assessment
LCP JG	Concawe Low Carbon Pathways Joint Group
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat (Batterietechnologie)
Li	Lithium (kritischer Rohstoff), engl. Lithium
LNMO	Lithium-Nickel-Mangan-Oxid (Batterietechnologie)
LPG	Flüssiggas bzw. Autogas, engl. Liquefied Petroleum Gas

Mn	Mangan (kritischer Rohstoff)
MTZ	Motorentechnische Zeitschrift (Springer Verlag)
NABU	Naturschutzbund Deutschland e. V.
N ₂ O	Distickstoffoxid (Treibhausgas)
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NF ₃	Stickstofftrifluorid (Treibhausgas)
NGO	Nichtregierungsorganisation, engl. Non-Governmental Organization
NH ₃	Ammoniak (Luftschadstoff)
Ni	Nickel (kritischer Rohstoff)
MJ	Megajoule (Einheit der Energie)
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt (Batterietechnologie)
NM VOC	Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (Luftschadstoff)
NO _x	Stickoxid (Luftschadstoff), engl. Nitrogen Oxide
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, engl. Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Fahrzeughersteller, engl. Original Equipment Manufacturer
O ₃	Ozon (Luftschadstoff)
Pd	Palladium (kritischer Rohstoff)
PFC	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (Treibhausgas)
PGM	Platingruppenmetalle (kritischer Rohstoff)

PHEV	Plug-in Hybridfahrzeug, engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PIK	Potsdam-Institut für Klimaforschung
PKW	Personenkraftwagen
PL	Polen
PI	Platin (kritischer Rohstoff)
PM _x	Feinstaubemissionen (Luftschadstoff), engl. Particulate Matter
PM _{2,5}	Feinstaubemissionen kleiner als 2,5 µm
PM ₁₀	Feinstaubemissionen kleiner als 10 µm
PtL	Power-to-Liquid (Verfahren zur Umwandlung von elektrischer Energie in flüssige Kraftstoffe)
PV	Photovoltaik
RED II	Erneuerbare-Energien-Richtlinie II der Europäischen Union, engl. Renewable Energy Directive II
REEV	Range Extended Electrical Vehicle (Antriebstechnologie)
Rh	Rhodium (kritischer Rohstoff)
Ru	Ruthenium (kritischer Rohstoff)
S	Strategischer Rohstoff (EU-Liste kritischer Rohstoffe)
SDG	Sustainable Development Goals (UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung)
SEO	Seltenerdoxide (Synonym für Seltenerdmetalle)
SF ₆	Schwefelhexafluorid (Treibhausgas)
SO ₂	Schwefeldioxid (Luftschadstoff)
SO _{2e}	SO ₂ -Äquivalente, engl. SO _{2e} equivalents

SUV	Sport Utility Vehicle (Fahrzeugkategorie)
t	Tonne (Einheit der Masse)
TCO	Gesamtkosten des Eigentums, engl. Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
Tier	Zulieferer
TtW	Tank-to-Wheel (Lebenszyklusphase)
T&E	Transport and Environment (Europäische Nichtregierungsorganisation)
UN	Vereinte Nationen, engl. United Nations
UNITI	Bundesverband Energie Mittelstand e. V.
USA	Vereinigte Staaten von Amerika, engl. United States of America
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie e. V.
Wh	Wattstunde (Einheit der Leistung)
WtT	Well-to-Tank (Lebenszyklusphase)
WtW	Well-to-Wheel (Lebenszyklusphase)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	PKWs mit alternativen Antriebstechnologien und alternativen Energieträgern (KI-generiert)	24
Abbildung 2:	Darstellung der Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) in Bezug auf ihre Relevanz für die Ökobilanz	25
Abbildung 3:	Vorgehensmodell zur Literaturrecherche und Studienauswertung	26
Abbildung 4:	Überblick der wesentlichen Aspekte der Hauptkapitel der Masterarbeit.....	30
Abbildung 5:	Ökobilanz und Lebenszyklusphasen eines PKWs.....	33
Abbildung 6:	Synopsis der Antriebstechnologien und Energieträger für PKWs.....	35
Abbildung 7:	CO ₂ e-Emissionsfaktoren der EU-Länder im Jahr 2021.....	38
Abbildung 8:	Herstellungsprozess von eFuels (EE-Strom und FTS).....	42
Abbildung 9:	Herstellungsprozess von HVO100	43
Abbildung 10:	Tankstellenkarte für Biokraftstoff HVO100 in der Europäischen Union (Quelle: efuel-now).....	44
Abbildung 11:	Übersicht der Treibhausgase und des globalen Erderwärmungspotenzials	46
Abbildung 12:	Übersicht der Luftschadstoffe (Göteborg-Protokoll).....	48
Abbildung 13:	Gesamtleistung und Fahrzeuglebensdauer von PKWs (Benzin und Diesel)	50
Abbildung 14:	Well-to-Wheel-Analyse für die Nutzungsphase von PKWs..	65
Abbildung 15:	THG-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) bei Verwendung von landesspezifischem Strommix oder erneuerbaren Energien	69
Abbildung 16:	THG-Emissionen bei Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) ..	72

Abbildung 17:	Erneuerbare THG-Emissionen bei alternativen Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren	76
Abbildung 18:	THG-Emissionen und erneuerbare THG-Emissionen bei PHEVs unter Verwendung von fossilen und alternativen Kraftstoffen und unterschiedlicher Herkunft des Stroms.....	83
Abbildung 19:	THG-Emissionen bei PHEVs unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugverbräuche unter Realbedingungen	84
Abbildung 20:	CO ₂ e-Emissionen der Antriebsarten und Energieträger im Vergleich	88
Abbildung 21:	Prozentuale Abweichung der THG-Emissionen von BEVs und FCEVs im Vergleich zu ICEV-Benzinern	89
Abbildung 22:	Prozentuale Abweichung der THG-Emissionen von ICEVs mit alternativen Kraftstoffen und PHEVs im Vergleich zu ICEV-Benzinern	91
Abbildung 23:	Entwicklung der CO ₂ e-Emissionsfaktoren der Stromerzeugung vom Jahr 1990 bis 2021 von ausgewählten EU-Ländern.....	92
Abbildung 24:	Bevölkerungszahlen, Bestandsfahrzeuge, Fahrzeugneuzulassungen und CO ₂ e-Emissionsfaktoren der Stromerzeugung ausgewählter EU-Länder.....	93
Abbildung 25:	Vergleich von THG-Emissionen vs. Energieeinsatz verschiedener Antriebsarten und Energieträger	95
Abbildung 26:	Erneuerungsraten des PKW-Bestands der EU im Kontext der CO ₂ e-Emissionen der Stromerzeugung.....	97
Abbildung 27:	Energieeffizienz von BEV, FCEV und ICEV [eFuel] im Vergleich	100
Abbildung 28:	CO ₂ -neutraler Kreislauf von eFuels.....	102
Abbildung 29:	Erneuerung der PKW-Bestandsflotte der EU von Jahr 2025 bis 2053	105

Abbildung 30:	Balance zwischen Chancen und Herausforderungen für den Einsatz von eFuels im PKW-Sektor und anderen Sektoren	106
Abbildung 31:	Vergleich der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050 für die unterschiedlichen Antriebstechnologien und Kraftstoffe	108
Abbildung 32:	Vergleichende Analyse der berechneten Cradle-to-Gate-THG-Emissionen aus verschiedenen Studien	116
Abbildung 33:	Cradle-to-Gate-THG-Emissionen pro Fahrzeug im Jahr 2025, 2035 und 2050	118
Abbildung 34:	Cradle-to-Gate THG-Emissionen pro Fahrzeug nach Fahrzeugkomponenten	119
Abbildung 35:	End-of-Life-THG-Emissionen pro Fahrzeug im Jahr 2025, 2035 und 2050	120
Abbildung 36:	Lebenszyklus-THG-Emissionen von BEVs in den Jahren 2025, 2035 und 2050	122
Abbildung 37:	Vergleich der LCA-THG-Emissionen von BEVs zu ICEV-G	123
Abbildung 38:	Lebenszyklus-THG-Emissionen von FCEVs in den Jahren 2025, 2035 und 2050	124
Abbildung 39:	Vergleich der LCA-THG-Emissionen von FCEVs zu ICEV-G	125
Abbildung 40:	Lebenszyklus-THG-Emissionen von ICEVs in den Jahren 2025, 2035 und 2050	126
Abbildung 41:	Vergleich der LCA-THG-Emissionen von ICEVs zu ICEV-G	127
Abbildung 42:	Lebenszyklus-THG-Emissionen von PHEVs (fossile Kraftstoffe) in den Jahren 2025, 2035 und 2050	128
Abbildung 43:	Vergleich der LCA-THG-Emissionen von PHEVs mit fossilen Kraftstoffen zu ICEV-G	129

Abbildung 44: Lebenszyklus-THG-Emissionen von PHEVs (Alternative Kraftstoffe) in den Jahren 2025, 2035 und 2050	130
Abbildung 45: Vergleich der LCA-THG-Emissionen von PHEVs mit alternativen Kraftstoffen zu ICEV-G	131
Abbildung 46: Lebenszyklus-THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für das Jahr 2025	132
Abbildung 47: Prozentuale Aufteilung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs für das Jahr 2025	134
Abbildung 48: Lebenszyklus-THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für das Jahr 2035	135
Abbildung 49: Prozentuale Aufteilung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs für das Jahr 2035	136
Abbildung 50: Lebenszyklus-THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für das Jahr 2050	137
Abbildung 51: Prozentuale Aufteilung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs für das Jahr 2050	138
Abbildung 52: Tank-to-Wheel-Stickoxidemissionen bei Diesel-PKWs	141
Abbildung 53: Cradle-to-Gate- und End-of-Life-Stickoxidemissionen	142
Abbildung 54: Well-to-Tank-Stickoxidemissionen	144
Abbildung 55: Tank-to-Wheel-Stickoxidemissionen	147
Abbildung 56: LCA-Stickoxidemissionen	148
Abbildung 57: Prozentuale Verteilung der LCA-Stickoxidemissionen	149
Abbildung 58: Cradle-to-Gate- und End-of-Life-Feinstaubemissionen	152
Abbildung 59: Well-to-Tank-Feinstaubemissionen	153

Abbildung 60: Tank-to-Wheel-Feinstaubemissionen	154
Abbildung 61: LCA-Feinstaubemissionen	156
Abbildung 62: Prozentuale Verteilung der LCA-Feinstaubemissionen	157
Abbildung 63: Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten im Rahmen der Masterarbeit.....	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahl relevanter Kriterien für die Ökobilanz	28
Tabelle 2:	Energieträger und Antriebstechnologien für PKWs.....	36
Tabelle 3:	Annahmen zu Laufleistung und Lebensdauer der Antriebstechnologien für die Jahre 2025, 2035 und 2050.....	53
Tabelle 4:	Veränderte Annahmen zu Emissionsfaktoren der Energie- träger in den Jahren 2035 und 2050 im Vergleich zum Jahr 2025	54
Tabelle 5:	Veränderte Annahmen zum Fahrzeugverbrauch in den Jahren 2035 und 2050 im Vergleich zum Jahr 2025.....	56
Tabelle 6:	Berechnungen zu Well-to-Tank-Emissionsfaktoren für Stickoxide und Feinstaub	58
Tabelle 7:	Berechnung der Well-to-Tank-Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Herstellung von eFuels mit Stromerzeugung anhand des Strommixes EU27	59
Tabelle 8:	Berechnung der Well-to-Tank-Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Herstellung von eFuels mit Stromerzeugung anhand des von 100 % EE-Strom	59
Tabelle 9:	Übersicht der Beteiligten der verwendeten Studien, Meta- studien und Statistiken	62
Tabelle 10:	CO ₂ e-Emissionen von batterieelektrischen PKWs (BEV)	68
Tabelle 11:	CO ₂ e-Emissionen von Brennstoffzellen-PKWs (FCEV)	70
Tabelle 12:	CO ₂ e-Emissionen von PKWs mit Verbrennungsmotoren (ICEV).....	74
Tabelle 13:	Übersicht verschiedener Datenquellen für Emissionsfaktoren für Biokraftstoffe HVO100	77
Tabelle 14:	CO ₂ e-Emissionen von PKWs mit Plug-in-Hybrid- Antriebstechnologie (PHEV)	81

Tabelle 15:	Vergleichende Darstellung des Emissionsfaktors, des Fahrzeugverbrauchs, der Lebensdauer, der Gesamtfahrleistungen und der THG-Emissionen über die Lebensdauer für verschiedene Antriebstechnologien und Energieträger	86
Tabelle 16:	Chancen und Herausforderungen für den Markthochlauf von eFuels	99
Tabelle 17:	Vergleich zum Infrastrukturausbau pro Antriebstechnologie	103
Tabelle 18:	Fahrzeugkomponenten der verschiedenen Antriebstechnologien	115
Tabelle 19:	EU-Liste kritischer und strategischer Rohstoffe im Kontext alternativer Antriebstechnologien.....	159
Tabelle 20:	Bedarf an kritischen Rohstoffen für die unterschiedlichen Antriebstechnologien	160
Tabelle 21:	Bedarf an kritischen Rohstoffen für die unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten alternativer Antriebstechnologien.....	162
Tabelle 22:	Vergleichende Darstellung des Potenzials der Antriebstechnologien und Energieträger zur Reduzierung von Treibhausgasen	170
Tabelle 23:	Vergleichende Darstellung des Potenzials der Antriebstechnologien und Energieträger zur Reduzierung von Luftschadstoffen (Stickoxide und Feinstaub).....	172
Tabelle 24:	Zusammenhänge zwischen den 17 SDGs und Umweltfaktoren: THG, Stickoxide, Feinstaub und kritische Rohstoffe.....	176

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung: Warum diese Masterarbeit im Kontext der Nachhaltigkeit wichtig ist

Die Automobilindustrie befindet sich im tiefgreifenden Transformationsprozess hin zu nachhaltigeren Antriebstechnologien. Als langjährig in der Automobilindustrie Tätiger, sind die Auswirkungen der notwendigen Transformation hautnah in Beruf und Arbeitsleben erlebbar. Die Diskussionen in Gesellschaft, Politik und Wirtschaft erscheinen dabei oftmals als wenig faktenbasiert und kurzfristig orientiert. Die persönliche Motivation liegt darin, einen wissenschaftlich fundierten, also objektiven Beitrag zur Diskussion über Effizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Antriebstechnologien und alternativer Kraftstoffe zu leisten.

Der PKW-Sektor ist einer der Hauptverursachenden von CO₂e-Emissionen in der Europäischen Union.¹ Die Automobilindustrie steht spätestens seit dem geplanten de facto Verbot von Verbrennungsmotoren ab 2035 vor der Herausforderung, die CO₂e-Emissionen signifikant zu reduzieren.² Obwohl sich zahlreiche Studien dem Thema Energieverbrauch und Wirkungsgrad einzelner Antriebstechnologien widmen, fehlt es an einer vergleichenden Analyse dieser Technologien im Kontext des europäischen PKW-Sektors. Weiterhin verwenden viele Studien den europäischen Strommix als Beurteilungsgrundlage. Genau dieser muss aber für eine detaillierte und fundierte Beurteilung länderspezifisch noch einmal genauer analysiert werden.

Diese Abschlussarbeit zielt darauf ab, die Ökobilanz der verschiedenen Antriebskonzepte über den gesamten Lebenszyklus (Lebenszyklusanalyse, LCA) hinweg vergleichend darzustellen. Es sollen im Detail: Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV), Verbrennungsmotorfahrzeuge (ICEV) und Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV) des PKW-Sektors der Europäischen Union (EU) verglichen werden. Bei ICEV und PHEV sollen insbesondere auch alternative Kraftstoffe, also synthetische Kraftstoffe wie eFuels und Biokraftstoffe wie HVO100, betrachtet werden. Alternative Kraftstoffe könnten, möglicherweise auch nach dem Jahr 2035 bei PKW-Neuzulassungen in der Europäischen Union als CO₂-neutrale Alternativen

¹ Europäischer Rat, 2024b.

² Europäisches Parlament, 2023d.

zugelassen sein.³ Die Abbildung 1 wurde durch Künstliche Intelligenz (KI) generiert und symbolisiert die vier wesentlichen alternativen Antriebstechnologien (BEV, FCEV, ICEV und PHEV), welche im Rahmen dieser Masterarbeit in Bezug auf ihre Ökobilanz betrachtet werden.⁴



Abbildung 1: PKWs mit alternativen Antriebstechnologien und alternativen Energieträgern (KI-generiert)

Neben dem aktuellen Stand für das Jahr 2025 sollen explizit für die Treibhausgase (THG) auch verschiedene Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 betrachtet werden. Im Ausblick auf die zukünftigen Jahre werden veränderte Rahmenbedingungen, wie Emissionsfaktoren der Stromerzeugung, Reifegrade der Technologien oder Verfügbarkeit alternativer Energieträger, berücksichtigt. Der Vergleich soll einen wissenschaftlich fundierten Beitrag mit belastbaren Daten generieren, um verantwortungsvolle Innovationen (Responsible Innovation) zur signifikanten Erhöhung der Nachhaltigkeit des europäischen PKW-Sektors voranzutreiben. Diese Masterarbeit soll aufzeigen, wie Elektro-, Brennstoffzellen-, Verbrennungsmotoren- und Plug-in-Hybridfahrzeuge im PKW-Sektor der Europäischen Union die Treibhausgas-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie den Einsatz kritischer Rohstoffe über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg beeinflussen.

³ BMK, 2022.

⁴ Siehe KI-Verzeichnis.



Abbildung 2: Darstellung der Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) in Bezug auf ihre Relevanz für die Ökobilanz

In der Abbildung 2 sind die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung, Sustainable Development Goals (SDGs), der Vereinten Nationen dargestellt.⁵ Die 14 farblich hervorgehobenen SDGs haben einen direkten Bezug zu dieser Ökobilanz.⁶ Die Zusammenhänge zwischen den 17 SDGs und Umweltfaktoren, wie Treibhausgasen, Stickoxiden, Feinstaub und kritischen Rohstoffen werden im Kapitel 7.3 ausführlicher dargestellt und genauer begründet. Diese Masterarbeit leistet einen wichtigen Beitrag zur Diskussion über nachhaltige Mobilität und deren Auswirkung, insbesondere in Bezug auf den Klimawandel und der effizienten und sinnvollen Nutzung der verfügbaren Ressourcen.

⁵ DGNV, 2025. Die Abbildung wurde mit grafischen Elementen der DGNV erstellt.

⁶ SDGs ohne, bzw. mit sehr geringem Bezug zu dieser Ökobilanz sind grau dargestellt.

1.2 Wissenschaftliche Methoden und Literatur: Bewertung von alternativen Antrieben anhand einer Lebenszyklusanalyse

Die Vorgehensweise stützt sich auf einer umfangreichen Literaturrecherche und Auswertung aktueller Studien und Metastudien, welche überwiegend in den Jahren 2020 bis 2025 veröffentlicht wurden, sowie auf Statistiken öffentlicher Organisationen.⁷ Die systematische Auswertung dieser Daten erfolgt in einer vergleichenden Analyse, welche anhand der Methode einer Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt wurde. Das Vorgehensmodell zur Literaturrecherche und Studienauswertung ist in Abbildung 3 visualisiert und wird nachfolgend beschrieben.

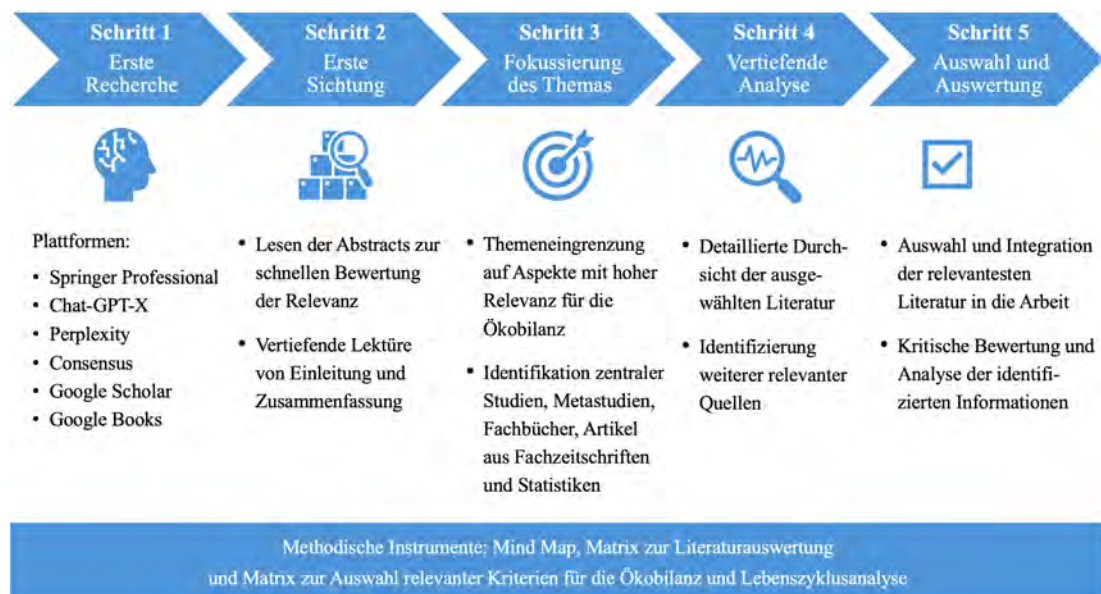


Abbildung 3: Vorgehensmodell zur Literaturrecherche und Studienauswertung

Schritt 1: Erste Recherche

Ziel der Recherche war, eine möglichst umfangreiche und breit aufgestellte Untersuchung der Themengebiete sicherzustellen. Aus diesem Grund wurden unterschiedlichste Plattformen genutzt, um wissenschaftlich fundierte Studien, Metastudien, Fachbücher und Fachliteratur zur Ökobilanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe im PKW-Sektor der Europäischen Union zu identifizieren.

⁷ Vergleiche **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Schritt 2: Erste Sichtung

Im Anschluss erfolgte eine erste Sichtung, indem das Abstract zur schnellen Bewertung der Relevanz gelesen wurde. Bei der als relevant eingestuften Literatur wurde eine vertiefende Lektüre von Einleitung und Zusammenfassung durchgeführt. Die Ergebnisse der relevanten Literatur wurden in einer Matrix (Anlage I) zusammengefasst und die Quellen entsprechend kategorisiert.

Schritt 3: Fokussierung des Themas

Die Themeneingrenzung konzentrierte sich auf die wichtigsten Aspekte für eine Ökobilanz und auf diejenigen, die den größten Einfluss auf nachhaltigere Antriebstechnologien haben. Für diese relevanten Themen wurden die zentralen Studien, Metastudien, Fachbücher, Artikel aus Fachzeitschriften und Statistiken identifiziert und in der Literaturmatrix kategorisiert.

Schritt 4: Vertiefende Analyse

Im Rahmen der vertiefenden Analyse erfolgte eine detaillierte Durchsicht der vorselektierten Literatur. Als methodisches Instrument wurde unter anderem eine Mindmap erstellt (Anlage I). Zusätzlich wurde eine Matrix entwickelt, um relevante Kriterien für die Ökobilanz und Lebenszyklusanalyse auszuwählen. Diese Matrix ist in der

Tabelle 1 abgebildet und erleichtert die Unterscheidung zwischen wesentlichen und unwesentlichen Aspekten. Die vertiefende Analyse wurde zur Identifizierung weiterer Literaturquellen genutzt.

Schritt 5: Auswahl und Auswertung

Abschließend erfolgte die Auswahl und Integration der relevantesten Literatur in die Masterarbeit. Während des Schreibens erfolgte eine kontinuierliche Analyse und kritische Bewertung der während der Literaturrecherche identifizierten Informationen. Aufbauend auf der im Rahmen der Literaturrecherche geleisteten Vorarbeit, unterscheidet sich die Masterarbeit von der Vertiefungsarbeit insbesondere durch die Integration und Berücksichtigung von einer deutlich größeren Anzahl von Aspekten.⁸

⁸ Knežić, 2024.

Auswahl relevanter Kriterien für die Ökobilanz

Die berücksichtigten Aspekte können der

Tabelle 1 entnommen werden. Die Vertiefungsarbeit beschränkte sich auf die Nutzungsphase und eine beschränkte Anzahl an Antriebstechnologien und Energieträgern. Die Masterarbeit deckt den gesamten Lebenszyklus eines PKWs und alle relevanten Antriebstechnologien ab und betrachtet auch Szenarien, um zukünftige Entwicklungen abzuschätzen. Weiterhin berücksichtigt die Masterarbeit sowohl Treibhausgase als auch weitere Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub. Außerdem betrachtet sind weitergehende Themen wie der Einsatz von kritischen Rohstoffen und innovative Technologien, um Verbrennungsmotoren mit nachhaltigen Kraftstoffen zu betreiben.

Antriebstechnologie	Energieträger	Ökologische Aspekte				Andere Aspekte				Phasen des Lebenszyklus				Geografische Abgrenzung				Zeitliche Abgrenzung			
		Treibhausgase THG [CO ₂ e]	Stickoxidemissionen [NO _x]	Feinstaubemissionen [PM _{2,5} PM ₁₀]	Andere Umweltwirkungen	Kritische Rohstoffe	Aufbau und Betrieb von Infrastruktur	Ökonomische Aspekte	Soziale Aspekte	CtG Rohstoffgewinnung und -erzeugung	WtT Herstellung	TwT Energieerzeugung	EoL Nutzung	Entsorgung	Deutschland	EU27	Europa	Global	Aktuelle Annahmen 2025	Szenarien für 2035 und 2050 (THGs)	Szenarien für andere Aspekte
BEV	Strommix (EU27)																				
	Strommix (landesabhängig)																				
	PV-Strom (100% EE)																				
FCEV	Erdgasreforming																				
	Elektrolyse (100% EE)																				
	Elektrolyse (Strommix EU27)																				
	Andere Wasserstoffarten																				
ICEV	Benzin																				
	Diesel																				
	eFuels																				
	Biokraftstoff HVO																				
	CNG (Erdgas)																				
	LPG (Autogas)																				
	Wasserstoff (H ₂ -ICE)																				
PHEV	Benzin/Strom																				
	Diesel /Strom																				
	eFuels/Strom																				
	Biokraftstoffe HVO/Strom																				
	Wasserstoff/Strom																				
REEV	Benzin/Strom																				

Legende

Bestandteil der Vertiefungsarbeit
 Zusätzliche Aspekte in Masterarbeit
 Keine oder ansatzweise Berücksichtigung

Tabelle 1: Auswahl relevanter Kriterien für die Ökobilanz

Ergänzend zu

Tabelle 1 sind die folgenden Anmerkungen zu den wesentlichen oder unwesentlichen Kriterien zur eindeutigen Abgrenzung von Bedeutung:

- *Feinstaubemissionen*: Es wurden keine abriebbedingten Feinstaubemissionen berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.2).
- *Andere Umweltwirkungen*: Eutrophierung, Ozonbildung (Sommersmog), Ozonabbau, Ressourcenbeanspruchung, Naturraumbeanspruchung, Landnutzungsänderungen und Frischwasserbedarf wurden nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 7.4).
- *Kritische Rohstoffe*: Lithium, Kupfer, Nickel, Kobalt, Platingruppenmetalle, Graphit, Mangan, Aluminium und Seltenerdmetalle wurden im Kapitel 6.3 berücksichtigt.
- *Aufbau und Betrieb von Infrastruktur*: Wurde nur ansatzweise beim Thema eFuels betrachtet (vgl. Kapitel 4.5).
- *Ökonomische Aspekte*: Wurden ansatzweise beim Thema kritische Rohstoffe (vgl. Kapitel 6.3) und alternativen Kraftstoffen (vgl. Kapitel 2.4) betrachtet.
- *Soziale Aspekte*: Wurden ansatzweise beim Thema kritische Rohstoffe (vgl. Kapitel 6.3) und alternativen Kraftstoffen (vgl. Kapitel 2.4) betrachtet.
- *End-of-Life-Lebenszyklusphase*: Die Treibhausgas-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen werden im Rahmen der Ökobilanz bei der Bilanzierung berücksichtigt. Die Auswirkungen von End-of-Life-Optionen für Traktionsbatterien auf die Ökobilanz von PKWs sollte im Rahmen weiterer Forschungen detaillierter untersucht werden.

Weitergehende Ergänzungen und eine kritische Würdigung dieser Masterarbeit werden im Kapitel 7.4 ausführlicher beschrieben.

1.3 Aufbau der Masterarbeit: Ein Überblick über die Struktur

Kapitel 1 bietet eine Einführung in den Hintergrund, die Motivation, die Problemstellung sowie die Zielsetzung der Masterarbeit. Darüber hinaus werden die wissenschaftlichen Methoden vorgestellt und die Vorgehensweise bei der Literaturrecherche und -auswahl dargelegt. Die Auswahl relevanter Kriterien für die Ökobilanz wird begründet.

Kapitel 0 erläutert die grundlegenden Begriffe sowie die Konzepte zur Lebenszyklusanalyse von PKWs und stellt verschiedene Antriebstechnologien und deren Marktanteile und technische Merkmale vor. Zusätzlich werden die betrachteten Umweltwirkungen (Treibhausgase, Stickoxide, Feinstaub und kritische Rohstoffe) erläutert sowie die verwendeten Studien, Metastudien, Statistiken und getroffenen Annahmen ausführlich und transparent dargelegt.

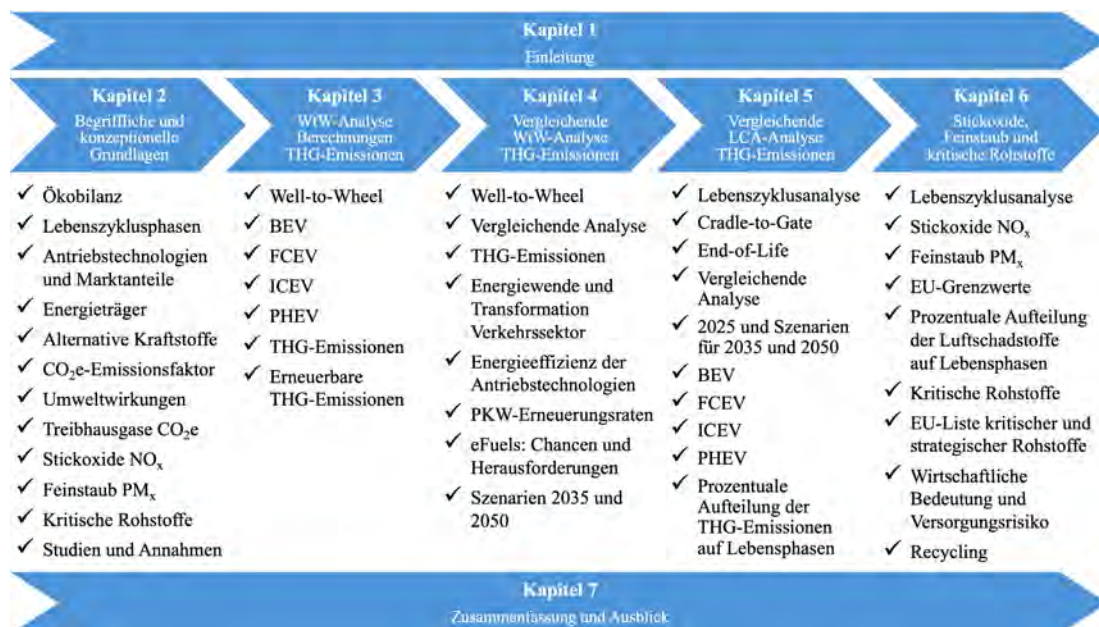


Abbildung 4: Überblick der wesentlichen Aspekte der Hauptkapitel der Masterarbeit

Kapitel 3 beschreibt die methodische Vorgehensweise zur Datenerhebung und deren Analyse, gefolgt von den Berechnungsmethoden zum Energieverbrauch und den Treibhausgasemissionen von batterieelektrischen-, Brennstoffzellen-, Verbrennungsmotor- und Plug-in-Hybridfahrzeugen in der Nutzungsphase (Well-to-Wheel). Das Kapitel schließt mit einem zusammenfassenden Vergleich der Ergebnisse ab.

Kapitel 4 widmet sich dem direkten Vergleich des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase (Well-to-Wheel) der im vorherigen Kapitel betrachteten Antriebstechnologien und Energieträger. Quantitative Vergleiche werden durchgeführt und die Energieeffizienz der Technologien wird analysiert. Der Zusammenhang zwischen der Dekarbonisierung des PKW-Sektors und der Notwendigkeit des weiteren Ausbaus der Erneuerbaren Energien wird erörtert. Es wird auf die besonderen Chancen und Herausforderungen von eFuels eingegangen. Dieses Kapitel schließt mit den Szenarien der THG-Emissionen in den Jahren 2035 und 2050 ab.

In **Kapitel 5** erfolgt die vergleichende Cradle-to-Gate-Analyse (CtG), anhand derer die Treibhausgasemissionen in der Rohstoffgewinnung und -erzeugung sowie der Herstellung von PKWs berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden die THG-Emissionen der Entsorgung End-of-Life (EoL) von Fahrzeugen betrachtet. Für jede Antriebstechnologie werden die THG-Emissionen im Detail für die Jahre 2025, 2035 und 2050 vorgestellt und mit dem Referenzwert eines ICEV-Benziners verglichen. Dieses Kapitel schließt mit der vergleichenden Analyse der Szenarien der Treibhausgasemissionen für die verschiedenen Antriebstechnologien und Energieträger in den Jahren 2035 und 2050 ab.

Kapitel 6 betrachtet die Umweltbelastungen durch Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie den Einsatz kritischer Rohstoffe für die gesamte Lebenszyklusphase eines PKWs. Der Vergleich erfolgt zunächst für die jeweiligen Antriebstechnologien und schließt mit einer vergleichenden Betrachtung dieser ab. Der Bezug zu den kritischen Rohstoffen wird durch die Verwendung der EU-Liste kritischer Rohstoffe hergestellt. Hierbei wird auch die Relevanz einer stabilen Versorgung mit kritischen Rohstoffen für die Transformation des Verkehrssektors verdeutlicht.

In **Kapitel 7** werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Masterarbeit zusammengefasst und die jeweiligen Antriebsarten hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen und ihrem Potenzial zur Senkung von Treibhausgasen, Stickoxid- und Feinstaubemissionen zusammengefasst. Darüber hinaus werden die Grenzen der Lebenszyklusanalyse aufgezeigt und weitere wichtige Aspekte aufgeführt, welche im Rahmen einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse von PKWs berücksichtigt werden sollten. Abschließend wird der Bedarf an weiteren Forschungen in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte für den PKW-Sektor aufgezeigt.

2 Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen zur LCA der Antriebstechnologien und Kraftstoffe für PKWs und verwendete Annahmen

2.1 Grundbegriffe zur Ökobilanz für PKWs

Ökobilanz: Die Grundsätze und Rahmenbedingungen zur Durchführung einer Ökobilanz sind in der internationalen Norm ISO 14040 geregelt. In dieser Norm werden Ökobilanzen folgendermaßen definiert:

„Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“).⁹

Ökobilanzen werden auch als Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA) bezeichnet. Die Anforderungen an die Erstellung einer Ökobilanz sind in der ISO 14044 detailliert geregelt. Die Ökobilanz-Studie basiert auf vier Phasen:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung¹⁰

Diese Masterarbeit betrachtet Umweltaspekte im Verlauf des Lebenswegs eines PKWs im Kontext der Europäischen Union. Diese berücksichtigen die Rohstoffgewinnung, welche zur Erzeugung der Fahrzeugkomponenten benötigt wird, die Produktion der Komponenten und Fahrzeuge, die Nutzung der PKWs inklusive der Emissionen zur Bereitstellung der Energieträger, als auch das Recycling sowie die Entsorgung der Fahrzeuge. Die jeweiligen Phasen des Lebenszyklus eines PKWs werden nachfolgend definiert und beschrieben. In Abbildung 5 sind die einzelnen Phasen des Lebenszyklus eines PKWs visualisiert.

⁹ DIN EN ISO, 2021, S. 7.

¹⁰ DIN EN ISO, 2021, S. 7.

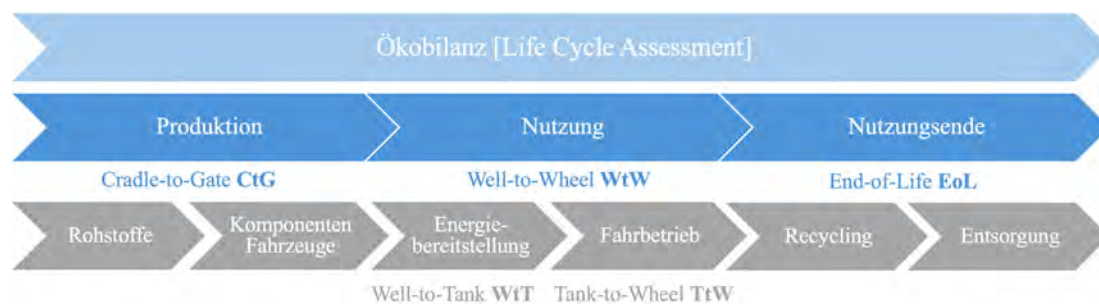


Abbildung 5: Ökobilanz und Lebenszyklusphasen eines PKWs

Produktion: Die erste Phase im Produktlebenszyklus bezieht sich auf die Gewinnung der Rohstoffe, Herstellung der Komponenten sowie der Fahrzeuge und wird im Rahmen von Ökobilanzen als Cradle-to-Gate-Analyse (CtG) bezeichnet. Die Lebenszyklusphasen der Herstellung des Fahrzeugs inklusive der Materialvorkette, stellen bei traditionellen Antriebskonzepten im Vergleich zur Nutzungsphase kurz- und mittelfristig einen geringeren Stellhebel zur Minderung der CO₂e-Emissionen dar.¹¹ Die notwendigen Komponenten werden weitgehend von Zulieferern entwickelt und hergestellt. Durch das seit langem immer weiter fortschreitende Outsourcing von Entwicklungs- und Produktionsleistungen hat sich über die Jahre ein sehr komplexes Netzwerk aus Zulieferern (Tiers) und Fahrzeugherstellern (OEMs) entwickelt.¹²

Nutzung: Die Nutzungsphase von PKWs eröffnet kurz- und mittelfristig das größte Potenzial zur signifikanten Reduzierung der verkehrsbedingten CO₂e-Emissionen und wird im Rahmen von Ökobilanzen als Well-to-Wheel-Analyse (WtW) bezeichnet. Mit zunehmender Dekarbonisierung, sowohl der Nutzungsphase der PKWs als auch der Bereitstellung der Energieträger, verschiebt sich der Fokus mehr in Richtung der anderen Lebenszyklusphasen.¹³ Die Nutzungsphase wird in die Well-to-Tank-Analyse (WtT) und Tank-to-Wheel-Analyse (TtW) unterteilt.¹⁴ Während sich die TtW-Phase nur auf die Fahrzeugnutzung bezieht, berücksichtigt diese Ökobilanz zusätzlich die WtT-Phase, welche die Bereitstellung der Antriebsenergie berücksichtigt.¹⁵ Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Energiewende und die Elektromobilität.¹⁶

¹¹ VDA, 2023, S. 5.

¹² Stan, 2020, S. 18 f.

¹³ Wietschel et al., 2022, S. 31 ff.

¹⁴ VDA, 2023, S. 5.

¹⁵ Bothe et al., 2020, S. 2.

¹⁶ Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 33.

Nutzungsende: Die letzte Phase im Lebenszyklus eines PKWs ist das Nutzungsende, welches auch als End-Of-Life-Phase (EoL) bezeichnet wird. In dieser Phase wird das Recycling und das Entsorgen der Fahrzeuge berücksichtigt. Im Vergleich zu den Phasen der Produktion und Nutzung entstehen beim Nutzungsende deutlich geringere Treibhausgasemissionen.¹⁷ Im Rahmen dieser Masterarbeit werden auch die Emissionen des Nutzungsendes betrachtet, jedoch mit einem deutlich geringerem Detaillierungsgrad als die beiden anderen Lebenszyklusphasen eines PKWs.

2.2 Marktüberblick und technologische Merkmale von BEV, FCEV, ICEV und PHEV Antriebstechnologien

Laut dem Bericht „*Trends in the Global Vehicle Fleet*“ dominieren PKWs mit fossil angetriebenen Verbrennungsmotoren sowohl den globalen als auch den europäischen Markt. Dennoch stieg der Marktanteil alternativer Antriebstechnologien (BEV und PHEV) von 5 % im Jahr 2019 auf 14 % im Jahr 2022 an. Der Hochlauf der Elektromobilität ist insbesondere in China und Europa sichtbar.

Bei der Betrachtung der fossil betriebenen Verbrennungsmotoren dominieren global betrachtet Benzinmotoren. Dieselmotoren und gasbetriebene Motoren haben nur in wenigen Regionen oder Ländern einen nennenswerten Marktanteil. Dieselmotoren haben lediglich in Europa eine signifikante Marktpräsenz, da diese Antriebstechnologie zur Reduzierung von Treibhausgasen vorangetrieben wurde. PKWs mit Brennstoffzellentechnologie (FCEV) spielen bisher keine Rolle.¹⁸ In dieser Ökobilanz werden Benzin-Verbrennungsmotoren aufgrund ihrer Marktdominanz meistens als Referenz für vergleichende Analysen herangezogen.¹⁹

Aus dem globalen Marktüberblick ist ersichtlich, dass der Marktanteil der jeweiligen Antriebstechnologien in den Regionen unterschiedlich ausgeprägt ist. Der kontinuierliche Anstieg des globalen Marktanteils von Sports Utility Vehicles (SUVs), von 20% im Jahr 2010 auf 50% im Jahr 2022, führte zu einem Rebound-Effekt, da die PKWs zwar über effizientere Motorentechnologien verfügten, diese Einsparungen jedoch durch das gestiegene Fahrzeuggewicht überkompensiert wurden.²⁰

¹⁷ VDA, 2023, S. 5.

¹⁸ Cazzola et al., 2023, S. 14 f.

¹⁹ Bei Stickoxiden (NO_x) werden Diesel-Fahrzeuge als Referenz verwendet, aufgrund des Diesel-Abgasskandals und der besonders hohen Emissionen im Realbetrieb (vgl. Kapitel 6.1).

²⁰ Cazzola et al., 2023, S. 16.

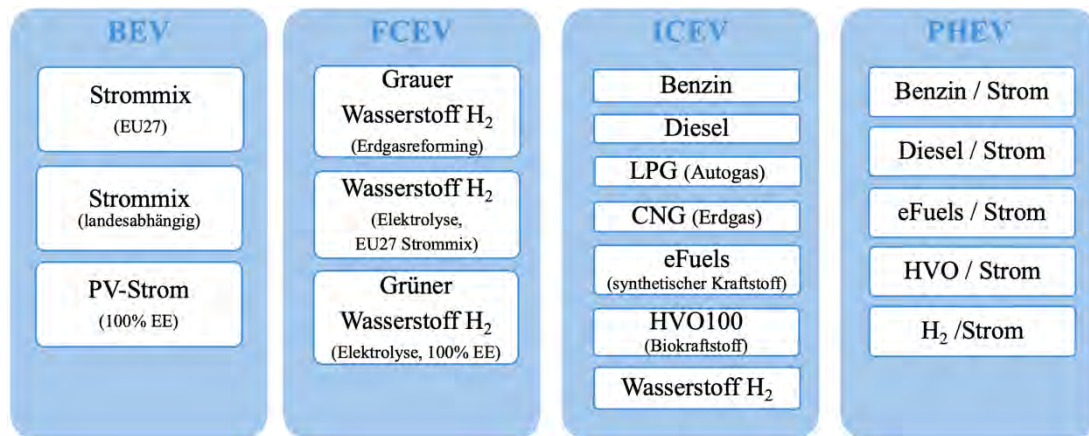


Abbildung 6: Synopsis der Antriebstechnologien und Energieträger für PKWs

Abbildung 6 vermittelt einen zusammenfassenden Überblick über die Komplexität der verschiedenen Antriebstechnologien. Elektrofahrzeuge (BEV), die rein elektrisch betrieben werden und im Fahrbetrieb kein CO_{2e} emittieren, bilden eine wichtigste Säule in Bezug auf nachhaltigere Antriebstechnologien. Es ist wichtig zu beachten, dass Elektrofahrzeuge nicht direkt, sondern indirekt über den Ladevorgang CO_{2e} emittieren. Dies geschieht vor allem wenn der Strommix überwiegend aus fossilen Energiequellen stammt.²¹ Somit ist die Klimabilanz von Elektroautos davon abhängig, in welchem Land ein Elektrofahrzeug geladen wird. Als besonders umweltfreundlich gilt ein Elektrofahrzeug, wenn es mit Strom betrieben wird, welcher ausschließlich aus erneuerbaren Energien (EE) erzeugt wurde.²²

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sind derzeit am weitesten von einer signifikanten Marktausbreitung für PKW-Anwendungen entfernt, allerdings wird diesen ein Potenzial ab dem Jahr 2030 zugeschrieben. Dies gilt insbesondere für Regionen, welche nicht genügend Erneuerbare Energien durch Wind-, Sonnen-, und Wasserkraft erzeugen können. Des Weiteren werden FCEVs regelmäßig mit besonders großen und schweren Fahrzeugen, wie beispielsweise SUVs, in Verbindung gebracht.²³

Die Verbrennungsmotoren (ICE) werden derzeit fast ausschließlich mit fossilen Kraftstoffen wie Benzin, Diesel, Autogas oder Erdgas betrieben. Jedoch gibt es, technologisch gesehen, auch Möglichkeiten, Verbrennungsmotoren mit regenerativen Energieträgern wie eFuels, HVO oder Wasserstoff zu betreiben.

²¹ Aus diesem Grunde wird in dieser Masterarbeit auch die *Well-to-Tank* Phase berücksichtigt.

²² Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 33.

²³ Wietschel et al., 2022, S. 55 ff.

Bei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren entsteht primär Wasserdampf, jedoch werden andere Luftschadstoffe wie Stickoxide (NO_x) und in sehr geringem Umfang auch CO_2 freigesetzt.²⁴ In dieser Übersicht wurde auf die Darstellung von Hybridmodellen (Mild-Hybrid, Full-Hybrid) verzichtet, da diese zwar zu Kraftstoffeinsparungen beitragen, jedoch das Fahrzeug nicht rein elektrisch antreiben. Bei den Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 wird eine vollständige Hybridisierung (Full-Hybrid) unterstellt.²⁵

Die Plug-In-Hybride werden als separate Kategorie dargestellt, da diese eine Mischung aus ICEV und BEV darstellen und über zwei Antriebstechnologien verfügen. PHEVs werden als Brückentechnologie angesehen, können jedoch kurzfristig einen Beitrag zur Minderung des CO_2 -Ausstoßes leisten, insofern diese zu einem signifikanten Anteil elektrisch betrieben werden. Theoretisch können auch PHEVs CO_2 -neutral betrieben werden, wenn hierfür eFuels/Strom oder HVO/Strom eingesetzt wird. Jedoch sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Gesamtwirkungsgrad bei diesen Technologien sehr gering ist.²⁶

Energieträger [Strom/Kraftstoff]	Antriebstechnologie					
	EV		ICE		PHEV	
	BEV	FCEV	Benzi- ner	Diesel	Benzi- ner	Diesel
Strom	✓				✓	✓
Wasserstoff		✓				
Benzin (fossil)			✓		✓	
eFuels			✓		✓	
Diesel (fossil)				✓		✓
HVO100				✓		✓

Tabelle 2: Energieträger und Antriebstechnologien für PKWs

In Tabelle 2 werden die Energieträger und Antriebstechnologien tabellarisch dargestellt. Bei BEVs wird ausschließlich Strom für den Antrieb benötigt, der in

²⁴ Schrank et al., 2021, S. 24 f.

²⁵ Wietschel et al., 2022, S. 11.

²⁶ Wietschel et al., 2022, S. 4.

der Traktionsbatterie gespeichert wird. Bei FCEVs handelt es sich auch um ein elektrisches Fahrzeug (EV), jedoch wird die für den Antrieb benötigte Energie erzeugt, indem in der Brennstoffzelle der Wasserstoff in elektrische Energie umgewandelt wird. Für Verbrennungsmotoren stehen fossile und alternative Kraftstoffe zur Verfügung. Bei PHEVs wird sowohl flüssiger Kraftstoff als auch Strom benötigt. Der Strom wird insbesondere über externe Ladestationen zugeführt und die Energie in der Traktionsbatterie gespeichert.²⁷ Die beiden nachfolgenden Kapitel betrachten die Eigenschaften, Herstellungsmethoden und Herausforderungen der verschiedenen Energieträger im Kontext der Nachhaltigkeit von Antriebstechnologien.

2.3 Unterschiede und Herausforderungen bei der Nutzung von Strom und Wasserstoff als Energieträger für BEV und FCEV

Für die meisten in Tabelle 2 dargestellten Antriebstechnologien ist der Energieträger ein flüssiger Kraftstoff wie Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge oder Benzin, Diesel, eFuels, HVO100 und Wasserstoff für Verbrennungsmotoren. In einigen Studien wird Strom von den flüssigen Kraftstoffen klar abgegrenzt.²⁸ In anderen Studien wird der Strom bzw. Fahrstrom als Kraftstoff (engl. Fuel) kategorisiert.²⁹ Auch bei etablierten Begriffen der Lebenszyklusanalyse, wie Tank-to-Wheel (TtW), kann die Thematik zum Fahrstrom Unklarheiten hervorrufen, da BEVs keinen Tank aufweisen. Neben der Tatsache, dass Strom im Gegensatz zu Kraftstoffen nicht flüssig ist, gibt es noch ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal. Beim Strom gibt es keine physikalische oder chemische Analyse, anhand dessen sich die Quelle ermitteln lässt. Wietschel bezeichnet das Stromnetz sehr anschaulich mit folgender Beschreibung:

„Das Stromnetz ist vergleichbar mit einem See, auf dem auf der einen Seite eine Reihe an Stromproduzenten Strom einleiten und auf der anderen Seite Strom entnommen wird.“³⁰

Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgt eine klare Unterscheidung zwischen Strom und Kraftstoffen. Dabei wird der Begriff **Energieträger** verwendet, der sowohl Fahrstrom als auch flüssige Kraftstoffe umfasst.

²⁷ Doppelbauer, 2025, S. 52.

²⁸ Wietschel et al., 2022, S. 14.

²⁹ Prussi et al., 2020a, S. 34.

³⁰ Wietschel et al., 2022, S. 15.

Strom als Energieträger

Beim Strom für BEV oder PHEV wird ein Strommix zugrunde gelegt, welcher auf fossilen und erneuerbaren Energiequellen basiert. Eine Ausnahme bildet die Sensitivität bei welchem PKWs ausschließlich mit Strom aus PV-Anlagen oder Strom aus 100% Erneuerbaren Energien geladen werden. Dieses Szenario soll das maximale Potenzial von Elektroautos aufzeigen, wird jedoch in der Realität nicht vollständig umsetzbar sein. In vielen europäischen Ländern reicht die Sonneneinstrahlung in den Wintermonaten nicht aus, um die PKWs regelmäßig aufzuladen. In diesen Situationen, wird dann Strom aus dem Stromnetz gespeist, um das Fahrzeug zu laden. Die Speichermöglichkeiten von Strom sind sehr begrenzt, da stationäre Batterien oder Pumpspeicher nur für wenigen Stunden ausreichen.³¹ Die Sensitivität zu PV-Anlagen zeigt auf, wie die Ökobilanz von Elektroautos in einer weitestgehend dekarbonisierten Welt aussehen könnte.

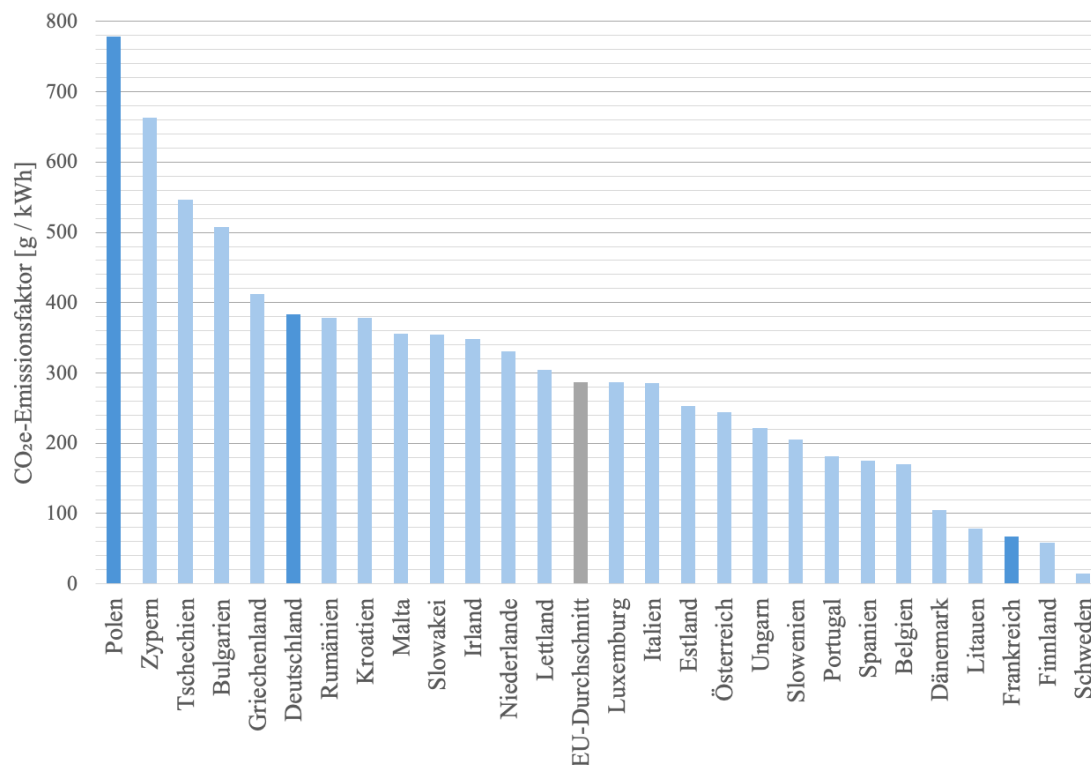


Abbildung 7: CO₂e-Emissionsfaktoren der EU-Länder im Jahr 2021

³¹ Wirth, H./Fraunhofer ISE, 2024, S. 58.

In Abbildung 7 sind die CO₂e-Emissionsfaktoren der einzelnen EU-Länder für das Jahr 2021 abgebildet. Die CO₂e-Emissionen durch Stromerzeugung der EU betrugen durchschnittlich 287 Gramm pro Kilowattstunde (g/kWh). Der Emissionsfaktor lag mit 779 g/kWh in Polen am höchsten, während Deutschland mit 383 g/kWh deutlich über dem europäischen Durchschnitt lag. Frankreich verzeichnete mit 68 g/kWh einen sehr niedrigen Emissionsfaktor.³² Diese deutlichen Unterschiede lassen sich auf die Zusammensetzung des Strommixes in den jeweiligen Ländern zurückführen.

So nutzt Polen beispielsweise 22% erneuerbare Energiequellen und 78% fossile Brennstoffe. Frankreich hat auch nur 25% erneuerbaren Energiequellen und nur 14% fossile Brennstoffe eingesetzt. Der niedrige Emissionsfaktor wird überwiegend aus den 62% Energieerzeugung aus Kernenergie erzielt. Deutschland hat bereits 44% Strom aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt, jedoch ist mit 50% der Anteil aus fossilen Brennstoffen immer noch hoch. Die Kernenergie nimmt in Deutschland mit 6% nur noch eine untergeordnete Rolle ein.³³

Wasserstoff als Energieträger

BMW CEO Oliver Zipse sieht die Technologieoffenheit als den Schlüssel für Europas Wettbewerbsfähigkeit. Derzeit ist BMW der einzige europäische Automobilhersteller, der neben Elektrofahrzeugen auch Brennstoffzellenfahrzeuge entwickelt. Im Bereich der FCEVs nimmt BMW in Kooperation mit Toyota eine wegbereitende Rolle ein.³⁴

Bei einem Brennstoffzellenfahrzeug wird Wasserstoff als primäre Energiequelle genutzt, indem in der Brennstoffzelle eine chemische Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff stattfindet, bei welcher Wasser als Nebenprodukt entsteht. Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Fahrbetrieb (TtW) emissionsfrei verfügen ebenfalls über eine Traktionsbatterie, welche unterstützende Energie für den Fahrzeugantrieb bereitstellen kann und Energie aus der Rekuperation speichert. Es wird jedoch kein Strom über externe Ladestationen geladen.³⁵

³² Bastos et al., 2024.

³³ Europäischer Rat, 2024a.

³⁴ Riering, 2024.

³⁵ Schaal, 2024.

Die Art der Herstellung des Wasserstoffs ist entscheidend für die Ökobilanz von Brennstoffzellenfahrzeugen. Dieser kann durch Erdgasreforming oder durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen oder anhand des Strommixes erzeugt werden. Das Erdgasreforming ist derzeit die am weitesten verbreitete Form der Wasserstofferzeugung, hat jedoch aufgrund des fossilen Ursprungs kein großes Potenzial, um signifikant zur Dekarbonisierung des PKW-Sektors beizutragen. Diese Art wird auch als grauer Wasserstoff bezeichnet und der Emissionsfaktor wird im Rahmen dieser Masterarbeit mit 394 Gramm CO₂e pro Kilowattstunde angesetzt.³⁶

Das Verfahren der **Elektrolyse**, in welcher elektrische Energie genutzt wird, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten, ermöglicht einen potenziell CO₂-freien Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen. Ähnlich wie bei der Stromerzeugung für das Laden der BEVs ist die Art des Stroms, welcher für die Elektrolyse verwendet wird, entscheidend für den Emissionsfaktor. Insofern der Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt, wird dieser als grüner Wasserstoff bezeichnet und im Rahmen dieser Masterarbeit wird ein Emissionsfaktor von 34 Gramm CO₂e pro Kilowattstunde verwendet. Beim Einsatz des aktuellen Strommixes der EU-Länder ergibt sich ein Emissionsfaktor von 427 Gramm CO₂e pro Kilowattstunde.³⁷

³⁶ Prussi et al., 2020b, 03_Excel Files.

³⁷ Prussi et al., 2020b, 03_Excel Files.

2.4 Eigenschaften, Herstellungsmethoden und Herausforderungen alternativer Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren: Synthetische und Biokraftstoffe im Kontext der EU-Klimaziele

Alternative Kraftstoffe bieten das Potenzial, Antriebstechnologien wie Verbrennungsmotoren unter Einsatz von synthetischen oder Biokraftstoffen CO₂-neutral zu betreiben.³⁸ In diesem Kapitel werden die Eigenschaften und Herstellungsmethoden der alternativen Kraftstoffe eFuels und HVO100 vorgestellt. Darüber hinaus werden die Annahmen zu den Emissionsfaktoren dieser Kraftstoffe getroffen.

Die EU plant ab dem Jahr 2035 ein Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge in Kraft treten zu lassen. Dieses Verbot sieht vor, dass alle PKWs im Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel) keine CO₂-Emissionen freisetzen dürfen. Durch dieses Ziel soll der Verkehrssektor klimaneutral werden. Benzin- und Dieselfahrzeuge, welche vor dem Jahr 2035 zugelassen wurden, können auch im Jahr 2035 und den Folgejahren weiter genutzt werden. Die EU berücksichtigt bei dieser Betrachtung, dass ein PKW eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Jahren hat. Basierend auf dieser Vorgehensweise sollte es ab dem Jahr 2050 nur noch eine geringe Menge an Bestandsfahrzeugen in der EU geben, welche Verbrennungsmotoren mit fossilen Kraftstoffen nutzen.³⁹

Synthetischer Kraftstoff eFuels

Da alle Verbrennungsmotoren im Fahrbetrieb CO₂ freisetzen, wird diese geplante Rechtsvorschrift der EU auch als Verbrennerverbot für PKWs bezeichnet.⁴⁰ Insbesondere Deutschland, aber auch andere Mitgliedsstaaten der EU, haben sich nach der Einigung zu CO₂-emissionsfreien PKWs für eine Sonderlösung für Verbrennungsmotoren eingesetzt, welche mit synthetischen Kraftstoffen (eFuels) betrieben werden.⁴¹ Laut einem aktuellen Bericht des Potsdamer Instituts für Klimaforschung (PIK) sind eFuels derzeit kommerziell nicht verfügbar und die Projektion für die kommenden Jahre bis 2035 weisen auf eine weiterhin sehr beschränkte Verfügbarkeit hin.⁴²

³⁸ David et al., 2021, S. 24 ff.

³⁹ Europäisches Parlament, 2023d.

⁴⁰ Riering, 2024.

⁴¹ Bundesregierung, o. J.

⁴² Ueckerdt et al., 2023, S. 1.

Der synthetische Kraftstoff eFuels bietet die Möglichkeit, Verbrennungsmotoren potenziell CO₂-neutral zu betreiben. Bei der Herstellung von klimaneutralen eFuels entsteht bei der Elektrolyse Wasserstoff, welcher unter Einsatz von Erneuerbaren Energien erzeugt wird (Abbildung 8). Neben Wasserstoff (H₂) wird für die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) auch Kohlenstoff (CO₂) benötigt, um den flüssigen Kraftstoff herzustellen. Aufgrund der komplexen Prozesskette entstehen mehrfache Umwandlungsprozesse, welche in einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 47 % resultieren.⁴³

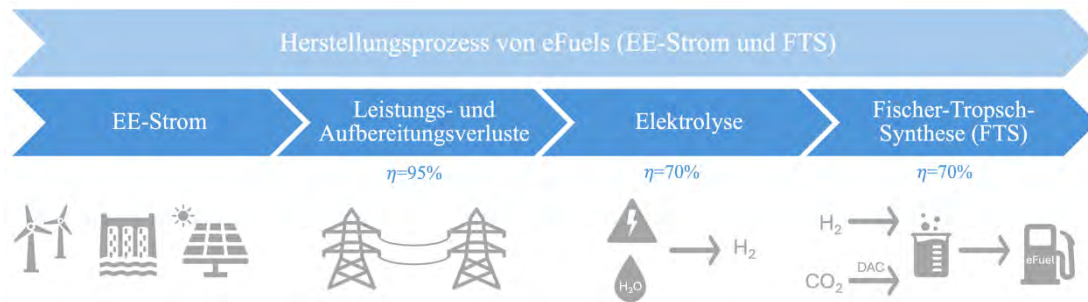


Abbildung 8: Herstellungsprozess von eFuels (EE-Strom und FTS)

Die Umwandlung von Strom in einen flüssigen Kraftstoff (eFuels) wird auch als Power-to-Liquid (PtL) bezeichnet. Das „e“ steht dabei für Elektrizität, somit könnten eFuels sinngemäß als elektrischer Kraftstoff bezeichnet werden.⁴⁴ Klimaneutral sind eFuels nur, wenn das CO₂ der Atmosphäre entzogen wurde, welches als Direct Air Capture-Methode (DAC) bezeichnet wird. Es gibt weitere Methoden, um CO₂ abzuscheiden, wie beispielsweise während der Verbrennung fossiler Rohstoffe in Kohlekraftwerken. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden ausschließlich eFuels betrachtet, bei denen das CO₂ unter Verwendung der Direct Air Capture-Methode aus der Atmosphäre entzogen wurde.⁴⁵ Dadurch entsteht ein **geschlossener Kohlenstoffkreislauf**, der keine zusätzlichen CO₂-Emissionen freisetzt. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden folgende Emissionsfaktoren für eFuels zugrunde gelegt:

- Strom aus 100 % EE: THG-Emissionsfaktor von 40 g CO₂e/kWh.
- EU-Strommix und Erdgas: THG Emissionsfaktor von 536 g CO₂e/kWh.⁴⁶

⁴³ David et al., 2021, S. 24 ff.

⁴⁴ Wietschel et al., 2022, S. 22 f.

⁴⁵ David et al., 2021, S. 24 ff.

⁴⁶ Fehrenbach et al., 2016, S. 145.

Biokraftstoff HVO100

Ähnlich wie bei den Brennstoffzellenfahrzeugen, für die es kaum Wasserstoff-tankstellen gibt, verhält es sich auch mit eFuels für Verbrennungsmotoren. Diese sind derzeit nicht in größeren Mengen verfügbar.⁴⁷ Im Gegensatz dazu ist der Markthochlauf von HVO100 in Deutschland im Jahr 2024 gestartet. Der erneuerbare flüssige Biokraftstoff HVO100 wurde in Deutschland im April 2024 für den Vertrieb an den Tankstellen zugelassen.⁴⁸

Laut dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) bietet dieser Biodieselskraftstoff in seiner Reinform (HVO100) im Vergleich zu fossilen Dieselskraftstoffen bei seiner Herstellung (Well-to-Tank) ein CO₂-Emissionsminderungspotenzial von mehr als 90 %. Bei den meisten Diesel-Verbrennungsmotoren kann HVO100 ohne Umrüstung genutzt werden.⁴⁹

In Abbildung 9 ist der Herstellungsprozess visualisiert. Dieser erfolgt anhand eines Hydrierungsprozesses, bei welchem die Ausgangsstoffe (überwiegend Altspeiseöl und tierische Fette) mit Wasserstoff zu HVO verarbeitet werden. Zur Sicherstellung einer positiven Klimabilanz, sollte der Wasserstoff auch anhand von Elektrolyse unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden.

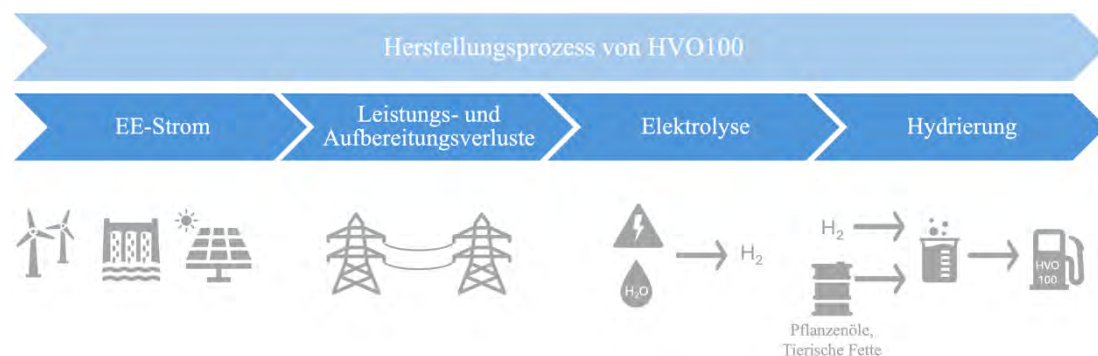


Abbildung 9: Herstellungsprozess von HVO100

Durch die Kompatibilität mit Dieselfahrzeugen aus der Bestandsflotte bietet HVO100 eine kurzfristige Möglichkeit zur Reduzierung von THG-Emissionen des PKW-Sektors.⁵⁰ Bei der Verbrennung des Kraftstoffs im

⁴⁷ HVO100 goes Germany, 2024.

⁴⁸ BMDV, 2024.

⁴⁹ HVO100 goes Germany, 2024.

⁵⁰ BMDV, 2024.

Verbrennungsmotor wird das CO₂ welches zuvor im Wachstumsprozess der Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurde, wieder freigesetzt.⁵¹

Im Laufe des Jahres 2024 haben sich in Europa die Tankstellen an denen HVO100 verfügbar ist verdoppelt. Im Dezember 2024 waren es ca. 5.000 Tankstellen europaweit, welche in Abbildung 10 symbolisiert werden.⁵²



Abbildung 10: Tankstellenkarte für Biokraftstoff HVO100 in der Europäischen Union (Quelle: efuel-now)

BMW ist einer der wenigen Automobilhersteller, welcher kein Auslaufdatum für Verbrennungsmotoren für den Konzern benannt hat. Dieser bekennt sich weiterhin zu Verbrennungsmotoren und Plug-in-Hybridfahrzeugen. Seit Januar 2025 liefert BMW alle neuen Dieselfahrzeuge mit HVO100 statt Diesel als Werksbefüllung aus.⁵³

Die Pressemitteilungen und Veröffentlichungen aus Politik, Wirtschaft und wirtschaftsnahen Organisationen heben die zuvor genannten Vorteile hervor. Seitens diverser Umweltschutzorganisationen und Verbraucherzentralen werden einige kritische Aspekte betont. So kann HVO100 auch aus frisch produzierten Pflanzenölen, wie Palmöl, hergestellt werden, welches mit

⁵¹ Tödter, 2024.

⁵² efuelsnow, 2024.

⁵³ Riering, 2024.

indirekter Landnutzungsänderung und der Abholzung von Regenwäldern im Zusammenhang steht. Ein weiterer kritischer Aspekt bezieht sich auf die begrenzte Verfügbarkeit von Altspeiseölen und den derzeit hohen Importanteil, vor allem aus Asien. Die Rohstoffe, die zur Herstellung von HVO100 verwendet werden, stehen in konkurrierender Nutzung durch andere Bereiche wie beispielsweise in der oleochemischen Industrie, welche tierische Fette zu Wärme- und Stromversorgung nutzt. Zusätzlich werden tierische Fette als klima- und umweltschädlich angesehen, da diese ein Produkt der industriellen Tierhaltung sind.⁵⁴

Die genannten Aspekte sollen nur einen Einblick in die Thematik geben. Bei der Förderung alternativer Kraftstoffe sollten Personen mit politischer Entscheidungsbefugnis berücksichtigen, dass Verlagerungen von kritischen Umweltaspekten in andere Sektoren vermieden werden sollten. Die Europäische Union hat in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (RED II) bereits viele genaue Regelungen zu synthetischen Kraftstoffen getroffen.⁵⁵

Zudem sind die exakten Produktionsprozesse in den aktuellen Studien noch unzureichend dokumentiert. Die zugrunde gelegten Annahmen werden oftmals unzureichend beschrieben. Um fundierte Entscheidungen treffen zu können, sind detaillierte Forschungen erforderlich, die den Einsatz von synthetischen oder Biokraftstoffen umfassend analysieren. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden zwei unterschiedliche Emissionsfaktoren von HVO100 berücksichtigt:

- **HVO aus Reststoffen bzw. Abfallöl und Elektrolyse mit 100 % EE-Strom** mit einem THG-Emissionsfaktor von **34 g CO₂e/kWh**.
- **HVO aus Palmöl**, inklusive Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen, mit einem THG Emissionsfaktor von **536 g CO₂e/kWh**.⁵⁶

2.5 Umweltwirkungen: Treibhausgas-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Bedarf an kritischen Rohstoffen

Treibhausgase (THG)

Treibhausgase sind die Hauptursache für die Erderwärmung.⁵⁷ Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist das am meisten emittierte und auch das wohl bekannteste

⁵⁴ DUH et al., 2024, S. 2 ff.

⁵⁵ Allekotte et al., 2024, S. 168 ff.

⁵⁶ Fehrenbach et al., 2016, S. 145.

⁵⁷ IPCC, 2023, S. 4.

Treibhausgas. Neben weiteren natürlichen Gasen, wie Methan und Lachgas, gibt es eine Vielzahl an künstlichen Gasen. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen diesen ist das **Globale Erderwärmungspotenzial (GWP)**, welches sich signifikant voneinander unterscheiden kann und in Abbildung 6 in eckigen Klammern dargestellt ist.⁵⁸

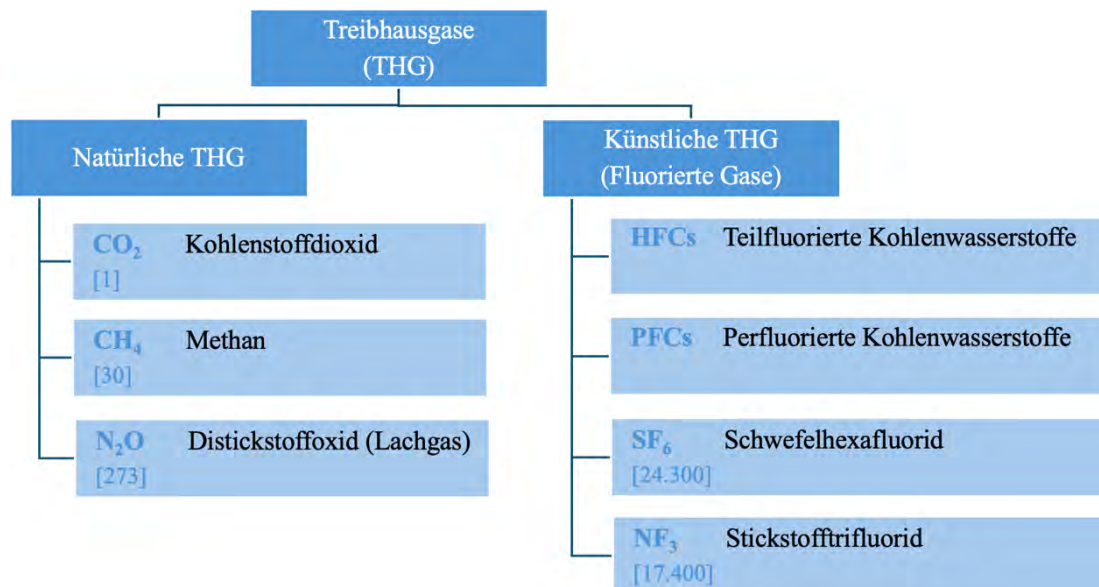


Abbildung 11: Übersicht der Treibhausgase und des globalen Erderwärmungspotenzials

Demnach hat Methan eine Klimawirkung, die 30-mal höher ist als jene von CO₂. Die jeweils freigesetzte Menge an künstlichen THGs ist zwar deutlich geringer, dagegen ist deren GWP oftmals mehrere tausend Mal stärker als jenes von CO₂.⁵⁹ Um die Klimawirkungen vereinfacht darzustellen, werden die Gase durch das Konzept der **CO₂-Äquivalente** normiert.⁶⁰ Diese werden in der Wissenschaft unterschiedlich abgekürzt und im Rahmen dieser Masterarbeit einheitlich mit **CO₂e** abgekürzt.

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls wurde im Jahr 1997 erstmals eine rechtlich bindende Begrenzung des Ausstoßes von Treibhausgasen in einem völkerrechtlichen Vertrag unterzeichnet. Inzwischen haben 191 Staaten dieses

⁵⁸ HFCs und PFCs sind vielfältige Stoffe und ihre GWP-Werte variieren stark, daher wurden keine konkreten Zahlen genannt.

⁵⁹ Greenhouse Gas Protocol, 2024, S. 2.

⁶⁰ Europäisches Parlament, 2023b.

Protokoll ratifiziert, wobei die USA als einziges Industrieland bis heute dieses formell nicht bestätigt hat.⁶¹

Die Treibhausgase und somit der GWP als Indikator wird in den meisten Studien zur Umweltbilanz von Antriebstechnologien berücksichtigt und kann als derzeitiger Leitindikator betrachtet werden. Die Europäische Union ist nach China und den USA der drittgrößte Verursachende von THG-Emissionen, welche über einen Zeitraum von wenigen Jahren oder sogar Jahrtausende in der Atmosphäre verbleiben.⁶² Jedoch wird die Bedeutung des GWP mit zunehmender Defossilisierung, des Verkehrssektors und anderer Sektoren, voraussichtlich an Relevanz verlieren. Die Schwerpunkte bei der Betrachtung der Umweltwirkungen von Produkten wird sich dann voraussichtlich in andere Bereiche verschieben, welche nachfolgend vorgestellt und definiert werden. Dazu zählen beispielsweise andere Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub aber auch kritische Rohstoffe.⁶³

Stickoxid- und Feinstaubemissionen:

Das Kyoto-Protokoll beinhaltet nur die Begrenzung von Treibhausgasemissionen. Im Rahmen des Göteborg-Protokolls wurde im Jahr 1999 die Minderung von weiteren Luftschadstoffen wie zum Beispiel von Stickoxiden (NO_x) beschlossen. Im Jahr 2012 wurde eine umfassende Novellierung des Göteborg-Protokolls entschieden, bei welcher Feinstaub ($\text{PM}_{2,5}$) neu hinzugekommen ist.⁶⁴ Um das Versauerungspotenzial in Ökobilanzen vereinfacht darzustellen, werden die Luftschadstoffe durch das Konzept der SO_2 -Äquivalente (SO_{2e}) normiert.⁶⁵ In Bezug auf den PKW-Verkehr sind die Stickoxide und Feinstaubbelastungen von besonderer Relevanz.⁶⁶ In der Abbildung 12 sind alle Luftschadstoffe visualisiert, deren Relevanz in Bezug auf das Göteborg-Protokoll wichtig ist.

⁶¹ Umweltbundesamt, 2024c.

⁶² Europäisches Parlament, 2023c, S. 4.

⁶³ Biemann et al., 2024, S. 202.

⁶⁴ Umweltbundesamt, 2019a.

⁶⁵ Biemann et al., 2024, S. 45.

⁶⁶ Wietschel et al., 2022, S. 30.

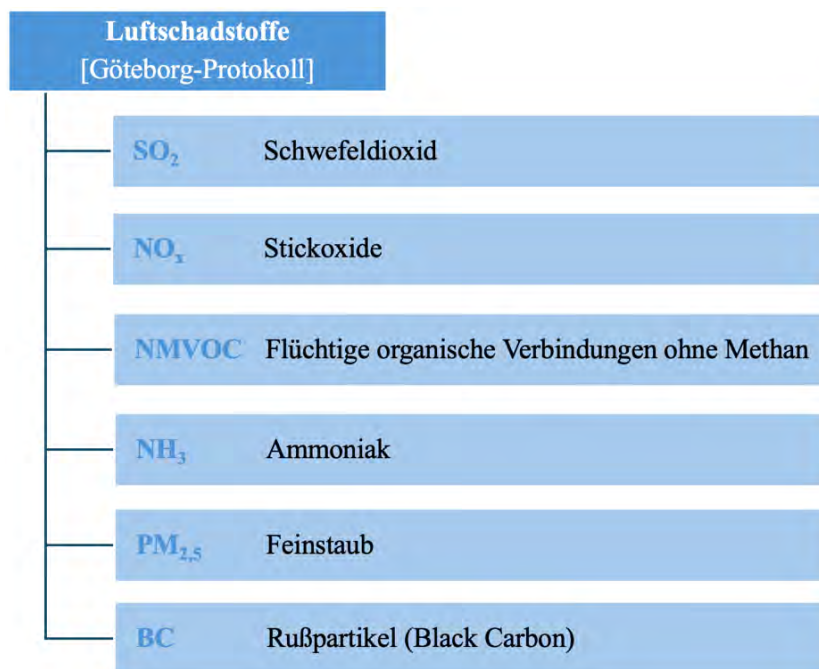


Abbildung 12: Übersicht der Luftschadstoffe (Göteborg-Protokoll)

Stickoxide NO_x verursachen neben der Versauerung der Böden auch Eutrophierung und tragen indirekt zu bodennahem Ozon (Sommersmog) bei. Ozon O₃ wird nicht direkt emittiert, sondern wird bei intensiver Sonneneinstrahlung u. a. aus NO_x und NMVOC freigesetzt. Die Wirkungskette zwischen den einzelnen Luftschadstoffen unterliegt einem komplexen Prozess. Feinstaub steht mit gesundheitlichen Gefahren für den Menschen im Zusammenhang.⁶⁷

⁶⁷ Umweltbundesamt, 2019c.

Kritische Rohstoffe

Die meisten Studien und Metastudien zu alternativen Antriebstechnologien und Kraftstoffen betrachten insbesondere die Treibhausgasemissionen, vernachlässigen jedoch andere Umweltaspekte wie die Nutzung von kritischen Rohstoffen. Wietschel betrachtet in seiner Studie die langfristige Umweltbilanz und das Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien, bei welcher auch der Bedarf an kritischen Rohstoffen für die unterschiedlichen Antriebstechnologien betrachtet wird.⁶⁸

Die Rohstoffe können in Bezug auf deren Verfügbarkeit (Versorgungsrisiko) sowie negativer sozialer oder ökologischer Wirkungen kritisch sein. Neben diesen Umweltaspekten wird oftmals die politische Abhängigkeit in Bezug auf bestimmte Rohstoffe diskutiert. Diese politischen Aspekte werden im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter betrachtet.⁶⁹

Im Rahmen dieser Arbeit werden Lithium, Kupfer, Nickel, Kobalt, Platingruppenmetalle, Graphit, Mangan, Aluminium und Seltenerdmetalle im Kapitel 6.3 behandelt. Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Thematik und berücksichtigt die wichtigsten Aspekte, welche mit diesen kritischen Rohstoffen im Zusammenhang stehen. Die genauere Betrachtung des Einsatzes von kritischen Rohstoffen sollte im Rahmen weiterer Forschungen detaillierter untersucht werden.

⁶⁸ Wietschel et al., 2022, S. 39.

⁶⁹ Wietschel et al., 2022, S. 39.

2.6 Verwendete Studien, Metastudien, Fachliteratur, Statistiken und getroffene Annahmen zur Lebenszyklusanalyse

Annahmen zur Fahrzeulebensdauer und Gesamtleistung

Die Ergebnisse von Lebenszyklusanalysen (LCAs), Klimabilanzen oder Ökobilanzen, unterscheiden sich oftmals aufgrund von unterschiedlichen Datenquellen und Annahmen.⁷⁰ Um die Ergebnisse dieser Masterarbeit transparent und nachvollziehbar zu gestalten, werden diese nachfolgend beschrieben. Es wurden ausschließlich sekundäre Daten in Form von Studien, Metastudien, Fachbüchern, Fachzeitschriften und Statistiken von Regierungsbehörden und anderen Organisationen verwendet.

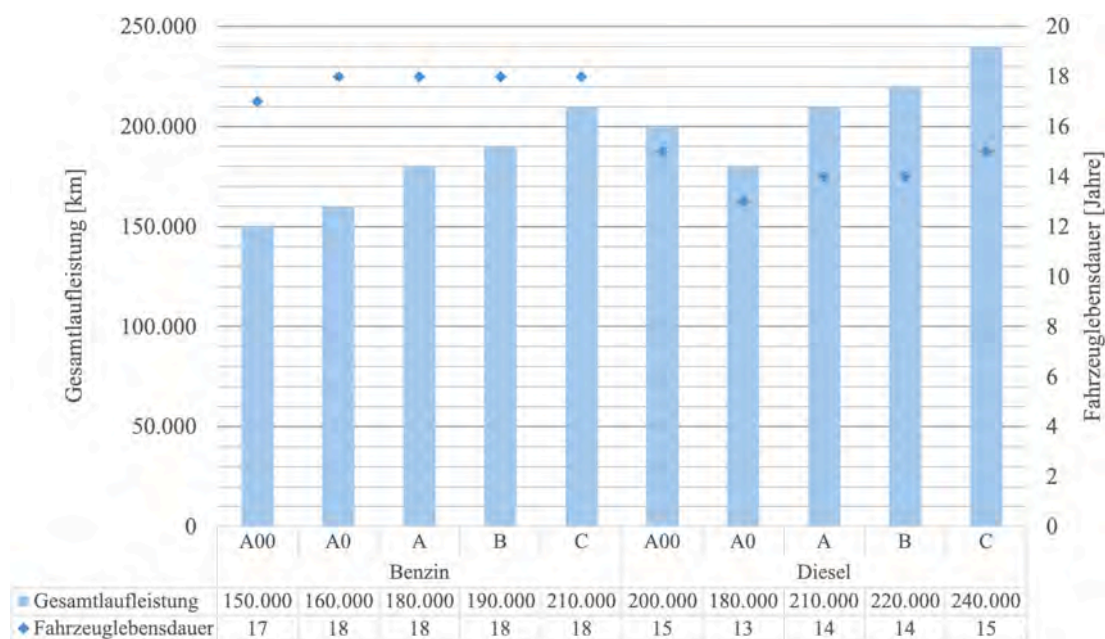


Abbildung 13: Gesamtleistung und Fahrzeulebensdauer von PKWs (Benzin und Diesel)

Sowohl die **Gesamtleistung** als auch die **Fahrzeulebensdauer** eines PKWs, haben einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz. Für traditionelle Fahrzeuge, welche mit einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, liegen umfangreiche Daten und Auswertungen vor. Da der Hochlauf der Elektromobilität erst vor etwa 5 Jahren begonnen hat (vgl. Kapitel 2.2), liegen für die alternativen Antriebstechnologien, wie BEV, FCEV, PHEV und alternative Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren kaum Erfahrungswerte vor.⁷¹

⁷⁰ Seibel, 2021, S. 11.

⁷¹ Wietschel et al., 2022, S. 9.

Sowohl die Fahrzeuglebensdauer als auch die Gesamtleistung, unterscheiden sich signifikant in Abhängigkeit vom Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie.⁷² Fahrzeuge mit einem Benzinmotor haben mit durchschnittlich 18 Jahren längere Lebensdauern, jedoch geringere Kilometerlaufleistungen von durchschnittlich 180.000 km. Dieselfahrzeuge haben durchschnittlich mit 210.000 km eine höhere Laufleistung, jedoch mit 14 Jahren deutlich kürzere Lebensdauern. Die Gesamtleistung am Ende der Lebensdauer ist bei Fahrzeugen einer höheren Kategorie deutlich höher als bei kleinen Segmenten. In Anlehnung an eine Studie von Weymar und Finkbeiner werden in dieser Masterarbeit folgende Annahmen getroffen:

- Benziner: Laufleistung von 180.000 km und Lebensdauer von 18 Jahren
- Diesel: Laufleistung von 210.000 km und Lebensdauer von 14 Jahren⁷³

Im Jahr 2022 waren europaweit 49 von 252 Millionen und somit ca. 20 % aller Bestandsfahrzeuge in Deutschland zugelassen.⁷⁴ Die Studie zu den Fahrzeuglaufleistungen und Gesamtlebensdauern von PKWs basierte auf Daten des deutschen Marktes. Weymar und Finkbeiner weisen in ihrer Studie darauf hin, dass die Lebensdauer mit der Stilllegung bei der deutschen Zulassungsstelle endet. Die Datengrundlage zum Export von vielen PKWs oder deren Recycling ist nur unzureichend.⁷⁵ Dennoch werden die Daten in dieser Ökobilanz als repräsentativ für alle EU-Länder angenommen. Im Rahmen zukünftiger Forschungen sollten die Gesamtleistungen und Gesamtlebensdauern in den jeweiligen europäischen Ländern detaillierter analysiert werden.

Für Batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge liegen weder für die Laufleistung noch für die Lebensdauer, ausreichende historische Daten vor. Für BEVs soll der Mittelwert der Jahreslaufleistungen von Benziner- und Diesel-Verbrennungsmotoren verwendet werden. Die Fahrzeuglebensdauer wird auf 12 Jahre reduziert, da die Lebensdauer der Traktionsbatterien aus heutiger Sicht schwer abgeschätzt werden kann und verlässliche Erfahrungswerte kaum vorliegen. Die herstellenden Unternehmen bieten mittlerweile

⁷² Fahrzeugsegmente A00, A0, A, B oder C.

⁷³ Weymar/Finkbeiner, 2016, S. 2019 ff.

⁷⁴ ACEA, 2024b, S. 5.

⁷⁵ Weymar/Finkbeiner, 2016, S. 2020.

vergleichbare Garantieleistungen für BEV und konventionelle Fahrzeuge an.⁷⁶ Für Brennstoffzellenfahrzeuge werden die gleichen jährlichen Laufleistungen wie für Diesel-ICEVs verwendet, da sich FCEVs insbesondere bei hohen Reichweitenanforderungen und schweren PKWs anbieten.⁷⁷ Aufgrund der begrenzten Erfahrungen zur Lebensdauer von Brennstoffzellen in PKW-Anwendungen, wird die Lebensdauer auf 12 Jahre reduziert.⁷⁸

- BEV: Laufleistung von 150.000 km und Lebensdauer von 12 Jahren
- FCEV: Laufleistung von 180.000 km und Lebensdauer von 12 Jahren

Für Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) und Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen liegen keine umfangreichen historischen Daten vor. Für PHEVs wird der Mittelwert der Jahreslaufleistungen von Benzin- und Diesel-Verbrennungsmotoren verwendet. Jedoch wird die Gesamtlebensdauer, aus ähnlichen Gründen (Lebensdauer der Traktionsbatterie) wie bei BEV auf 14 Jahre reduziert. Für die alternativen Kraftstoffe bei den Verbrennungsmotoren, werden eFuels mit Benzinmotoren und HVO mit Dieselmotoren gleichgesetzt. Beide alternativen Kraftstoffe gelten als Drop-in-Lösungen, welche sehr ähnliche Eigenschaften wie fossile Kraftstoffe aufweisen, und somit auch bei Bestandsfahrzeugen eingesetzt werden können.⁷⁹

- PHEV: Laufleistung von 175.000 km und Lebensdauer von 14 Jahren
- ICEV (eFuels): Laufleistung von 180.000 km und Lebensdauer von 18 Jahren
- ICEV (HVO): Laufleistung von 210.000 km und Lebensdauer von 14 Jahren

In Tabelle 3 werden die Annahmen zur Laufleistung und Lebensdauer zusammenfassend dargestellt. Bei der Fahrzeuglebensdauer werden für die Szenarien in den Jahren 2035 und 2050 für alle alternativen Antriebstechnologien eine höhere Lebensdauer und Fahrleistung angenommen, da davon auszugehen ist, dass sowohl Batterien als auch Brennstoffzellen im Rahmen ihrer technologischen Weiterentwicklungen höhere Lebensdauern erreichen werden.⁸⁰

⁷⁶ Wietschel et al., 2022, S. 9.

⁷⁷ Wietschel et al., 2022, S. 55.

⁷⁸ Wietschel et al., 2022, S. 10.

⁷⁹ Knost et al., 2024, S. 26.

⁸⁰ Biemann et al., 2024, S. 97.

Tabelle 3: Annahmen zu Laufleistung und Lebensdauer der Antriebstechnologien für die Jahre 2025, 2035 und 2050

Antriebs- technolo- gie	Energieträ- ger	Jahres- laufleis- tung [km]	Gesamtlaufleistung [km]			Fahrzeuglebens- dauer [Jahre]		
			2025	2035	2050	2025	2035	2050
BEV	Strom	12.500	150.000	175.000	200.000	12	14	16
FCEV	Wasserstoff	15.000	180.000	210.000	240.000	12	14	16
ICEV	Benzin	10.000	180.000			18		
	Diesel	15.000	210.000			14		
	eFuel	10.000	180.000			18		
	HVO	15.000	210.000			14		
PHEV	Benzin/Strom	12.500	175.000	200.000	225.000	14	16	18
	eFuel/Strom	12.500	175.000	200.000	225.000	14	16	18
	HVO/Strom	15.000	210.000			14		

Szenarien für die Jahre 2035 und 2050

Neben dem aktuellen Jahr 2025 werden zwei Szenarien betrachtet, welche veränderte Annahmen für die Jahre 2035 und 2050 berücksichtigen. Wie bereits zuvor erwähnt, werden höhere Fahrzeuglebensdauern für die alternativen Antriebstechnologien BEV, FCEV und PHEV erwartet. Darüber hinaus wird für diese Szenarien die Annahme getroffen, dass der durchschnittliche und auch länderspezifische Emissionsfaktor des Strommixes weiter sinken, die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff steigen und die Defossilisierung der Industrie weiter voranschreiten wird. Das Jahr 2035 soll explizit betrachtet werden, da nach heutiger Planung der Europäischen Union ab 2035 das de facto Verbrennerverbot voraussichtlich gültig sein wird.⁸¹ Ab diesem Jahr werden dann nur noch BEV und FCEV neu zugelassen werden. Für Fahrzeuge, die zum

⁸¹ BMK, 2022.

ausschließlichen Betrieb mit synthetischen Kraftstoffen oder Biokraftstoffen zugelassen werden, soll es eine eigene Fahrzeugkategorie geben.⁸² Für das Jahr 2050 wurde die Annahme getroffen, dass es ein weitestgehend defossilisiertes Produktionssystem gibt. Während aktuell die Nutzung von fossilen Kraftstoffen die Treibhausgasbilanz maßgeblich beeinflussen, ist davon auszugehen, dass im Jahr 2050 fast ausschließlich THG-Emissionen während der Herstellung entstehen.⁸³

Die beiden nachfolgenden Tabellen zeigen die veränderten Annahmen für die THG-Emissionsfaktoren der Energieträger und den Fahrzeugverbrauch.

Tabelle 4: Veränderte Annahmen zu Emissionsfaktoren der Energieträger in den Jahren 2035 und 2050 im Vergleich zum Jahr 2025

Antriebs- technolog ie	Energieträger	THG-Emissionsfaktor [g CO ₂ e/kWh]		
		2025	2035	2050
BEV	Strommix Deutschland	383	209	35
	Strommix Polen	779	446	35
	Strommix Frankreich	68	35	35
	Strommix EU27	287	151	35
	EE-Strom	35	35	35
	• Strommix EU27: EF sinkt von 2025 bis 2050 linear auf den Wert von EE-Strom • EE-Strom: unverändert			
FCEV	H2 [Erdgasreforming]	394	374	356
	H2 [Strommix EU27]	427	270	34
	H2 [EE-Strom]	34	34	34
	• Erdgasreforming: Annahme von 5 % Effizienzsteigerung im Jahr 2035 im Vergleich zum Jahr 2025 und weitere 5 % bis zum Jahr 2050. • Strommix EU27: EF sinkt von 2025 bis 2050 linear auf den Wert von EE-Strom.			

⁸² Allekotte et al., 2024, S. 121.

⁸³ Biemann et al., 2024, S. 202.

	• EE-Strom: unverändert.			
ICEV	Benzin	326	310	294
	Diesel	331	314	299
	eFuel [EE-Strom]	40	40	40
	eFuel [Strommix EU27]	637	335	40
	HVO [Reststoffe]	34	34	34
	HVO [Palmöl]	536	536	536
	• Benzin/Diesel: Annahme von 5 % Effizienzsteigerung im Jahr 2035 im Vergleich zum Jahr 2025 und weitere 5 % bis zum Jahr 2050. • eFuels Strommix EU27: Annahme, dass Wert von 2025 bis 2050 linear auf EE-Strom fällt. • eFuels EE-Strom und HVO100: unverändert.			
PHEV	Benzin [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	316	270	229
	Benzin [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	297	191	100
	Benzin [75 %] / EE-Strom [25 %]	253	241	229
	Benzin [25 %] / EE-Strom [75 %]	108	104	100
	eFuel EU27 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	550	289	39
	eFuel EU27 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	375	197	36
	HVO100 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	97	63	34
	HVO 100 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	224	122	35
	• Veränderungen entsprechen den Veränderungen von ICEV und BEV.			

Tabelle 5: Veränderte Annahmen zum Fahrzeugverbrauch in den Jahren 2035 und 2050 im Vergleich zum Jahr 2025

Antriebs- technolog ie	Energieträger	Fahrzeugverbrauch [kWh/100 km]		
		2025	2035	2050
BEV	Strommix Deutschland	22	19	19
	Strommix Polen			
	Strommix Frankreich			
	Strommix EU27			
	EE-Strom			
	• 10 % Effizienzsteigerung im Jahr 2035 beim BEV-Antrieb durch tech- nische Weiterentwicklungen im Vergleich zum Jahr 2025. • Keine weitere Effizienzsteigerung im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2035.			
FCEV	H2 [Erdgasreforming]	47	42	38
	H2 [Strommix EU27]			
	H2 [EE-Strom]			
	• 10 % Verbrauchsreduzierung im Jahr 2035 im Vergleich zum Jahr 2025 aufgrund von technischer Weiterentwicklung (Brennstoffzelle). • 10 % Verbrauchsreduzierung im Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2035 aufgrund von technischer Weiterentwicklung (Brennstoffzelle).			
ICEV	Benzin	67	54	
	Diesel	69	65	
	eFuel [EE-Strom]	66	53	
	eFuel [Strommix EU27]	66	53	
	HVO [Reststoffe]	67	62	
	HVO [Palmöl]	67	62	
	• 20 % Reduzierung durch Full-Hybrid für Benziner oder eFuels im Jahr 2035 im Verglich zum Jahr 2035.			

	• 7 % Reduzierung durch Full-Hybrid für Diesel oder HVO100 im Jahr 2025 im Vergleich zum Jahr 2035.⁸⁴ • Nach 2035 keine weiteren Reduzierungen bei allen Kraftstoffen.		
PHEV	Benzin [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	62	50
	Benzin [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	36	31
	Benzin [75 %] / EE-Strom [25 %]	62	50
	Benzin [25 %] / EE-Strom [75 %]	36	31
	eFuel EU27 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	61	49
	eFuel EU27 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	36	31
	HVO100 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	61	57
	HVO100 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	36	33
	• Veränderungen entsprechen den Veränderungen von ICEV und BEV.		

⁸⁴ Wietschel et al., 2022, S. 11.

Stickoxid- und Feinstaubemissionsfaktoren

In Bezug auf Treibhausgasemissionen und THG-Emissionsfaktoren liegen umfangreiche Daten aus zahlreichen Studien vor. Bei den Stickoxid- und Feinstaubemissionen liegen deutlich weniger wissenschaftlich fundierte Daten vor. In den meisten Studien werden oftmals nur die Klimawirkungen durch Treibhausgase im Detail betrachtet. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird für die Ermittlung der NO_x und PM_x-Emissionsfaktoren insbesondere auf Daten des Umweltbundesamtes und des Statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat) zurückgegriffen.

Die individuellen Emissionsfaktoren der jeweiligen Energieträger wurden der aktuellen Veröffentlichung des Umweltbundesamtes aus dem Jahre 2025 entnommen. Es wurde die Annahme getroffen, dass diese Werte auch für andere Länder der Europäischen Union gültig sind. Diesem Dokument können detaillierte Daten für Well-to-Tank Emissionsfaktoren sowohl für fossile Energieträger wie Erdgas, Kohle und Erdöl, als auch erneuerbaren Energieträgern, wie Wind, Wasser und Solarenergie und zusätzlich auch für Kernenergie entnommen werden.⁸⁵ Die Zusammensetzung der jeweiligen Anteile der Energieträger an dem jeweiligen Strommix wurde anhand der Daten von Eurostat aus dem Jahre 2022 entnommen.⁸⁶ Die unterschiedliche Zusammensetzung für die ausgewählten Länder, kann der Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Berechnungen zu Well-to-Tank-Emissionsfaktoren für Stickoxide und Feinstaub

Art	Energieträger		Prozentualer Anteil der Energieträger					Emissionsfaktor	
	Energieträger		DE	PL	FR	EU27	EE	NO _x	PM _x
Fossil	Erdgas		13,5%	6,9%	11,1%	19,6%	0,0%	214	4
	Kohle		32,3%	70,3%	1,4%	15,8%	0,0%	352	12
	Erdöl		0,8%	0,0%	1,1%	1,6%	0,0%	581	27
	Andere		3,1%	0,7%	0,0%	1,7%	0,0%	382	14
Erneuerbar	Windkraft		24,7%	11,4%	8,4%	15,9%	45,7%	34	10
	Wasserkraft		3,9%	1,8%	11,2%	11,3%	32,5%	19	18
	Solarenergie		11,9%	4,9%	4,2%	7,6%	21,8%	77	32
	Biomasse		3,4%	4,0%	0,8%	4,5%	0,0%	420	27
	Erdwärme		0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	180	12
Kernenergie	Nuklear		6,4%	0,0%	61,9%	21,9%	0,0%	42	5
Strommix	Gewichteter		NO _x	194	289	72	155	38	Emissionsfaktoren [mg NO _x / kWh] [mg PM _x / kWh]
	Emissionsfaktor		PM _x	13	13	8	12	17	

⁸⁵ Lauf et al., 2025, S. 50 ff.

⁸⁶ Eurostat, 2024b.

Bei der Herstellung von eFuels werden großen Mengen an Strom benötigt. Das Umweltbundesamt hat bei der Veröffentlichung zur Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger aus dem Jahr 2025 synthetische Kraftstoffe aufgrund der sehr geringen Einsatzmengen noch nicht berücksichtigt.⁸⁷ Aus diesem Grunde wurden verschiedene Quellen zugrunde gelegt, um die Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Herstellung von eFuels im Rahmen der Well-to-Tank-Phase zu berechnen. In den beiden nachfolgenden Tabellen werden zum einen der aktuelle europäische Strommix und zum anderen 100 % EE-Strom unterstellt, damit beide Sensitivitäten im Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2 berücksichtigt werden können.

Tabelle 7: Berechnung der Well-to-Tank-Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Herstellung von eFuels mit Stromerzeugung anhand des Strommixes EU27

NO _x	PM _x	Einheit	Beschreibung	Quelle
155	12	mg/kWh	Emissionsfaktor der Stromerzeugung [EU27]	Tabelle 6
27		kWh/l	Stromverbrauch für 1 Liter Kraftstoff	⁸⁸
4.185	324	mg/l	Emissionen pro Liter Kraftstoff	
11,5		kWh/kg	Unterer Heizwert Kraftstoff	⁸⁹
0,748		kg/l	Dichte Kraftstoff	
8,602		kWh/l	Energiegehalt von 1 Liter Kraftstoff	
487	38	mg/kWh		

Tabelle 8: Berechnung der Well-to-Tank-Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Herstellung von eFuels mit Stromerzeugung anhand des von 100 % EE-Strom

NO _x	PM _x	Einheit	Beschreibung	Quelle
38	17	mg/kWh	Emissionsfaktor der Stromerzeugung [EE]	Tabelle 6
27		kWh/l	Stromverbrauch für 1 Liter Kraftstoff	Tabelle 7

⁸⁷ Lauf et al., 2025, S. 141.

⁸⁸ Fichtner, 2021, S. 10.

⁸⁹ Soler et al., 2020, S. 7.

1.026	459	mg/l	Emissionen pro Liter Kraftstoff	
11,5		kWh/kg	Unterer Heizwert Kraftstoff	Tabelle 7
0,748		kg/l	Dichte Kraftstoff	
8,602		kWh/l	Energiegehalt von 1 Liter Kraftstoff	
119	53	mg/kWh		

Die Annahmen von Fichtner zum Stromverbrauch von einem Liter Kraftstoff werden anhand von einem Vergleich mit einem Diesel-ICEV dargelegt, jedoch sind die wesentlichen Produktionsmethoden für e-Diesel und e-Benzin identisch.⁹⁰

Folgende Emissionsfaktoren wurden für die Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Herstellung von Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge im Rahmen der Well-to-Tank-Analyse nach Knörr zugrunde gelegt.⁹¹

- Emissionsfaktoren für Stickoxidemissionen:
 - H₂ [Erdgasreforming] **389 mg NOx/kWh**
 - H₂ [Strommix EU27] **763 mg NOx/kWh**
 - H₂ [EE-Strom] **40 mg NOx/kWh**
- Emissionsfaktoren für Feinstaubemissionen:
 - H₂ [Erdgasreforming] **22 mg PMx/kWh**
 - H₂ [Strommix EU27] **50 mg PMx/kWh**
 - H₂ [EE-Strom] **7 mg PMx/kWh**

Es gibt nur sehr wenige Studien, die Informationen zu Emissionsfaktoren der Stickoxid- und Feinstaubemissionen bei der Wasserstoffherstellung bereitstellen. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Wasserstoff, welcher anhand von Elektrolyse hergestellt wird, da derzeit kaum Produktionskapazitäten verfügbar sind (vgl. Kapitel 2.3). Somit stellen die verwendeten Emissionsfaktoren nur Richtwerte dar und genauere Werte sollten im Rahmen von weiteren Forschungen, insbesondere bei Hochlauf der Produktionskapazitäten, ermittelt werden.

⁹⁰ Soler et al. 2020, S. 29 ff.

⁹¹ Knörr et al., 2013, S. 66 f.

Verwendete Studien, Metastudien und Statistiken

Diese Masterarbeit analysiert und wertet umfangreichen Analysen und Auswertung von Studien und Metastudien aus. Zusätzlich stützten Statistiken öffentlicher Institutionen die getroffenen Annahmen und Aussagen. Im Folgenden werden die beteiligten Organisationen und Institutionen der verwendeten Studien, Metastudien und Statiken aufgelistet.⁹²

⁹² Eine detaillierte Übersicht der verwendeten Literatur kann der **Anlage I** entnommen werden.

Tabelle 9: Übersicht der Beteiligten der verwendeten Studien, Metastudien und Statistiken

Beteiligte Organisation oder Institution
Agora Verkehrswende
Automobilwoche
AVL List GmbH
Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Conservation of Clean Air and Water in Europe (Concawe)
Deutsche Bundesregierung
Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA)
Deutsche Umwelthilfe (DUH)
Deutscher Naturschutzring (DNR)
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e. V. (DIW)
Deutsches Umweltbundesamt
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Europäischer Rat - Rat der Europäischen Union
Europäisches Parlament
European Automobile Manufacturers' Association (ACEA)
European Council for Automotive Research R&D (EUCAR)
Eurostat
Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)
Forschungsgesellschaft für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik (FVT)
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV)
Fraunhofer ISE/Fraunhofer ISI
Frontier Economics Ltd.
Global Fuel Economy Initiative (GFEI)

Greenpeace
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu)
Institut für Verkehrsforschung
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
Joint Research Centre der Europäischen Union (JRC)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kraftfahrt-Bundesamt
Mobil in Deutschland e. V.
Naturschutzbund (NABU)
NOW GmbH
Österreichische Energieagentur
Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität & Technologie (BMK)
Österreichisches Umweltbundesamt
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Springer Verlag - The International Journal of Life Cycle Assessment
Springer-Verlag - Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)/MTZ worldwide
Transport and Environment (T&E)
Verband der Deutschen Automobilindustrie e. V. (VDA)

3 Well-to-Wheel-Analyse (WtW): Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen in der Nutzungsphase von PKWs

3.1 Definition der Well-to-Wheel-Phase (WtW) und verwendete Methoden zur Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen für PKWs

Ein Bericht des Europäischen Parlaments aus dem Jahr 2023 zeigt, dass der Straßenverkehr etwa 20 % der gesamten CO₂-Emissionen in der EU verursacht hat. Die Aufschlüsselung des Straßenverkehrs nach Verkehrsträgern legt dar, dass Personenkraftwagen mit etwa 60 % die Hauptverursachenden der straßenverkehrsbedingten Emissionen sind. Ergänzend wird betont, dass der Verkehr der einzige Sektor ist, der in den letzten drei Jahrzehnten zunehmende Treibhausgasemissionen verursachte, obwohl die CO₂-Emissionen pro Fahrzeug deutlich reduziert wurden.⁹³

Der Verband der Deutschen Automobilindustrie (VDA) empfiehlt in seinem Positionspapier zur Dekarbonisierung des Lebenszyklus eines PKWs, das Hauptaugenmerk auf die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks in der Nutzungsphase zu legen. Dies wird dadurch begründet, dass beim Lebenszyklus eines PKWs mit klassischem Verbrennungsmotor (ICEV) die größte Menge an CO₂ in der Nutzungsphase freigesetzt wird. Auch alternative Antriebstechnologien wie batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge sind derzeit keine klimaneutralen Antriebsformen, wenn die Emissionen der Energieträger bei der Analyse berücksichtigt werden. Jedoch bieten insbesondere batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund des hohen Wirkungsgrads und der steigenden Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energiequellen das größte Potenzial, um die Treibhausgase in den kommenden Jahren zu reduzieren.⁹⁴

⁹³ Europäisches Parlament, 2023a, S. 2 ff.

⁹⁴ VDA, 2023, S. 5.

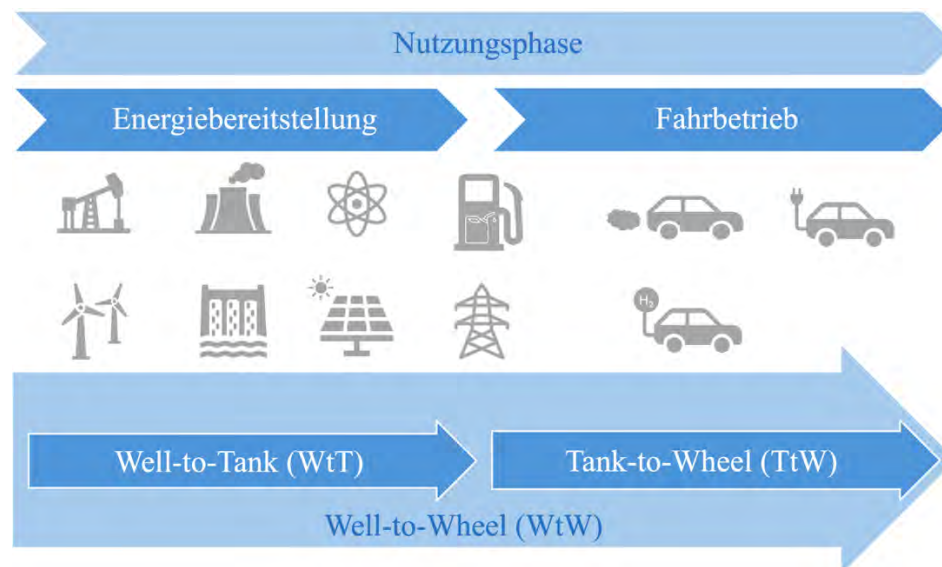


Abbildung 14: Well-to-Wheel-Analyse für die Nutzungsphase von PKWs

Abbildung 14 illustriert den methodischen Ansatz zur Erfassung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase, in welcher sowohl der Well-to-Tank (WtT), als auch der Tank-to-Wheel-Ansatz (TtW) einbezogen werden. Beide Ansätze werden zu der so genannten **Well-to-Wheel-Analyse (WtW)** zusammengefasst. Durch die Anwendung dieser Methodik wird eine fundierte und transparente Analyse des Energieverbrauchs von PKWs in der Nutzungsphase und den daraus resultierenden CO₂e-Emissionen ermöglicht. Die EU-Flottenziele (Euro 6, Euro 7) basieren auf einer Tank-to-Wheel-Betrachtung. Dementsprechend beschränken sich die EU-Flottenziele nur auf ein bestimmtes Stadium im Lebenszyklus.⁹⁵

Im Kapitel 2.2 wurde ein Marktüberblick über den PKW-Sektor gegeben. Der stark gestiegene Anteil an SUVs wurde als Rebound-Effekt aufgeführt. Die folgenden Berechnungsmethoden basieren auf der Annahme, dass es auch in Zukunft einen hohen Anteil an SUVs bei den PKW-Neuzulassungen geben wird. Dieser Trend wird in einer aktualisierten Bewertung des Instituts für Energie- und Umweltforschung (ifeu) zur Klimabilanz von PKWs aus dem Jahr 2025 bestätigt.⁹⁶

⁹⁵ Bothe et al., 2020, S. 9.

⁹⁶ Biemann et al., 2025, S. 8.

Bei allen Antriebstechnologien werden die CO_{2e}-Emissionen über die gesamte Nutzungsphase eines PKWs berechnet. Für diese Berechnung sind folgende Elemente essenziell:

- **CO_{2e}-Emissionsfaktor des Energieträgers** (EE-Strom, Strommix, Wasserstoff und Kraftstoffe wie Benzin, Diesel, eFuels und HVO100)
- **Fahrzeugverbrauch** des PKWs (Energienmenge pro 100 km Fahrstrecke)
- **Gesamtfahrleistung** des PKWs (siehe Kapitel 2.6)

Anhand dieser Elemente wird für jede Kombination von Antriebsart und Energieträger Folgendes berechnet:

- THG-Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebensdauer (Tonnen CO_{2e})
- THG-Emissionen pro gefahrenem Kilometer (Gramm CO_{2e} pro km)

Folgende Vorgehensweise wurde bei den Berechnungen zugrunde gelegt:

- Erneuerbare THG-Emissionen werden bei alternativen Kraftstoffen (eFuels und HVO100) zusätzlich ausgewiesen.
- Um eine bessere Vergleichbarkeit des Fahrzeugverbrauchs verschiedener Antriebstechnologien zu ermöglichen, wird der Verbrauch in Kilowattstunden pro Kilometer umgerechnet (kWh pro 100 km).
- Um eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Antriebstechnologien sicherzustellen, wird der Energieverbrauch in Megajoule pro 100 Kilometer Fahrstrecke (MJ pro 100 km) angegeben.
- Bei der Berechnung des Verbrauchs von BEVs werden Sensitivitätsanalysen für den jeweiligen Strommix der EU-Länder und zusätzlich noch PV-Strom bzw. EE-Strom gerechnet.
- Bei der Berechnung des Verbrauchs von FCEV werden Sensitivitätsanalysen für grauen und grünen Wasserstoff und auch für Elektrolyse unter Einsatz des EU-Strommixes ermittelt. Der jeweilige Wirkungsgrad des Antriebes wird beim Fahrzeugverbrauch mitberücksichtigt.

Die genauen Berechnungen mit den jeweiligen Formeln sind in **Anlage II** detaillierter aufgeführt. In den vier folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse für die betrachteten Antriebstechnologien BEV, FCEV, ICEV und PHEV vorgestellt.

3.2 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von BEVs

Beim Fahrzeugbetrieb eines Elektroautos werden keine direkten CO₂e-Emissionen freigesetzt, während bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren die CO₂e-Emissionen durch die Verbrennung von fossilen Kraftstoffen entstehen. Folglich stoßen Elektrofahrzeuge bei der reinen Tank-to-Wheel-Betrachtung keine direkten CO₂e-Emissionen aus.⁹⁷ Wie im Kapitel 3.1 beschrieben werden zusätzlich zu den TtW Emissionen auch die Emissionen der Energiebereitstellung berücksichtigt. Bei Elektroautos ist die Klimawirkung in der gesamten Nutzungsphase hauptsächlich von der Herkunft des Stroms abhängig.⁹⁸ Der Strommix variiert erheblich zwischen den EU-Mitgliedsstaaten. In Kapitel 2.3 wurden die Hintergründe und Eigenschaften von Strom bzw. Strommix mit den entsprechenden Emissionsfaktoren (EF) erläutert.

Deutschland, Frankreich und Polen hatten im Jahr 2022 zusammen ca. 188 Millionen Einwohnende, welche in etwa 42% der Gesamtbevölkerung der Europäischen Union stellen.⁹⁹ In den weiteren Berechnungen werden die Emissionsfaktoren für diese drei Länder und der EU-Durchschnitt verwendet.¹⁰⁰ Darüber hinaus wird noch eine Sensitivität gerechnet, die auf der Annahme basiert, dass ein BEV über seine gesamte Nutzungsdauer mit **Strom aus PV-Anlagen bzw. Strom aus 100% Erneuerbaren Energien** geladen wird. Es entstehen keine direkten CO₂e-Emissionen bei der Erzeugung des Stroms aus PV-Anlagen, jedoch berücksichtigt der **Emissionsfaktor von 35 g CO₂e/kWh** die Herstellung der Anlage.¹⁰¹

Da sich Elektrofahrzeuge seit einigen wenigen Jahren im Markthochlauf befinden, gibt es bereits erste Erfahrungswerte zum Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen. Derzeit liegen keine langjährigen Erfahrungswerte zu Flottenverbräuchen von reinen Elektroautos vor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der technologische Reifegrad in den kommenden Jahren, insbesondere bei den Traktionsbatterien, noch deutlich zunehmen wird. Wietschel hat in einer im Jahre 2022 veröffentlichten Studie eine Energiedichte von 150 Wh/kg für die Fahrzeugbatterie im Jahr 2020 und von 200 Wh/kg im Jahr 2030

⁹⁷ Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 33.

⁹⁸ Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 33.

⁹⁹ Eurostat, 2024a.

¹⁰⁰ Bastos et al., 2024.

¹⁰¹ Wirth/Fraunhofer ISE, 2024, S. 47.

angenommen.¹⁰² Dies würde einer Steigerung der Energiedichte von 33% innerhalb eines Zeitraums von 10 Jahren entsprechen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird ein **Energieverbrauch von 22 kWh/100km** für Elektrofahrzeuge angenommen. Dieser Wert basiert auf den Annahmen der Studie von Jander für einen SUV.¹⁰³

In Tabelle 10 sind die CO₂e-Emissionen für den jeweiligen Strommix der Länder sowie für den PV-Strom bzw. 100% EE-Strom dargestellt. Die angenommene Gesamtfahrleistung eines BEV wurde bereits in Kapitel 2.6 definiert. Die Berechnung der Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebenszeit erfolgt, indem das Produkt aus Emissionsfaktor, Fahrzeugverbrauch und Gesamtfahrleistung gebildet wird. Die Emissionen pro Kilometer ergeben sich aus dem Produkt des Emissionsfaktors und des Fahrzeugverbrauchs.¹⁰⁴

Tabelle 10: CO₂e-Emissionen von batterieelektrischen PKWs (BEV)

Energieträger	Emissionsfaktor g CO ₂ e/kWh	Fahrzeugverbrauch kWh/100 km	Gesamtfahrleistung km	THG-Emissionen über Lebensdauer t CO ₂ e	THG-Emissionen pro Kilometer g CO ₂ e/km
Strommix [Polen]	779	22	150.000	25	168
Strommix [Deutschland]	383	22	150.000	12	83
Strommix [EU-Durchschnitt]	287	22	150.000	9	62
Strommix	68	22	150.000	2	15

¹⁰² Wietschel et al., 2022, S. 25.

¹⁰³ Jander et al., 2021, S. 24.

¹⁰⁴ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

[Frankreich]					
Strom					
[PV / 100 % EE]	35	22	150.000	1	8

In Abbildung 15 werden die Ergebnisse visualisiert und durch die rote Linie mit den THG-Emissionen des Referenzwertes eines vergleichbaren ICEV-Benziners in Relation gesetzt. Es ist deutlich sichtbar, dass Elektrofahrzeuge im europäischen Kontext bereits heute deutlich geringere THG-Emissionen in der Nutzungsphase freisetzen als klassische Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Obwohl Polen einen Emissionsfaktor von 779 g CO₂e/kWh hat, was deutlich höher ist als der eines ICEV-Benziners mit 220 g CO₂e/kWh, sind die gesamten THG-Emissionen dennoch niedriger. Dies ist insbesondere auf den sehr hohen Systemwirkungsgrad von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) zurückzuführen (vgl. Abbildung 27).



Abbildung 15: THG-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) bei Verwendung von landesspezifischem Strommix oder erneuerbaren Energien

Erneuerbare THG-Emissionen werden bei BEV nicht freigesetzt und werden nur bei den alternativen Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren berücksichtigt (vergleiche Kapitel 3.4 und 3.5).

3.3 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von FCEVs

Ähnlich wie bei Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), werden beim Fahrzeugbetrieb eines Brennstoffzellenfahrzeugs gleichermaßen keine direkten CO₂e-Emissionen freigesetzt. Jedoch ergeben sich nur Vorteile für die Klimabilanz, wenn der Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird.¹⁰⁵ Der Energieverbrauch wird nach zwei Arten der Wasserstoffherstellung unterschieden: Erzeugung mittels Erdgasreforming oder Elektrolyse unter Verwendung von Strom (Strommix oder 100 % EE-Strom). Die Unterschiede dieser beiden Herstellungsverfahren und die angenommenen Emissionsfaktoren wurden im Kapitel 2.3 beschrieben.

Tabelle 11: CO₂e-Emissionen von Brennstoffzellen-PKWs (FCEV)

Energieträger	Emissionsfaktor g CO ₂ e/kWh	Fahrzeugverbrauch kWh/100 km [kg/100km]	Gesamtfahrleistung km	THG-Emissionen über Lebensdauer t CO ₂ e	THG-Emissionen pro Kilometer g CO ₂ e/km
Wasserstoff [Erdgasreforming]	394	47 [1,4]	180.000	33	184
Wasserstoff [Elektrolyse, Strommix EU27]	427	47 [1,4]	180.000	36	199
Wasserstoff [Elektrolyse, Strom 100 % EE]	34	47 [1,4]	180.000	3	16

In Tabelle 11 sind die CO₂e-Emissionen für die jeweilige Art der Wasserstoffherzeugung dargestellt.¹⁰⁶ Die angenommene Gesamtfahrleistung eines FCEV wurde bereits in Kapitel 2.6 definiert. Die Berechnung der Emissionen über die

¹⁰⁵ Wietschel et al., 2022, S. 55.

¹⁰⁶ Prussi et al., 2020b, 03_Excel Files.

gesamte Fahrzeuglebenszeit erfolgt, indem das Produkt aus Emissionsfaktor, Fahrzeugverbrauch und Gesamtfahrleistung gebildet wird. Die Emissionen pro Kilometer ergeben sich aus dem Produkt des Emissionsfaktors und des Fahrzeugverbrauchs.¹⁰⁷

Der Fahrzeugverbrauch bei Brennstoffzellen-PKWs wird in Kilogramm Wasserstoff pro 100 Kilometer Fahrstrecke angegeben und wird in dieser Masterarbeit mit 1,4 kg/100 km angenommen, welcher auf einem Test des Realverbrauchs eines BMW iX5 Hydrogen basiert.¹⁰⁸ Um diesen in Kilowattstunden pro 100 Kilometer Fahrstrecke umzurechnen, wird das Produkt aus der Menge Wasserstoff mit dem unteren Heizwert von Wasserstoff gebildet. Der untere Heizwert von Wasserstoff beträgt 33,33 kWh/kg und somit ergibt sich ein **FCEV-Verbrauch von 47 kWh/100 km**.¹⁰⁹ Im Vergleich zu einem BEV ist der Verbrauch von FCEV in etwa doppelt so hoch. Dies resultiert aus dem deutlich schlechteren Gesamtwirkungsgrad eines FCEVs im Vergleich zu einem Batterieelektrischen Fahrzeug (vgl. Abbildung 27).¹¹⁰

¹⁰⁷ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

¹⁰⁸ Schaal, 2024.

¹⁰⁹ Prussi et al., 2020a, S. 46.

¹¹⁰ David et al., 2021, S. 25.

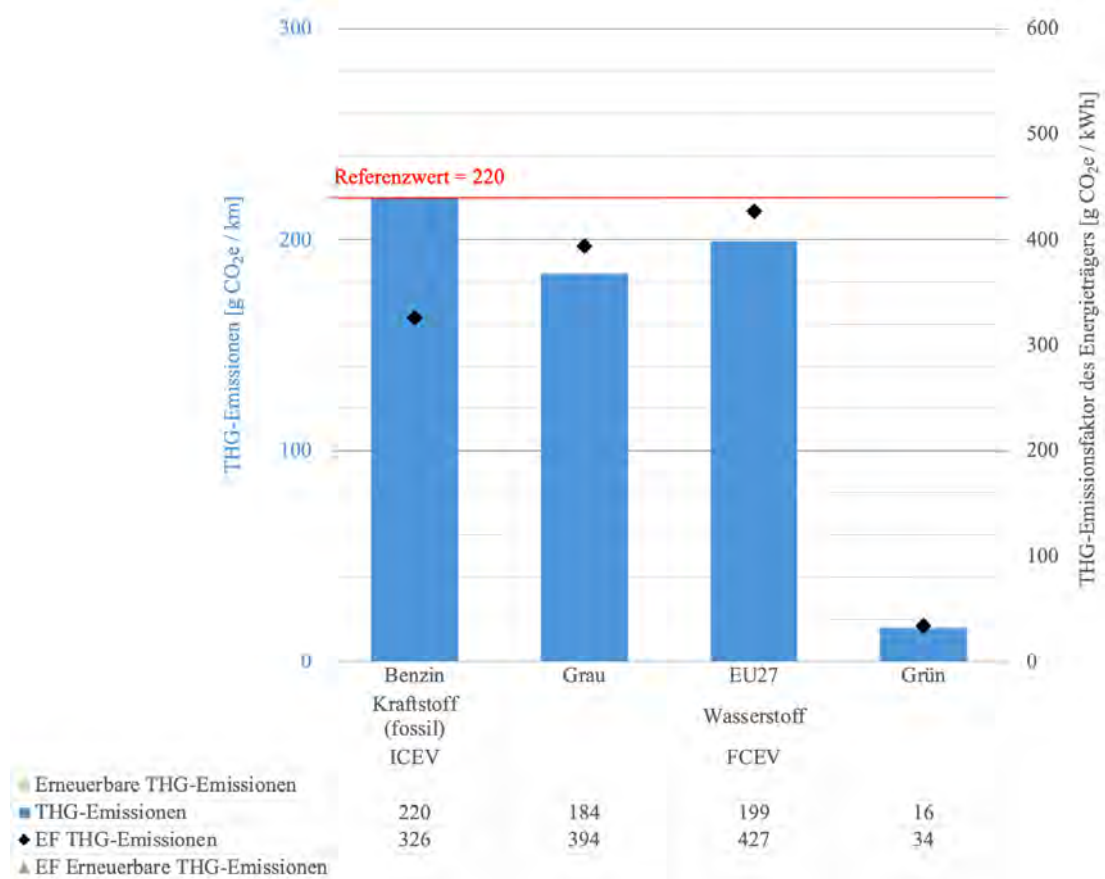


Abbildung 16: THG-Emissionen bei Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV)

In Abbildung 16 werden die Treibhausgasemissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen grafisch visualisiert und durch die rote Linie mit dem Referenzwert des ICEV-Benziners ins Verhältnis gesetzt. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) emittieren im Vergleich zu ICEVs mit Benzinmotor nur geringfügig niedrigere THG-Emissionen, falls bei der Herstellung des Wasserstoffs Erdgasreforming oder Elektrolyse anhand des EU27 Strommixes eingesetzt wurde. Signifikante Einsparpotenziale in Bezug auf THG-Emissionen ergeben sich nur, wenn der Wasserstoff mittels Elektrolyse unter Verwendung von 100 % EE-Strom erzeugt wurde.

Erneuerbare Treibhausgasemissionen werden bei BEV nicht freigesetzt und werden nur bei den alternativen Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4 und 3.5).

3.4 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von ICEVs

PKWs mit Verbrennungsmotoren werden überwiegend mit fossilen Kraftstoffen betrieben und dominieren global den Markt in allen Regionen. Laut einem Bericht des Umweltbundesamtes, sind die kilometerbezogenen direkten Emissionen des Treibhausgases CO₂ bei PKWs seit dem Jahr 1995 um knapp 13 % gesunken, während die CO₂e-Gesamtemissionen aller Sektoren in Deutschland seit 1990 um 40 % gesunken sind, stagnieren diese jedoch im Verkehrssektor.¹¹¹ Durch die Verbrennung von fossilen Kraftstoffen, wie Benzin oder Diesel, entstehen direkte Emissionen beim Betrieb der Fahrzeuge. Ähnlich wie bei den Brennstoffzellenfahrzeug (FCEVs) ist der Systemwirkungsgrad auch bei ICEVs deutlich geringer als bei einem batterieelektrischen Fahrzeug (vgl. Abbildung 27).¹¹²

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, dominieren global gesehen die ICEV-Benziner den Markt. In Europa weist jedoch auch der Dieselmotor in vielen Ländern einen signifikanten Marktanteil auf. Laut dem Verband der europäischen Automobilhersteller ACEA hatten bei den Bestandsfahrzeugen der EU-Länder Benziner-Fahrzeuge einen Marktanteil von 50,6 % und Dieselfahrzeuge von 40,8 %. Gasbetriebene PKWs hatten nur einen Marktanteil von 3,2 %.¹¹³ Die direkten CO₂e-Emissionen des europäischen PKW-Sektors werden folglich hauptsächlich durch ICEV-Benziner und ICEV-Diesel verursacht.

In Tabelle 12 sind die CO₂e-Emissionen für die jeweiligen Kraftstoffarten dargestellt.¹¹⁴ Die angenommene Gesamtfahrleistung eines ICEV wurde bereits in Kapitel 2.6 definiert. Die Berechnung der Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebenszeit erfolgt, indem das Produkt aus Emissionsfaktor, Fahrzeugverbrauch und Gesamtfahrleistung gebildet wird. Die Emissionen pro Kilometer ergeben sich aus dem Produkt des Emissionsfaktors und des Fahrzeugverbrauchs.¹¹⁵ Der Fahrzeugverbrauch bei PKWs mit Verbrennungsmotor wird in Liter Kraftstoff pro 100 Kilometer Fahrstrecke angegeben. Für Verbrennungsmotoren, welche mit Benzin oder Diesel betrieben werden, liegen umfangreiche Erfahrungswerte vor.

¹¹¹ Umweltbundesamt, 2024a, S. 1 ff.

¹¹² David et al., 2021, S. 25.

¹¹³ ACEA, 2024b, S. 15.

¹¹⁴ Prussi et al., 2020b, Appendix 1_Results (für Benzin und Diesel).

¹¹⁵ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

Tabelle 12: CO₂e-Emissionen von PKWs mit Verbrennungsmotoren (ICEV)

Energieträger	Emissionsfaktor g CO ₂ e/kWh	Fahrzeugverbrauch kWh/100 km [l/100 km]	Gesamtfahrleistung km	THG-Emissionen über Lebensdauer t CO ₂ e	THG-Emissionen pro Kilometer g CO ₂ e/km
Kraftstoff (fossil) [Benzin]	326	67 [7,7]	180.000	40	220
Kraftstoff (fossil) [Diesel]	331	69 [7,0]	210.000	48	230
Alternativer Kraftstoff [eFuel EU27/ Strommix EU27]	637	66 [7,7]	180.000	76	423
Alternativer Kraftstoff [eFuel EE /EE-Strom]	40	66 [7,7]	180.000	5	27
Alternativer Kraftstoff [HVO100/Palmöl]	536	67 [7,0]	210.000	75	358
Alternativer Kraftstoff [HVO100/Reststoffe]	34	67 [7,0]	210.000	5	23

Der Fahrzeugverbrauch von **7,7 Liter Diesel pro 100 Kilometer** bzw. von **7,0 Liter Benzin pro 100 Kilometer** Fahrstrecke basiert auf dem deutschen Flottenverbrauch aller Bestandsfahrzeuge aus dem Jahr 2022, welcher vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) veröffentlicht wurde.¹¹⁶ Um den Verbrauch in Kilowattstunden pro 100 Kilometer Fahrstrecke umzurechnen, muss das Produkt aus der Menge des Kraftstoffs mit dem unteren Heizwert und der Dichte des spezifischen Kraftstoffs gebildet werden.¹¹⁷ Aus dieser Berechnung resultiert ein Fahrzeugverbrauch von **67 kWh pro 100**

¹¹⁶ BMDV et al., 2023, S. 309.

¹¹⁷ Prussi, 2020a, S. 41 (für Benzin, Diesel und HVO). Soler et al., 2020, S. 7 (für eFuels).

Kilometer für Benziner und von 69 kWh pro 100 Kilometer für Diesel-Fahrzeuge.¹¹⁸

Alternative Kraftstoffe, die in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können, werden im Rahmen dieser Masterarbeit zusätzlich zu den fossilen Kraftstoffen betrachtet. Dazu zählen Verbrennungsmotoren, die mit synthetischen Kraftstoffen (eFuels) oder Biokraftstoffen (HVO100) betrieben werden. Diese alternativen Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren sind in Abbildung 6 dargestellt.

Bei den eFuels werden die gleichen Annahmen wie bei Benziner-Fahrzeugen und bei HVO100 werden die gleichen Annahmen wie bei Diesel-Fahrzeugen getroffen, da diese in den jeweiligen Motoren als Alternativen eingesetzt werden können.¹¹⁹ Der Energieeinsatz ist bei den alternativen Kraftstoffen, aufgrund unterschiedlicher Heizwerte und Dichte der jeweiligen Kraftstoffe, etwas geringer als bei den fossilen Kraftstoffen. Für jeden der alternativen Kraftstoffe werden Sensitivitätsanalysen berechnet. Diese sollen sowohl den *Best Case* als auch den *Worst Case* in Bezug auf die Klimabilanz dieser Kraftstoffe darstellen.

Der komplexe Herstellungsprozesses von eFuels umfasst mehrere verlustbehaftete Umwandlungsschritte, was in einem niedrigen Wirkungsgrad von 47 % resultiert (vgl. Kapitel 2.4). Zusätzlich hat der Verbrennungsmotor ebenfalls einen geringen Wirkungsgrad von ca. 30 %, da ein Großteil der Energie durch Abwärme verloren geht. Daraus resultiert bei der Well-to-Wheel-Analyse beim Einsatz von **eFuels** in Verbrennungsmotoren ein **Systemwirkungsgrad von 14%** (vgl. Abbildung 27).¹²⁰

Bei der Sensitivitätsanalyse wird zum einen der Einsatz von 100 % EE-Strom und zum anderen die Herstellung unter Einsatz des durchschnittlichen Strommixes der EU betrachtet.

- eFuels die vollständig aus **EE-Strom** hergestellt werden, weisen einen Emissionsfaktor von **40 g CO₂e/kWh** auf.
- eFuels die mit dem durchschnittlichen **Strommix der EU-Länder** hergestellt werden, weisen einem Emissionsfaktor von **637 g CO₂e/kWh** auf.¹²¹

¹¹⁸ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

¹¹⁹ Knost et al., 2024, S. 26.

¹²⁰ David et al., 2021, S. 25.

¹²¹ GermanZero, 2022, S. 3.

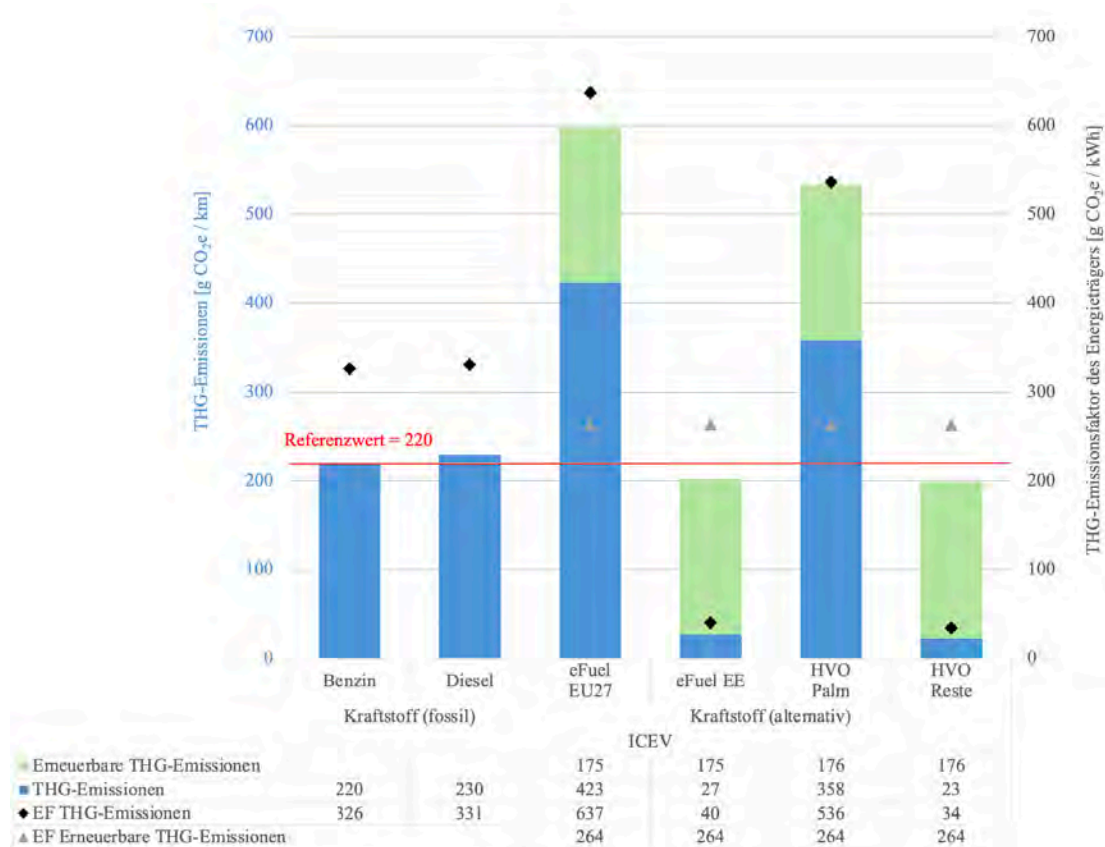


Abbildung 17: Erneuerbare THG-Emissionen bei alternativen Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren

Dieser signifikante Unterschied wird insbesondere durch den geringen Wirkungsgrad bei der Herstellung der eFuels verursacht, der einen hohen Energieeinsatz erfordert. Die Gesamtemissionen für die Fahrzeuglebensdauer sind bei eFuels, die mit dem europäischen Strommix hergestellt werden doppelt so hoch wie bei einem Fahrzeug, deren Betrieb mit fossilem Benzin erfolgt.¹²² Im Gegensatz dazu liegen die Gesamtemissionen für die Fahrzeuglebensdauer beim Einsatz von 100% EE-Strom zur Herstellung der eFuels auf vergleichbarem Niveau wie ein BEV (vergleiche Tabelle 10), welches ebenfalls Strom aus 100% Erneuerbaren Energien nutzt. Diese Sensitivitätsanalyse verdeutlicht die sehr kontroversen Diskussionen in Bezug auf den Vergleich von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und eFuels für Verbrennungsmotoren, die in der Politik, Wirtschaft, Gesellschaft, Wissenschaft und auch von NGOs geführt wird.

Die meisten Studien und Publikationen berücksichtigen bei dem Vergleich der Klimabilanz von Verbrennungsmotoren, deren Antrieb mit eFuels erfolgt, nur die Treibhausgasemissionen, die zusätzlich freigesetzt werden. Die Erneuerbaren Treibhausgasemissionen werden bei den Berechnungen ausgeblendet,

¹²² Ohne Berücksichtigung der erneuerbaren Treibhausgasemissionen.

da diese zuvor aus der Atmosphäre entnommen wurden und einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf bilden (vgl. Kapitel 2.4). Dennoch wird bei der Verbrennung von eFuels wieder Kohlenstoffdioxid (CO₂) freigesetzt. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die **Erneuerbaren Treibhausgasemissionen** bei den alternativen Kraftstoffen zusätzlich dargestellt und mit einem **Emissionsfaktor** von **264 g CO₂e/kWh** für **eFuels** berücksichtigt.¹²³

In Abbildung 17 wird dieser Zusammenhang zwischen den Treibhausgasemissionen für alle betrachteten fossilen und alternativen Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren dargestellt. Die dunkelblauen Balken visualisieren die Treibhausgasemissionen, die zu einem Netto-Zuwachs von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre führen. Die grünen Balken stellen die erneuerbaren THG-Emissionen dar, bei denen kein Nettozuwachs an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre erfolgt. Der jeweilige Emissionsfaktor (EF) ist separat dargestellt.

Bei dem Biokraftstoff HVO100 werden ebenfalls Erneuerbare THG-Emissionen bei der Verbrennung des Kraftstoffs im Verbrennungsmotor freigesetzt. Die **Erneuerbaren Treibhausgasemissionen** bei HVO100 werden mit einem **Emissionsfaktor** von **264 g CO₂e/kWh** berücksichtigt.¹²⁴

Bei der Sensitivitätsanalyse wird für HVO100 zum einen der Einsatz von Reststoffen und zum anderen der Einsatz von frischem Palmöl, inklusive der durch Landnutzungsänderungen freigesetzten THG-Emissionen, betrachtet.

- HVO100, welches aus **Reststoffen** hergestellt wurde, resultiert in einem Emissionsfaktor von **34 g CO₂e/kWh**.
- HVO100 deren Herstellung aus frischem **Palmöl** erfolgte, resultiert in einem Emissionsfaktor von **536 g CO₂e/kWh**.¹²⁵

In Tabelle 13 sind verschiedene Datenquellen und die entsprechenden Annahmen zu den Emissionsfaktoren von HVO100 dargestellt. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die *Best-Case*- und *Worst-Case*-Werte nach Fehrenbach verwendet.

Tabelle 13: Übersicht verschiedener Datenquellen für Emissionsfaktoren für Biokraftstoffe HVO100

¹²³ Soler et al., 2020, S. 7.

¹²⁴ Prussi et al., 2020b, Appendix 1_Results.

¹²⁵ Fehrenbach et al., 2016, S. 145.

Bezeichnung	THG-Emissionsfaktor [g CO ₂ e/kWh]	Quelle
Abfallöl, hydriert	34	126
Palmöl, hydriert ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen	130	
Palmöl, hydriert mit Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen	536	
Biodiesel/Abfall	36	127
HVO-Palmöl	130	
HVO (Abfall, Reststoffe)	39	128
HVO (Palmöl)	66	
Hydriertes Altspeiseöl/ Hydrierte tierische Fette (typischer Wert)	50	129
Importiertes Öl	206	130
Altspeiseöl	40	

Ähnlich wie bei den eFuels liegen auch bei HVO100 signifikante Unterschiede bei den THG-Emissionsfaktor vor. Bei HVO100 ist der THG-Emissionsfaktor insbesondere von den verwendeten Rohstoffen (Reststoffe oder frisches Öl) aber auch vom Importanteil abhängig. Im Sinne der nachhaltigen Entwicklung hat die Europäische Union mit der Neufassung der Erneuerbare Energien-

¹²⁶ Fehrenbach et al., 2016, S. 145.

¹²⁷ Biemann et al., 2024, S.88.

¹²⁸ Lauf et al., 2025, S. 144.

¹²⁹ Europäisches Parlament und Rat, 2018, S. 85.

¹³⁰ Prussi et al., 2020b, Appendix 1_Results.

Richtlinie (RED II) den Einsatz von Palmöl für HVO100 ab dem Jahr 2023 abgeschafft.¹³¹

Während fossile Kraftstoffe hohe THG-Emissionen verursachen, können alternative Kraftstoffe je nach Herstellungsprozess und Rohstoffquelle deutlich geringere Emissionen aufweisen. Der Einsatz von erneuerbaren Energien ist entscheidend für eine positive Klimabilanz. Die Sensitivitätsanalysen verdeutlichen, dass eFuels und HVO100 aus nachhaltigen Quellen potenziell vergleichbare THG-Emissionen wie batterieelektrische Fahrzeuge erreichen können, jedoch bleibt die Effizienz ein kritischer Faktor. Sowohl eFuels als auch HVO100 sind aufgrund der erneuerbaren THG-Emissionen im Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel) keine emissionsfreien Fahrzeuge.

3.5 Berechnung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen von PHEVs

Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) werden als Alternative Antriebstechnologie kategorisiert, obwohl diese als primäre Antriebskraft einen Verbrennungsmotor nutzen, welcher derzeit auf fossilen Kraftstoffen basiert. Verbrennungsmotoren können in verschiedenen Stufen der Hybridisierung ausgelegt werden. Die Besonderheit von PHEVs ist, dass diese auch längere Strecken ausschließlich elektrisch zurücklegen können. Ab 2025 sollen neu zugelassene PHEVs mindestens 100 km rein elektrisch fahren können.¹³² Die Klimabilanz hängt insbesondere von dem Verhältnis von elektrischem und verbrennungsmotorischem Fahranteil ab.

In den meisten Studien werden PHEVs als Brückentechnologie angesehen, können jedoch kurz- und mittelfristig zur Reduzierung der verkehrsbedingten THG-Emissionen beitragen.¹³³ Aufgrund der begrenzten elektrischen Reichweite und der zum Teil niedrigen Ladefrequenz durch die Nutzenden von PHEVs, können in Realität zu höherem Kraftstoffverbrauch und niedrigeren Ersparnissen an THG-Emissionen führen. In seiner Studie zum Realverbrauch von PHEVs hat Plötz signifikante Unterschiede im Ladeverhalten zwischen Privatfahrzeugen und Dienstwagen festgestellt.¹³⁴ Diese Aspekte sollten bei der Förderung von PHEVs beachtet werden, um Rebound-Effekte zu vermeiden.

Es werden 8 **verschiedene Sensitivitätsanalysen** betrachtet, welche die Wechselwirkungen zwischen dem Verhältnis der Fahranteile der beiden

¹³¹ Allekotte et al., 2024, S. 168 ff.

¹³² Prussi et al., 2020a, S. 34.

¹³³ Wietschel et al., 2022, S. 51.

¹³⁴ Plötz et al., 2022, S. v f.

Antriebe, der Herkunft des eingesetzten Stroms für den Antrieb des Elektromotors und der jeweiligen Art des Kraftstoffs für den Verbrennungsmotor untersuchen. Bei dem **Verhältnis der Fahranteile der beiden Antriebe** werden zum einen 75 % verbrennungsmotorische und 25 % elektrische und zum anderen 25 % verbrennungsmotorische und 75 % elektrische Fahranteile betrachtet. Bei der **Herkunft des Stroms** wird zum einen der durchschnittliche Strommix der EU-Länder untersucht, um kurz- und mittelfristige Effekte aufzuzeigen. Zusätzlich wird 100 % EE-Strom zur Verdeutlichung von langfristigen Effekten betrachtet.

Bei den Kraftstoffen werden **fossile und alternative Kraftstoffe** untersucht. Als fossiler Kraftstoff wird Benzin betrachtet, welches die kurz- und mittelfristigen Effekte von PHEV aufzeigt. Bei den fossilen Kraftstoffen wurde auf eine separate Darstellung von Diesel-ICEV verzichtet, da die THG-Emissionen auf einem ähnlichen Niveau liegen. Zusätzlich werden eFuels in Verbindung mit dem Strommix EU27 untersucht, um langfristige Effekte von PHEVs aufzuzeigen, da diese derzeit von einer ausreichenden Verfügbarkeit weit entfernt sind. Aufgrund der Marktreife von HVO100 wird dieser untersucht, um die kurz- und mittelfristigen Effekte von PHEV zu visualisieren.

Tabelle 14: CO₂e-Emissionen von PKWs mit Plug-in-Hybrid-Antriebstechnologie (PHEV)

Energieträger	Fahr- anteil	Emissions- faktor kombiniert g CO ₂ e/kWh	Fahrzeugver- brauch kombiniert kWh/100 km	Gesamt- fahrleistun- g km	THG-Emissi- onen über Lebens- dauer t CO ₂ e	THG-Emissi- onen pro Kilometer g CO ₂ e/km
Kraftstoff (fossil) [Benzin]	75 %	316	62	175.000	34	195
Strommix [EU27]	25 %					
Kraftstoff (fossil) [Benzin]	25 %	297	36	175.000	19	108
Strommix [EU27]	75 %					
Kraftstoff (fossil) [Benzin]	75 %	253	62	175.000	27	156
Strom [100 % EE]	25 %					
Kraftstoff (fossil) [Benzin]	25 %	108	36	175.000	7	39
Strom [100% EE]	75 %					
Alternativer Kraftstoff [eFuel EU27]	75 %	550	61	175.000	58	334
Strommix [EU27]	25 %					

Alternativer Kraftstoff [eFuel EU27]	25 %	375	36	175.000	24	135
Strommix [EU27]	75 %					
Alternativer Kraftstoff [HVO100]	75 %	97	61	210.000	12	59
Strommix [EU27]	25 %					
Alternativer Kraftstoff [HVO100]	25 %	224	36	210.000	17	81
Strommix [EU27]	75 %					

Im Gegensatz zu den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden sowohl der Emissionsfaktor als auch der Fahrzeugverbrauch bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen als kombinierter Wert aus den verbrennungsmotorischen und elektrischen Fahranteilen angegeben.¹³⁵ Da Plug-in-Hybridfahrzeuge ein höheres Gesamtfahrzeuggewicht haben als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEV) wurde der kombinierte Verbrauch um 10 % erhöht.¹³⁶

¹³⁵ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

¹³⁶ Jander et al., 2021, S. 23 f.

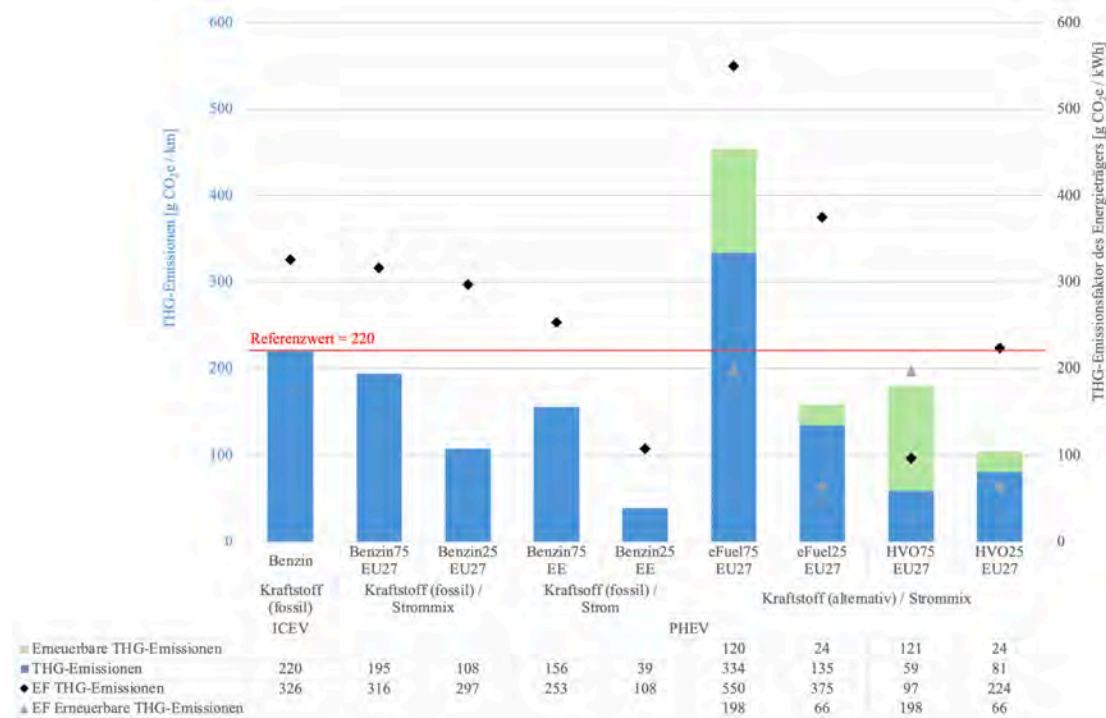


Abbildung 18: THG-Emissionen und erneuerbare THG-Emissionen bei PHEVs unter Verwendung von fossilen und alternativen Kraftstoffen und unterschiedlicher Herkunft des Stroms

In der Abbildung 18 werden ähnlich wie bei den Verbrennungsmotoren sowohl die THG-Emissionen als auch die erneuerbaren THG-Emissionen visualisiert. Die rote Linie zeigt den Referenzwert für ICEV-Benziner. Bei fossilen Kraftstoffen bietet ein hoher elektrischer Fahranteil ein hohes Potenzial zur Senkung der Treibhausgase. Bei HVO100 steigen die THG-Emissionen jedoch an, wenn der elektrische Fahranteil erhöht wird. Dies resultiert aus dem deutlich höheren Emissionsfaktor für den Strommix der EU-Staaten im Vergleich zu dem Emissionsfaktor für HVO100 aus Reststoffen. Bei eFuels entstehen bei hohem verbrennungsmotorischen Fahranteil erheblich höhere THG-Emissionen als bei einem vergleichbaren ICEV-Benziner.

Wie bereits erwähnt, wurden bei dieser Ökobilanz bei PHEVs der Fahrzeugverbrauch im Vergleich zu einem ICEV aufgrund des höheren Fahrzeuggewichts um 10 % erhöht. Der tatsächliche Mehrverbrauch ist von verschiedensten Faktoren wie beispielsweise Ladehäufigkeit, elektrische Reichweite, Fahrverhalten abhängig.

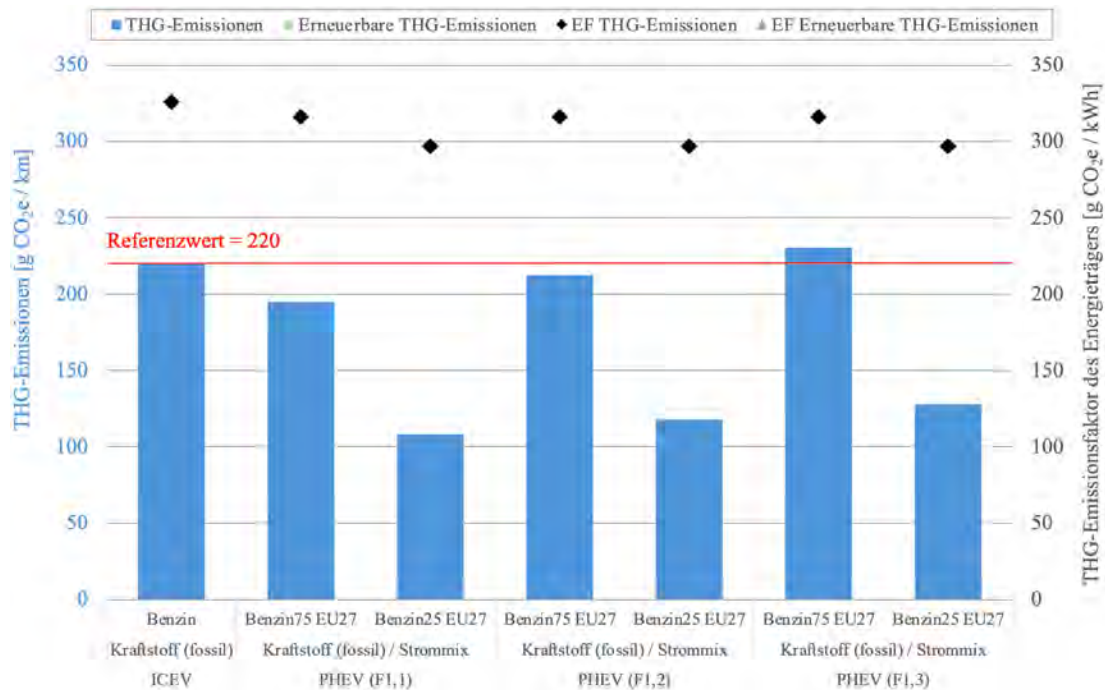


Abbildung 19: THG-Emissionen bei PHEVs unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugverbräuche unter Realbedingungen

In Abbildung 19 sind zusätzlich zu dem Mehrverbrauch von 10% (F1,1) zwei weitere Sensitivitäten berücksichtigt, die auf der Annahme basieren, dass der Mehrverbrauch 20 % (F1,2) oder 30 % (F1,3) beträgt. In Anlehnung an Plötz steigt der reale Fahrzeugverbrauch eines PHEVs um etwa 5 % pro 100 kg zusätzliche Fahrzeugmasse.¹³⁷ Nach Jander beträgt die Fahrzeugmasse eines PHEVs je nach Kategorie ca. 200 bis 400 kg mehr als bei einem vergleichbaren ICEV.¹³⁸ Anhand dieser Sensitivitäten wird deutlich, dass die potenziellen Senkungen der THG-Emissionen bei höherem Mehrverbrauch sogar den Verbrauch eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor überschreiten können. Dieser Effekt sollte bei der Förderung von PHEVs von den politischen Entscheidungsinstanzen berücksichtigt werden. Diese beiden Sensitivitäten verdeutlichen erneut die Wichtigkeit des hohen elektrischen Fahranteils.

¹³⁷ Plötz et al., 2022, S. 18.

¹³⁸ Jander et al., 2021, S. 23 f.

3.6 Zusammenfassender Vergleich des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien

Der Schwerpunkt der Bewertung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen in diesem Kapitel lag auf der Nutzungsphase von PKWs, da aktuell in dieser Phase die meisten THG-Emissionen freigesetzt werden. Der Straßenverkehr verursacht 20 % der THG-Emissionen in der EU, wobei PKWs die Hauptverursachenden sind. Alternative Antriebe, wie batterieelektrische oder brennstoffzellenbetriebene PKWs, bieten ein hohes Potenzial zur Reduktion der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen. Aber auch Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEVs) und Verbrennungsmotoren (ICEV), die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, weisen unter bestimmten Bedingungen ein hohes Potenzial zur Reduzierung der THG-Emissionen auf. Als Datenquellen wurden aktuelle Studien, Metastudien, Fachliteratur und Statistiken öffentlicher Institutionen verwendet. Die Annahmen basierten auf unterschiedlichen Lebensdauern und Gesamtleistungen der jeweiligen Antriebsarten, wobei für BEV und FCEV nur begrenzt historische Daten vorlagen.

Bei der Berechnung der CO_{2e}-Emissionen über die gesamte Nutzungsphase wurden individuelle Emissionsfaktoren, Fahrzeugverbräuche, Fahrzeuglebensdauern und Gesamtfahrleistungen der jeweiligen Antriebsarten und Energieträger berücksichtigt. Um das volle Potenzial der alternativen Antriebsarten aufzuzeigen, wurden Sensitivitätsanalysen für den Strommix (BEV) und die Art der Wasserstoffherstellung (FCEV) berücksichtigt. Anhand von ausgewählten EU-Ländern wurden die Auswirkungen der signifikanten Unterschiede der Emissionsfaktoren der Stromherstellung aufgezeigt. Bei BEVs und FCEVs entstehen zwar keine direkten CO_{2e}-Emissionen, jedoch wurden die Emissionen der Energieträgererzeugung betrachtet. Bei PKWs mit Verbrennungsmotoren wurden langjährige Erfahrungswerte verwendet, um einen realistischen Verbrauch zu berücksichtigen. Diese basierten auf dem Flottenverbrauch aller Bestandsfahrzeuge, die in Deutschland zugelassen sind. Benzin- und Dieselmotoren dominieren den europäischen Markt und beide Kraftstoffarten wurden näher betrachtet. Bei PHEVs wurden unterschiedliche Sensitivitäten berechnet, um die Wechselwirkungen zwischen dem Verhältnis der Fahranteile der beiden Antriebe, der Herkunft des eingesetzten Stroms für den Antrieb des Elektromotors und der jeweiligen Art des Kraftstoffs für den Verbrennungsmotor zu verdeutlichen. Sowohl FCEVs als auch ICEVs haben einen deutlich niedrigeren Systemwirkungsgrad als BEVs.

Tabelle 15: Vergleichende Darstellung des Emissionsfaktors, des Fahrzeugverbrauchs, der Lebensdauer, der Gesamtfahrleistungen und der THG-Emissionen über die Lebensdauer für verschiedene Antriebstechnologien und Energieträger

Antriebstechnologie und Energieträger	Emissionsfaktor	Fahrzeugverbrauch	Lebensdauer	Gesamtfahrleistung	THG-Emissionen über Lebensdauer	
	g CO ₂ e/kWh	kWh/100 km	Jahre	km	t CO ₂ e	g CO ₂ e/km
BEV						
Strommix Polen	779	22	12	150.000	25	168
Strommix Deutschland	383	22	12	150.000	12	83
Strommix EU27	287	22	12	150.000	9	62
Strommix Frankreich	68	22	12	150.000	2	15
EE-Strom	35	22	12	150.000	1	8
FCEV						
H ₂ [Erdgasreforming]	394	47	12	180.000	33	184
H ₂ [Strommix EU27]	427	47	12	180.000	36	199
H ₂ [EE-Strom]	34	47	12	180.000	3	16
ICEV						
Benzin	326	67	18	180.000	40	220
Diesel	331	69	14	210.000	48	230
eFuel [Strommix EU27]	637	66	18	180.000	76	423
eFuel EU27 [EE-Strom]	40	66	18	180.000	5	27
HVO [Palmöl]	536	67	14	210.000	75	358
HVO [Reststoffe]	34	67	14	210.000	5	23
PHEV						
Benzin [75 %]	316	62	14	175.000	34	195

HVO100 [25 %] Strommix EU27 [75 %]	224	36	14	210.000	17	81
Strommix EU27 [25 %]						
Benzin [25 %] Strommix EU27 [75 %]	297	36	14	175.000	19	108
Benzin [75 %] EE-Strom [25 %]	253	62	14	175.000	27	156
Benzin [25 %] EE-Strom [75 %]	108	36	14	175.000	7	39
eFuel EU27 [75 %] Strommix EU27 [25 %]	550	61	14	175.000	58	334
eFuel EU27 [25 %] Strommix EU27 [75 %]	375	36	14	175.000	24	135
HVO100 [75 %] Strommix EU27 [25 %]	97	61	14	210.000	12	59

4 Vergleichende Well-to-Wheel-Analyse (WtW): Energieverbrauch und THG-Emissionen in der Nutzungsphase von PKWs

4.1 Aktueller Vergleich des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen verschiedener Antriebsarten

Im Rahmen der Well-to-Wheel-Analyse sind die erheblichen Unterschiede des CO₂e-Außstoßes der verschiedenen Antriebsarten und Energieträger deutlich sichtbar geworden. Abbildung 20 zeigt eine quantitative Gegenüberstellung der CO₂e-Emissionen über die gesamte Nutzungsdauer eines PKWs.¹³⁹

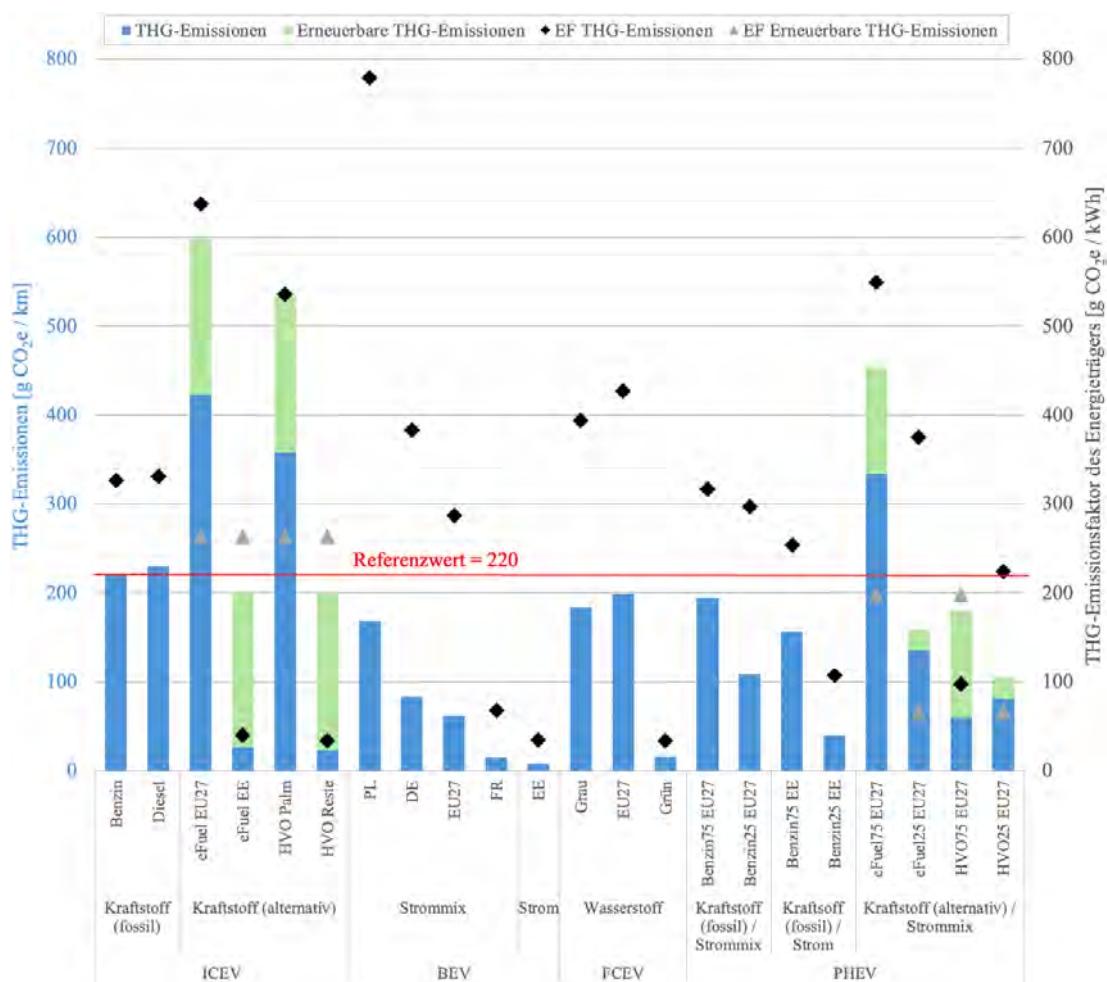


Abbildung 20: CO₂e-Emissionen der Antriebsarten und Energieträger im Vergleich

¹³⁹ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

Für den Vergleich der Antriebssysteme wurde ein PKW mit Benzin-Verbrennungsmotor als Referenz definiert. Diese Art von Antriebssystem ist derzeit am weitesten verbreitet.¹⁴⁰ Bei batterieelektrisch angetriebenen PKWs (BEV) ergeben sich erhebliche Unterschiede in der WtW-Gesamtbilanz, da diese ausschließlich auf den Emissionsfaktor der Stromerzeugung zurückzuführen sind. Wie in Abbildung 21 ersichtlich emittiert ein BEV, deren Antrieb mit dem aktuellen deutschen Strommix erfolgt, über die Nutzungsdauer ca. 62 % weniger CO₂e-Emissionen als ein vergleichbarer PKW mit Benzin-Verbrennungsmotor. Jedoch zeigt sich, dass ein BEV, welches in einem Land mit einem sehr hohen Emissionsfaktor, wie Polen, eingesetzt wird, eine deutlich niedrigere Ersparnis an CO₂e-Emissionen aufweisen kann. Im Vergleich zu einem ICEV-Benziner würde sich für ein in Polen betriebenes BEV nur noch eine Emissionersparnis von 24 % ergeben.

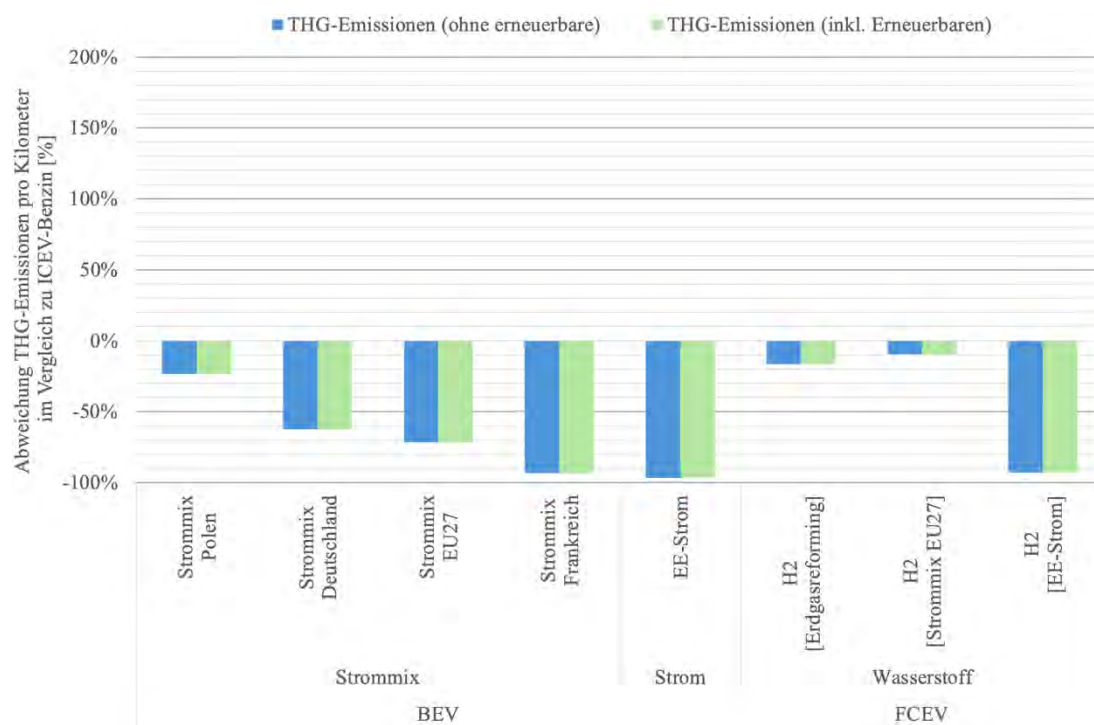


Abbildung 21: Prozentuale Abweichung der THG-Emissionen von BEVs und FCEVs im Vergleich zu ICEV-Benzinern

¹⁴⁰ Siehe Kapitel 2.2.

In Ländern, die bereits heute einen sehr geringen CO₂e-Emissionsfaktor bei der Stromerzeugung aufweisen, wie Frankreich, würden sich durch die Umstellung auf BEV-Fahrzeuge sofort erhebliche Einsparungen an CO₂e-Emissionen ergeben. Das Gleiche gilt für BEVs, die ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik (PV) betrieben werden. In den Ländern mit sehr niedrigem CO₂e-Emissionsfaktor, oder bei BEV-Fahrzeugen, die zu 100 % mit Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) betrieben werden, ergeben sich Einsparpotenziale von mehr als 90 % im Vergleich zu einem ICEV-Benziner.

Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb (FCEV) ergibt sich ein ähnliches Bild, wie bei den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Durch die Verwendung von grünem Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wurde, ergibt sich ein Einsparpotenzial von ca. 93 % gegenüber einem ICEV-Benziner. Falls jedoch grauer Wasserstoff, der basierend auf Erdgasreforming und somit auf fossilen Energiequellen erzeugt wurde, eingesetzt wird, schrumpfen die Ersparnisse auf nur ca. 16 % statt 93 %. Unter Verwendung des aktuellen Strommixes der EU-Länder ergeben sich nur sehr geringe Einsparpotenziale von 9 %.

Bei den alternativen Kraftstoffen, welche in Abbildung 22 visualisiert sind, zeigt sich, dass die THG-Emissionen stark voneinander abweichen und konträre Trends aufweisen. Unter Vernachlässigung der geringen Energieeffizienz von alternativen Kraftstoffen und Vernachlässigung von erneuerbaren Treibhausgasemissionen lassen sich erhebliche Einsparpotenziale zur THG-Emissionsminderung mit alternativen Kraftstoffen wie eFuels und HVO100 erzielen. Jedoch können die THG-Emissionen von Verbrennungsmotoren auch bei der Nutzung alternativer Kraftstoffe signifikant höher sein als beim Einsatz von fossilen Kraftstoffen. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit und Notwendigkeit der sektorenübergreifenden Kooperation, um den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant zu minimieren.

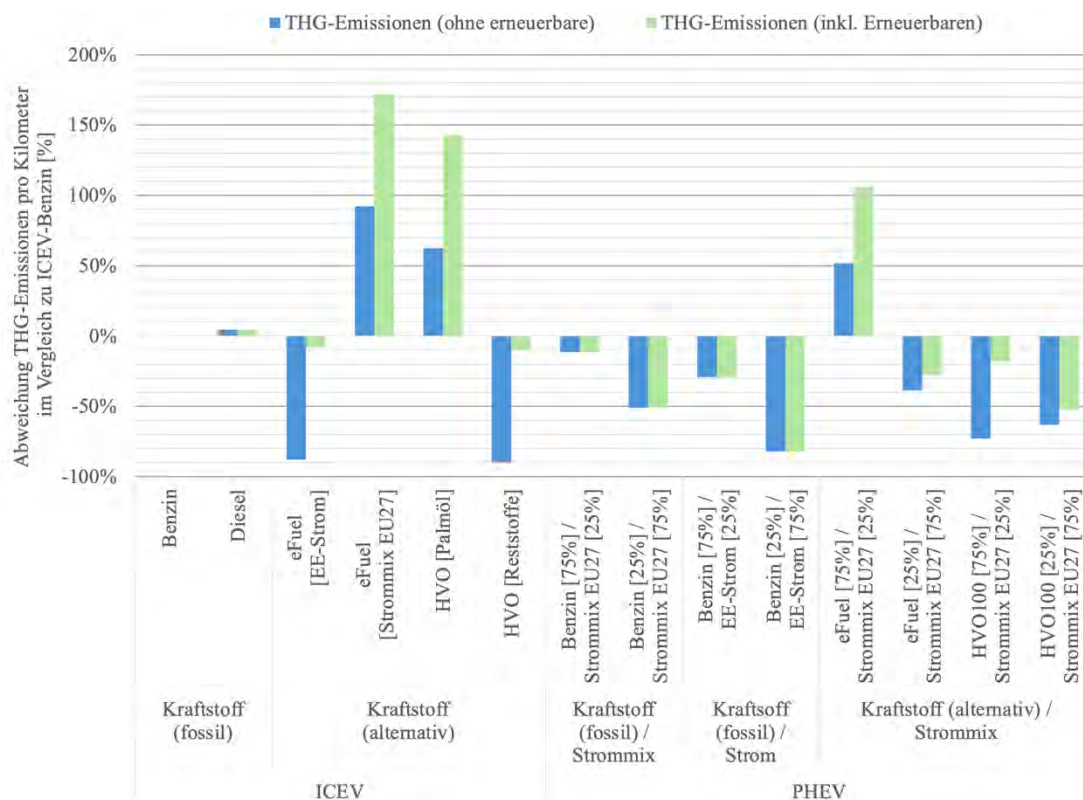


Abbildung 22: Prozentuale Abweichung der THG-Emissionen von ICEVs mit alternativen Kraftstoffen und PHEVs im Vergleich zu ICEV-Benzinern

Die meisten Sensitivität zu den untersuchten Plug-in-Hybridfahrzeugen zeigten CO₂e-Einsparpotenziale, welche durchaus bei über 50 % liegen können, falls die Fahrzeuge einen hohen elektrischen Fahranteil aufweisen. Basierend auf dieser Analyse können PHEVs kurz-, mittel- und langfristig zu einer signifikanten Reduzierung von Treibhausgasen beitragen, falls diese überwiegend elektrisch angetrieben werden. Der beschleunigte Ausbau von Erneuerbaren Energien wirkt sich bei hohem elektrischen Fahranteil von PHEVs auch auf die Bestandsfahrzeuge aus. Dennoch zeigt die Sensitivität mit eFuels und hohem verbrennungsmotorischen Fahranteil auf, dass PHEVs auch deutlich mehr THG-Emissionen als ein vergleichbarer ICEV-Benziner aufweisen können.

4.2 Alternative Antriebstechnologien und Kraftstoffe: Wie die Energiewende den Verkehrssektor transformiert

Der direkte Vergleich der CO₂e-Emissionen über die Nutzungsdauer eines PKWs zeigt, dass sowohl batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellen-PKWs und unter bestimmten Bedingungen auch Plug-in-Hybridfahrzeuge oder Verbrennungsmotoren, welche mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, ein sehr hohes Potenzial bieten, die CO₂e-Emissionen während der Nutzungsphase signifikant zu reduzieren. Jedoch ist es nicht ausreichend, lediglich das Antriebssystem von Verbrennungsmotoren auf alternative Antriebe wie BEV, FCEV und PHEV oder auf alternative Kraftstoffe für ICEV umzustellen. Um das volle Potenzial auszuschöpfen, ist es zwingend erforderlich, die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung in allen europäischen Ländern weiter zu reduzieren und den positiven Trend der letzten Jahrzehnte weiter fortzuführen. Der Abbildung 23 kann entnommen werden, dass sich die durchschnittlichen CO₂e-Emissionen der Stromerzeugung der EU-Länder von 1990 bis 2021 mehr als halbiert haben.

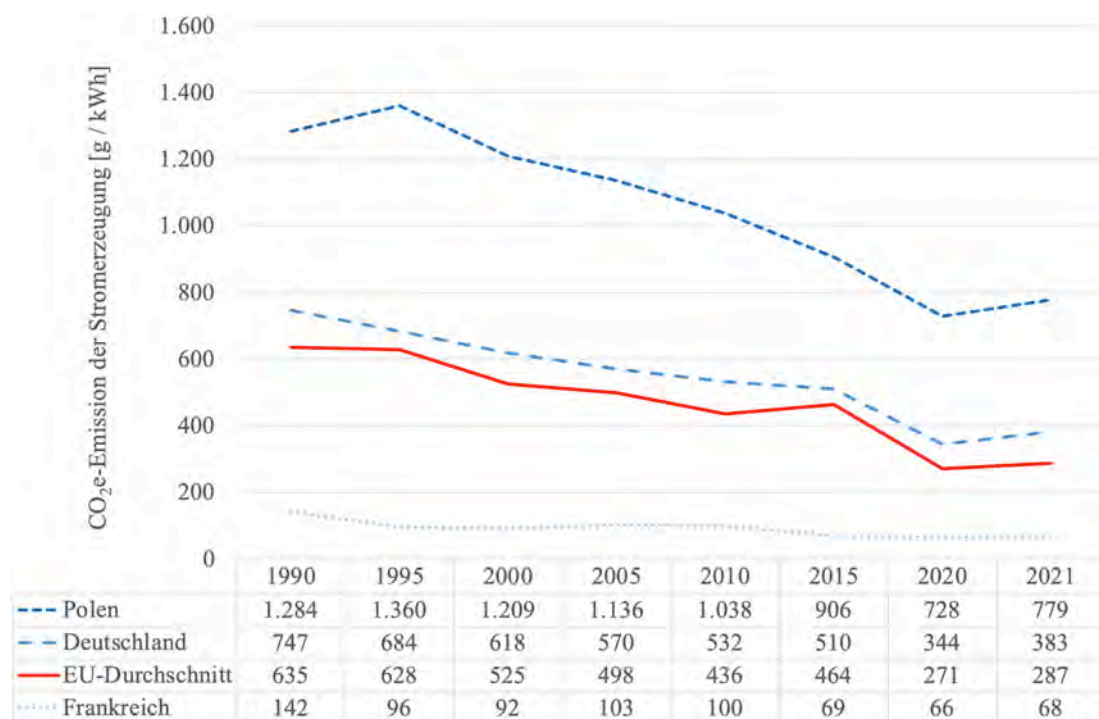


Abbildung 23: Entwicklung der CO₂e-Emissionsfaktoren der Stromerzeugung vom Jahr 1990 bis 2021 von ausgewählten EU-Ländern

Die Minderungen der Treibhausgase in der deutschen Energiewirtschaft sind auf den geringeren Einsatz von fossilen Brennstoffen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 zurückzuführen. Besonders stark war der Rückgang bei der Verwendung von Braun- und Steinkohle sowie bei Erdgas.¹⁴¹ Während der durchschnittliche Emissionsfaktor in Deutschland im Jahr 1990 bei 747 g/kWh lag, betrug dieser im Jahre 2021 nur noch 383 g/kWh.¹⁴² Dieser positive Trend der Dekarbonisierung des Energiesektors der deutschen Stromerzeugung sollte weiter fortgeführt werden.

In der Abbildung sind neben dem Durchschnitt der EU-Länder auch selektiv Länder mit besonders hohen oder niedrigen Emissionsfaktoren berücksichtigt. Polen hat seinen Emissionsfaktor seit 1990 um ca. 40% reduziert, hatte jedoch im Jahr 2021 mit 779 g/kWh immer noch den höchsten Emissionsfaktor aller EU-Länder. Deutschland hat seinen Emissionsfaktor seit 1990 um ca. 50% gesenkt, jedoch liegt dieser immer noch über dem EU-Durchschnitt.¹⁴³

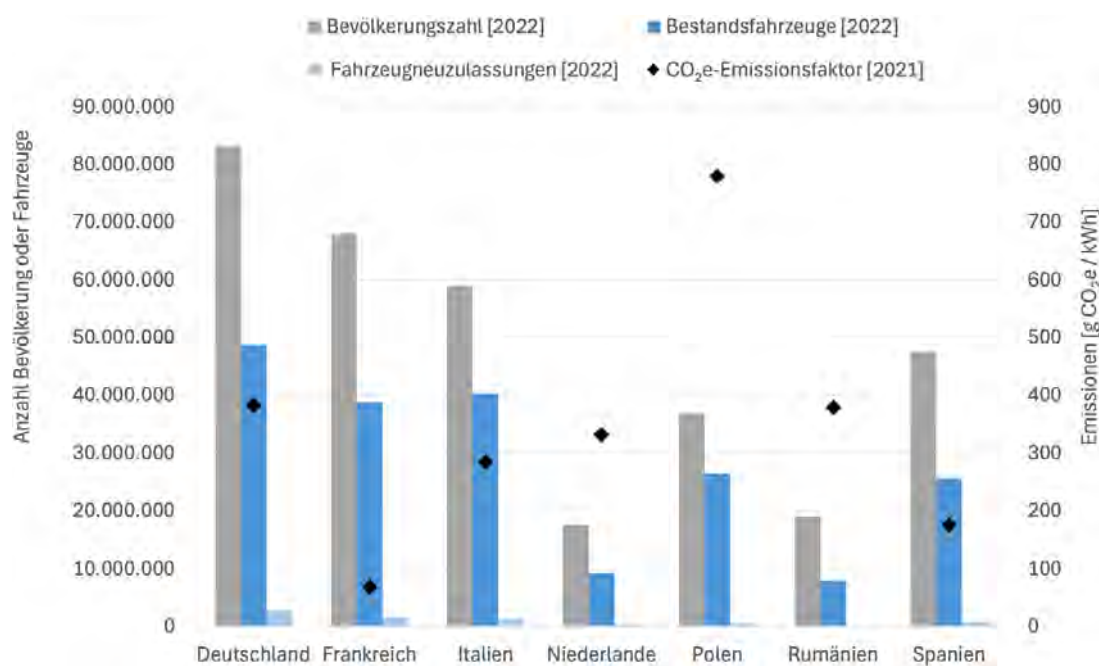


Abbildung 24: Bevölkerungszahlen, Bestandsfahrzeuge, Fahrzeugneuzulassungen und CO₂e-Emissionsfaktoren der Stromerzeugung ausgewählter EU-Länder

¹⁴¹ Umweltbundesamt, 2024b, S. 1.

¹⁴² Bastos et al., 2024.

¹⁴³ Bastos et al., 2024.

In Abbildung 24 sind die Bevölkerungszahlen, Bestandsfahrzeuge, Neuzulassungen und die CO₂e-Emissionsfaktoren der Stromerzeugung von 7 der 27 EU-Mitgliedsländer abgebildet. Deutschland, Frankreich, Italien, Niederlande, Polen, Rumänien und Spanien repräsentieren 78% der PKW-Bestandsflotte der EU-Länder, da in diesen Ländern im Jahr 2022 ca. 197 von den 252 Millionen PKWs zugelassen waren.¹⁴⁴ Um die Dekarbonisierung des Verkehrssektors durch alternative Antriebstechnologien und Kraftstoffe voranzutreiben, ist die Energiewende in allen Europäischen Ländern ein entscheidender Erfolgsfaktor. Eine erfolgreiche Energiewende ist entscheidend, um sowohl bei Neuzulassungen als auch bei der Bestandsflotte von PKWs, signifikante Treibhausgasreduzierungen zu erzielen. Die kurz- und mittelfristigen Reduzierungen der THG-Emissionen der Bestandsflotte, welche zum größten Teil PKWs mit Verbrennungsmotoren sind, lassen sich insbesondere durch den Einsatz von alternativen Kraftstoffen erzielen. Bei den Elektroautos wirken sich die zukünftigen Reduzierungen der Emissionsfaktoren der Stromerzeugung nicht nur auf die Neuzulassungen, sondern auch auf alle Bestandsfahrzeuge aus.

4.3 Energieeffizienz im Vergleich: Emissionen vs. Energieeinsatz der Antriebstechnologien und Energieträger

Im vorherigen Kapitel wurde der Zusammenhang zwischen der Energiewende und der Dekarbonisierung des Verkehrssektors verdeutlicht. Die Reduzierung der Treibhausgase in allen Sektoren ist einer der wichtigsten Stellhebel in Bezug auf die Erreichung der Klimaziele. Zur Erreichung der CO₂-Neutralität bis 2050 ist jedoch das Zusammenspiel unterschiedlicher Sektoren von entscheidender Bedeutung.

Wie im Kapitel 4.2 dargelegt, ist der Ausbau der Erneuerbaren Energien für viele Länder der EU eine bedeutende Herausforderung. Im Sinne eines effizienten Einsatzes der verfügbaren Ressourcen ist die **Energieeffizienz von entscheidender Bedeutung**. Bei der Auswahl und gezielten Förderung von alternativen Antriebstechnologien sollte der Energieeffizienz besondere Beachtung beigemessen werden. Die Energieeffizienz gibt einen Hinweis auf den Wirkungsgrad des betrachteten Systems.

¹⁴⁴ ACEA, 2024b, S. 5.

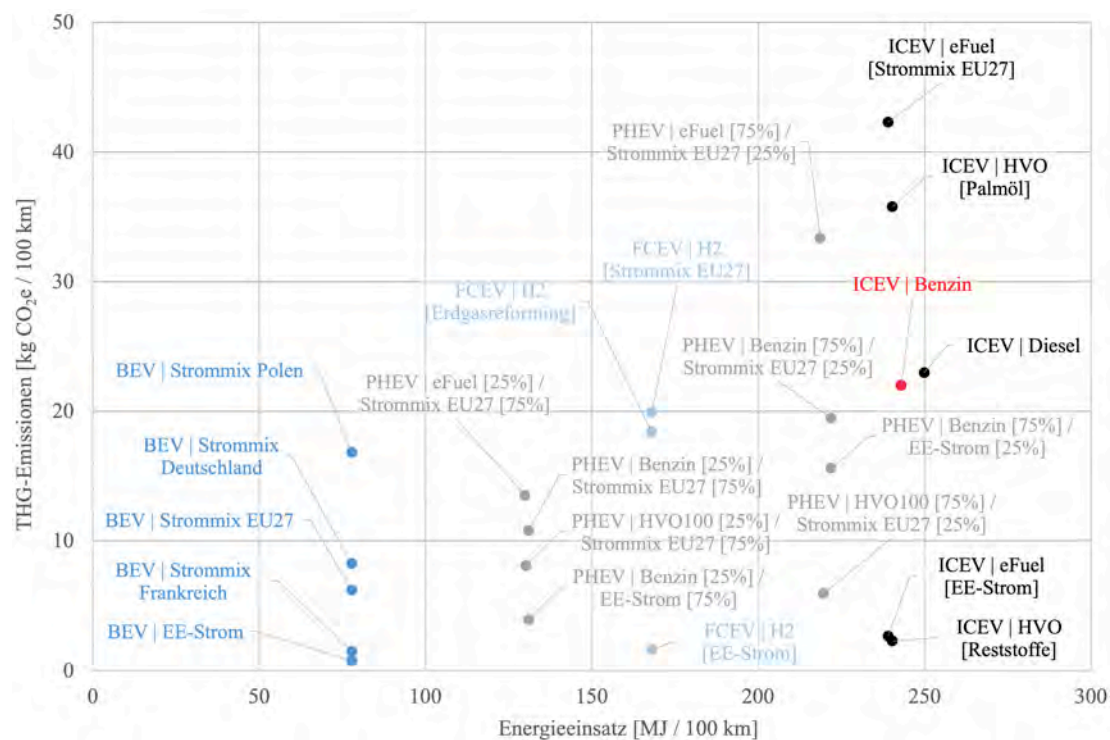


Abbildung 25: Vergleich von THG-Emissionen vs. Energieeinsatz verschiedener Antriebsarten und Energieträger

Abbildung 25 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem Energieeinsatz (in Megajoule pro 100 Kilometer) und den CO₂e-Emissionen (in kg pro 100 Kilometer) für verschiedene Antriebssysteme. Die in Kapitel 4.1 verglichenen Antriebstechnologien sind mit ihrem entsprechenden Energieeinsatz und Emissionen aufgeführt.¹⁴⁵ Im rechten Bereich befinden sich sowohl die traditionellen Antriebstechnologien mit Verbrennungsmotoren, welche durch Benzin oder Diesel angetrieben werden, als auch Verbrennungsmotoren, die mit alternativen Kraftstoffen angetrieben werden. Unabhängig von dem verwendeten Kraftstoff, erfordern alle Verbrennungsmotoren einen hohen Energieeinsatz im Vergleich zu den anderen Antriebstechnologien. Abhängig von der Kraftstoffart variieren die Treibhausgase in erheblichen Maßen.¹⁴⁶

Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Vergleich zu traditionellen Verbrennungsmotoren energieeffizienter, tragen dennoch nicht zwangsläufig zu einer signifikanten Reduzierung von verkehrsbedingten THG-Emissionen bei. Wie bereits in Kapitel 4.1 hervorgehoben, sind FCEVs nur in Verbindung mit dem Einsatz von grünem Wasserstoff eine sinnvolle alternative Antriebstechnologie.

¹⁴⁵ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

¹⁴⁶ Erneuerbare THG-Emissionen sind in dieser Gegenüberstellung nicht berücksichtigt.

Wie bereits in Kapitel 2.3 hervorgehoben, wird derzeit überwiegend grauer Wasserstoff produziert. Grüner Wasserstoff ist nur in geringen Mengen verfügbar. Es ist davon auszugehen, dass dieser voraussichtlich erst für Anwendungen zum Einsatz kommt, bei denen es keine Alternativen gibt, wie beispielsweise Industrie, Flug- und Schwerlastverkehr.¹⁴⁷ Der Einsatz vom aktuellen EU-Strommix für die Elektrolyse erzeugt sogar mehr THG-Emissionen als das Erdgasreforming.

Plug-in-Hybridfahrzeuge können in zwei Gruppen unterteilt werden. PHEVs mit einem hohen elektrischen Fahranteil sind energieeffizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge und die THG-Emissionen haben eine ähnliche Streuung wie bei den Elektroautos (BEVs). PHEVs die mit einem hohen verbrennungsmotorischen Fahranteil betreiben werden, sind weniger effizient als Brennstoffzellenfahrzeuge jedoch etwas energieeffizienter als reine Verbrennungsmotoren. Elektroautos haben von allen Antriebstechnologien die höchste Energieeffizienz. Der Energieeinsatz ist insbesondere im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren deutlich geringer. Dieser deutliche Vorteil resultiert aus dem wesentlich höheren Systemwirkungsgrad von Elektrofahrzeugen (vgl. Abbildung 27).¹⁴⁸ In Bezug auf die THG-Emissionen von Elektroautos ist die Herkunft des verwendeten Stroms von entscheidender Bedeutung, wie dies bereits in Kapitel 4.2 näher erläutert wurde.

¹⁴⁷ Wietschel et al., 2022, S. 56.

¹⁴⁸ David et al., 2021, S. 25.

4.4 Einfluss der PKW-Erneuerungsraten auf die Minderung von THG-Emissionen ausgewählter EU-Länder

In den vorherigen Kapiteln wurden insbesondere die THG-Emissionen aber auch die Energieeffizienz der Antriebstechnologien oder die Wichtigkeit der Energiewende betrachtet. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in diesem Kapitel betrachtet werden soll, beleuchtet die Unterschiede ausgewählter EU-Länder in Bezug auf die Förderung von alternativen Antriebstechnologien.

In Abbildung 26 werden die Zusammenhänge zwischen der Erneuerungsrate der PKW-Flotte und dem CO₂e-Emissionsfaktor der Stromerzeugung visualisiert. Auf der X-Achse wird die Erneuerungsrate des PKW-Bestands abgebildet. Auf der Y-Achse sind die CO₂e-Emissionsfaktoren pro EU-Land abgebildet, die bereits in Abbildung 7 dargestellt wurden. Die Größe der jeweiligen Blase symbolisiert die Größe der Bestandsflotte.

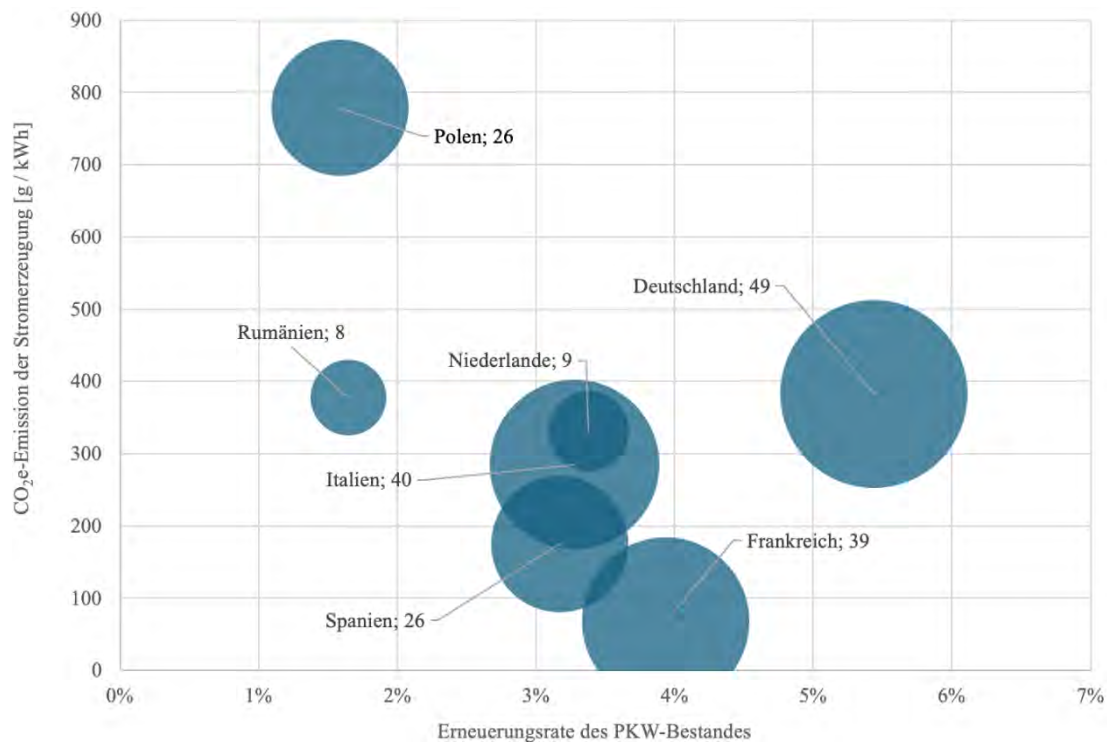


Abbildung 26: Erneuerungsraten des PKW-Bestands der EU im Kontext der CO₂e-Emissionen der Stromerzeugung

Die Erneuerungsrate wurde als prozentualer Wert aus dem Verhältnis von Neuzulassung im Jahr 2022 zu Bestandsfahrzeugen in Jahr 2022 berechnet. In Deutschland wurden 2.651.357 neue PKWs zugelassen und die Summe der Bestandsfahrzeuge betrug 48.763.036 PKWs.¹⁴⁹ Dies ergibt eine theoretische Erneuerungsquote von 5,4%. Die Zahl, die rechts neben dem Land in der Beschriftung dargestellt ist, bezieht sich auf die Größe der Blasen. Beispielsweise bedeutet die 49 hinter Deutschland, dass ca. 49 Millionen Bestandsfahrzeuge zugelassen waren. Um das Blasendiagramm übersichtlich zu gestalten sind nur die 7 Länder berücksichtigt, welche den größten Anteil an der PKW-Bestandsflotte innerhalb der EU27 haben (vgl. Kapitel 4.2).

Die durchschnittliche Erneuerungsquote der EU-Länder beträgt 3,6 %. Deutschland und Frankreich liegen mit 5,4 % und 3,9 % über der durchschnittlichen Erneuerungsquote. Italien, die Niederlande und Spanien liegen sehr nahe bei der durchschnittlichen Erneuerungsquote. Polen und Rumänien liegen mit 1,6 % deutlich unter der durchschnittlichen Erneuerungsquote. Die Erneuerungsquote gibt an, wie schnell der Fahrzeugbestand durch Neuzulassungen ersetzt wird und zeigt damit das Potenzial für die schnellere Einführung der neuen Technologien in den jeweiligen EU-Ländern. Je höher die Quote, umso schneller können alternative Antriebe zu signifikanten CO₂e-Emissionsreduzierungen beitragen.

Deutschland hat eine sehr hohe Erneuerungsquote, jedoch einen CO₂e-Emissionsfaktor der Stromerzeugung, der über dem EU-Durchschnitt liegt. Polen hat eine geringe Erneuerungsquote und einen sehr hohen CO₂e-Emissionsfaktor der Stromerzeugung. Mit einem PKW-Bestand von ca. 26 Millionen gehört Polen zu den EU-Ländern mit hohem PKW-Bestand. Frankreich hat eine leicht überdurchschnittliche Erneuerungsquote und einen sehr niedrigen CO₂e-Emissionsfaktor der Stromerzeugung, folglich können beide Faktoren positiv zu einer zügigen Emissionsreduzierung in Frankreich beitragen. Anhand der Analyse dieser drei Länder lässt sich erkennen, dass die optimale Vorgehensweise zur Erreichung der gemeinsamen EU-Ziele zur Treibhausgasminderung individuell für jedes EU-Land betrachtet werden sollte.¹⁵⁰

¹⁴⁹ ACEA, 2024a, S. 5.

¹⁵⁰ Detaillierte Berechnungen sind in Anlage II verfügbar.

4.5 Verbrennungsmotoren mit eFuels als alternativem Kraftstoff: Chancen und Herausforderungen

Die Wechselwirkungen bei der Dekarbonisierung der einzelnen Sektoren werden bei der Betrachtung von eFuels als alternativen Kraftstoff für Verbrennungsmotoren für PKWs besonders deutlich. In der Tabelle 16 werden die Chancen den Herausforderungen gegenübergestellt.

Tabelle 16: Chancen und Herausforderungen für den Markthochlauf von eFuels

Chancen	Herausforderungen
Potenziell sehr geringe THG-Emissionen	Geringe Energieeffizienz (WtW)
CO ₂ -neutraler Kraftstoff (geschlossener Kohlenstoffkreislauf)	Lokale Treibhausgas-, Stickoxid- und Feinstaubmissionen
Geringer Infrastrukturausbau	Derzeit sehr hoher Kraftstoffpreis
Dekarbonisierung der Bestandsflotte	eFuels kommerziell derzeit nicht verfügbar
Länder mit unzureichender Verteilnetzinfrastuktur zum Laden von Elektroautos	Globaler Mangel an Kapazitäten der Elektrolyseure und FTS-Anlagen
Länder mit sehr hohem CO ₂ e-Emissionsfaktor der Stromerzeugung	Potenzielle Einschränkung der Verfügbarkeit von eFuels oder EE-Strom für andere Sektoren

Geringe THG-Emissionen im Spannungsfeld mit geringer Energieeffizienz

Wie bereits in Kapitel 4.1 verdeutlicht, lassen sich beim Einsatz von eFuels potenziell erhebliche Einsparungen an THG-Emissionen erzielen, falls ausschließlich EE-Strom bei der Herstellung eingesetzt wird. Jedoch lassen sich diese Einsparungen an THG-Emissionen nur unter einem hohen Energieeinsatz erzielen. Dieser resultiert im Rahmen der Well-to-Wheel-Analyse in einer geringen Energieeffizienz.

In Abbildung 27 werden die Energieverluste von grünem Strom (100 % EE) beim Einsatz in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) oder Fahrzeugen welche mit einem Verbrennungsmotor mit

eFuels (ICEV) betrieben werden dargestellt.¹⁵¹ Der jeweilige Wirkungsgrad η für jeden Verlust wird separat ausgewiesen.¹⁵²

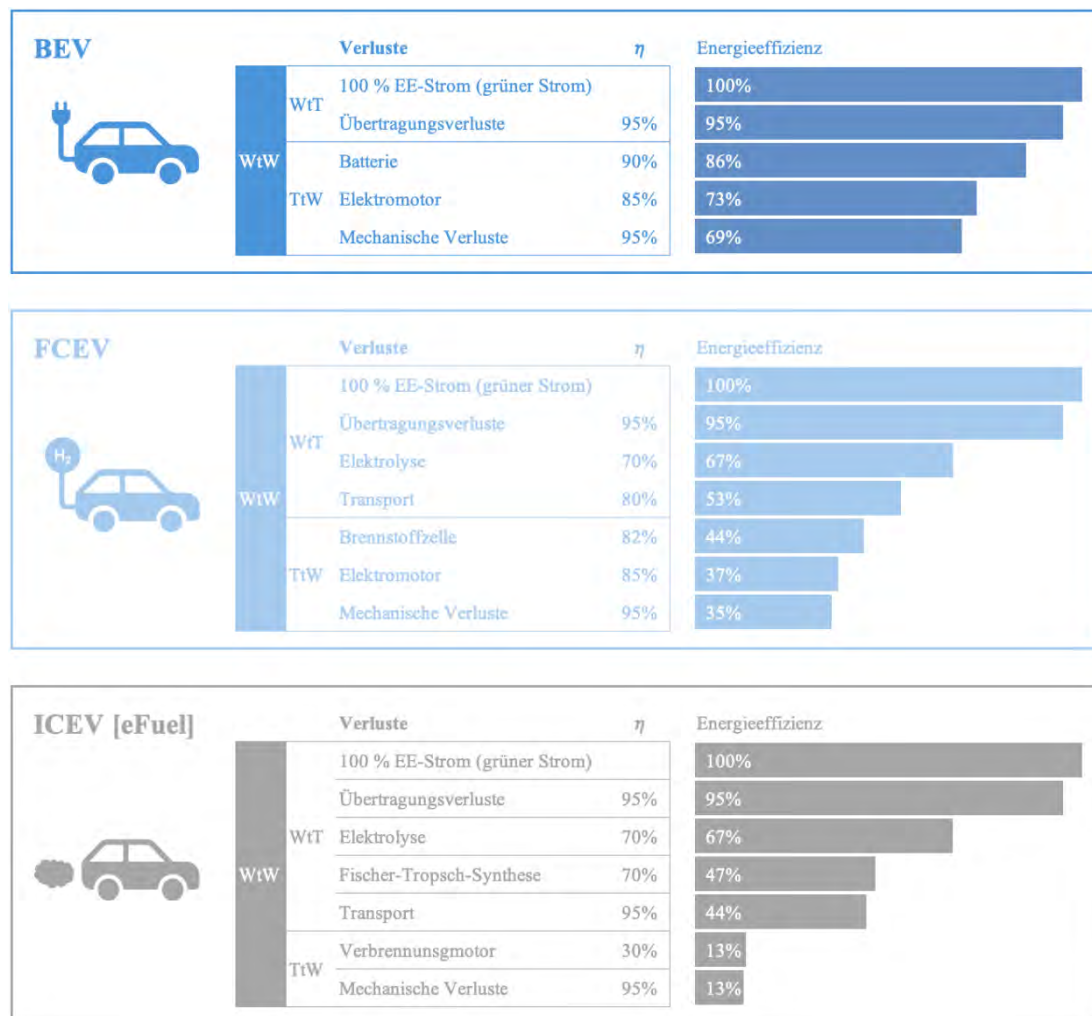


Abbildung 27: Energieeffizienz von BEV, FCEV und ICEV [eFuel] im Vergleich

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) haben im Vergleich zu den beiden anderen Antriebstechnologien bei jedem Verlustschritt einen hohen Wirkungsgrad von 85 % oder höher. Die größten Verlustfaktoren sind die Batterie mit einem Wirkungsgrad von 90 % und der Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von 85 %. Bei der Well-to-Tank Betrachtung entstehen nur

¹⁵¹ Die Abbildung wurde erstellt in Anlehnung an Strimitzer et al., 2022, S. 20.

¹⁵² Der Wirkungsgrad der jeweiligen Verluste wurde übernommen von Soler et al., 2020, S. 35.

Übertragungsverluste innerhalb des Stromnetzes, so dass bei BEV auch von einer Direktverstromung gesprochen wird.¹⁵³ Die gesamte **Energieeffizienz beträgt ca. 69 %**, dies bedeutet, dass 69 % des bereitgestellten grünen Stroms in Antriebsenergie umgesetzt werden.

Ein **Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)** hat mehrere Verlustschritte mit einem mittleren Wirkungsgrad, der pro Verlustschritt in einem Bereich zwischen 70 % und 85 % liegt. Für die Herstellung des Kraftstoffs wird grüner Strom genutzt, um durch Elektrolyse Wasserstoff herzustellen. Es entstehen weitere Verluste durch den Transport des Wasserstoffs, der zu einer Energieeffizienz der Well-to-Tank-Betrachtung von ca. 53 % führt. Dies bedeutet, dass etwa die Hälfte des grünen Stroms durch Effizienzverluste verbraucht wurde, bevor der Kraftstoff in das Fahrzeug getankt wurde. Weitere Verluste entstehen durch den Einsatz des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle und durch den Elektromotor. Insgesamt gibt es im Vergleich zu der Direktverstromung in einem BEV bei den Brennstoffzellenfahrzeugen mehrere verlustbehaftete Umwandlungsschritte der eingesetzten Energie.¹⁵⁴ Dies resultiert in Vergleich zu einem BEV zu einer deutlich geringeren **Energieeffizienz von 35 %** bei der Nutzung von grünem Strom in einem Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV).

Der Einsatz von **eFuels als alternativem Kraftstoff für Verbrennungsmotoren** hat eine sehr niedrige Energieeffizienz. Dies hängt zum einen mit dem energieintensiven Herstellungsprozess für die eFuels und zum anderen mit dem geringen Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren zusammen. Ähnlich wie bei den Brennstoffzellenfahrzeugen wird Wasserstoff anhand von Elektrolyse hergestellt. Dieser Wasserstoff wird durch die Fischer-Tropsch-Synthese in den flüssigen Kraftstoff (eFuels) umgewandelt. Beide Prozessschritte haben jeweils einen Wirkungsgrad von nur 70 % und führen bei der Well-to-Tank-Betrachtung zu einer Energieeffizienz von ca. 44 %. Der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors beträgt ca. 30 % und resultiert in der Gesamtbilanz in einem **Wirkungsgrad von nur 13 %**. Der Energieeinsatz für grünen Strom ist um den Faktor 5 höher, wenn der erzeugte grüne Strom für ein Verbrennungsmotorenfahrzeug mit eFuels verwendet wird, statt diesen in einem batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) einzusetzen.

CO₂-neutraler Kraftstoff im Spannungsfeld mit lokalen Emissionen

Die Nutzung von eFuels als alternativen Kraftstoff für Verbrennungsmotoren wird als CO₂-neutral oder klimaneutral bezeichnet, da keine zusätzlichen CO₂-

¹⁵³ David et al., 2021. S.34 f.

¹⁵⁴ David et al., 2021. S.34 f.

Emissionen beim Betrieb des Fahrzeugs freigesetzt werden.¹⁵⁵ Wie bereits im Kapitel 2.4 beschrieben wurde der Kohlenstoff, welcher für die Herstellung von eFuels benötigt wird, der Atmosphäre entzogen und verbleibt somit im Kreislauf.¹⁵⁶ Durch diese Vorgehensweise wird das verbleibende CO₂-Budget geschont, um den weiteren Anstieg der globalen Erderwärmung zu minimieren.¹⁵⁷ CO₂-Neutralität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein weiterer Netto-Anstieg der globalen CO₂-Emissionen vermieden wird. Letztendlich wird im Betrieb des Fahrzeugs durch die direkten Emissionen nicht nur CO₂, sondern auch Stickoxide NO_x und Feinstaub freigesetzt.¹⁵⁸ Wie bereits in Kapitel 2.5 erwähnt, verursachen Stickoxide NO_x neben der Versauerung der Böden auch Eutrophierung und tragen indirekt zu bodennahem Ozon (Sommersmog) bei.¹⁵⁹ Bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) entstehen keine lokalen Emissionen bei der Nutzung.¹⁶⁰

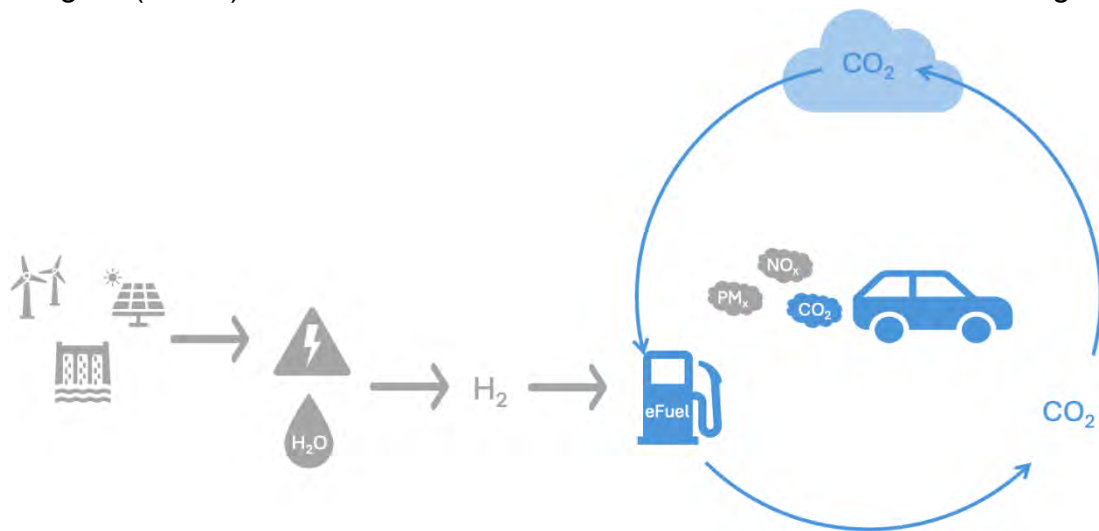


Abbildung 28: CO₂-neutraler Kreislauf von eFuels

¹⁵⁵ Diese Aussage gilt nur für die Well-to-Wheel Betrachtung.

¹⁵⁶ Abbildung 28 wurde erstellt in Anlehnung an Christ, o. J.

¹⁵⁷ Zapf et al., 2021, S. 31 f.

¹⁵⁸ Wietschel et al., 2022, S. 35 f.

¹⁵⁹ Umweltbundesamt, 2019a.

¹⁶⁰ Zapf et al., 2021, S. 30.

Gering Infrastrukturausbau im Spannungsfeld mit hohen Kraftstoffpreisen

Die meisten Studien zu Ökobilanzen oder Klimabilanzen von PKWs berücksichtigen insbesondere THG-Emissionen und zum Teil auch andere Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub oder kritische Rohstoffe. Nur in sehr wenigen Studien wird das Thema Infrastruktur ausführlicher betrachtet. Bothe betrachtet in seiner Lebenszyklusanalyse zu alternativen Fahrzeugantrieben auch die Thematik des Infrastrukturausbaus. Tabelle 17 verdeutlicht den notwendigen Infrastrukturausbau für jede Antriebstechnologie und wurde weitestgehend von Bothe übernommen.¹⁶¹ Ein Vorteil von eFuels ist die weitestgehende Nutzung von vorhandener Infrastruktur, die bereits für die fossilen Kraftstoffe (Benzin und Diesel) genutzt wird. Um ausreichend Kapazität für den grünen Strom für die Elektrolyseure bereitzustellen, ist bei eFuels nur ein Infrastrukturausbau für das Stromnetz erforderlich.¹⁶² Der Ausbau des Stromnetzes ist jedoch auch bei Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) notwendig.¹⁶³

Tabelle 17: Vergleich zum Infrastrukturausbau pro Antriebstechnologie

Infrastruktur	Antriebstechnologie				
	BEV	FCEV	ICE [fossil]	ICE [eFuels]	PHEV
Pipelines für Flüssigstoffe			✓	✓	✓
Pipelines für Gase		✓			
LKWs		✗	✓	✓	✓
Tanklaster		✓	✓	✓	✓
Lagerung von Flüssigstoffen			✓	✓	✓
H2-Speicherung		✓			
Tankstellen		✗	✓	✓	✓

¹⁶¹ Im Vergleich zu Bothe wurde zusätzlich noch PHEV berücksichtigt und bei FCEV wurde grauer Wasserstoff ausgeschlossen.

¹⁶² Ausbau des Stromnetzes sowohl bei lokaler als auch globaler Herstellung von eFuels erforderlich.

¹⁶³ Bothe et al., 2020, S. 36 ff.

Stromnetz	✓	✓		✓	✓
Stromspeicherung	✓				✓
Ladestationen	✓				✓

✓ Verfügbare Infrastruktur ✓ Fehlende Infrastruktur

Trotz des Vorteils der weitestgehend vorhandenen Infrastruktur sind die heutigen Kosten für die Herstellung der strombasierten synthetischen Kraftstoffe, wie eFuels, deutlich zu hoch und somit nicht wirtschaftlich.¹⁶⁴ Dies ist vermutlich auch einer der Gründe, warum eFuels derzeit kommerziell nicht verfügbar sind. In einer aktuellen Metastudie von Frontier Economics für den UNITI Bundesverband Energie Mittelstand werden kontinuierlich sinkende Produktionskosten vorhergesagt, die von ca. 1,86 bis 2,53 €/l im Jahr 2025 auf 1,10 bis 1,63 €/l im Jahr 2050 sinken sollen. Eine mögliche Option, um den Markthochlauf von eFuels zu unterstützen, bietet die Möglichkeiten diese alternativen Kraftstoffe mit fossilen Kraftstoffen zu mischen.¹⁶⁵

Dekarbonisierung der Bestandsflotte im Spannungsfeld mit unzureichender Verfügbarkeit von eFuels

Eines der wichtigsten Argumente welches Befürwortende von eFuels hervorheben, ist die Möglichkeit diese zur Dekarbonisierung der Bestandsflotte zu nutzen.¹⁶⁶ Wie bereits im Kapitel 4.4 erwähnt waren ca. 252 Millionen Bestandsfahrzeuge in der Europäischen Union im Jahr 2022 zugelassen. Innerhalb eines Jahres emittiert die gesamte Bestandsflotte der EU ca. 709 Millionen Tonnen an CO₂.¹⁶⁷

Die durchschnittliche Erneuerungsquote aller EU-Länder beträgt 3,6 %. Dies bedeutet, dass pro Jahr ca. 9 Millionen PKWs neu zugelassen werden. Unter der Annahme, dass ab sofort nur noch emissionsfreie PKWs zugelassen werden, würde es ca. 28 Jahre, also bis zum Jahr 2053 dauern, bis die gesamte Bestandsflotte in der Europäischen Union ersetzt wurde. Eine kurz- und

¹⁶⁴ Wietschel et al., 2022, S. 54.

¹⁶⁵ Frontier Economics, 2024, S. 28 ff.

¹⁶⁶ Wietschel et al., 2022, S. 54.

¹⁶⁷ Berechnung der CO₂e-Emissionen der PKW-Bestandsflotte in der Europäischen Union pro Jahr: 220 g CO₂e/km (Tabelle 12) · 12.500 km/Jahr und PKW (Tabelle 3) · 250 Millionen PKWs.

mittelfristige Dekarbonisierung der Bestandsflotte könnte somit einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung der verkehrsbedingten THG-Emissionen leisten.

In Abbildung 29 ist diese vereinfachte Berechnung zur vollständigen Erneuerung der PKW-Bestandsflotte der Europäischen Union visualisiert. Diese Überschlagsrechnung verdeutlicht die Dringlichkeit der signifikanten Erhöhung der Anteile an alternativen Antriebstechnologien bei den PKW-Neuzulassungen im Kontext der Europäischen Union. Einer der entscheidenden Vorteile von eFuels im Vergleich zu alternativen Antriebstechnologien ist die Möglichkeit, diese für die existierende Bestandsflotte einzusetzen.

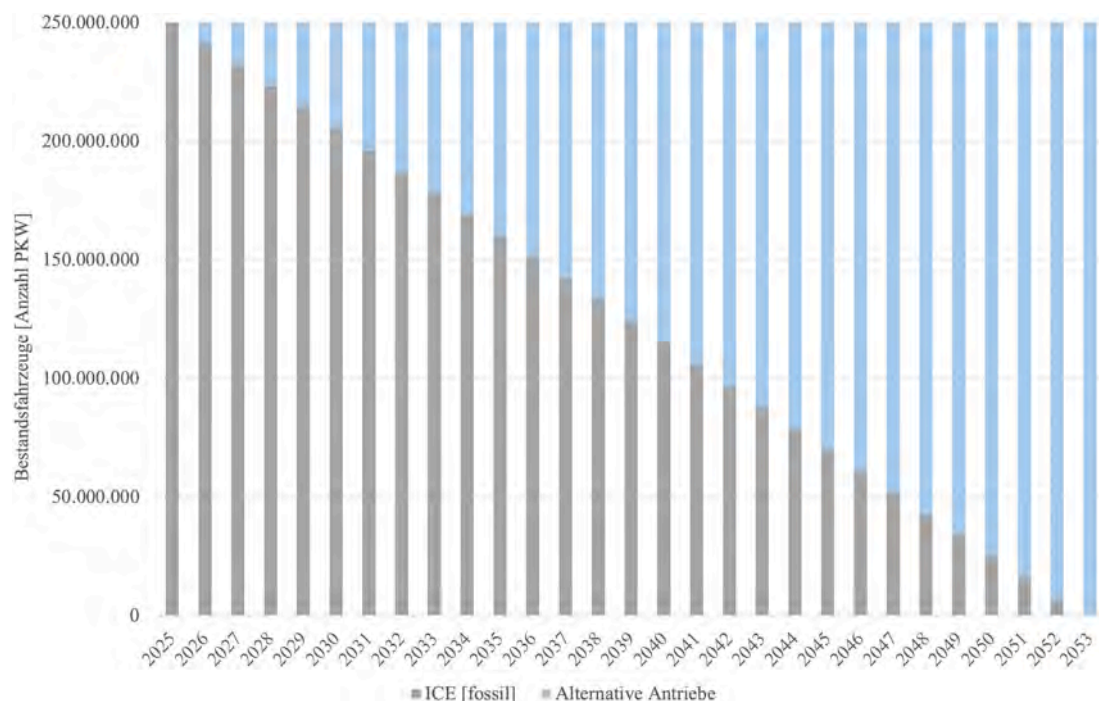


Abbildung 29: Erneuerung der PKW-Bestandsflotte der EU von Jahr 2025 bis 2053

Wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, befindet sich der Biokraftstoff HVO100 seit 2024 im Markthochlauf in Deutschland. In Nordeuropa und Kalifornien ist HVO schon seit ca. 10 Jahren verfügbar.¹⁶⁸ Der strombasierte synthetische Kraftstoff eFuels ist derzeit kommerziell nicht verfügbar.¹⁶⁹ Die Möglichkeit der Dekarbonisierung der Bestandsflotte wird aus heutiger Sicht insbesondere durch die fehlende kommerzielle Verfügbarkeit von eFuels gehemmt.

¹⁶⁸ Dhom, 2024.

¹⁶⁹ Ueckerdt et al., 2023, S. 1.

eFuels als Alternative für spezifische Länder im Spannungsfeld mit Einschränkungen der Produktionskapazität sowie Konkurrenz zu anderen Sektoren

Zusätzlich zu der bereits erwähnten Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Bestandsflotte betonen Befürwortende von eFuels die Nutzung der bestehenden Infrastruktur.¹⁷⁰ Der deutlich geringere Investitionsaufwand in die Infrastruktur könnte insbesondere finanzschwachen Ländern eine kostengünstigere Option bieten, um durch den Einsatz von eFuels die Dekarbonisierung des PKW-Sektors voranzutreiben. Finanzschwache Länder werden vor erheblichen Herausforderungen stehen, um die notwendigen Investitionen in die Ladeinfrastruktur für Elektroautos zu tätigen.

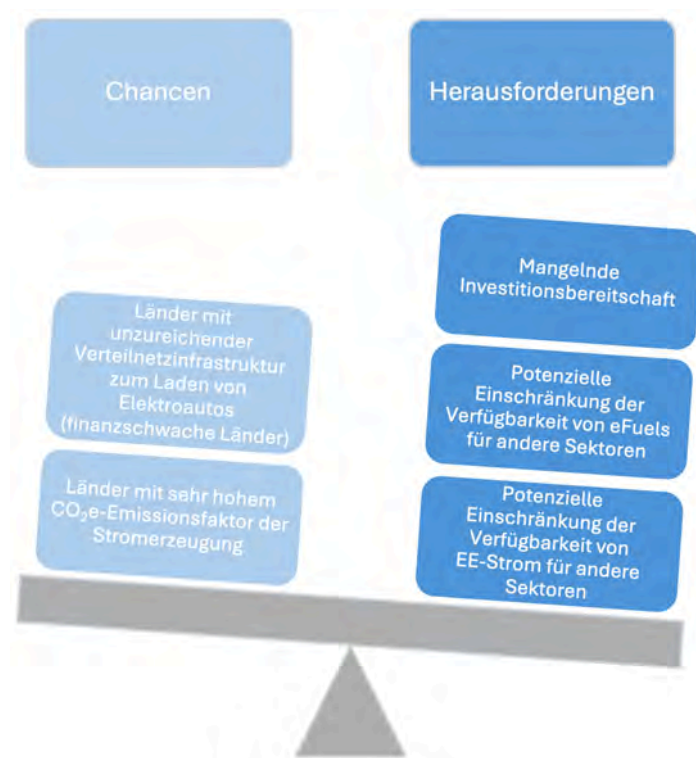


Abbildung 30: Balance zwischen Chancen und Herausforderungen für den Einsatz von eFuels im PKW-Sektor und anderen Sektoren

Das Potsdam-Institut für Klimaforschung (PIK) hebt in ihrer Analyse zu eFuels aus dem Jahre 2023 hervor, dass die derzeit geplanten eFuel-Projekte bei weitem nicht ausreichen, um den PKW-Sektor in den kommenden Jahren mit ausreichenden Mengen zu versorgen. Die Projekte, die bis zum Jahr 2035 geplant sind, würden noch nicht einmal ausreichen, um Sektoren wie den Flug- und Schiffsverkehr mit ausreichenden Mengen zu versorgen. Ein weiterer

¹⁷⁰ Soler et al., 2020, S. 98.

Aspekt ist die mangelnde Investitionsbereitschaft, die sich beispielsweise dadurch zeigt, dass bei den zuvor genannten geplanten Projekten zu 99 % noch die Investitionsentscheidung aussteht. Derzeit besteht ein globaler Mangel an Kapazitäten der Elektrolyseure und FTS-Anlagen.¹⁷¹

Die sehr weite Spanne der CO₂e-Emissionsfaktoren der Stromerzeugung der jeweiligen EU-Länder wurde in Kapitel 2.3 verdeutlicht. Möglicherweise könnte der Einsatz von eFuels die Dekarbonisierung des PKW-Sektors in Ländern mit besonders hohem Emissionsfaktor der Stromerzeugung schneller vorantreiben, falls diese Länder eFuels importieren würden.¹⁷² Zu der bereits erwähnten sehr eingeschränkten Verfügbarkeit von eFuels würde bei der möglicherweise zukünftig besseren Verfügbarkeit von eFuels der PKW-Sektor mit anderen Sektoren konkurrieren, bei denen eine Elektrifizierung nur schwer oder gar nicht möglich ist.¹⁷³ Wie in Abbildung 27 ersichtlich benötigen eFuels im Vergleich zu Elektroautos (BEV) aufgrund ihrer geringen Energieeffizienz eine um den Faktor 5 höhere Menge an Strom aus Erneuerbaren Energien. Dadurch verursachen eFuels potenziell Einschränkungen der Verfügbarkeit von EE-Strom für andere Sektoren, die das Angebot an EE-Strom zusätzlich verknappen würde.¹⁷⁴

Zusammenfassung

Die Nutzung von eFuels bietet eine vielversprechende Möglichkeit zur Dekarbonisierung von Verbrennungsmotoren, insbesondere für die Bestandsflotte, indem sie CO₂-neutralen flüssigen Kraftstoff bereitstellt und die bestehende Infrastruktur und Motoren weiternutzt. Sie können insbesondere in Ländern ohne ausreichende Ladeinfrastruktur für Elektroautos vorteilhaft sein. Allerdings stehen eFuels vor erheblichen Herausforderungen wie der geringen Energieeffizienz, sehr begrenzter Verfügbarkeit von Produktionsanlagen und derzeit sehr hohen Produktionskosten. Die Konkurrenz um eFuels und erneuerbare Energien für andere Sektoren könnte die Nutzung von eFuels für den PKW-Sektor weiter einschränken. Trotz dieser Hürden könnten eFuels als Übergangslösung dienen, um die dringend notwendige Dekarbonisierung des PKW-Sektors zu beschleunigen, bis energieeffizientere Alternativen verfügbar sind.

¹⁷¹ Ueckerdt et al., 2023, S. 2 ff.

¹⁷² Durch den Aufbau der Infrastruktur zur eFuels-Erzeugung und dem Transport in das Zielland entstehen THG-Emissionen.

¹⁷³ Biemann et al., 2024, S. 31.

¹⁷⁴ David et al., 2021, S. 37.

4.6 Szenarien der THG-Emissionen: Vergleichende Analyse der Nutzungsphase von PKWs in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Die vorherigen Kapitel basierten auf aktuellen Annahmen, um die Treibhausgasemissionen für die unterschiedlichen Antriebstechnologien und Kraftstoffe für das Jahr 2025 aufzuzeigen. Die Klimabilanz von alternativen Antriebstechnologien wie BEV und FCEV wurde insbesondere durch die Herkunft des Stroms beeinflusst. Bei alternativen Kraftstoffen wie HVO100 wurde die Klimabilanz hauptsächlich durch die Herkunft der verwendeten Rohstoffe beeinflusst. Zusammenfassend handelt es sich bei allen bisherigen Ausführungen zur Klimabilanz um Momentaufnahmen unter der Berücksichtigung von aktuellen Annahmen, welche im Kapitel 2.6 ausführlich beschrieben worden sind. In diesem Kapitel sollen Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 im Vergleich zum Basisjahr 2025 dargestellt werden, um das Potenzial zur weiteren Reduzierung der Treibhausgase für die unterschiedlichen Antriebstechnologien und Kraftstoffe aufzuzeigen. In Abbildung 31 werden die Ergebnisse für die THG-Emissionen pro gefahrenem Kilometer zusammenfassend dargestellt. Die Annahmen und die verwendeten Quellen sind in Kapitel 2.6 und Anlage II detailliert dargestellt.

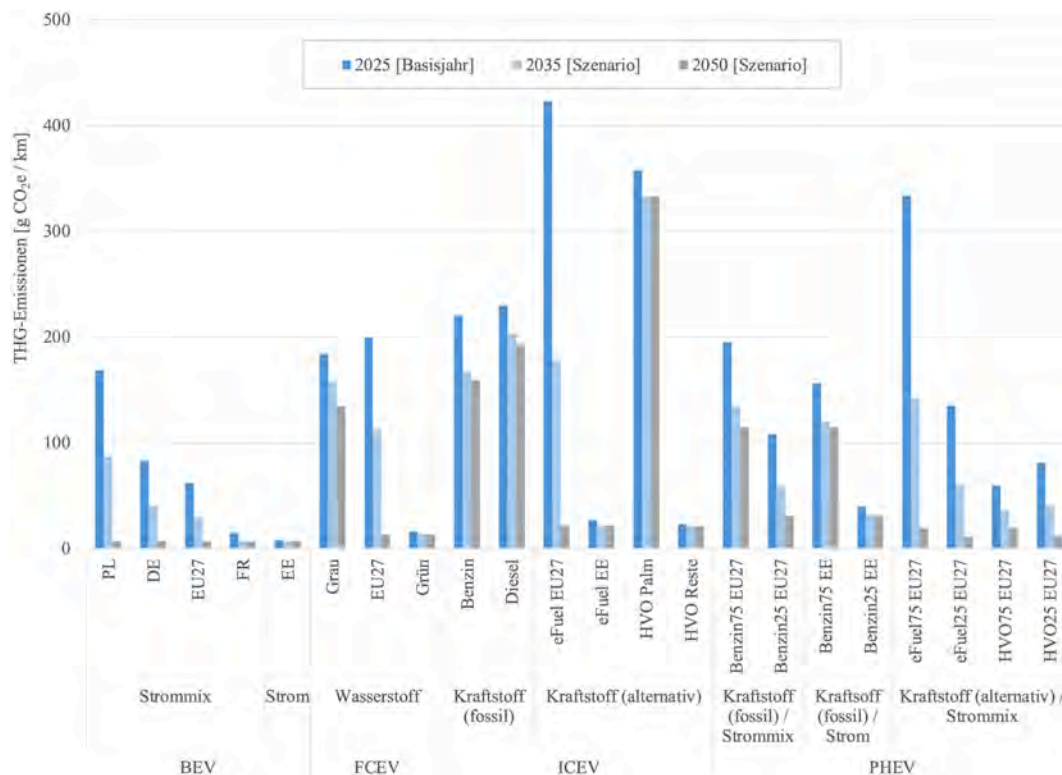


Abbildung 31: Vergleich der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050 für die unterschiedlichen Antriebstechnologien und Kraftstoffe

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) wurde die Annahme getroffen, dass der THG-Emissionsfaktor der Stromerzeugung der jeweiligen EU-Länder von dem Jahr 2025 bis 2050 linear auf den Wert von EE-Strom gesenkt werden kann. Der gegenwärtige THG-Emissionsfaktor von 287 g CO₂e/kWh würde bis 2035 auf 151 g CO₂e/kWh sinken und bis 2050 auf nur noch 35 g CO₂e/kWh fallen. Diese Annahme basiert darauf, dass die EU ihr Ziel der CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2050 weitestgehend erreichen wird. Die verbleibenden THG-Emissionen werden nur noch durch die Herstellung der Anlagen (z. B. PV-Anlagen) verursacht. Die Dekarbonisierung des Energiesektors zur Stromerzeugung bietet den größten Stellhebel zur weiteren Reduzierung der THG-Emissionen von batterieelektrischen Fahrzeugen. Weitere Potenziale zur Reduzierung von THG-Emissionen bieten technische Weiterentwicklungen des Antriebsstrangs, die mit 10 % Effizienzsteigerung im Jahr 2035 im Vergleich zum Referenzjahr 2025 angenommen wurden. Durch technologische Weiterentwicklungen bei den Traktionsbatterien wurde die Annahme getroffen, dass die Lebensdauer der BEVs kontinuierlich von 12 Jahren im Basisjahr 2025 auf 16 Jahre im Szenario für das Jahr 2050 gesteigert werden kann. Diese resultiert in einer gesteigerten Gesamtfahrleistung von 200.000 km statt nur 150.000 km. Die durchschnittlichen THG-Emissionen von 82 g CO₂e/km im Jahr 2025 könnten durchgängig für alle Länder auf 7 g CO₂e/km im Jahr 2050 gesenkt werden unter der Annahme, dass alle EU-Länder die CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2050 weitestgehend umgesetzt haben. Um diesen Zustand zu erreichen, ist die erfolgreiche Energiewende für alle EU-Länder obligatorisch.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

Bei den Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) verhält es sich in Bezug auf das Potenzial zur weiteren Reduzierung der THG-Emissionen im Rahmen der Well-to-Wheel-Analyse analog zu den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Den größten Stellhebel bietet auch hier der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien. Bei FCEV gibt es jedoch einen wichtigen Aspekt, der bei der Betrachtung der Szenarien deutlich wird. Im Jahr 2025 würde die Erzeugung von Wasserstoff unter Verwendung des Strommixes der Europäischen Union sogar mehr THG-Emissionen verursachen als beim Erdgasreforming, welches auf fossilem Erdgas basiert. Dies hängt mit dem energieintensiven Prozess und den entsprechenden Wirkungsgraden der Produktionsprozesse bei der Herstellung des Wasserstoffs zusammen (vergleiche Abbildung 27). Analog zu den batterieelektrischen Fahrzeugen wurde auch bei den FCEVs die Annahme getroffen, dass der THG-Emissionsfaktor zur Stromerzeugung der jeweiligen EU-Länder von dem Jahr 2025 bis 2050 linear auf den Wert von EE-Strom fällt. Weitere Potenziale zur Reduzierung von THG-Emissionen bieten technische

Weiterentwicklungen des Antriebsstrangs, die mit einer Reduzierung des Fahrzeugverbrauchs von 20 % im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzjahr 2025 angenommen wurden. Durch technologische Weiterentwicklungen bei den Brennstoffzellen wurde die Annahme getroffen, dass die Lebensdauer der FCEVs kontinuierlich von 12 Jahren im Basisjahr 2025 auf 16 Jahre im Szenario für das Jahr 2050 gesteigert werden kann. Dies resultiert in einer erhöhten Gesamtfahrleistung der PKWs von 240.000 km statt nur 150.000 km.

Beim Erdgasreforming werden ebenfalls Reduzierungen der THG-Emissionen aufgezeigt. Diese werden zum einen durch Effizienzsteigerungen beim Herstellungsprozess (10 % Effizienzsteigerung vom Jahr 2025 bis 2050) und zum anderen durch die Reduzierung des Fahrzeugverbrauchs und durch die Erhöhung der Gesamtlebensdauer des Fahrzeugs erzielt. Dennoch bleiben die THG-Emissionen bei FCEVs im Jahr 2050 die Wasserstoff aus Erdgasreforming verwenden, auf einem etwas geringeren Niveau als ICEVs, deren Betrieb mit fossilen Kraftstoffen erfolgt.

Im Jahr 2035 hat sich das Verhältnis geändert. Die Elektrolyse unter Verwendung des Strommixes der EU ist jetzt vorteilhafter als Wasserstoffproduktion durch Erdgasreforming, während es im Jahr 2025 genau umgekehrt war. Dennoch würden Brennstoffzellenfahrzeuge unter Verwendung von Wasserstoff, der mithilfe von Elektrolyse und unter Einsatz des EU-Strommixes hergestellt wurde, auch im Szenario für das Jahr 2035 vergleichsweise viele THG-Emissionen freisetzen. Mit dem Ziel, die durch Verkehr verursachten THG-Emissionen frühzeitig und signifikant zu verringern, weisen Brennstoffzellenfahrzeuge kurzfristig keine bedeutenden Einsparpotenziale auf. Auch mittelfristig ist eine nur begrenzte Reduktion der THG-Emissionen möglich. Langfristig bieten FCEVs ein hohes Potenzial zur Senkung der THG-Emissionen, wie in dem Szenario für das Jahr 2050 verdeutlicht wird. In der Übergangsphase bieten FCEVs nur bedingt das Potenzial zur Reduzierung von THG-Emissionen, welches fast ausschließlich von dem THG-Emissionsfaktor der Stromerzeugung abhängig ist.

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICEV)

Bei Fahrzeugen deren Verbrennungsmotoren mit fossilen Kraftstoffen (Benzin, Diesel) betrieben werden, ergeben sich auch in den kommenden Jahren Potenziale zur Reduzierung der THG-Emissionen pro gefahrene Kilometer. Diese werden insbesondere durch die weitere Hybridisierung erzielt, die Wietschel für Benzin mit 20 % und für Diesel mit 7 % Effizienzsteigerung bis zum Jahr 2035 voraussagt. Weitere Hybridisierung bedeutet in diesem Fall, dass davon auszugehen ist, dass alle Neuzulassungen im Szenario für das Jahr 2035 auf der Full-Hybrid-Technologie basieren.¹⁷⁵ Nach dem Jahr 2035 werden keine weiteren Effizienzsteigerungen mehr angenommen. Auch unter der Annahme dass alle PKWs, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, über einen Full-Hybrid Antriebsstrang verfügen, bleiben die THG-Emissionen auf einem Niveau, welches dazu führen würden, dass die EU das Ziel eines CO₂-Neutralen Verkehrssektors klar verfehlen würde.

Im Hinblick auf die Lebensdauer und Gesamtfahrleistung von ICEV wurden bei den Szenarien sowohl für fossile als auch für alternative Kraftstoffe keine Veränderungen im Vergleich zum Basisjahr 2025 angenommen. In Bezug auf alternative Kraftstoffe wurde bei den eFuels die fortschreitende Dekarbonisierung des Energiesektors zur Stromerzeugung analog zu BEVs und FCEVs berücksichtigt. Bei den eFuels besteht im Jahr 2035 eine ähnliche Problematik wie bei den FCEVs, die genauso Wasserstoff nutzen, der mit Elektrolyse anhand des EU-Strommixes hergestellt wurde. Die THG-Emissionen für eFuels im Jahr 2035 liegen beim Strommix EU27 auf einem ähnlichen Niveau wie bei den fossilen Kraftstoffen.

Unter der Annahme, dass im Jahr 2050 die vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors erzielt wurde, bieten eFuels ein sehr hohes Potenzial, um zusätzliche THG-Emissionen in der Nutzungsphase nahezu vollständig zu vermeiden. Es sei nochmals betont, dass eFuels durch den geschlossenen Kohlenstoffkreislauf in der Nutzungsphase zwar CO₂-neutral, aber trotzdem nicht emissionsfrei sind (vergleiche Kapitel 4.5). Wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt, können eFuels jedoch auch als Blend mit fossilen Kraftstoffen wie Benzin gemischt werden. Diese Beimischung könnte eine Option bieten, um den Markthochlauf von eFuels zu unterstützen.

Bei dem Biokraftstoff HVO100 zeigt sich ganz klar, dass der Einsatz von frischem Palmöl weder aktuell noch in Zukunft eine sinnvolle Option zur Dekarbonisierung des PKW-Sektors bieten würden. Die EU hat im Rahmen der Erneuerbare Energien-Richtlinie (RED II) beschlossen, den Einsatz von Palmöl

¹⁷⁵ Wietschel et al., 2022, S. 11.

für fortschrittliche Biokraftstoffe wie HVO100 ab dem Jahr 2023 zu beenden.¹⁷⁶ Der Einsatz von HVO100 aus Reststoffen bietet bereits jetzt und auch in der Zukunft ein sehr hohes Potenzial, um zusätzliche THG-Emissionen in der Nutzungsphase nahezu vollständig zu vermeiden. Auch hier sei analog zu den eFuels nochmals betont, dass HVO100 aus Reststoffen durch den geschlossenen Kohlenstoffkreislauf in der Nutzungsphase zwar CO₂-neutral, aber trotzdem nicht emissionsfrei sind (vergleiche Kapitel 4.1). Zudem wird der Markthochlauf und die Gesamtmenge des zukünftig verfügbarem HVO100 durch die Menge der verfügbaren Reststoffe, wie Altspeiseöl oder tierischen Fetten, begrenzt (vgl. Kapitel 2.4).

Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV)

Analog zu Kapitel 3.5 wurden erneut die Fahranteile der beiden Antriebsarten betrachtet. Zum einen wurden 75 % verbrennungsmotorische und 25 % elektrische und zum anderen 25 % verbrennungsmotorische und 75 % elektrische Fahranteile als Sensitivitäten betrachtet. Für Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEVs) wurden ähnliche Annahmen wie bei BEV und ICEV getroffen. Die THG-Emissionen des verbrennungsmotorischen Fahranteils sinken leicht durch Effizienzsteigerungen bei den Verbrennungsmotoren und der elektrische Fahranteil wird maßgeblich durch den EU-Strommix beeinflusst.

Bei den PHEVs, die mit Benzin und EU-Strommix betrieben werden ergeben sich erhebliche Einsparpotenziale der THG-Emissionen insbesondere durch die kontinuierlich sinkenden THG-Emissionen der Stromerzeugung beim EU-Strommix. Auch in Zukunft bieten PHEVs, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, nur dann ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung von THG-Emissionen, wenn der elektrische Fahranteil deutlich die verbrennungsmotorischen Fahranteile überwiegt.

Auch bei dem alternativen Kraftstoff HVO100 lassen sich durch die fortschreitende Dekarbonisierung des europäischen Energiesektors weitere Reduzierungen der THG-Emissionen erzielen. Bei den eFuels die mit EU-Strommix hergestellt werden, ergeben sich erhebliche Reduktionspotenziale der THG-Emissionen nur in Verbindung mit der weitestgehenden Dekarbonisierung des Energiesektors zur Stromerzeugung. Im Basisjahr 2025 würden die THG-Emissionen in der Nutzungsphase mit hohem verbrennungsmotorischem Fahranteil sogar deutlich über denen von Verbrennungsmotoren liegen, die mit fossilen Kraftstoffen (Benzin) angetrieben werden. Auch im Szenario für das Jahr 2035 ergeben sich in der Nutzungsphase für PHEVs, die mit eFuels

¹⁷⁶ Allekotte et al., 2024, S. 168.

mit hohem verbrennungsmotorischem Anteil betrieben werden, ähnliche THG-Emissionen wie bei fossilen Kraftstoffen (ICEV-Benzin). Auf eine gesonderte Darstellung von eFuels mit EE-Strom wurde aufgrund der aktuell und in naher Zukunft nicht vorhandenen Kommerzialisierung verzichtet. Jedoch zeigt das Szenario für PHEVs die im Jahr 2050 eFuels nutzen auf, dass die THG-Emissionen sowohl beim Strommix als auch beim EE-Strom für das Laden der Traktionsbatterie auf ein geringes Niveau sinken. Dennoch ist die Gesamtenergieeffizienz auf einem sehr niedrigen Niveau.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 entwickelt, um das Potenzial zur weiteren Reduzierung der THG-Emissionen verschiedener Antriebstechnologien und Kraftstoffe bzw. Energieträger im Vergleich zum Basisjahr 2025 zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die weitere Dekarbonisierung des Energiesektors zur Stromerzeugung für die Senkung der THG-Emissionen von BEVs und FCEVs entscheidend ist. Während BEVs kurz-, mittel- und langfristig erhebliche Einsparungen bieten, bleibt das Potenzial von FCEVs in der Übergangsphase begrenzt. Alternative Kraftstoffe können ebenfalls einen signifikanten Beitrag leisten, vorausgesetzt, die Energiequellen werden vollständig dekarbonisiert.

5 Vergleichende Lebenszyklusanalyse (LCA): THG-Emissionen verschiedener Antriebstechnologien von PKWs in den Jahren 2025, 2035 und 2050 im Kontext der Europäischen Union

5.1 Vergleichende Cradle-to-Gate-Analyse (CtG): THG-Emissionen in der Herstellungsphase von PKWs

In den vorherigen Kapiteln wurden die Potenziale der unterschiedlichen Antriebstechnologien und alternativer Kraftstoffe in Bezug auf die Senkung der THG-Emissionen in der Nutzungsphase von PKWs aufgezeigt. Dabei wurde nachgewiesen, dass sowohl alternative Antriebstechnologien als auch alternative Kraftstoffe einen Beitrag zur signifikanten Reduzierung von Treibhausgasen leisten können. In diesem und den nachfolgenden Kapiteln werden zusätzlich die weiteren Lebenszyklusphasen, wie die Herstellungsphase (Cradle-to-Gate) und auch die Phase des Nutzungsendes (End-of-Life), berücksichtigt.

Für die Fahrzeugherstellung werden für die Cradle-to-Gate-Analyse verschiedene Fahrzeugkomponenten, wie die Karosserie (Rumpf), der Antriebsstrang und die Batterie unterschieden. Zusätzlich werden auch spezifische Komponenten wie die Brennstoffzelle und der Wasserstofftank von Brennstoffzellenfahrzeugen separat dargestellt, da diese einen erheblichen Anteil der THG-Emissionen in der CtG-Phase emittieren.¹⁷⁷ In Tabelle 18 werden diese Zusammenhänge visualisiert.

¹⁷⁷ Wietschel et al., 2022, S. 23 ff.

Tabelle 18: Fahrzeugkomponenten der verschiedenen Antriebstechnologien

Fahrzeugkomponente	Antriebstechnologie			
	BEV	FCEV	ICE	PHEV
Rumpf (Karosserie)	✓	✓	✓	✓
Konventioneller Antrieb			✓	✓
Elektroantrieb	✓	✓	(✓)	✓
Traktionsbatterie (Batterie)	✓	✓	(✓)	✓
Brennstoffzelle		✓		
H2-Tank		✓		

Bei sämtlichen Antriebstechnologien werden die individuellen THG-Emissionen der Karosserie berücksichtigt, wobei sich aber keine gravierenden Unterschiede zwischen den Antriebstechnologien ergeben. Die zum Teil erheblichen Unterschiede der THG-Emissionen resultieren insbesondere aus den anderen Komponenten wie dem Antriebsstrang und der Traktionsbatterie oder Brennstoffzelle. Bei den Verbrennungsmotoren werden verschiedene Grade der Hybridisierung berücksichtigt. Aufgrund dessen werden der Elektroantrieb und die Batterie für ICEV nur bei den Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 berücksichtigt. Für alle Komponenten werden sowohl die aktuellen THG-Emissionen aus dem Jahr 2025 als auch zusätzlich Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 berücksichtigt.

Zahlreiche Studien zu THG-Emissionen von PKWs berücksichtigen nur die Nutzungsphase. Dennoch gibt es mehrere Studien, welche den gesamten Lebenszyklus und somit auch die THG-Emissionen der PKW-Herstellung einbeziehen. Die berechneten Werte unterscheiden sich bei den jeweiligen Studien, jedoch sind die Proportionen zwischen den einzelnen Antriebstechnologien vergleichbar.

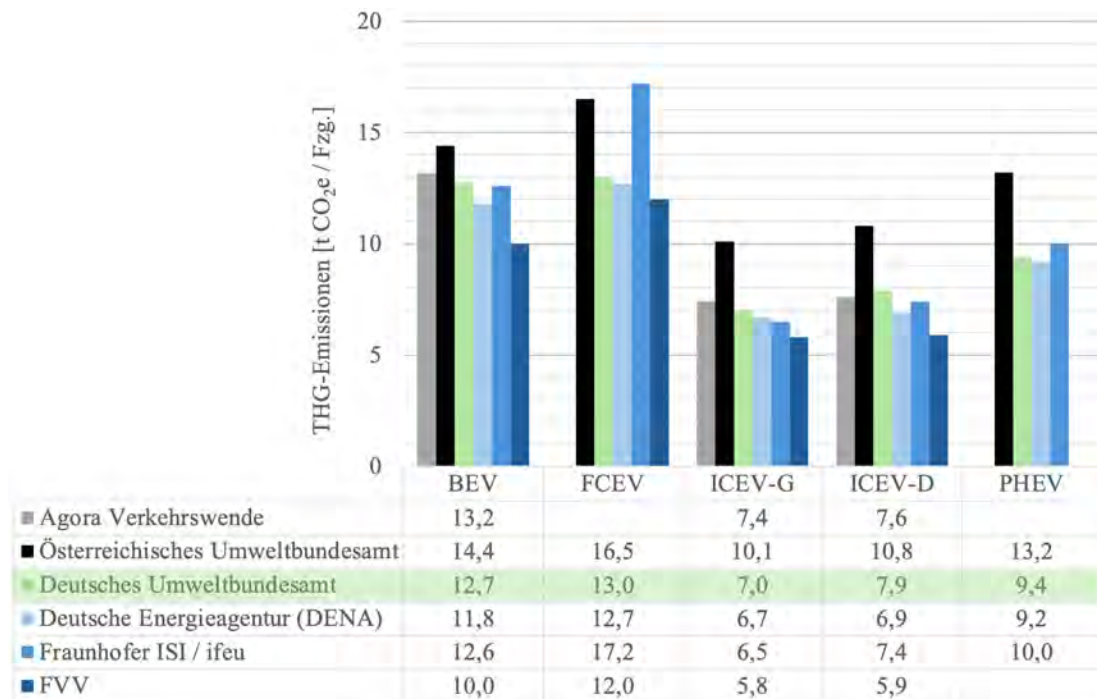


Abbildung 32: Vergleichende Analyse der berechneten Cradle-to-Gate-THG-Emissionen aus verschiedenen Studien

In der Abbildung 32 werden die Berechnungen der verschiedenen Studien vergleichend dargestellt. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden die Ergebnisse der Kompaktklasse dargestellt, da diese Fahrzeugkategorie in allen aufgeführten Studien verwendet wurde.¹⁷⁸ Bei der Herstellung von PKWs mit Benzinmotoren (ICEV-G) und Dieselmotoren (ICEV-D) entstehen keine signifikanten Unterschiede. Agora Verkehrswende betrachtet nur BEV und ICEV und berücksichtigt aktuelle Werte, die im Jahr 2019 veröffentlicht wurden.¹⁷⁹ Das Österreichische Umweltbundesamt berücksichtigt alle im Rahmen dieser Masterarbeit berücksichtigten Antriebstechnologien und betrachtet verschiedene Fahrzeugklassen mit aktuellen Werten, die im Jahr 2021 veröffentlicht wurden.¹⁸⁰ Die Werte sind höher als bei den anderen Studien.

Die Veröffentlichung vom Deutschen Umweltbundesamt aus dem Jahr 2024 ist sehr aktuell und berücksichtigt neben den aktuellen Werten auch Szenarien für die Jahre 2030 und 2050.¹⁸¹ Die Werte des Deutschen Umweltbundesamtes liegen ungefähr in der Mitte der Spannweite der unterschiedlichen

¹⁷⁸ Außer bei der Metastudie vom FVV.

¹⁷⁹ Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 42.

¹⁸⁰ David et al., 2021, S. 45.

¹⁸¹ Biemann et al., 2024, S. 177 ff.

Studienergebnisse. Die Deutsche Energieagentur kommt mit seiner Veröffentlichung aus dem Jahre 2021 in etwa zu den gleichen Ergebnissen, wie das Deutsche Umweltbundesamt. Die Besonderheit an dieser Studie ist, dass neben allen Antriebstechnologien mit Sensitivitäten für die Fahrzeugkategorien zusätzlich zu den aktuellen Werten aus dem Jahr 2020 auch Szenarien für die Jahre 2030 und 2040 berücksichtigt werden.¹⁸²

Das Fraunhofer ISI und das Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) kommen bei Brennstoffzellenfahrzeugen zu deutlich höheren THG-Emissionen als die meisten anderen Studien, zeigen dabei für alle anderen Antriebstechnologien vergleichbare Ergebnisse zu den anderen Studien auf. Allerdings werden nur die Kompaktklasse und aktuelle Werte berücksichtigt.¹⁸³ Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) veröffentlichte im Jahr 2020 eine Metastudie, welche die typischen Bereiche aufzeigt, die in anderen Studien für die Herstellungsmethoden ermittelt wurden. In Abbildung 32 wurde der Mittelwert der Metastudie übernommen. Genaue Angaben zur Fahrzeugkategorie lassen sich dieser Metastudie nicht entnehmen und es werden auch keine Szenarien dargestellt.¹⁸⁴

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Werte vom Deutschen Umweltbundesamt übernommen, da es sich um eine sehr aktuelle Studie handelt, welche auch zukünftige Szenarien beinhaltet. Zusätzlich werden die Berechnungen ausführlich dargelegt und alle wichtigen Antriebstechnologien werden berücksichtigt. Die Werte aus der Studie wurden jedoch um 15 % erhöht um die Fahrzeugkategorie der SUVs statt der Kompaktklasse zu berücksichtigen, da auch in den Betrachtungen zu den THG-Emissionen in der Nutzungsphase in den Kapiteln 3 und 4 diese Fahrzeugkategorie zugrunde gelegt wurde. Jander berücksichtigt neben Kleinwagen auch die Kompaktklasse und SUVs. Die Werte für SUVs sind nach Jander ca. 15 % höher als für die Kompaktklasse.

¹⁸² Jander et al., 2021, S. 54 f.

¹⁸³ Wietschel et al., 2022, S. 27.

¹⁸⁴ Bothe et al., 2020, S. 33.

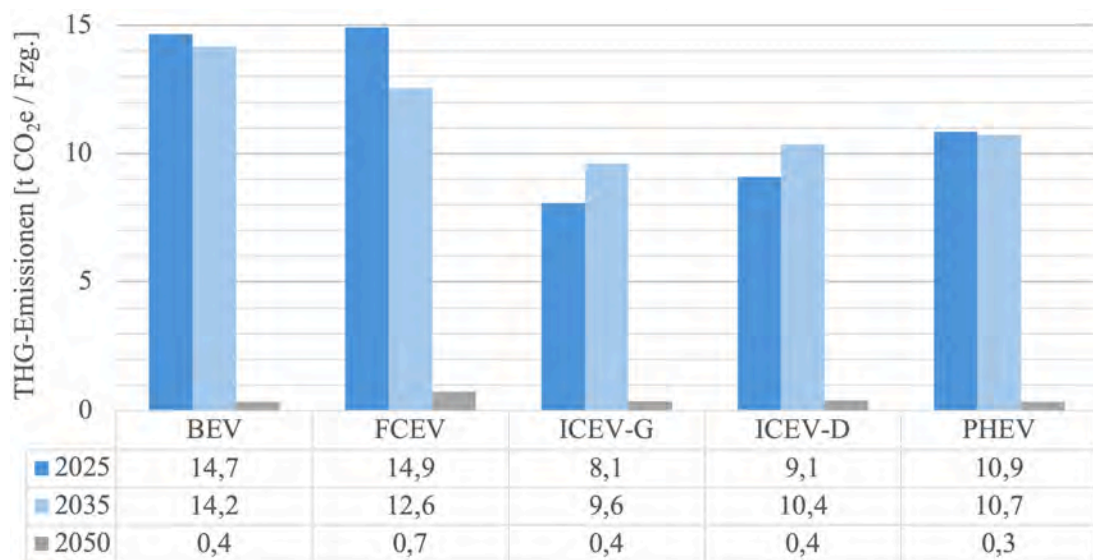


Abbildung 33: Cradle-to-Gate-THG-Emissionen pro Fahrzeug im Jahr 2025, 2035 und 2050

Die THG-Emissionen der Herstellung eines Fahrzeugs werden in Abbildung 33 vergleichend pro Antriebstechnologie einschließlich der Szenarien visualisiert. Die THG-Emissionen der Herstellung liegen bei den alternativen Antriebstechnologien höher als bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Während in den Jahren 2025 und 2035 keine gravierenden Veränderungen stattfinden, sinken die THG-Emissionen im Jahr 2050 signifikant unter der Annahme, dass die Produktionsprozesse weitestgehend defossilisiert sind (vgl. Kapitel 2.6).

Um die Unterschiede in den THG-Emissionen der Herstellung von PKWs genauer zu verstehen, ist eine Aufteilung der Emissionen nach den wichtigsten Fahrzeugkomponenten zielführend (vgl. Tabelle 18). In der Abbildung 34 werden die Anteile der jeweiligen Fahrzeugkomponenten an den Gesamtemissionen visualisiert.

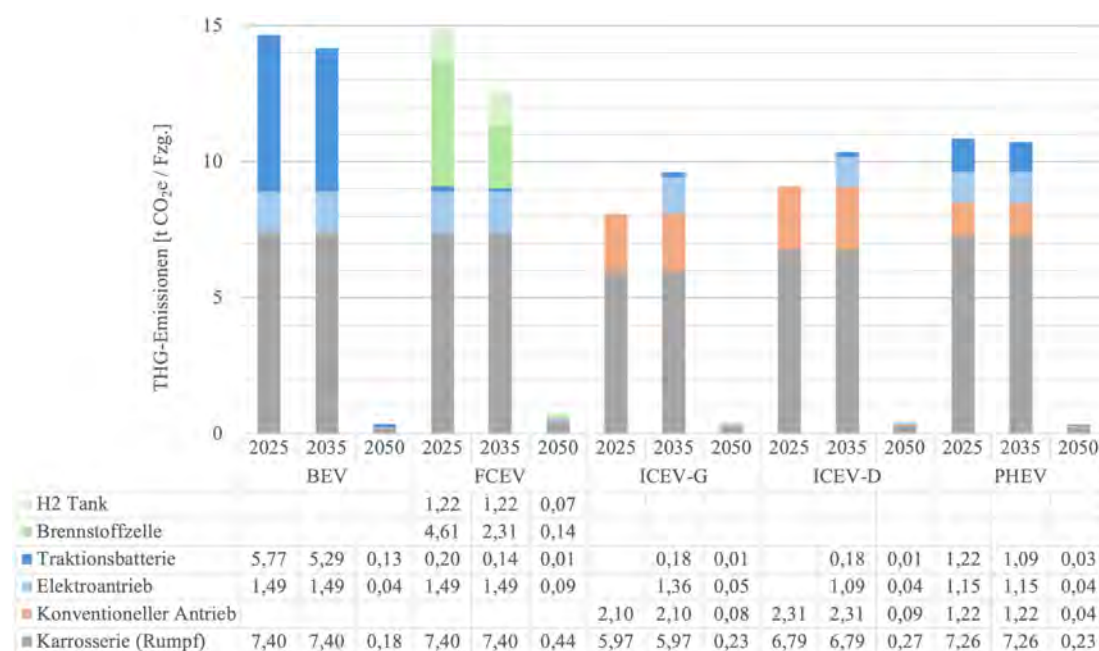


Abbildung 34: Cradle-to-Gate THG-Emissionen pro Fahrzeug nach Fahrzeugkomponenten

Die THG-Emissionen bei der Herstellung des Rumpfs (Karosserie) unterscheiden sich für die verschiedenen Antriebstechnologien nur in geringerem Maße. Die deutlich höheren Herstellungsemissionen von BEVs werden insbesondere durch die zusätzlichen Emissionen bei der Herstellung der Traktionsbatterie verursacht. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen werden die zusätzlichen Emissionen hauptsächlich durch die Brennstoffzelle und auch durch den Wasserstofftank hervorgerufen. Sowohl bei den BEVs als auch bei den FCEVs werden Reduzierungen der THG-Emissionen von Jahr 2025 bis 2035 durch technologische Fortschritte erwartet (vgl. Kapitel 2.6). Bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wurde die Annahme getroffen, dass alle Fahrzeuge bis 2035 mit einem Full-Hybrid Antriebsstrang ausgestattet sein werden. Dadurch entstehen höhere Emissionen im Jahr 2035 im Vergleich zu den aktuellen Emissionen (vgl. Kapitel 2.6).

5.2 Vergleichende End-of-Life-Analyse (EoL): THG-Emissionen beim Nutzungsende von PKWs

Im Vergleich zu den THG-Emissionen der Herstellung von PKWs werden im Rahmen der Entsorgung der Fahrzeuge deutlich weniger Emissionen freigesetzt. Die Menge der freigesetzten Emissionen ist auch bei den End-of-Life-Emissionen bei den alternativen Antriebstechnologien höher als bei den Fahrzeugen mit klassischen Verbrennungsmotoren. Für alle Antriebstechnologien werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten sinkenden THG-Emissionen aufgrund fortschreitender Defossilisierung des Produktionssektors erwartet.¹⁸⁵

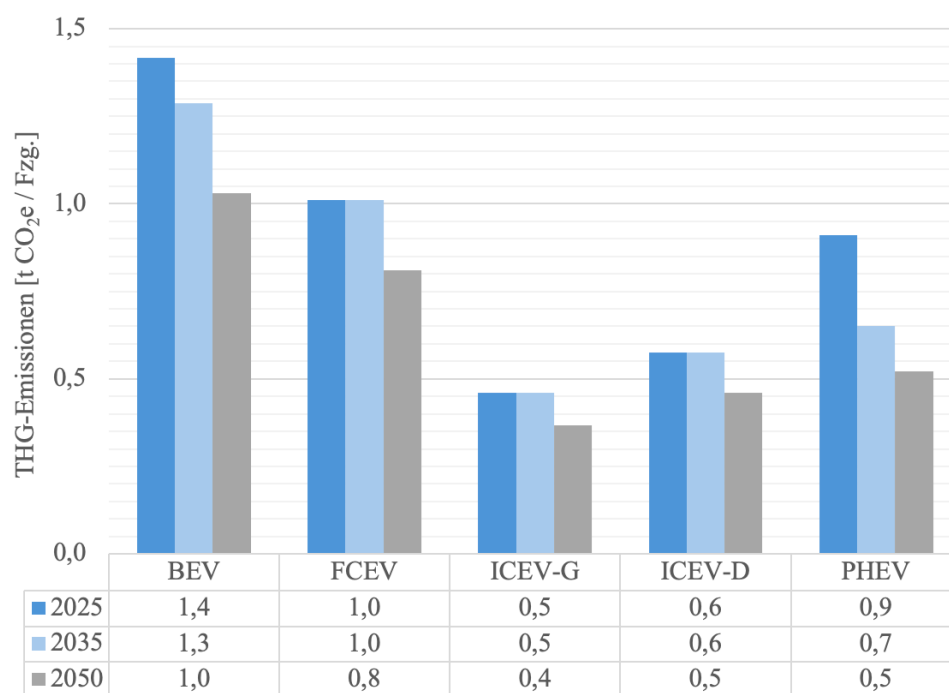


Abbildung 35: End-of-Life-THG-Emissionen pro Fahrzeug im Jahr 2025, 2035 und 2050

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden analog zu den CtG-Emissionen auch die Werte für die EoL-Emissionen vom Deutschen Umweltbundesamt übernommen. Auch hier wurden die Werte aus der Studie um 15 % erhöht, um die Fahrzeugkategorie der SUVs statt der Kompaktklasse zu berücksichtigen, da auch in den Betrachtungen zu den THG-Emissionen in der Nutzungsphase SUVs zugrunde gelegt wurden.

¹⁸⁵ Biemann et al., 2024, S. 106 f.

Basierend auf der isolierten Betrachtung der THG-Emissionen, die im Rahmen der End-of-Life-Analyse freigesetzt werden, sind diese Emissionen im Vergleich zu den anderen Phasen des Lebenszyklus eines PKWs von geringerer Bedeutung. Für die End-of-Life-Phase (EoL) gibt es jedoch Aspekte, welche sich signifikant auf andere Lebenszyklusphasen, wie beispielsweise den Herstellungsprozess auswirken können. Im Kapitel 5.1 wurde hervorgehoben, dass die Traktionsbatterien für alternative Antriebstechnologien einen erheblichen Anteil an den Treibhausgasemissionen der Cradle-to-Gate-Phase verursachen. Bei einem batterieelektrischen Fahrzeug beträgt der Anteil der Traktionsbatterie ca. 40 % der THG-Emissionen (vgl. Abbildung 34).

Mit zunehmendem Markthochlauf der Elektrofahrzeuge und aufgrund des voraussichtlich hohen Marktwerts der Traktionsbatterien nach dem Ende des PKW-Lebenszyklus gibt es verschiedenen Optionen für gebrauchte Traktionsbatterien. Eine der End-of-Life-Optionen stellt das Recycling dar, um durch effiziente Materialrückgewinnung und steigende Recyclingquoten THG-Emissionen bei der Herstellung von neuen Traktionsbatterien reduzieren. Bei einer sektorenübergreifenden Betrachtung bietet sich auch die Möglichkeit einer Zweitnutzung der Batterien für andere Sektoren wie beispielsweise stationäre Anwendungen.¹⁸⁶

Dieser Second-Life-Ansatz wird voraussichtlich in Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnen. Da diese Thematik derzeit noch am Anfang der Entwicklung steht, wurden Second-Life-Optionen in den Bilanzierungen dieser Masterarbeit nicht berücksichtigt.¹⁸⁷ Die Auswirkungen von End-of-Life-Optionen für Traktionsbatterien auf die Ökobilanz von PKWs sollte im Rahmen weiterer Forschungen detaillierter untersucht werden.

¹⁸⁶ Biemann et al., 2024, S. 142 ff.

¹⁸⁷ Wietschel et al., 2022, S. 41.

5.3 Lebenszyklusanalyse (LCA) von BEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050

In den bisherigen Kapiteln wurden die THG-Emissionen der einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs betrachtet. In diesem und den folgenden Kapiteln werden die THG-Emissionen aller Lebenszyklusphasen vergleichend dargestellt. Zusätzlich werden die voraussichtlichen Veränderungen für die Szenarien in den Jahren 2035 und 2050 aufgezeigt.

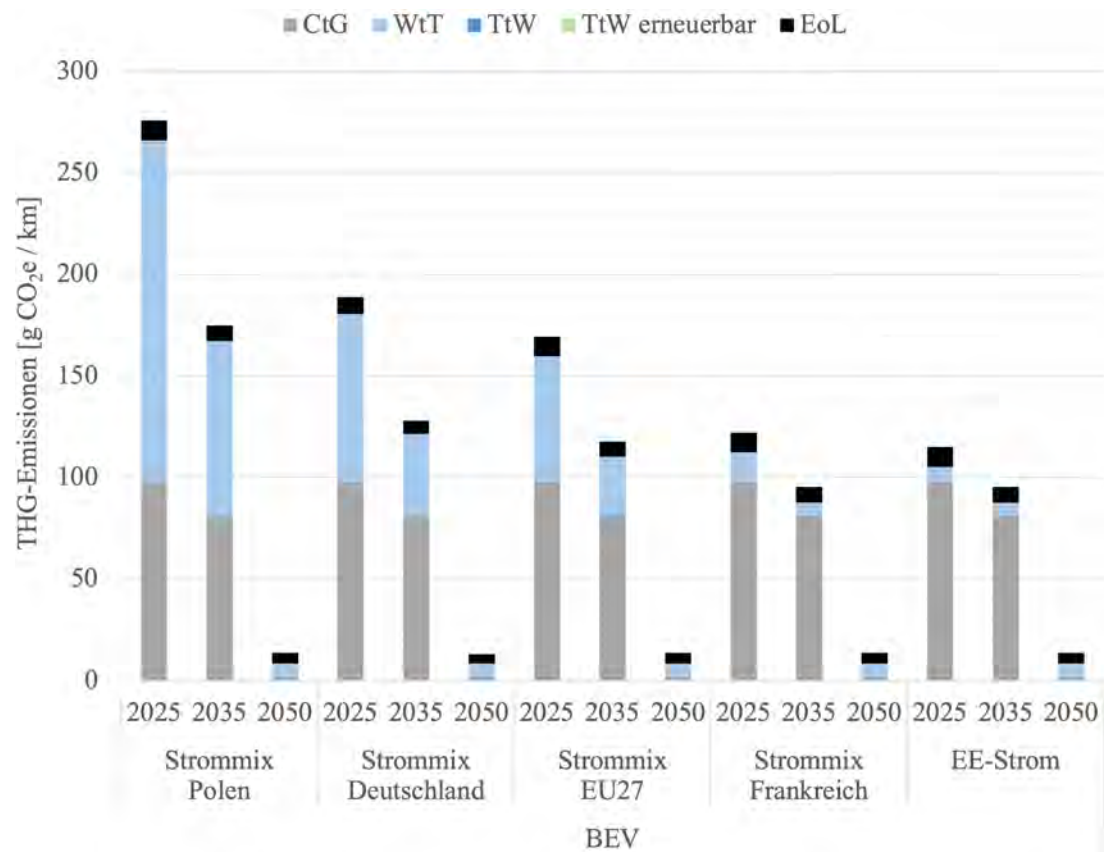


Abbildung 36: Lebenszyklus-THG-Emissionen von BEVs in den Jahren 2025, 2035 und 2050

In der Abbildung 36 werden die THG-Emissionen für die jeweiligen Sensitivitäten für batterieelektrische Fahrzeuge visualisiert. Sowohl aktuell als auch zukünftig sollte der Fokus der Reduzierung von Treibhausgasemissionen auf die Cradle-to-Gate-Phase und Well-to-Tank-Phase gelegt werden. Einen wesentlichen Beitrag zur Senkung von THG-Emissionen kann durch die erfolgreiche Energiewende (vgl. Kapitel 4.2) erzielt werden, welche zu einer kontinuierlichen Senkung der Emissionsfaktoren der Stromerzeugung beiträgt.

Weitere wichtige Aspekte zur THG-Emissionsreduzierung bei BEVs bieten die Senkung der Emissionen in der Herstellungsphase durch Second-Life-Optionen (vgl. Kapitel 5.2) und insbesondere durch die Defossilisierung der gesamten Industrie (vgl. Kapitel 5.1). Das Szenario für das Jahr 2050 verdeutlicht, dass sowohl beim Einsatz von EE-Strom (z. B. beim Laden des PKWs anhand der privaten PV-Anlage) als auch bei dem Strommix der jeweiligen Länder eine nahezu emissionsfreie Elektromobilität potenziell möglich ist.

Da die aktuellen EU-Abgasnormen ausschließlich Emissionen der TtW-Phase berücksichtigen, gelten BEVs als emissionsfreie Fahrzeuge.¹⁸⁸ Dennoch zeigt die Betrachtung der gesamten Lebenszyklusanalyse klar auf, dass auch bei BEVs signifikante Reduzierungen der THG-Emissionen erzielt werden müssen, um die von der EU angestrebte Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 zu erreichen.

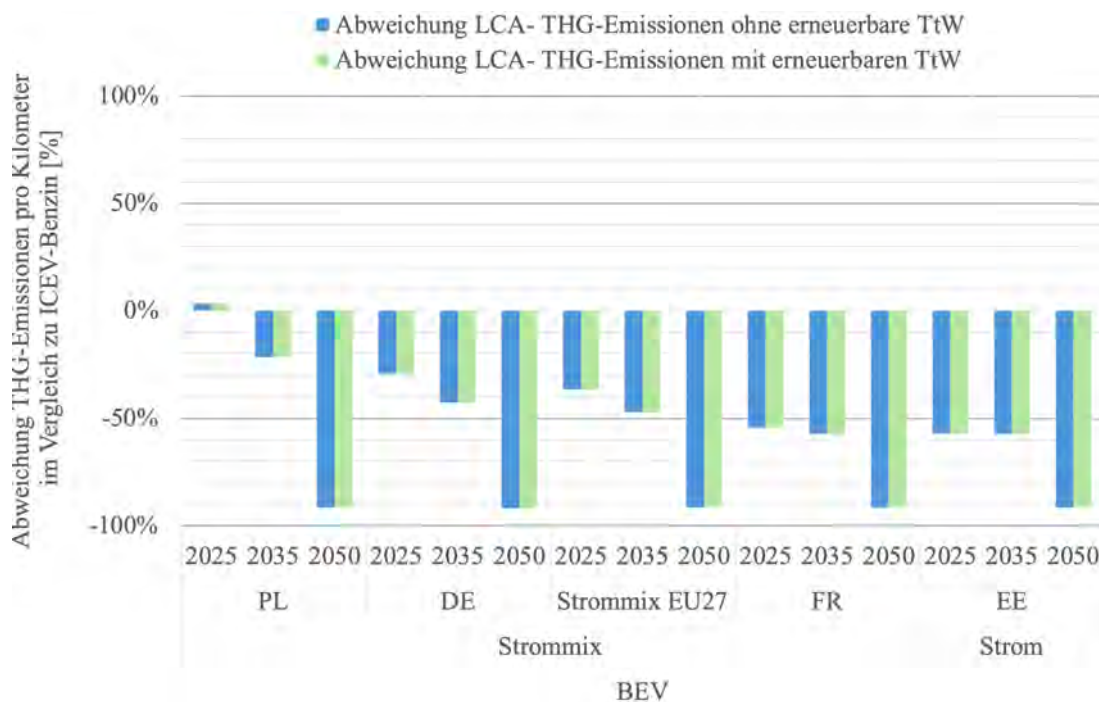


Abbildung 37: Vergleich der LCA-THG-Emissionen von BEVs zu ICEV-G

In Abbildung 37 werden die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von batterieelektrischen Fahrzeugen mit der Referenz eines ICEV-Benziners vergleichend dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Einsparungen von THG-Emissionen in den Szenarien deutlich zunehmen. Auch für das aktuelle Jahr 2025 werden in fast allen Ländern THG-Emissionen eingespart, wenn BEVs statt ICEV-Benzinern eingesetzt werden. Nur in Polen werden basierend

¹⁸⁸ Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 33.

auf dem aktuellen landesspezifischen Emissionsfaktor der Stromerzeugung keine THG-Emissionen eingepreist. Bei der isolierten Betrachtung der THG-Emissionen in der Nutzungsphase (Well-to-Wheel) wurden 72 % Einsparpotenzial für das Jahr 2025 beim Einsatz eines BEV mit europäischem Strommix ausgewiesen (vgl. Abbildung 21). Bei der Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus sinken die Emissionseinsparungen auf 37 % (vgl. Abbildung 37). Das kurzfristige Einsparpotenzial an THG-Emissionen durch Umstellung auf BEV ist bei der Lebenszyklusanalyse deutlich geringer als bei der isolierten Betrachtung der Nutzungsphase (Well-to-Wheel).

5.4 Lebenszyklusanalyse (LCA) von FCEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050

In Bezug auf die Lebenszyklus-THG-Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den batterieelektrischen Fahrzeugen, da die meisten Emissionen in der Cradle-to-Gate-Phase oder der Well-to-Tank-Phase freigesetzt werden. Ähnlich wie bei BEVs werden auch bei FCEVs keine THG-Emissionen in der reinen Tank-to-Wheel-Betrachtung freigesetzt.

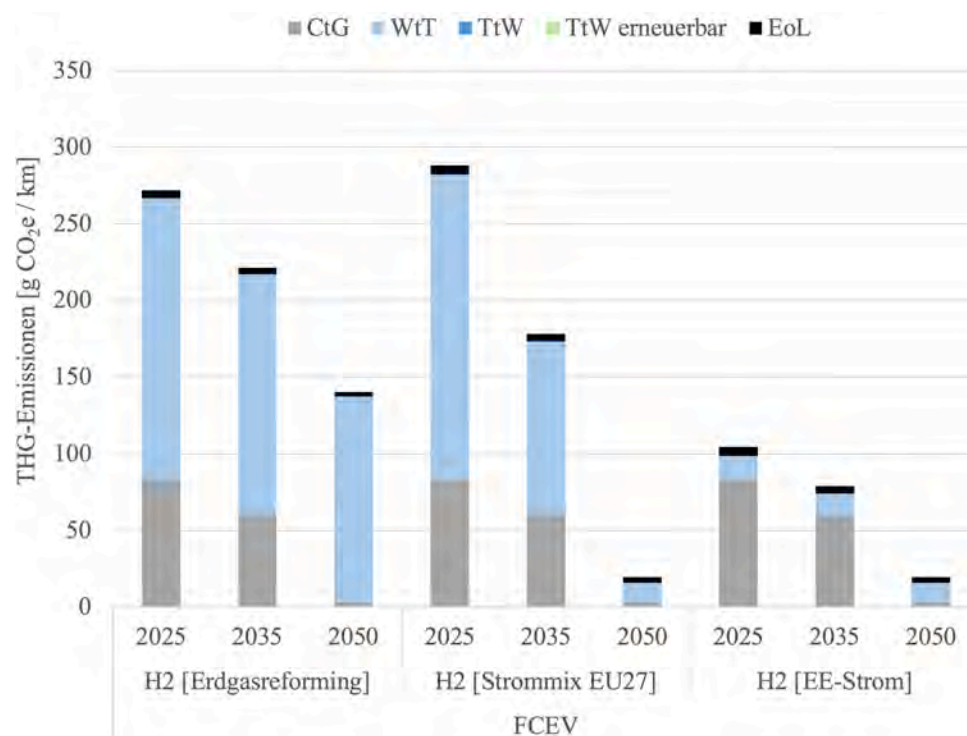


Abbildung 38: Lebenszyklus-THG-Emissionen von FCEVs in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Während bei den BEVs aktuell für die meisten Sensitivitäten die THG-Emissionen der Herstellung (CtG) dominieren, entstehen bei den derzeit verbreiteten Herstellungsmethoden für Wasserstoff signifikante Mengen an THG-

Emissionen. Folglich erzielen Brennstoffzellenfahrzeuge aktuell keine nennenswerten Vorteile gegenüber PKWs mit konventionellen Verbrennungsmotoren (vgl. Abbildung 39). Durch den geringeren Gesamtwirkungsgrad von FCEVs im Vergleich zu BEVs entstehen bei der WtT-Betrachtung deutlich höhere THG-Emissionen. Ein langfristiges Potenzial zur CO₂-Neutralität bieten nur die strombasierten Herstellungsmethoden, bei denen der Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt wird. Eine erfolgreiche Energiewende ist Grundvoraussetzung, um die THG-Emissionen signifikant zu senken.

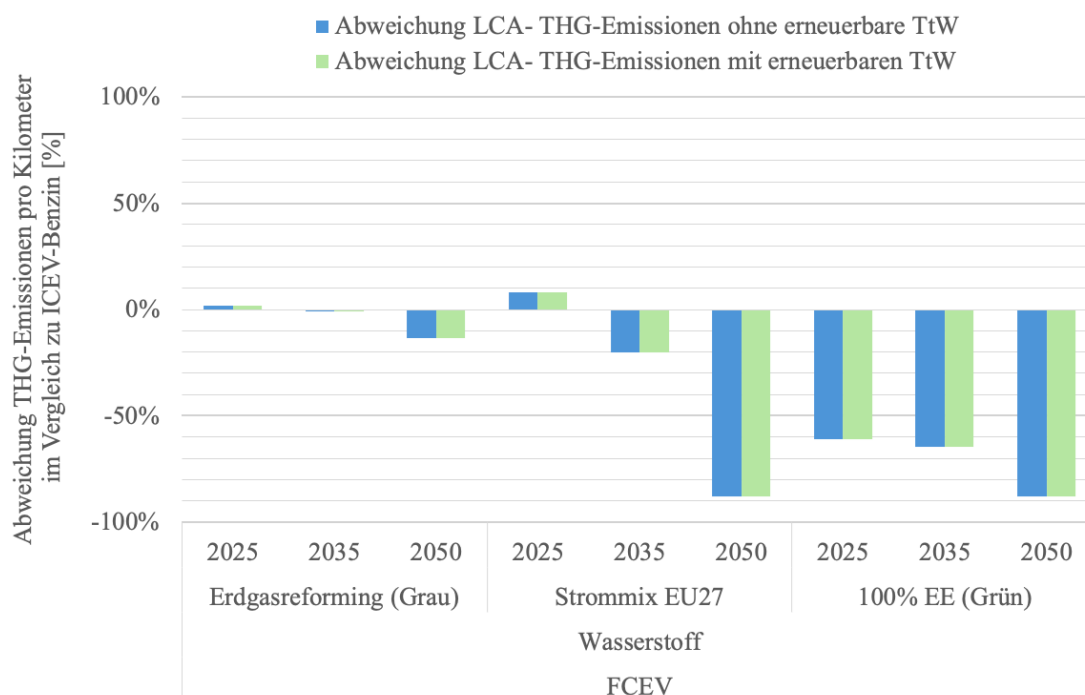


Abbildung 39: Vergleich der LCA-THG-Emissionen von FCEVs zu ICEV-G

Bei der Sensitivität mit Wasserstoff, der anhand von Elektrolyse mit Strom aus 100 % EE hergestellt wurde, ergeben sich signifikante Einsparpotenziale in Bezug auf THG-Emissionen. Jedoch ist die Verfügbarkeit derzeit noch begrenzt und steht mit anderen Sektoren in Konkurrenz, die ebenfalls grünen Wasserstoff benötigen, um die Dekarbonisierung voranzutreiben (vgl. Kapitel 2.3). Der aktuell weit verbreitete graue Wasserstoff, der auf Erdgasreforming basiert, ist weder derzeit noch in Zukunft eine sinnvolle Option, um Treibhausgase anhand von Brennstoffzellenfahrzeugen signifikant zu reduzieren.

5.5 Lebenszyklusanalyse (LCA) von ICEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Bei der Betrachtung der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ein deutlich komplexeres Bild als bei BEV oder FCEV. Bei den fossilen Kraftstoffen wie Benzin und Diesel dominieren die THG-Emissionen der Tank-to-Wheel-Phase. Die EU-Grenzwerte zu Treibhausgasemissionen adressieren die aus heutiger Sicht wichtigste Lebenszyklusphase. Zwischen Benzinern und Fahrzeugen mit Diesel-Verbrennungsmotor ergeben sich auch über den gesamten Lebenszyklus keine signifikanten Unterschiede. Die Unterschiede entstehen hauptsächlich durch die unterschiedlichen Laufleistungen und Lebensdauern bei der Bilanzierung der THG-Emissionen von ICEV-G und ICEV-D.

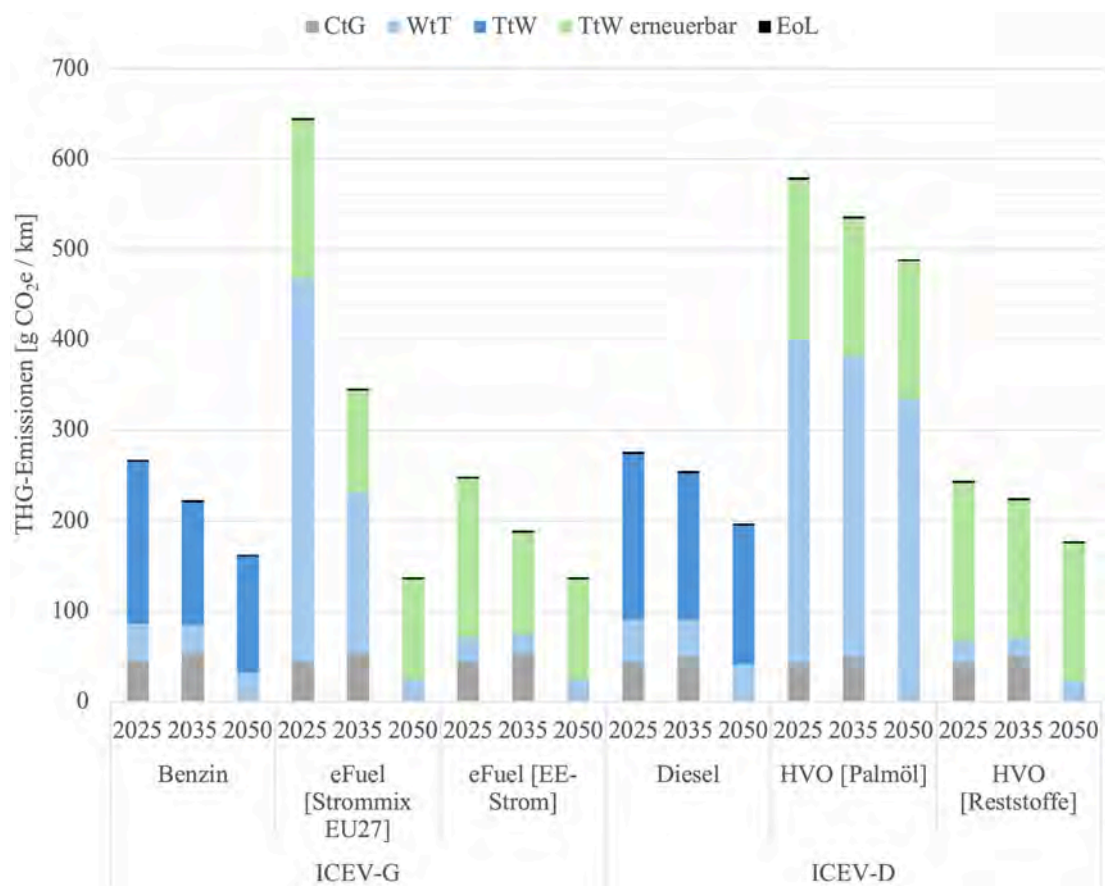


Abbildung 40: Lebenszyklus-THG-Emissionen von ICEVs in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Weitere Potenziale zur Senkung der THG-Emissionen von PKWs mit klassischen Antriebstechnologien sind auch in den nächsten Jahren vorhanden. Jedoch zeigt sich, dass auch im Jahr 2050 in einer weitestgehend defossilisierten Industrie signifikante THG-Emissionen bei der Nutzung von fossil angetriebenen PKWs freigesetzt würden.

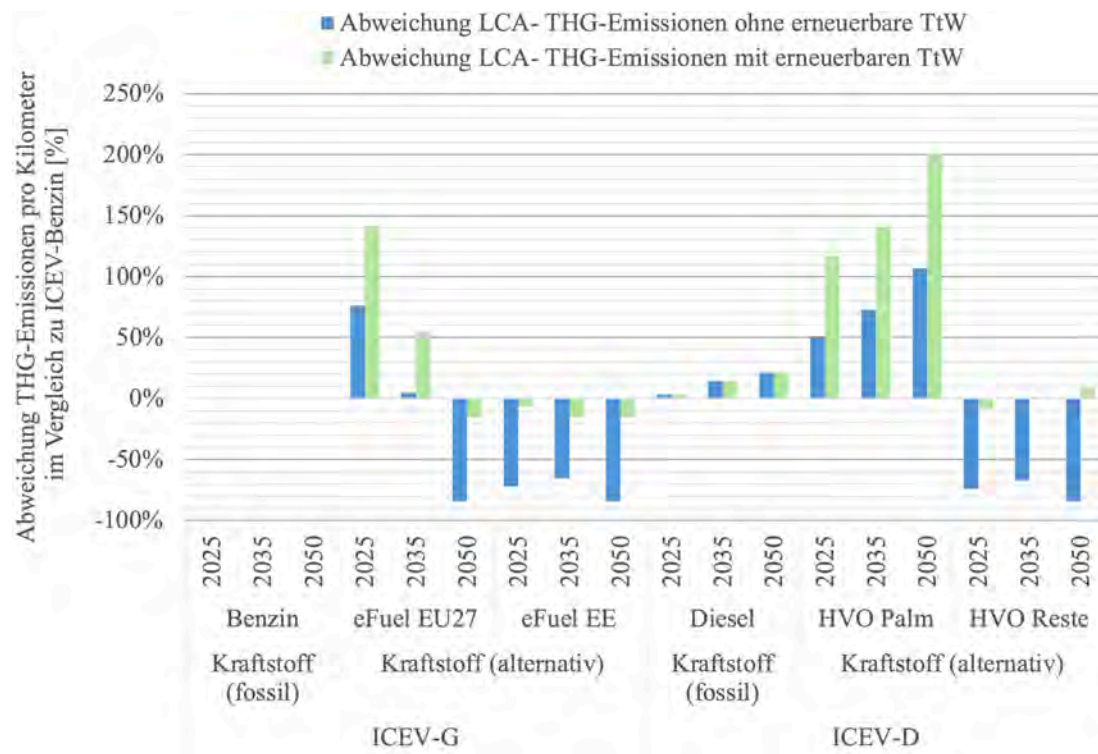


Abbildung 41: Vergleich der LCA-THG-Emissionen von ICEVs zu ICEV-G

Unter Vernachlässigung der erneuerbaren TtW-Emissionen bieten PKWs, die mit eFuels betrieben werden, auch aktuell signifikante Potenziale zur Reduzierung der THG-Emissionen, falls die eFuels ausschließlich unter Einsatz von erneuerbaren Energien hergestellt werden. Auch langfristig bieten eFuels ein hohes Potenzial zur Senkung der THG-Emissionen. Dennoch setzen PKWs, die mit eFuels angetrieben werden, lokale THG-Emissionen frei, wie die grünen Balken in der Abbildung 40 verdeutlichen. Wie bereits im Kapitel 4.5 ausführlich beschrieben, ist die Thematik eFuels deutlich komplexer als die isolierte Betrachtung von THG-Emissionen. Aufgrund des geringen Gesamtwirkungsgrades von ICEVs resultiert die Nutzung von eFuels (Elektrolyse mit Strommix EU27) in sehr hohen LCA-THG-Emissionen.

Bei dem Biokraftstoff HVO100 ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den eFuels. Die Nutzung von HVO, deren Herstellung aus Reststoffen erfolgte, kann bereits kurzfristig zu signifikanten Reduzierungen von THG-Emissionen beitragen. Auch bei HVO werden erneuerbare THG-Emissionen freigesetzt, die zuvor in den Rohstoffen gebunden waren (vgl. Kapitel 2.4). HVO deren Herstellung auf Palmöl basiert, bietet weder aktuell noch in Zukunft Potenzial zur Reduzierung von THG-Emissionen. Die Nutzung von HVO aus Palmöl verursacht sogar deutlich mehr THG-Emissionen als Fahrzeuge, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden.

5.6 Lebenszyklusanalyse (LCA) von PHEVs: Entwicklung der THG-Emissionen in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Fossile Kraftstoffe

Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen, die mit fossilen Kraftstoffen wie Benzin betrieben werden, sind sowohl die Emissionen der Herstellung (Cradle-to-Gate) als auch die Emissionen der Nutzung (Well-to-Tank und Tank-to-Wheel) von entscheidender Bedeutung. Ein hoher elektrischer Fahranteil ist ein wichtiger Stellhebel, der zur Reduzierung von Treibhausgasen über den gesamten Lebenszyklus beitragen kann. Weitere Aspekte, wie die Wichtigkeit der Energiewende und das begrenzte Potential der Senkungen von THG-Emissionen bei fossilen Kraftstoffen, wurden bereits in den Kapiteln 5.3 und 5.5 verdeutlicht.

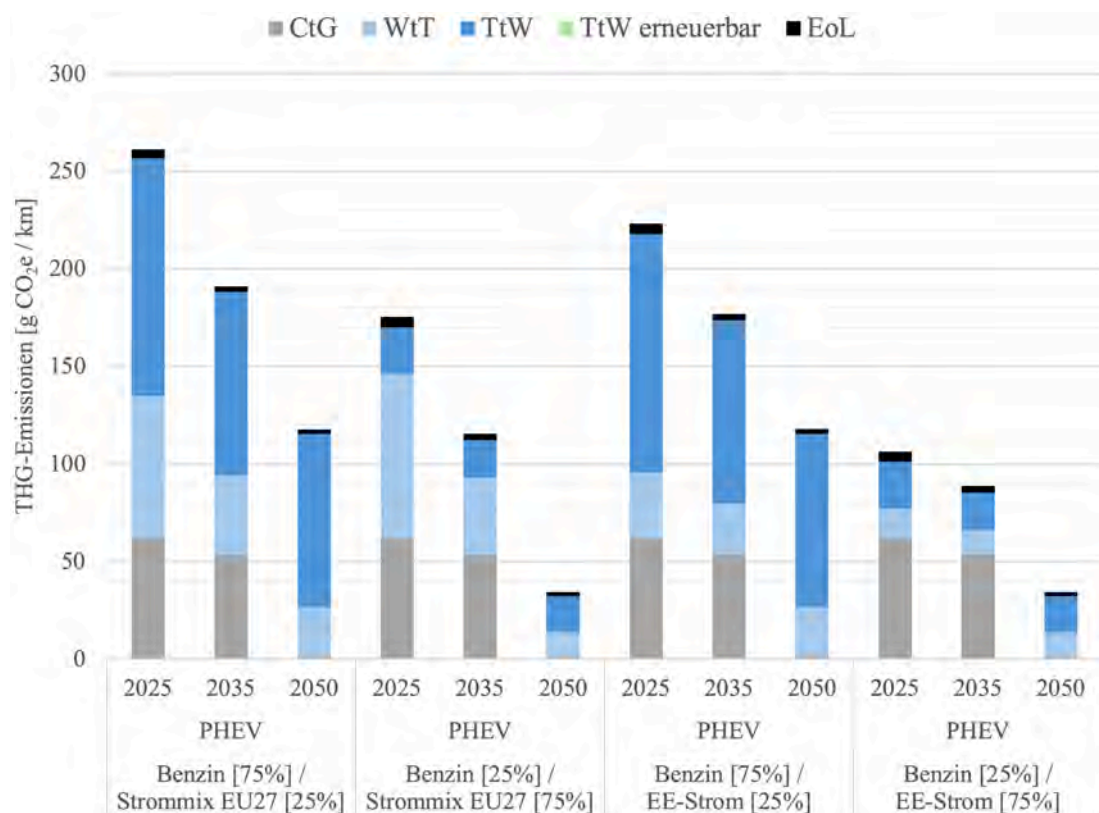


Abbildung 42: Lebenszyklus-THG-Emissionen von PHEVs (fossile Kraftstoffe) in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Abbildung 43 verdeutlicht, dass PHEVs die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, auch einen Beitrag zur Minderung der THG-Emissionen leisten können, insbesondere bei hohem elektrischen Fahranteil. Das Treibhausminderungspotenzial steigert sich im Laufe der Zeit, wie durch die Szenarien verdeutlicht wird.

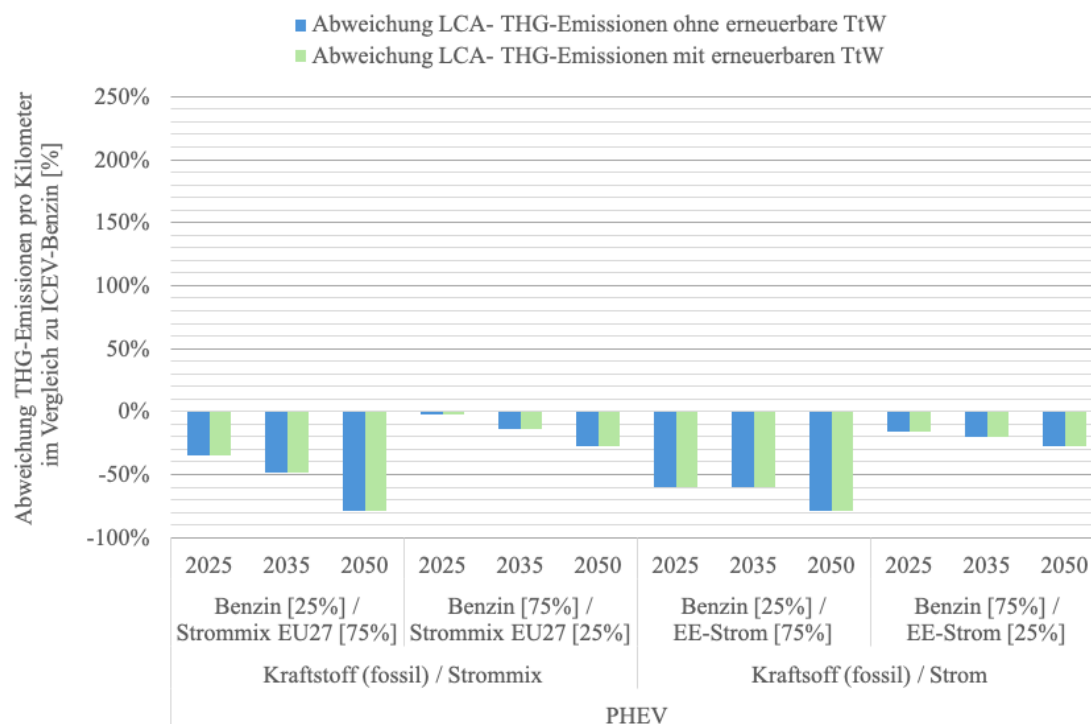


Abbildung 43: Vergleich der LCA-THG-Emissionen von PHEVs mit fossilen Kraftstoffen zu ICEV-G

Alternative Kraftstoffe

Bei Plug-in-Hybridfahrzeugen, die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, sind sowohl die THG-Emissionen der Herstellung (Cradle-to-Gate) als auch die Emissionen der Herstellung des Kraftstoffs bzw. des Stroms (Well-to-Tank) von entscheidender Bedeutung.

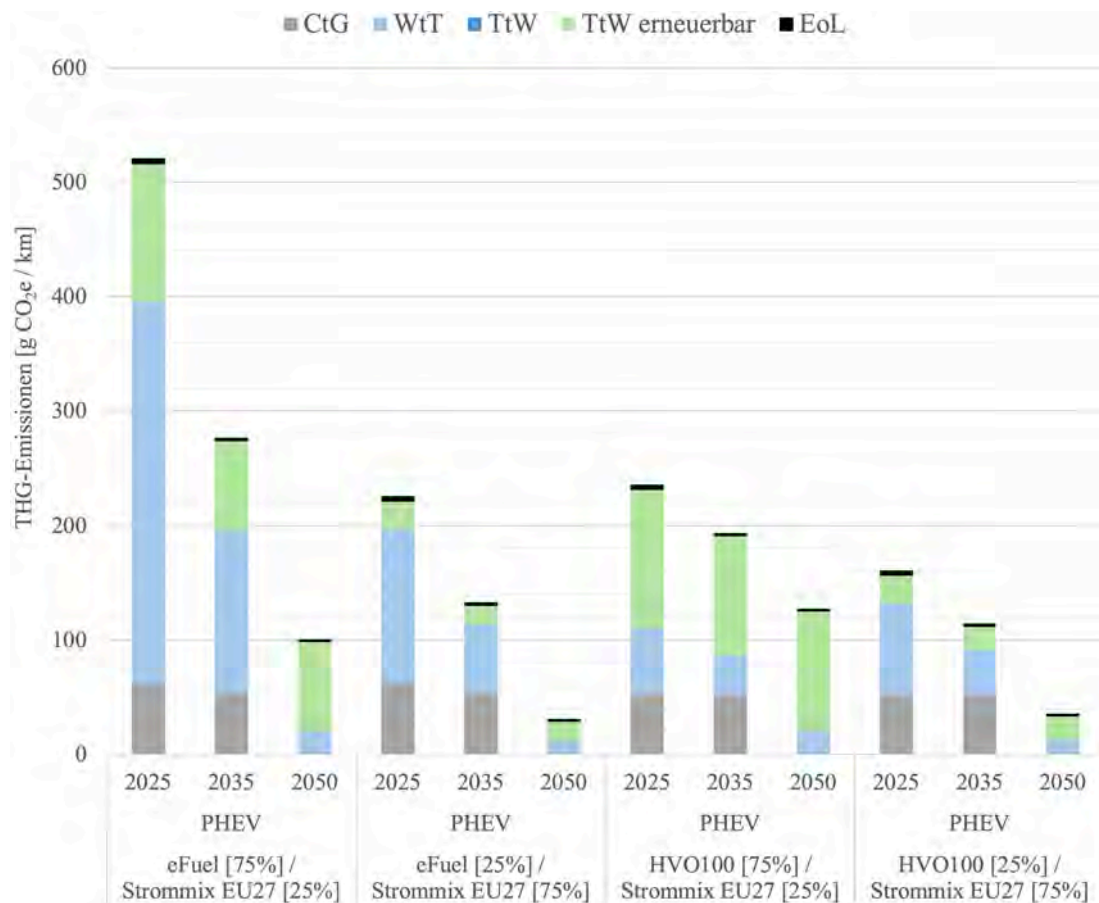


Abbildung 44: Lebenszyklus-THG-Emissionen von PHEVs (Alternative Kraftstoffe) in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen wurde bei eFuels der aktuelle europäische Strommix unterstellt. Dies würde bei einem hohen verbrennungsmotorischen Fahranteil sogar zu deutlich höheren Gesamtemissionen als bei einem ICEV, welcher mit fossilen Kraftstoffen betrieben wird, führen (vgl. Abbildung 45). Das Treibhausminderungspotenzial steigert sich im Laufe der Zeit, wie durch die Szenarien verdeutlicht wird.

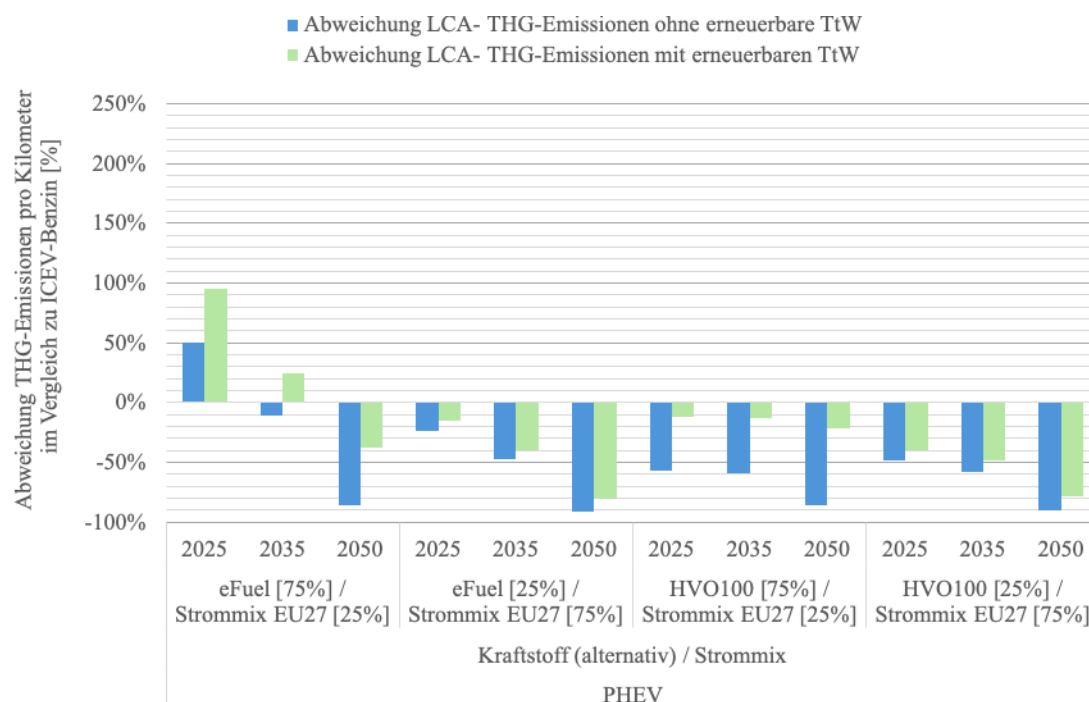


Abbildung 45: Vergleich der LCA-THG-Emissionen von PHEVs mit alternativen Kraftstoffen zu ICEV-G

Sowohl bei eFuels als auch bei HVO100 ist ein hoher elektrischer Fahranteil von entscheidender Bedeutung, um Reduzierungen von THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus zu erzielen. Bei einem ICEV, der mit HVO aus Reststoffen betrieben wird, können im Jahr 2025 Einsparungen an THG-Emissionen von 74 % erzielt werden (vgl. Abbildung 41). Ein PHEV, welches im Jahr 2025 mit HVO betrieben wird, würde mit 57 % sogar weniger Einsparungen als ein vergleichbarer ICEV ermöglichen. Dies wird durch den hohen Emissionsfaktor der Stromerzeugung mittels EU-Strommix (vgl. Abbildung 45) verursacht.

Plug-in-Hybridfahrzeuge, die mit HVO100 betrieben werden, sind technisch nicht sinnvoll, da diese keine Einsparungen an THG-Emissionen im Vergleich zu einem ICEV-HVO100 bieten. PHEV-Diesel werden im Rahmen dieser Masterarbeit nicht separat untersucht, jedoch würde sich eine ähnliche Emissionsbilanz wie bei PHEV-Benzinern ergeben. Aus diesem Grunde wurde auf die separate Darstellung von ICEV-Diesel verzichtet.

5.7 Zusammenfassung der Lebenszyklusanalyse (LCA): THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien in den Jahren 2025, 2035 und 2050

Aktuelles Jahr 2025

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für alle alternativen Antriebstechnologien und alternativen Kraftstoffe vergleichend dargestellt. In Abbildung 46 werden die aktuellen THG-Emissionen für das Jahr 2025 dargestellt. Bei einem direkten Vergleich der THG-Emission bei der isolierten Betrachtung der Nutzungsphase (vgl. Abbildung 20) ergeben sich veränderte Erkenntnisse bei der Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus.

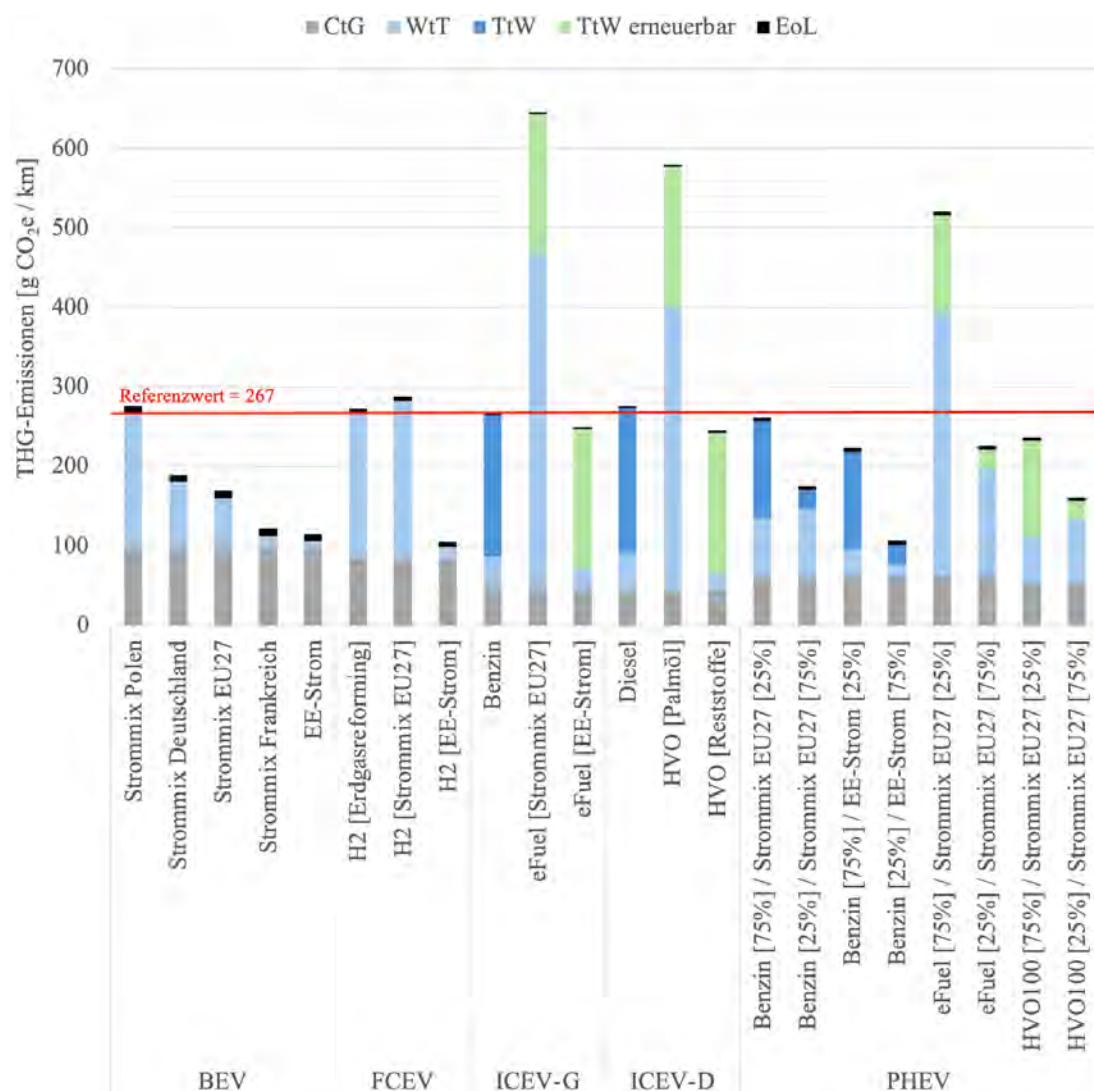


Abbildung 46: Lebenszyklus-THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für das Jahr 2025

Bei einem Vergleich der THG-Emissionen aus der Nutzungsphase (Well-to-Wheel) zeigten sich erhebliche Vorteile von BEVs gegenüber einem ICEV-Benziner, der als Referenzwert herangezogen wurde. Zwar zeigen die meisten Sensitivitäten der Lebenszyklusanalyse zu BEVs immer noch Einsparungen bei den THG-Emissionen im Vergleich zu einem ICEV-G auf. Allerdings sind diese geringer, da die THG-Emissionen der Herstellung von BEVs deutlich höher sind als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEVs). Die Sensitivität für den Strommix in Polen zeigt über den gesamten Lebenszyklus sogar einen leicht höheren Wert als ICEV-G.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den Sensitivitäten zu Brennstoffzellenfahrzeugen. Während die Sensitivitäten mit Erdgasreforming und Elektrolyse mit aktuellem Strommix noch Einsparungen bei den THG-Emissionen bei der Betrachtung der Nutzungsphase (Well-to-Wheel) aufzeigten, liegen die THG-Emissionen bei der Lebenszyklusanalyse leicht über denen von ICEV-Benzinern. Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse verdeutlichen noch einmal die Wichtigkeit der sektorübergreifenden Kooperation zwischen dem Verkehrssektor, dem Energiesektor und auch dem Produktionssektor, um das Ziel der CO₂-Neutralität bis zum Jahr 2050 zu erreichen.

Im Rahmen der Lebenszyklusanalyse bieten aus aktueller Sicht batterieelektrische Fahrzeuge, welche in Deutschland oder Frankreich betrieben werden, signifikante Einsparpotenziale in Bezug auf THG-Emissionen. Der EU-Strommix zeigt, dass BEVs in vielen Ländern der EU zu THG-Emissionseinsparungen beitragen können. Nur in wenigen Ländern mit besonders hohem Emissionsfaktor der Stromerzeugung (wie Polen) zeigen sich derzeit keine Einsparungen durch die Umstellung auf BEVs. In Bezug auf Brennstoffzellenfahrzeuge ergeben sich aktuell nur Minderungen der THG-Emissionen, wenn der Anteil an Erneuerbaren Energien bei der Herstellung des Wasserstoffs entsprechend hoch ist.

Alternative Kraftstoffe wie eFuels, die anhand von erneuerbaren Energien hergestellt wurden, oder HVOs, deren Herstellung aus Reststoffen erfolgte, bieten ebenfalls erhebliche Einsparpotenziale an zusätzlichen THG-Emissionen. Wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, gibt es derzeit noch Limitierungen bei den alternativen Kraftstoffen, wie ausstehende Markteinführung, mangelnde Investitionsbereitschaft zu eFuels und limitierte Verfügbarkeit an ausreichenden Mengen an HVO aus Reststoffen.

Bei Plug-in-Hybridfahrzeugen ist auch bei der Lebenszyklusbetrachtung ein hoher elektrischer Fahranteil von entscheidender Bedeutung, um THG-Emissionen zu reduzieren.

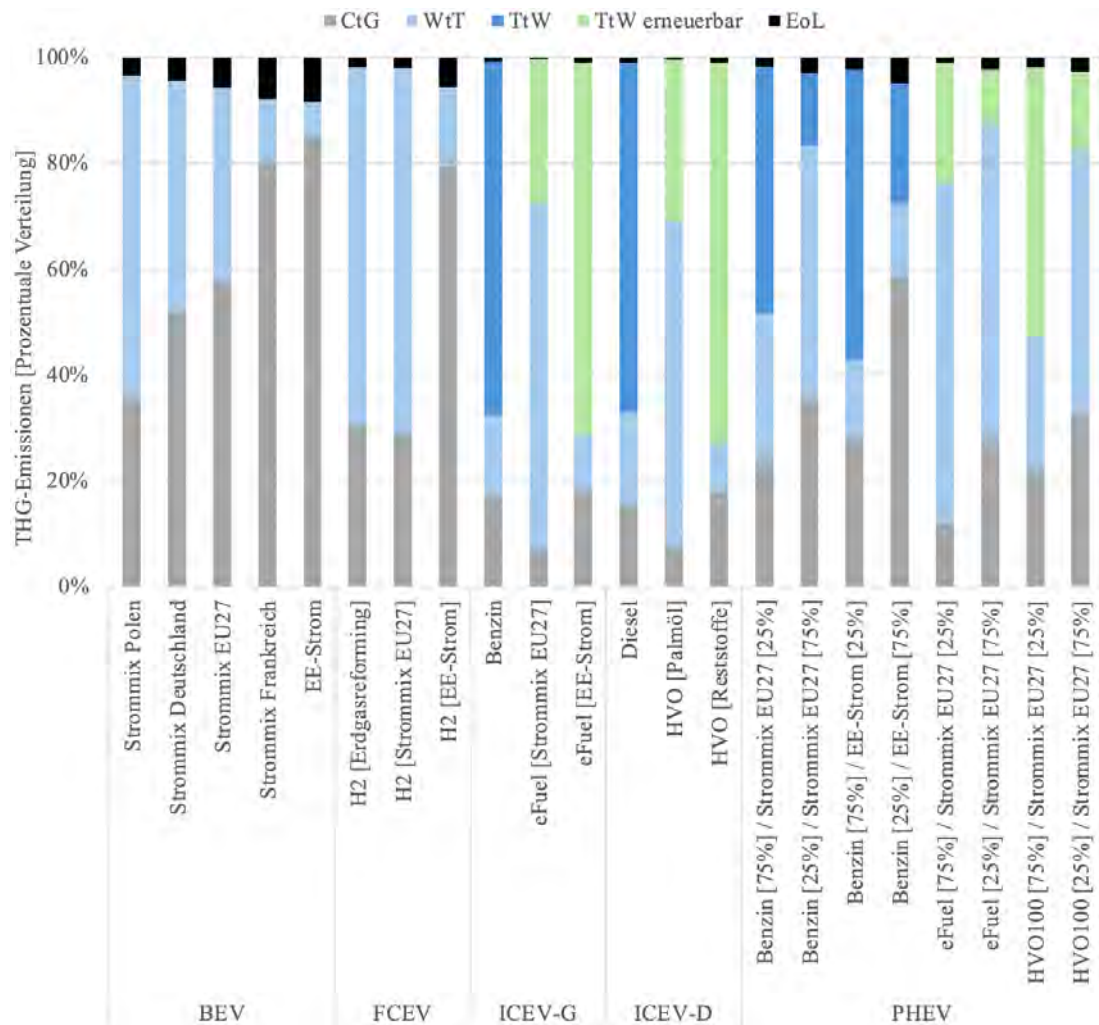


Abbildung 47: Prozentuale Aufteilung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs für das Jahr 2025

In Abbildung 47 wird die prozentuale Aufteilung der jeweiligen Lebenszyklusphasen eines PKWs dargestellt. Je nach Antriebstechnologie und Art des Energieträgers ergeben sich sehr unterschiedliche Verteilungen der Anteile der Lebenszyklusphasen an den Gesamtemissionen. Während bei den alternativen Antriebstechnologien BEV und FCEV die Emissionen der Herstellung (Cradle-to-Gate) und der Vorkette der Energieträger (Well-to-Tank) dominieren, sind die Herstellungsemissionen bei ICEV von untergeordneter Bedeutung. In Bezug auf ICEV dominieren die Emissionen der Nutzungsphase (Well-to-Wheel). Bei Plug-in-Hybridfahrzeugen dominieren bei hohem verbrennungsmotorischen Fahranteil die Emissionen der Nutzungsphase. Mit zunehmendem elektrischen Fahranteil gewinnen die Herstellungsemissionen (CtG) an Bedeutung. Aktuell haben die Emissionen beim Nutzungsende des PKWs (End-of-Life) in der Gesamtbetrachtung nur eine untergeordnete Rolle.

Szenario für das Jahr 2035

In dem Szenario für das Jahr 2035 ergibt sich eine veränderte Beurteilung der Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Bei der Referenzantriebstechnologie eines ICEV-Benziners steigen zwar die Herstellungsemissionen durch Umstellung auf Full-Hybrid leicht an, dennoch sinken die gesamten Treibhausgasemissionen von 267 g CO₂e/km im Jahr 2025 auf 223 g CO₂e/km im Jahr 2035.

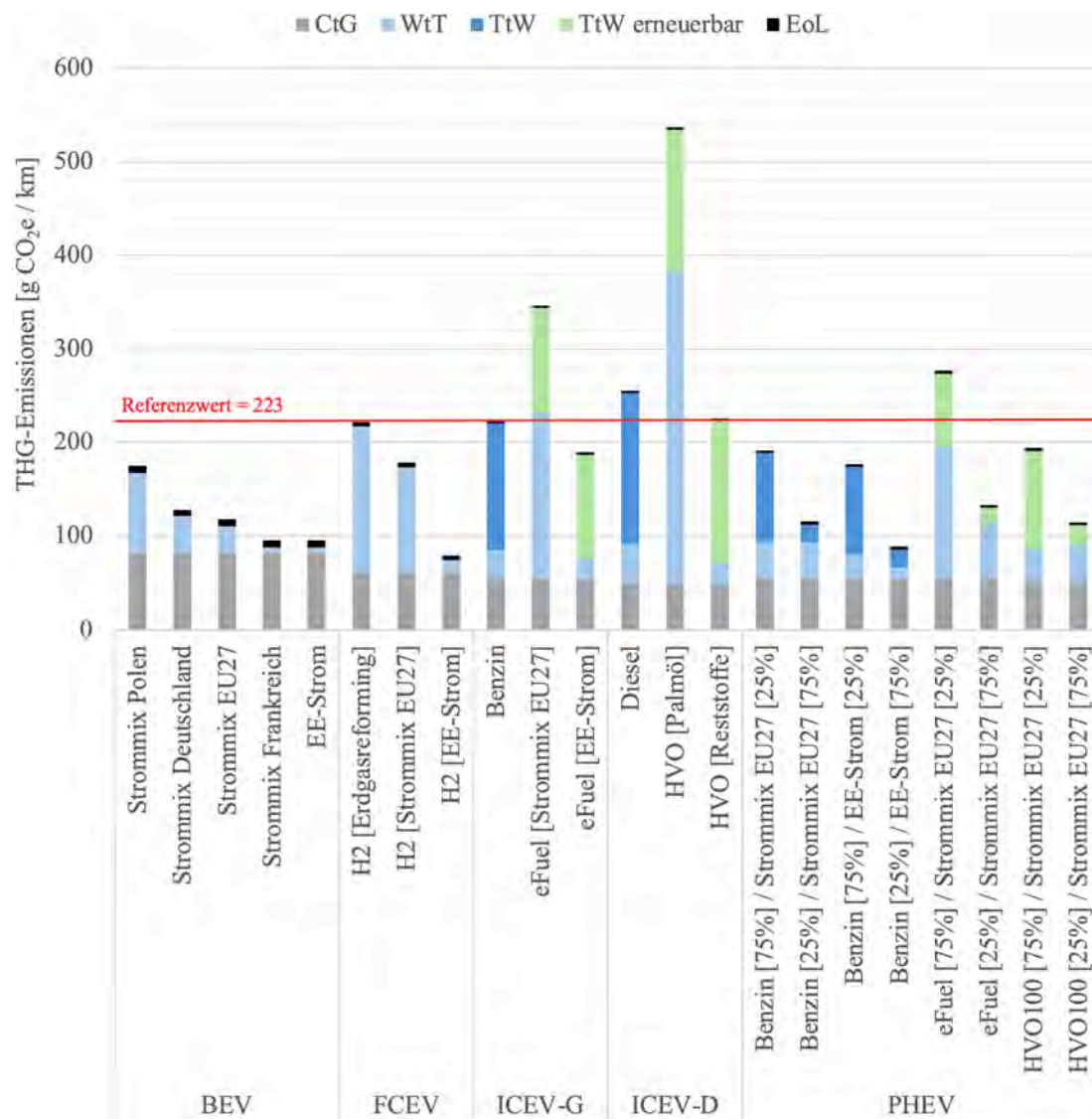


Abbildung 48: Lebenszyklus-THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für das Jahr 2035

Durch die fortschreitende Senkung der Emissionsfaktoren der Stromherstellung in allen Ländern der Europäischen Union nehmen die Vorteile von BEVs in Bezug auf die Senkung der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus weiter zu. In diesem Szenario werden auch bei dem Strommix in Polen weniger THG-Emissionen freigesetzt als bei einem ICEV-Benziner. Auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen zeigen sich beim Einsatz des europäischen Strommixes Vorteile gegenüber einem ICEV-Benziner. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei eFuels die im Jahr 2035 unter Einsatz des zukünftigen europäischen Strommixes hergestellt werden und zu diesem Zeitpunkt ähnliche Emissionen wie ein ICEV-Benziner freisetzen würden. Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen sinken die THG-Emissionen so weit, dass selbst bei einem höheren verbrennungsmotorischen Fahranteil dennoch Einsparungen gegenüber einem ICEV-Benziner erzielt werden können. Wie in Abbildung 49 dargestellt, zeigen sich im Jahr 2035 keine signifikanten Veränderungen bei der prozentualen Verteilung der THG-Emissionen im Vergleich zur aktuellen Aufteilung im Jahr 2025.

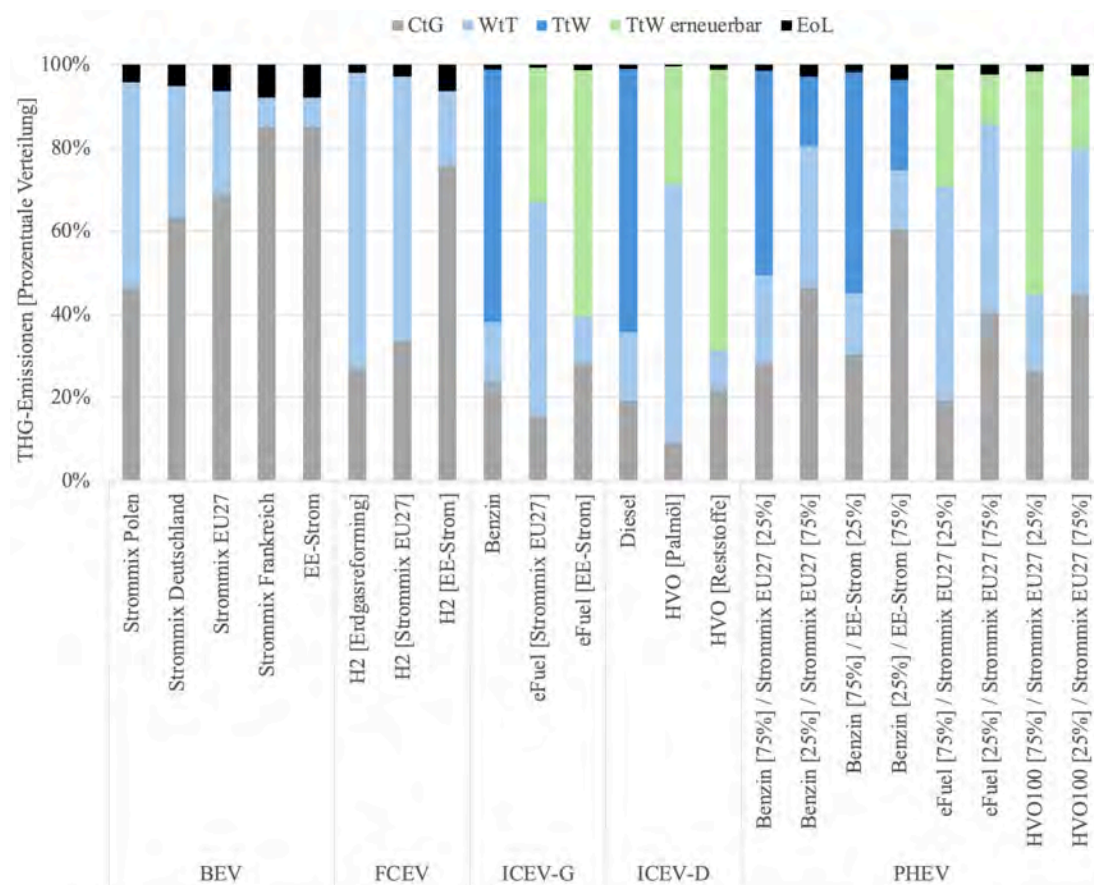


Abbildung 49: Prozentuale Aufteilung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs für das Jahr 2035

Szenario für das Jahr 2050

Abschließend werden die THG-Emissionen des Szenarios für das Jahr 2050 aufgezeigt. Für das Jahr 2050 ist eine weitestgehende Defossilisierung der gesamten Industrie unterstellt. Bei der Referenzantriebstechnologie eines ICEV-Benziners sinken die gesamten THG-Emissionen von 223 g CO_{2e}/km im Jahr 2035 auf 163 g CO_{2e}/km im Jahr 2050.

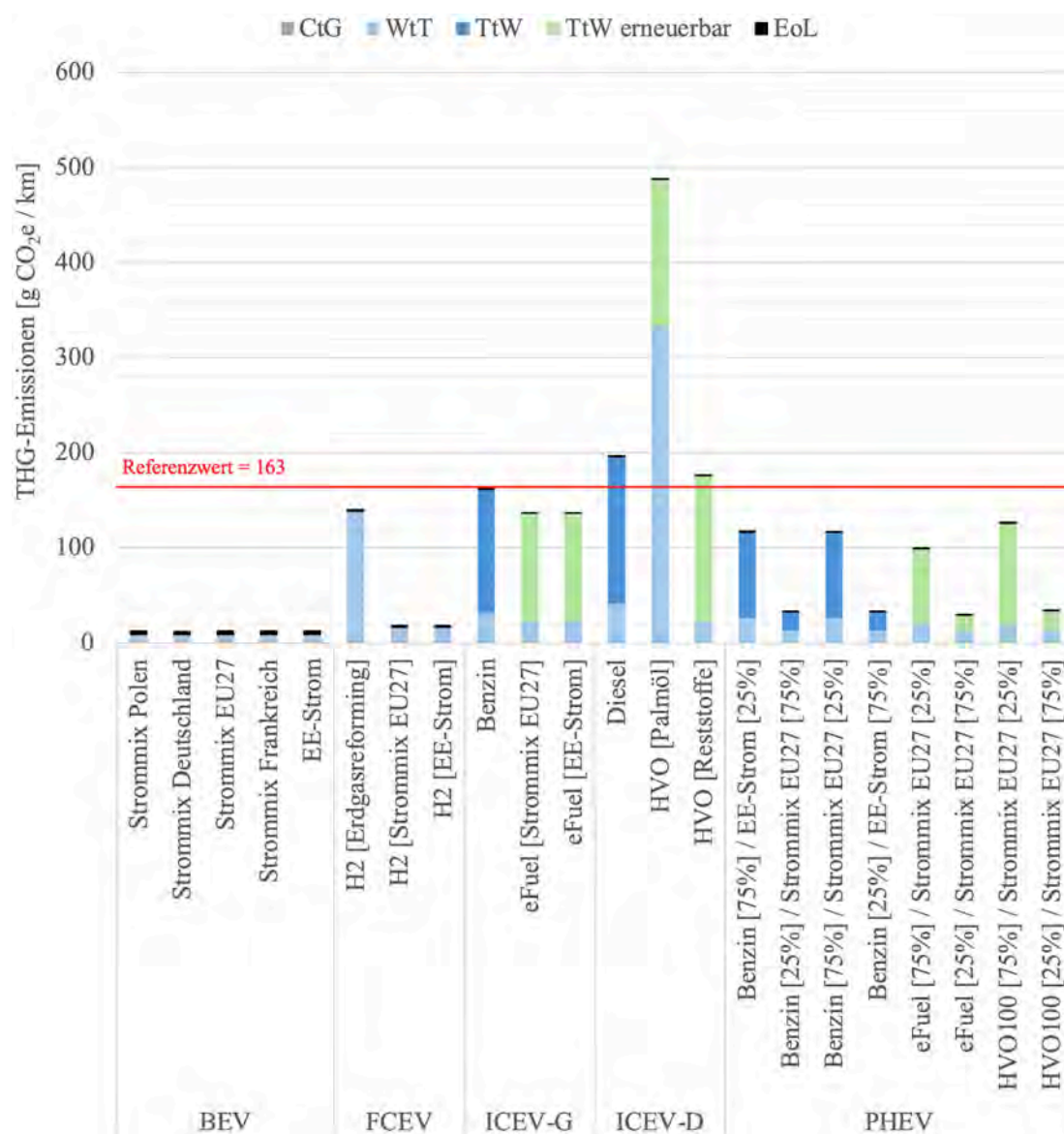


Abbildung 50: Lebenszyklus-THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien für das Jahr 2050

Batterieelektrische Fahrzeuge weisen nun in allen Sensitivitäten erhebliche Einsparpotenziale gegenüber einem ICEV-Benziner auf. Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit Wasserstoff aus Elektrolyse betrieben werden, haben ebenfalls sehr geringe THG-Emissionen. HVO100 aus Palmöl weist THG-Emissionen auf, die um den Faktor 2 höher sind als bei Fahrzeugen mit Benzin-Verbrennungsmotoren. In Bezug auf Plug-in-Hybridfahrzeuge zeigen insbesondere Fahrzeuge mit hohem elektrischen Fahranteil geringe THG-Emissionen auf.

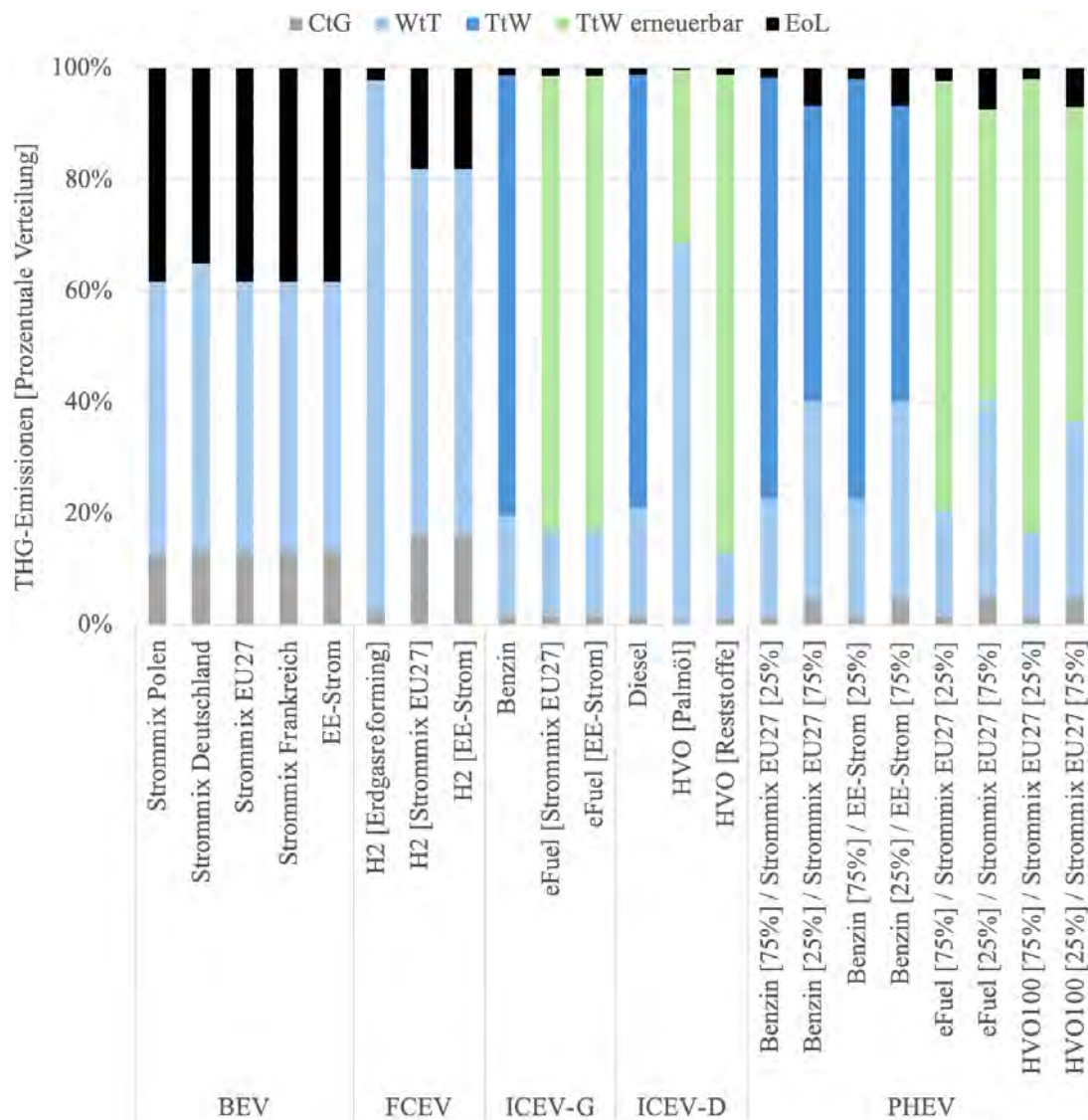


Abbildung 51: Prozentuale Aufteilung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines PKWs für das Jahr 2050

Bei der prozentualen Aufteilung der Lebenszyklusphase ergeben sich erhebliche Unterschiede im Vergleich zu dem Szenario aus dem Jahr 2035. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEVs) tragen nun auch die End-of-Life-Emissionen zu einem erheblichen Anteil zu den Gesamtemissionen bei. Wobei die Gesamtemissionen bei diesen Antriebstechnologien auf einem sehr geringen Niveau liegen.

Zusammenfassend zeigt die Lebenszyklusanalyse der THG-Emissionen, dass batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) signifikante Einsparpotenziale im Vergleich zu herkömmlichen, mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren bieten. Dies gilt insbesondere für Länder mit niedrigem Emissionsfaktor der Stromerzeugung. Alternative Kraftstoffe wie eFuels und HVO können ebenfalls zur Reduzierung von THG-Emissionen beitragen, obwohl ihre Verfügbarkeit derzeit begrenzt ist. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer sektorübergreifenden Zusammenarbeit zur Erreichung der CO₂-Neutralität in der Europäischen Union bis zum Jahr 2050. Im Laufe der Zeit können durch fortschreitende Defossilisierung der Industrie die THG-Emissionen der Herstellung von Fahrzeugen aller Antriebstechnologien weiter gesenkt werden, wobei die End-of-Life-Emissionen an Bedeutung gewinnen werden.

6 Umweltbelastungen durch Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Einsatz kritischer Rohstoffe über die gesamte Lebenszyklusphase eines PKWs

6.1 Vergleich der Stickoxidemissionen der verschiedenen Antriebstechnologien

In den bisherigen Kapiteln wurden detailliert die Verursachenden von Treibhausgasen im PKW-Sektor untersucht. Während Treibhausgase den Treibhauseffekt verstärken und somit direkt zum Klimawandel beitragen, verursachen Stickoxide lokale Luftverschmutzungen und haben negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (vgl. Kapitel 2.5). Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union konnten die gesamten Stickoxidemissionen von 1990 bis zum Jahr 2022 erfolgreich um ca. 64 % reduzieren. Während im Jahr 1990 noch ca. 15 Kilotonnen an Stickoxiden freigesetzt wurden konnte dieser Wert im Jahr 2022 auf ca. 5 Kilotonnen reduziert werden. Der Verkehrssektor war in der Vergangenheit und ist auch aktuell mit ca. 50 % Anteil der Hauptverursachende von Stickoxiden.¹⁸⁹

Entgegen der allgemeinen Meinung sieht die Realität folgendermaßen aus. Im Stadtverkehr sind Diesel-PKW's die Hauptverursachenden von Stickoxid-Emissionen. Eine Untersuchung des Umweltbundesamtes aus dem Jahre 2019 zeigt auf, dass 65 % der NO_x-Emissionen von Diesel-PKW's verursacht wurden. Die übrigen PKW's hatten einen Anteil von 3 % und die restlichen 32 % entfielen auf leichte und schwere Nutzfahrzeuge sowie Busse.¹⁹⁰ Obwohl die Grenzwerte für Stickoxid-Emissionen im Rahmen der EU in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gesenkt wurden, lagen die Messwerte im Realbetrieb um ein Vielfaches über den gültigen EU-Grenzwertvorgaben. Diese Problematik mit deutlich erhöhten Stickoxidemissionen wurde der breiten Öffentlichkeit spätestens durch den Diesel-Abgasskandal im September 2015 bewusst.¹⁹¹ In Abbildung 52 werden die signifikanten Unterschiede der Stickoxidemissionen verdeutlicht.

¹⁸⁹ Statista, 2024c.

¹⁹⁰ Umweltbundesamt, 2019b.

¹⁹¹ DUH, 2021.

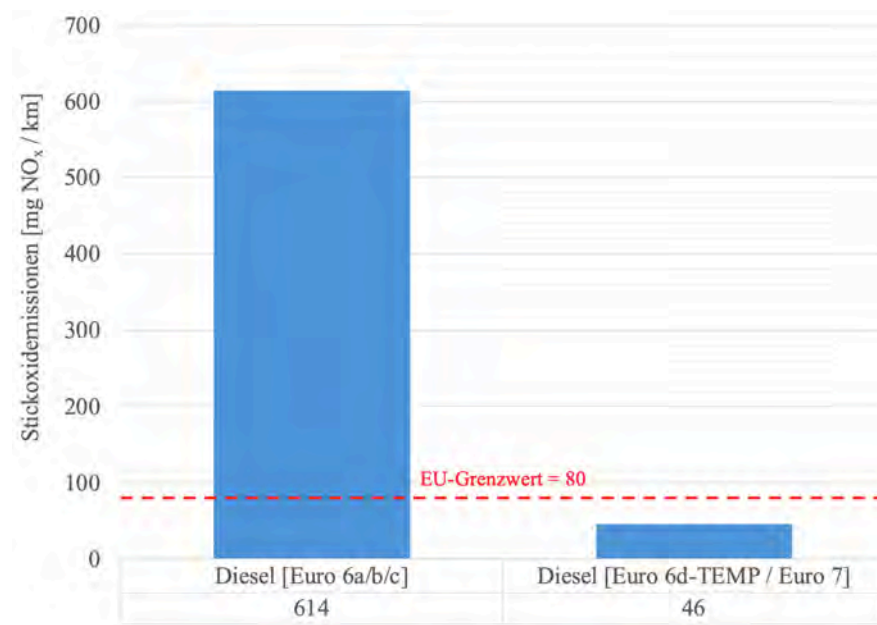


Abbildung 52: Tank-to-Wheel-Stickoxidemissionen bei Diesel-PKWs

Obwohl die Euro 6a, Euro 6b und Euro 6c Abgasnormen eine **Grenzwertvorgabe von maximal 80 mg NO_x/km** hatten, lag der Wert im Realbetrieb bei 614 mg NO_x/km, welches einem Faktor von 7 bis 8 entspricht. Erst durch Einführung des Abgasnorm Euro 6d-TEMP liegen die Messwerte im Realbetrieb mit 46 mg NO_x/km, deutlich unter der EU-Grenzwertvorgabe. Jedoch wurde der Großteil der heutigen Diesel-PKW Bestandsflotte anhand von Euro 6c oder älteren Normen zugelassen.¹⁹² Aus diesem Grunde werden nachfolgend **zwei Sensitivitäten für Diesel-Fahrzeuge** berechnet. Zum einen sollen Diesel-PKW mit der Abgasnorm Euro 6a/b/c und zum anderen mit der Abgasnorm Euro 6d-TEMP oder Euro 7 betrachtet werden.

Die Emissionsnorm Euro 6d-TEMP ist seit 1. September 2017 für die Genehmigung neuer Fahrzeugtypen verpflichtend. Die zweite Stufe der Emissionsnorm Euro 6e ist seit den 1. Januar 2025 für die Genehmigung neuer Fahrzeugtypen verpflichtend. Die Grenzwertvorgabe für Diesel und Benziner ist bei der Euro 6e ebenfalls unverändert geblieben.¹⁹³ Die neue Emissionsnorm Euro 7 soll ab dem 29. November 2026 für die Typgenehmigung neuer PKW-Modell in Kraft

¹⁹² Umweltbundesamt, 2019b.

¹⁹³ ADAC, 2024.

treten. In Bezug auf Stickoxide NO_x werden die Emissionswerte auch bei Euro 7 unverändert bleiben.¹⁹⁴

Cradle-to-Gate- und End-of-Life-Stickoxidemissionen

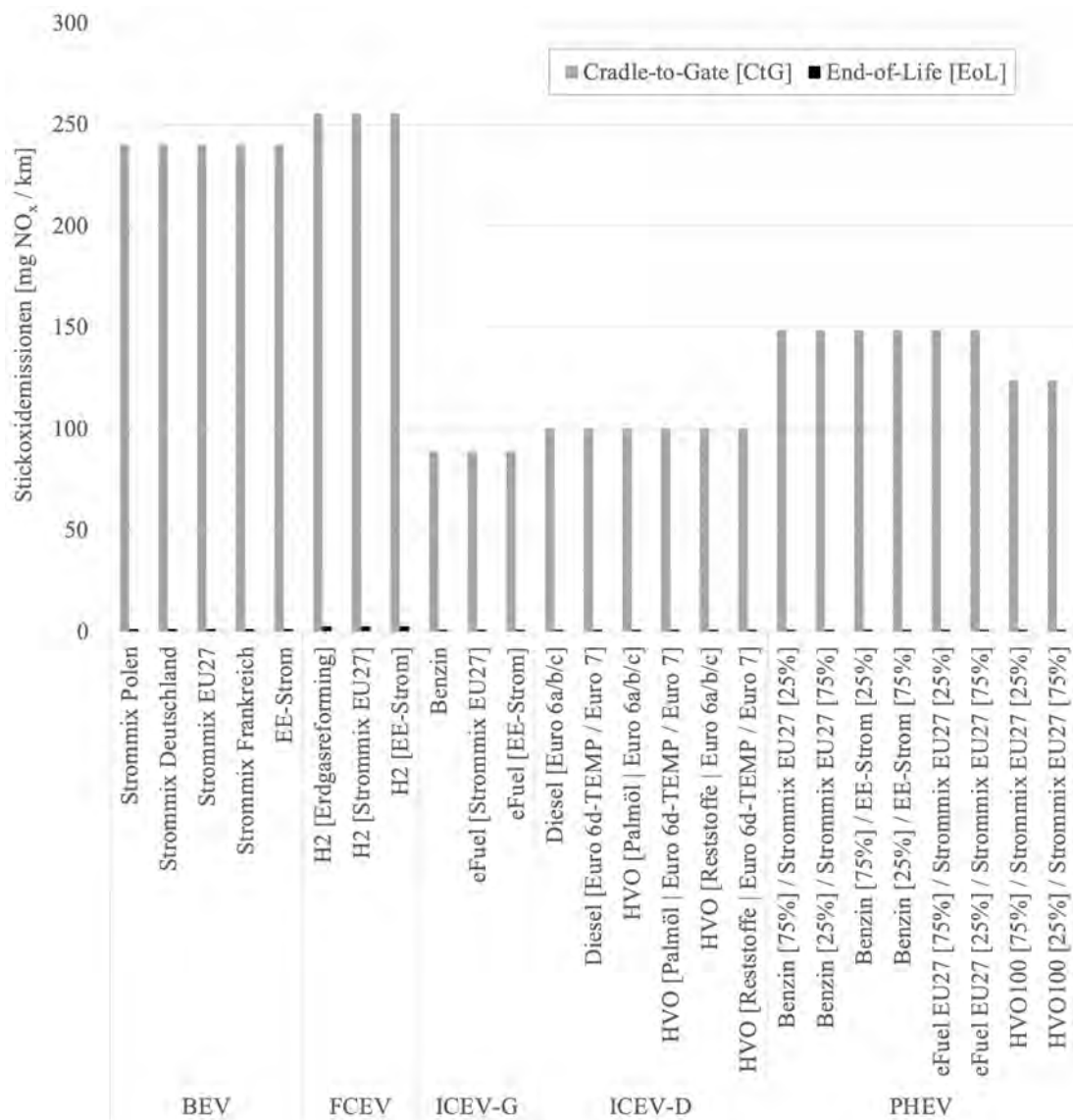


Abbildung 53: Cradle-to-Gate- und End-of-Life-Stickoxidemissionen

Bei der Herstellung der PKWs werden Stickoxidemissionen freigesetzt, die bei den alternativen Antriebstechnologien höher sind als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Dies ergibt ein sehr ähnliches Bild wie bei den Treibhausgasemissionen, bei denen die alternativen Antriebstechnologien ebenfalls höhere Emissionen verursachten (vgl. Kapitel 5.7). Die End-of-Life-

¹⁹⁴ Europäisches Parlament und Rat, 2024, S. 26.

Emissionen sind im Vergleich zu den NO_x-Emissionen der Herstellung der PKWs verschwindend gering und werden hier nicht weiter im Detail erläutert.¹⁹⁵

Well-to-Tank-Stickoxidemissionen

Die Stickoxidemissionen, die im Rahmen der Well-to-Tank-Analyse betrachtet werden, unterliegen abhängig von der Antriebstechnologie und dem Energieträger erheblichen Schwankungen. So verursacht ein batterieelektrisches Fahrzeug, welches permanent mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben wird, sehr niedrige Stickoxidemissionen pro Kilometer Fahrstrecke. Verbrennungsmotoren, die mit eFuels betrieben werden, bei deren Herstellung des Kraftstoffs ein EU-Strommix verwendet wird, verursachen im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor, der mit fossilen Kraftstoffen betrieben wird, signifikant höhere NO_x-Emissionen (Faktor 5).

¹⁹⁵ Wietschel et al., 2022, S. 28 ff.

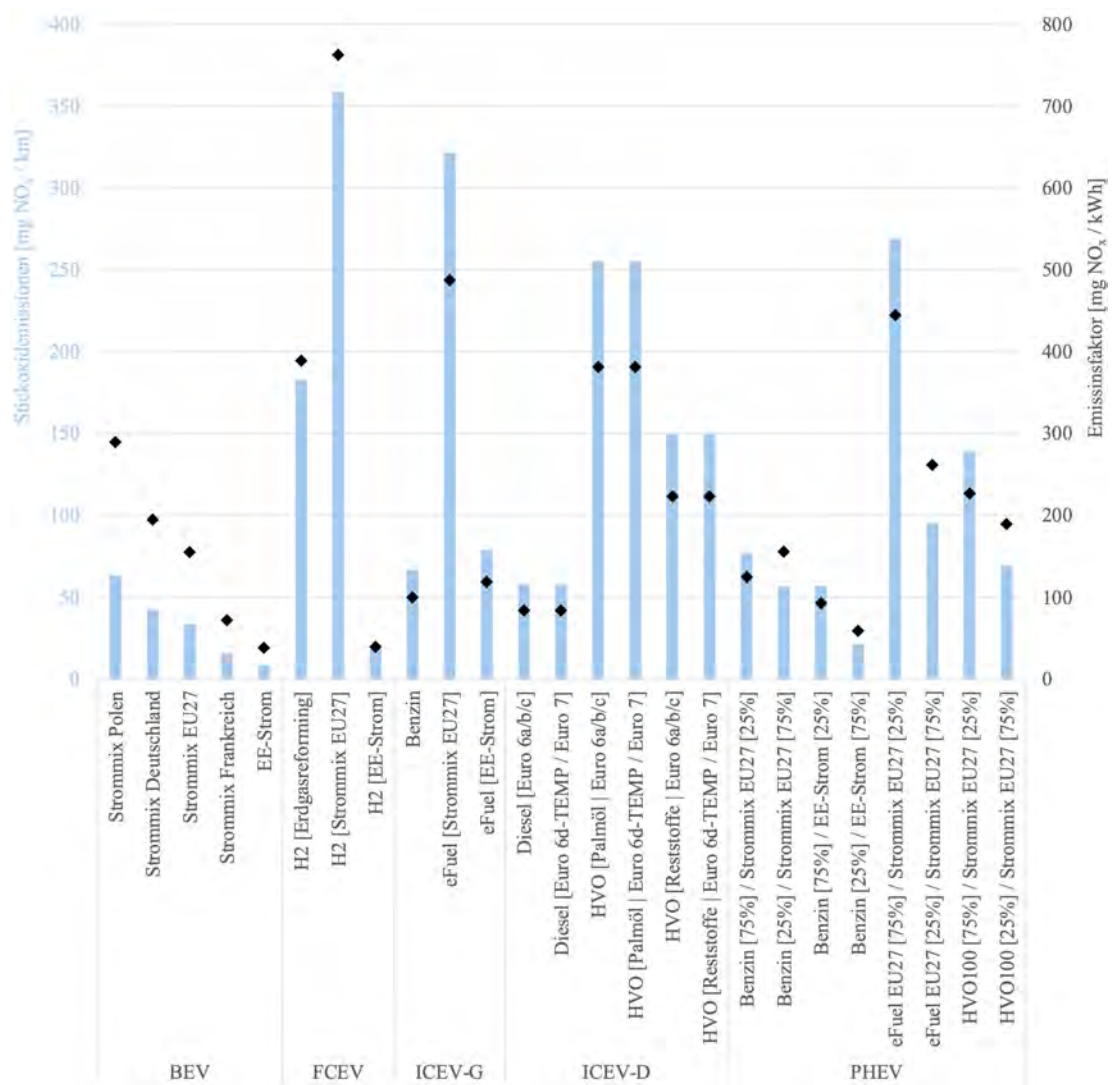


Abbildung 54: Well-to-Tank-Stickoxidemissionen

Ein Brennstoffzellenfahrzeug, welches mit Wasserstoff betreiben wird, bei deren Herstellung EU-Strommix verwendet wird, verursacht im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor, der mit fossilen Kraftstoffen betrieben wird, signifikant höhere NO_x-Emissionen (Faktor 6). Diese sehr hohen NO_x-Emissionen werden durch den hohen NO_x-Emissionsfaktor der Stromerzeugung von 155 mg NO_x/kWh bei Einsatz vom aktuellen EU-Strommix verursacht.¹⁹⁶

Batterieelektrische Fahrzeuge profitieren bei den Stickoxidemissionen von dem hohen Wirkungsgrad beim Energieeinsatz. Gegenüber Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden, ergeben sich je nach Strommix des jeweiligen Landes mittlere bis sehr deutliche Reduzierungen der NO_x-Emissionen. Eine Ausnahme bildet Polen, deren Stromnetz zu ca. 70 % Energie aus Kohlekraftwerken bezieht (vgl. Kapitel 2.6) und dadurch sogar mehr Stickoxide in der Well-to-Tank-Analyse emittiert als fossiles Benzin oder Diesel. In diesem Fall führt der sehr hohe Wirkungsgrad von BEVs nicht zu Einsparungen an NO_x-Emissionen.

Brennstoffzellenfahrzeuge können nur beim Einsatz von 100 % EE-Strom zu signifikanten Einsparungen an Stickoxidemissionen beitragen. Beim Einsatz von Wasserstoff aus Erdgasreforming oder dem aktuellen EU-Strommix ergeben sich um den Faktor 3 bis 6 höhere NO_x-Emissionen als bei fossilen Kraftstoffen, welche in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden.

Alternative Kraftstoffe wie eFuels führen zu höheren Stickoxidemissionen, da bei eFuels der Herstellungsprozess einen sehr geringen Wirkungsgrad aufweist und somit hohe Mengen an Strom benötigt werden (vgl. Abbildung 27). Selbst beim Einsatz von 100% Erneuerbaren Energien liegen die Stickoxidemissionen höher als bei fossilen Kraftstoffen. Beim Einsatz vom aktuellen EU-Strommix liegen die NO_x-Emissionen sogar um den Faktor 5 höher. Ein weiterer Aspekt, der bei der genauen Betrachtung der Herstellung von eFuels beachtet werden sollte, sind die genauen Herstellungspfade. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Herstellungspfaden, dessen Emissionen sich je nach Standort der Stromerzeugung, CO₂-Quelle, Technologie der Elektrolyse oder dem Transportweg signifikant voneinander unterscheiden können.¹⁹⁷

Selbst bei dem Biokraftstoff HVO ergeben sich deutlich höhere NO_x-Emissionen als beim fossilen Dieselmotorkraftstoff. Dies gilt insbesondere bei HVO welches auf Palmöl basiert, jedoch auch für HVO aus Reststoffen. Eine weitere Problematik bei HVO und anderen Biokraftstoffen ist, dass die Informationen zu der

¹⁹⁶ Eurostat, 2024b; Lauf et al., 2025, S. 50 ff.; Weltenergieat Deutschland, 2024.

¹⁹⁷ Liebich et al., 2020, S. 28.

Vielzahl an Rohstoffen, Transport- und Herstellungswegen nur ansatzweise bekannt und somit mit größeren Unsicherheiten verbunden sind.¹⁹⁸ Umweltschutzorganisationen wie die Deutsche Umwelthilfe (DUH) wiesen auch auf den hohen Importanteilen von Altspeiseölen hin die zusätzlich zu erhöhten Emissionen führen.¹⁹⁹ Zukünftige Forschungen sollten sich intensiver mit der Untersuchung von Stickoxidemissionen von HVO befassen.

Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen ergibt sich ein sehr divergentes Bild, bei dem sich in den meisten Fällen keine Einsparungen an NO_x-Emissionen im Vergleich zu klassischen Benziner- und Dieselfahrzeugen ergeben. Nur bei einem niedrigen verbrennungsmotorischen Fahranteil des Benzin-Verbrennungsmotors und hohem elektrischem Fahranteil, deren Energie aus 100 % EE-Strom versorgt wird, ergeben sich erhebliche Einsparpotenziale.

Tank-to-Wheel-Stickoxidemissionen

Die im Rahmen der Well-to-Tank-Analyse betrachteten NO_x-Emissionen werden als indirekte Emissionen bezeichnet, da diese nicht bei der Nutzung der PKWs, sondern in der Vorkette freigesetzt werden. Nachfolgend werden die direkten Emissionen aufgezeigt, welche bei der Nutzung von PKWs freigesetzt werden. Diese entstehen insbesondere in den Ballungsgebieten und schädigen dort die Gesundheit der Menschen. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen werden keine Stickoxidemissionen freigesetzt.²⁰⁰

¹⁹⁸ Lauf et al., 2025, S. 143.

¹⁹⁹ DUH et al., 2024, S. 8.

²⁰⁰ DENA, 2019.

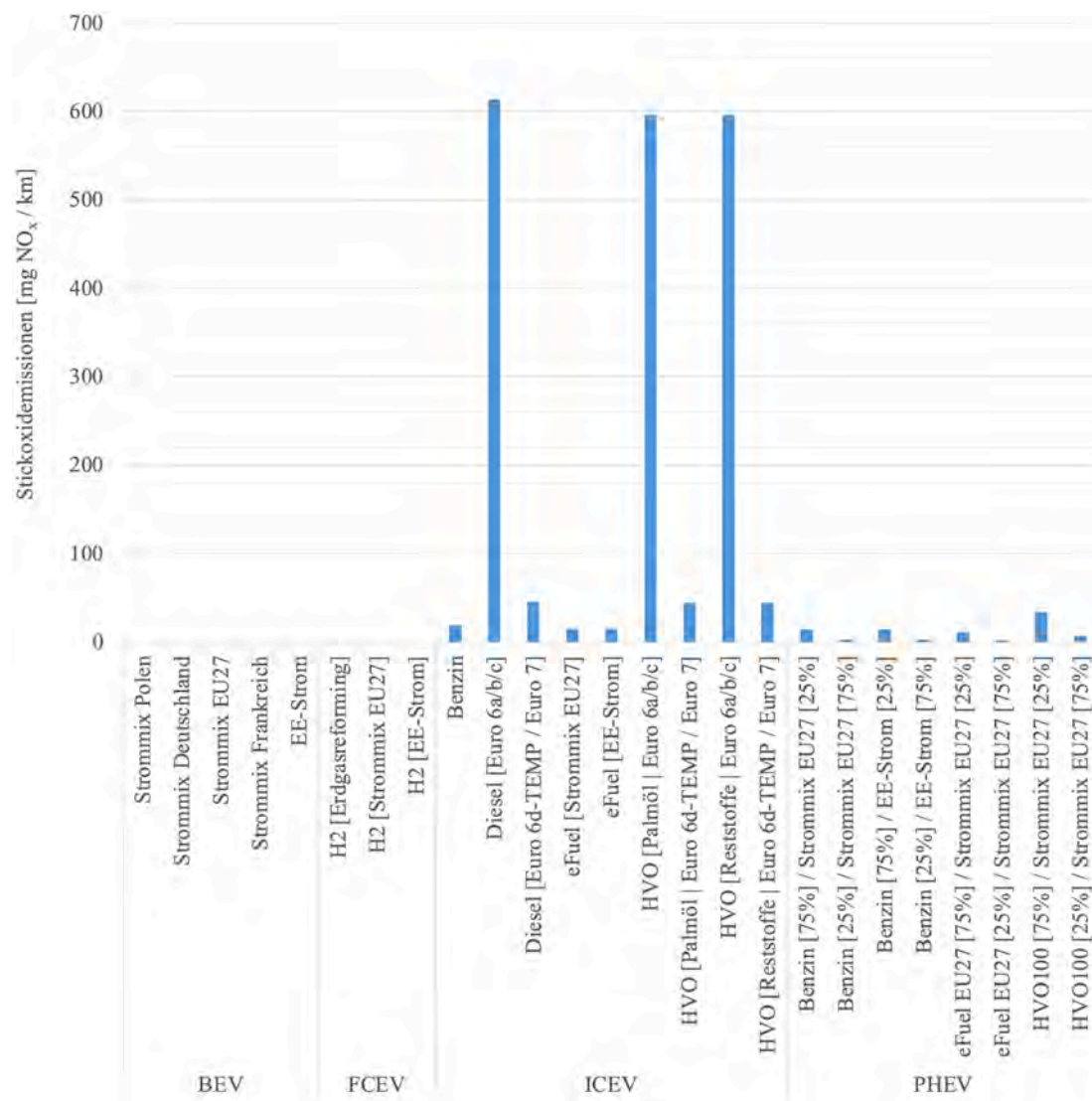


Abbildung 55: Tank-to-Wheel-Stickoxidemissionen

Wie bereits eingangs in diesem Kapitel erwähnt, stellen insbesondere PKWs mit Diesel-Verbrennungsmotor ein erhebliches Problem in Bezug auf die Stickoxidemissionen dar, insofern diese nicht die neueste EU-Abgasnorm erfüllen. Dies wird in der Abbildung 55 im direkten Vergleich zu allen anderen PKW-Antriebstechnologien noch einmal besonders verdeutlicht.

Stickoxidemissionen über den gesamten Lebenszyklus

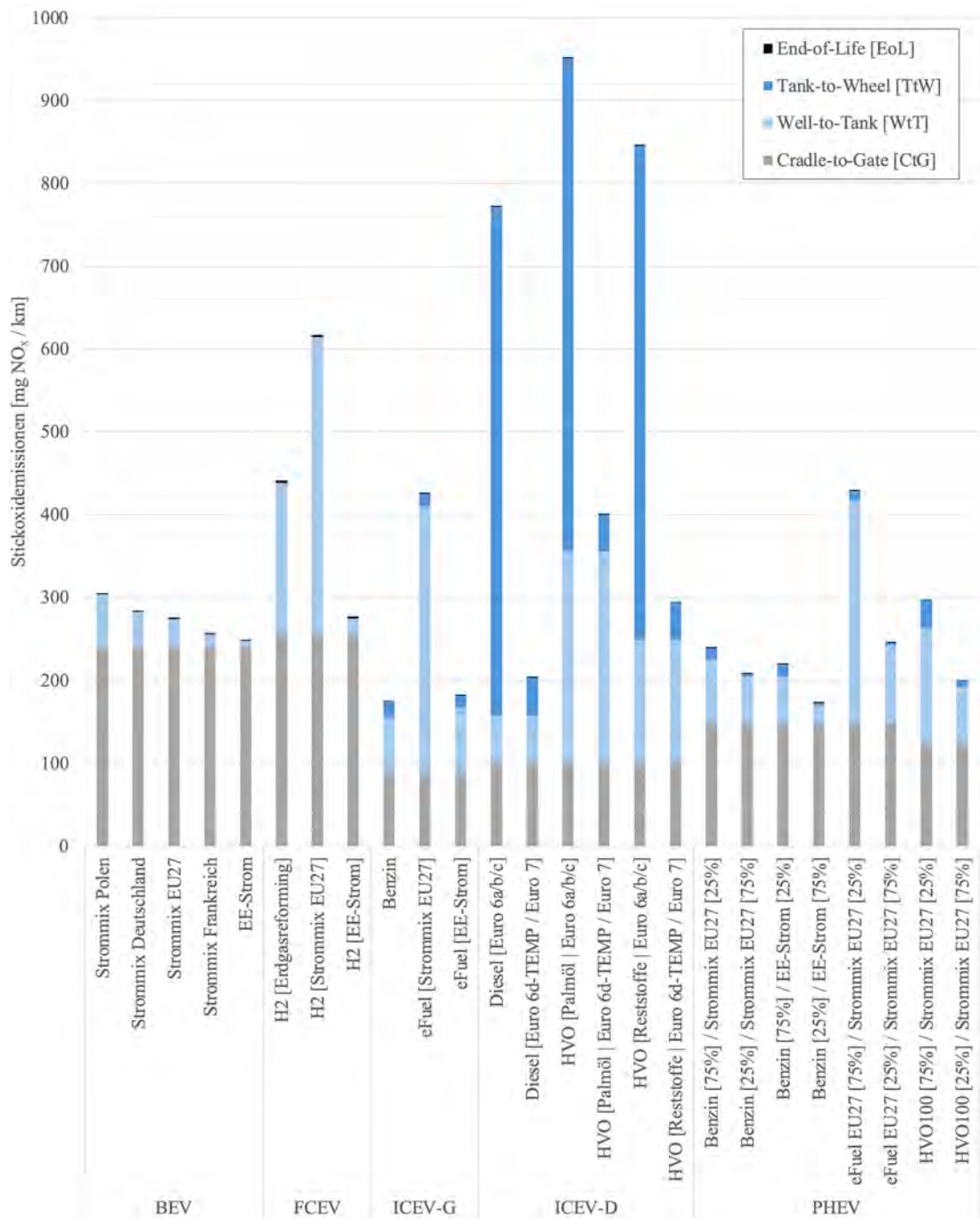


Abbildung 56: LCA-Stickoxidemissionen

Im direkten Vergleich der Stickoxidemissionen über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich ein sehr divergentes Bild. Über den gesamten Lebenszyklus emittieren Fahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen die geringsten NO_x-Emissionen, falls diese Fahrzeuge die neuesten EU-Abgasnormen (Euro 6d-TEMP oder neuer) erfüllen. Durch die noch sehr hohen Emissionen der Herstellung von PKWs mit alternativen Antriebstechnologien (BEV, FCEV und PHEV) ergeben

sich bei der Lebenszyklusanalyse keine Vorteile gegenüber klassischen Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Dennoch entstehen bei BEV und FCEV keine direkten Emissionen in den Ballungszentren, was zu einer Reduzierung der Luftverschmutzung beiträgt. In Abbildung 57 werden die prozentualen Anteile der einzelnen Phasen des Lebenszyklus von PKWs vergleichend dargestellt. Auch hier ergibt sich ein sehr divergentes Bild.

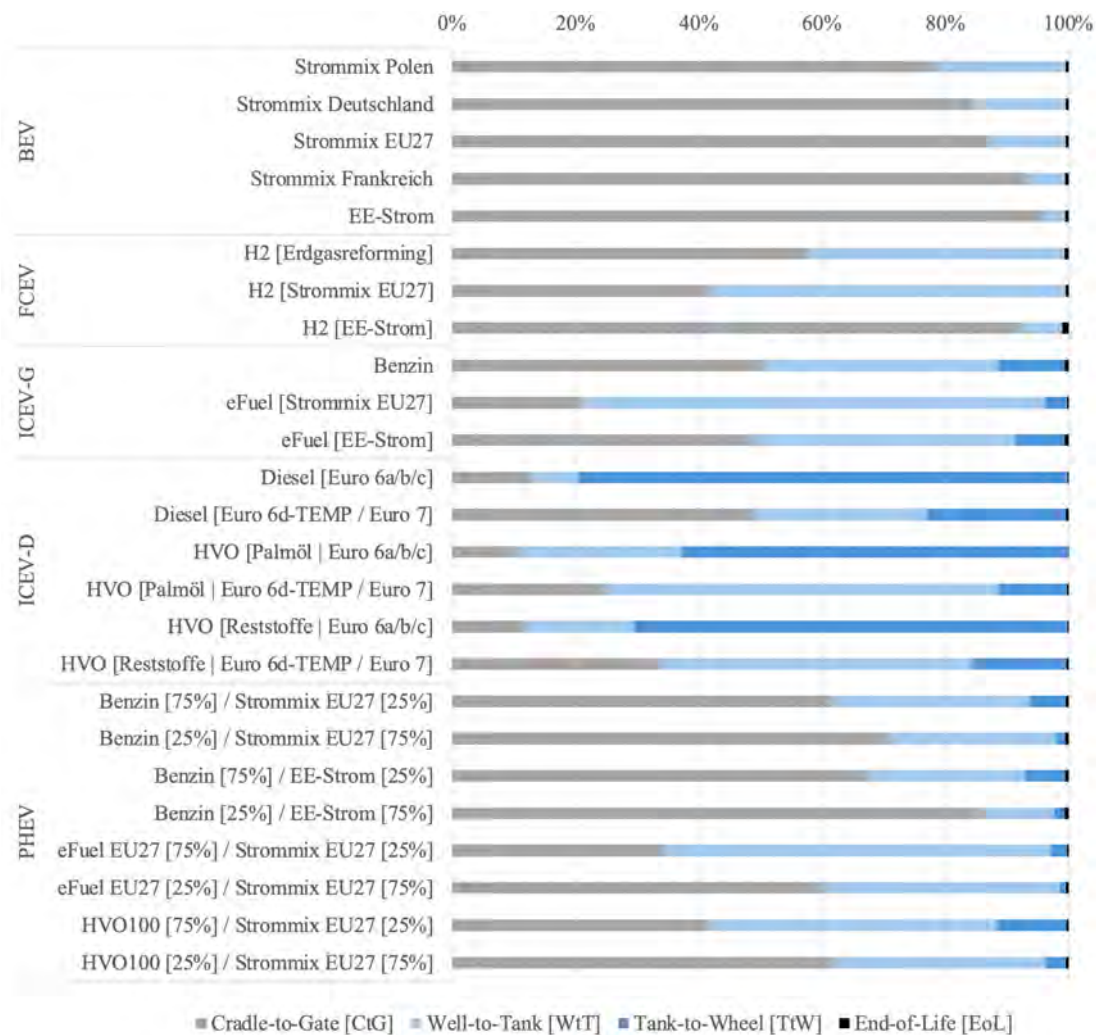


Abbildung 57: Prozentuale Verteilung der LCA-Stickoxidemissionen

Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen dominiert die Cradle-to-Gate-Phase mit einem Anteil von 80 % oder mehr. Hier sollte der Fokus auf die signifikante Reduzierung der NO_x-Emissionen in der Herstellungsphase gesetzt werden. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen dominieren bei den Herstellungsmethoden mit Erdgasreforming oder EU-Strommix sowohl die NO_x-Emissionen der Herstellung als auch die Well-to-Tank-Emissionen. Bei der Herstellung des Wasserstoffs anhand von 100 % erneuerbaren Energien dominieren die Cradle-to-Gate-Emissionen mit mehr als 90 %.

Bei Verbrennungsmotoren überwiegen bei Diesel-Fahrzeugen, welche nur die älteren EU-Abgasnormen (Euro 6a, Euro 6b und Euro 6c) erfüllen die direkten Emissionen im Rahmen der Tank-to-Wheel-Analyse. Bei Benziner-Fahrzeugen oder Diesel Fahrzeugen neuerer Generation (Euro 6d-TEMP oder neuer) verschiebt sich die Problematik mehr hin zu der Herstellung (Cradle-to-Gate) oder der Vorkette der Energieträger (Well-to-Tank). Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen dominieren sowohl die Emissionen der Herstellung als auch der Vorkette. Bei allen Antriebstechnologien betragen die NO_x-Emission in der End-of-Life-Phase weniger als 1 % und sind somit von untergeordneter Bedeutung.

Detaillierte Berechnungen zu diesem Kapitel sind in **Anlage II** verfügbar. Zusammenfassend sollte der Fokus der weiteren Reduzierung von Stickoxiden insbesondere auf die Lebenszyklusphasen der Herstellung der PKWs (Cradle-to-Gate) und auf die Vorkette bei der Herstellung der Energieträger (Well-to-Tank) gelegt werden, um Rebound-Effekte durch die Transformation zu alternativen Antriebstechnologien zu vermeiden.

6.2 Vergleich der Feinstaubemissionen der verschiedenen Antriebstechnologien

Neben den im vorherigen Kapitel betrachteten Stickoxidemissionen werden lokale Luftverschmutzungen auch durch Feinstaub verursacht. In diesem Kapitel werden insbesondere die auspuffbedingten Feinstaubemissionen betrachtet, die in der Vergangenheit erheblich zu lokaler Luftverschmutzung, insbesondere in Ballungsräumen, beigetragen haben. Im Jahr 1990 wurden 83 % der $PM_{2,5}$ und 72 % der PM_{10} -Feinstaubemissionen durch auspuffbedingte PM_x -Emissionen verursacht. Durch konstante Reduktion der Auspuffemissionen konnten die verkehrsbedingten Feinstaubemissionen deutlich reduziert werden.

Aktuell sind nicht nur die auspuffbedingten Emissionen, sondern auch die abriebbedingten Feinstaubemissionen in den Fokus gerückt. Die abriebbedingten Feinstaubemissionen entstehen beispielsweise durch Bremsabrieb oder Reifenabrieb. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die abriebbedingten Feinstaubemissionen nicht weiter betrachtet.²⁰¹ Zu diesem Thema gibt es umfangreiche Untersuchungen des OECD. Eines der Probleme welches vom OECD hervorgehoben wird ist die mangelnde Regulierung zu den abriebbedingten Emissionen.²⁰²

Im Gegensatz zu den zuvor genannten abriebbedingten Emissionen gibt es genaue Grenzwertvorgaben der EU in Bezug auf die auspuffbedingten Feinstaubemissionen. Die **Euro 7-Emissionsgrenzwerte** für Feinstaub betragen **4,5 mg Partikelmasse pro Kilometer** und die Partikelzahl darf maximal $6 \cdot 10^{11}$ Partikel für PKWs mit Benzin- oder Diesel-Verbrennungsmotor betragen.²⁰³

Cradle-to-Gate- und End-of-Life-Feinstaubemissionen

Bei der Herstellung der PKWs werden Feinstaubemissionen freigesetzt, die bei den alternativen Antriebstechnologien höher sind als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Die erhöhten Feinstaubbelastungen werden insbesondere durch die Batterieproduktion verursacht.²⁰⁴ Dies ergibt ein sehr ähnliches Bild wie bei den Treibhausgasemissionen, bei denen die alternativen Antriebstechnologien ebenfalls höhere Emissionen aufweisen (vgl. Kapitel 5.7). Die End-of-

²⁰¹ Zapf et al., 2021a, S. 50 ff.

²⁰² OECD, 2020, S. 8.

²⁰³ Europäisches Parlament und Rat, 2024, S. 26.

²⁰⁴ Wietschel et al., 2022, S. 29.

Life-Emissionen sind im Vergleich zu den PM_x-Emissionen der Herstellung der PKWs verschwindend gering und werden hier nicht weiter im Detail erläutert.²⁰⁵

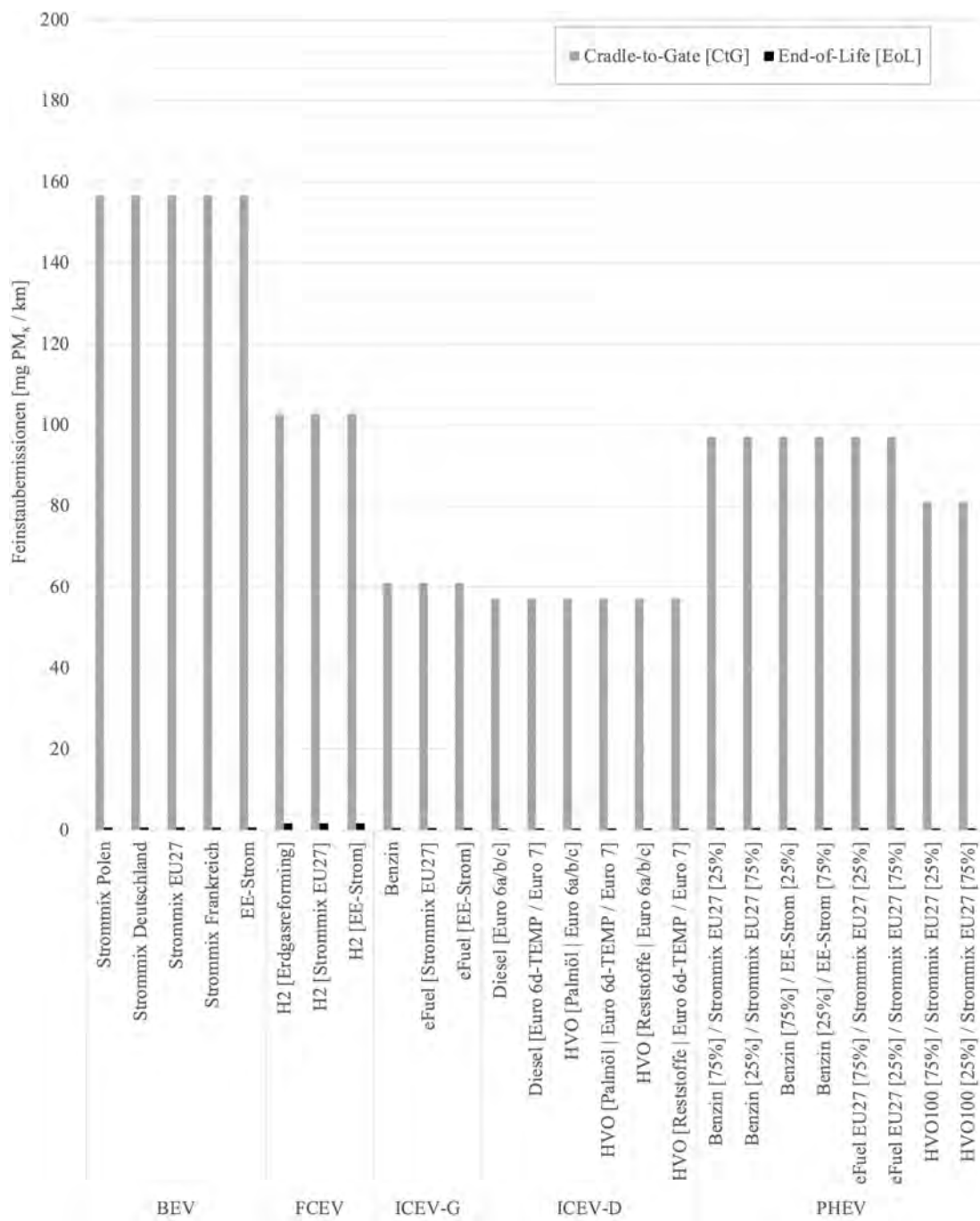


Abbildung 58: Cradle-to-Gate- und End-of-Life-Feinstaubemissionen

²⁰⁵ Wietschel et al., 2022, S. 28 ff.

Well-to-Tank-Feinstaubemissionen

Die Feinstaubemissionen, die in der Vorkette bei der Herstellung der Energieträger entstehen, unterliegen ähnlichen Schwankungen wie die Stickoxide. Bei der Erzeugung des Stroms für den Einsatz in batterieelektrischen Fahrzeugen werden geringere Mengen an Feinstaub freigesetzt als bei der Herstellung von fossilen Kraftstoffen. In Bezug auf Brennstoffzellenfahrzeuge werden geringere Feinstaubemissionen nur in Verbindung mit 100 % erneuerbaren Energien erzielt.

Ähnlich wie bei den Stickoxiden werden bei der Herstellung von alternativen Kraftstoffen wie eFuels oder HVO höhere Feinstaubemissionen als bei fossilen Kraftstoffen freigesetzt. Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen ergibt sich ein sehr divergentes Bild, bei dem sich in den meisten Fällen keine Einsparungen an PM_x -Emissionen im Vergleich zu klassischen Benziner- und Dieselfahrzeugen ergeben.

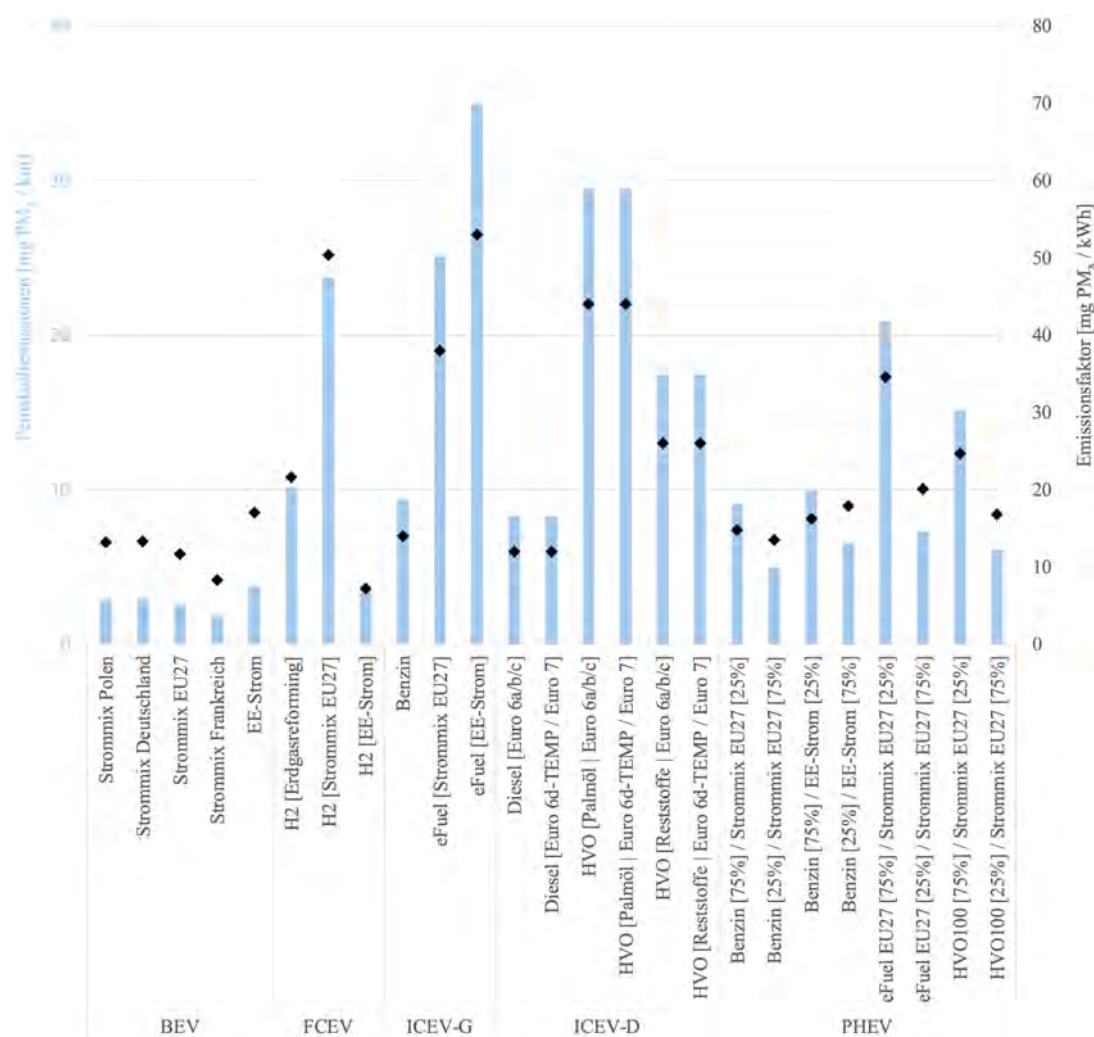


Abbildung 59: Well-to-Tank-Feinstaubemissionen

Tank-to-Wheel-Feinstaubemissionen

Während batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge im Rahmen der Tank-to-Wheel-Analyse keine Feinstaubemissionen aufweisen, müssen diese für verbrennungsmotorische Fahrzeugkonzepte berücksichtigt werden. In der aktuellen Veröffentlichung des Umweltbundesamtes zur Emissionsbilanz von Energieträgern werden die direkten Emissionen bei fossilem Diesel und auch bei HVO mit dem gleichen Wert von 7 mg PM_x/kWh festgesetzt.²⁰⁶ Dies entspricht ungefähr dem aktuellen EU-Grenzwert von 4,5 mg PM_x pro Kilometer Fahrstrecke.

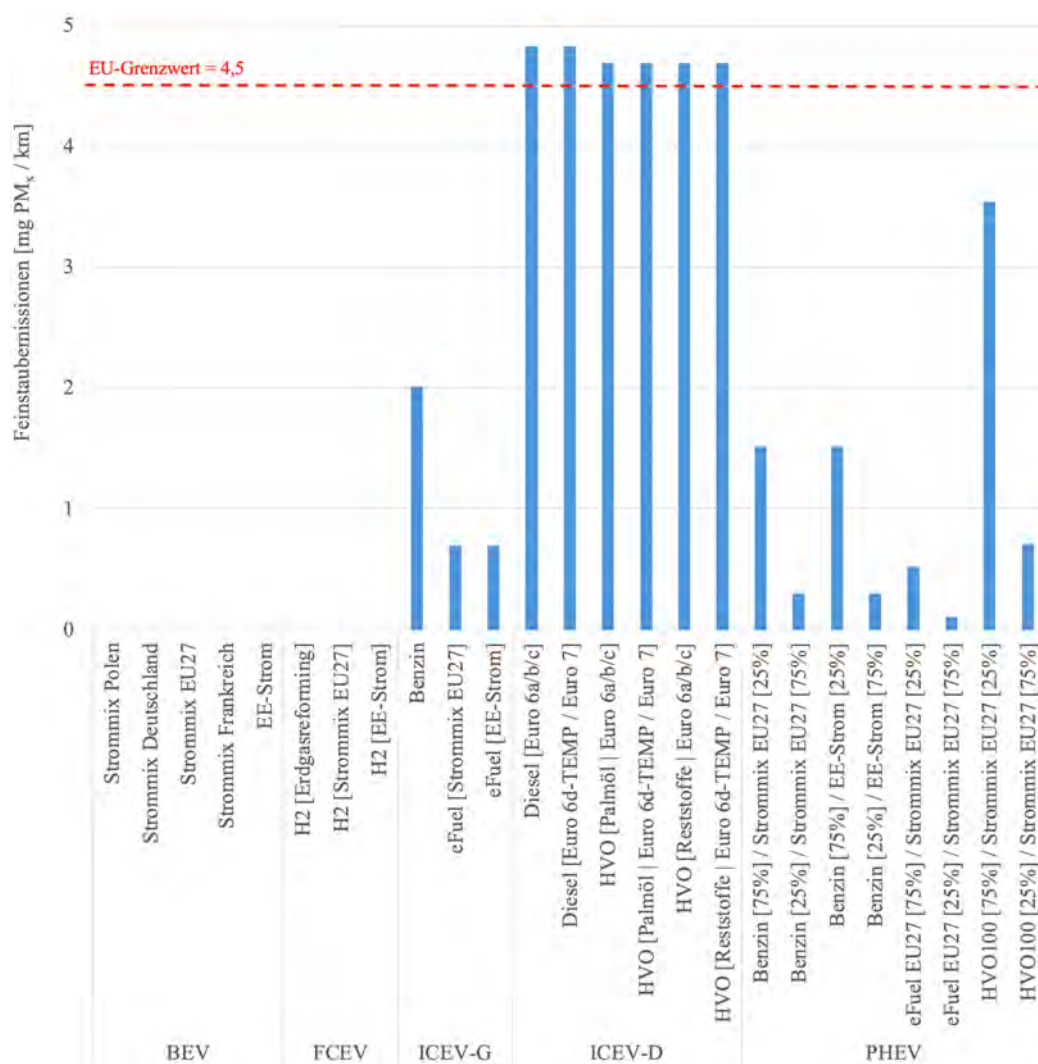


Abbildung 60: Tank-to-Wheel-Feinstaubemissionen

²⁰⁶ Lauf et al., 2025, S. 144 f.

Bei den eFuels weisen Studien darauf hin, dass diese durch einen optimierten Verbrennungsprozess weniger Feinstaubemissionen ausstoßen können als fossiles Benzin. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde die Annahme getroffen, dass sich die PM_x-Emissionen um 65 % im Vergleich zu Benzin reduzieren lassen.²⁰⁷ Jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse der Studien, die sich mit der Thematik der Reduzierung von Feinstaubemissionen von eFuels beschäftigen. Derzeit gibt es wenige Studien, welches darauf schließen lässt, dass es hier noch weiteren Forschungsbedarf gibt. Da eFuels noch nicht marktreif sind, fehlt es hier auch an umfangreicheren Erfahrungswerten. Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen können die Feinstaubemissionen durch niedrigere verbrennungsmotorische Fahranteile reduziert werden.

Feinstaubemissionen über den gesamten Lebenszyklus

Im direkten Vergleich der Feinstaubemissionen über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich ein abweichendes Bild. Über den gesamten Lebenszyklus emittieren Fahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen die geringsten PM_x-Emissionen. Durch die höheren Emissionen bei der Herstellung der PKWs mit alternativen Antriebstechnologien (BEV, FCEV und PHEV) ergeben sich bei der Lebenszyklusanalyse keine Vorteile gegenüber klassischen Verbrennungsmotoren.

²⁰⁷ Kulzer et al., 2020.; Soler et al., 2020, S. 66.

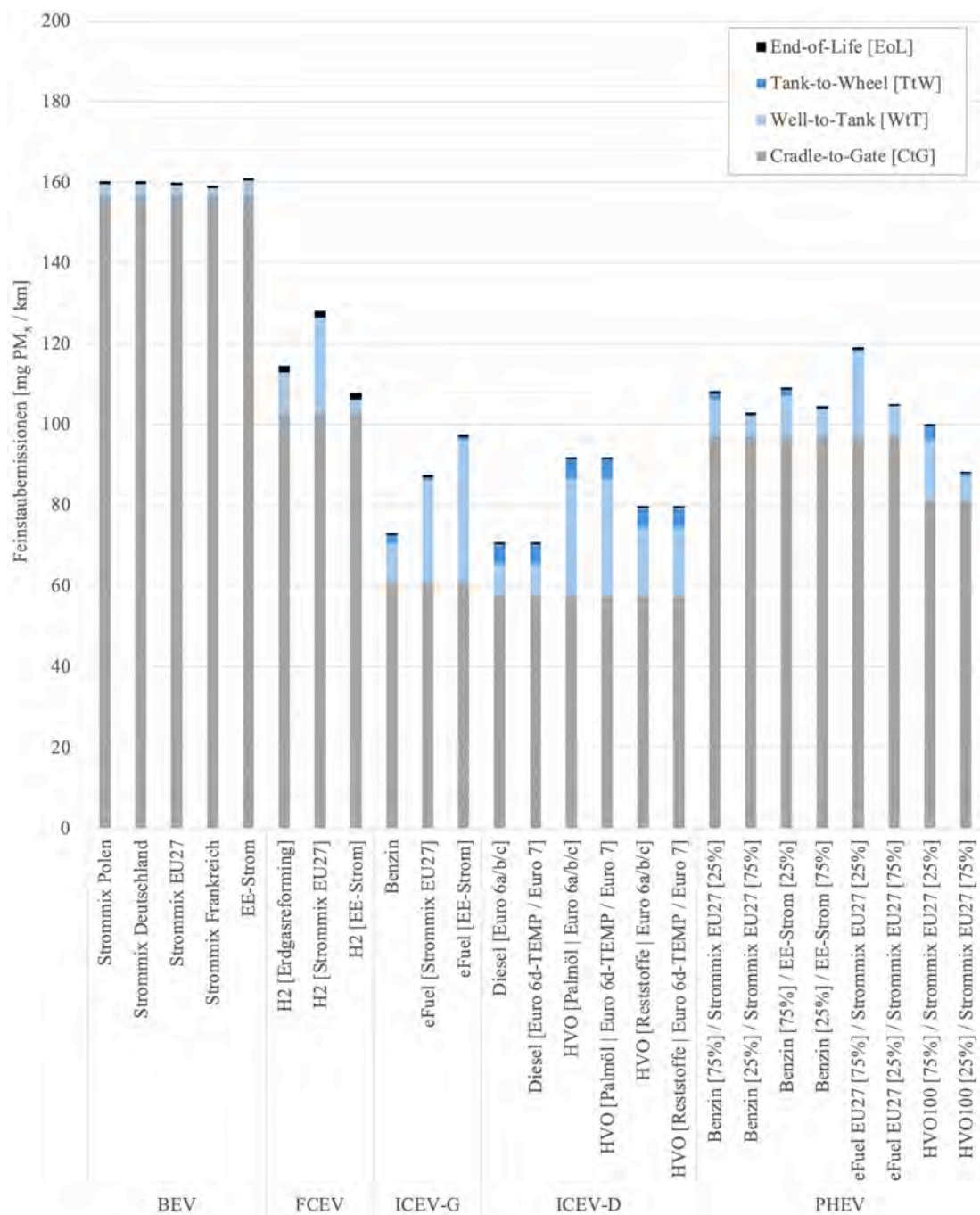


Abbildung 61: LCA-Feinstaubemissionen

In Abbildung 62 werden die prozentualen Anteile der einzelnen Phasen des Lebenszyklus von PKWs vergleichend dargestellt. Auch hier ergibt sich ein divergierendes Bild.

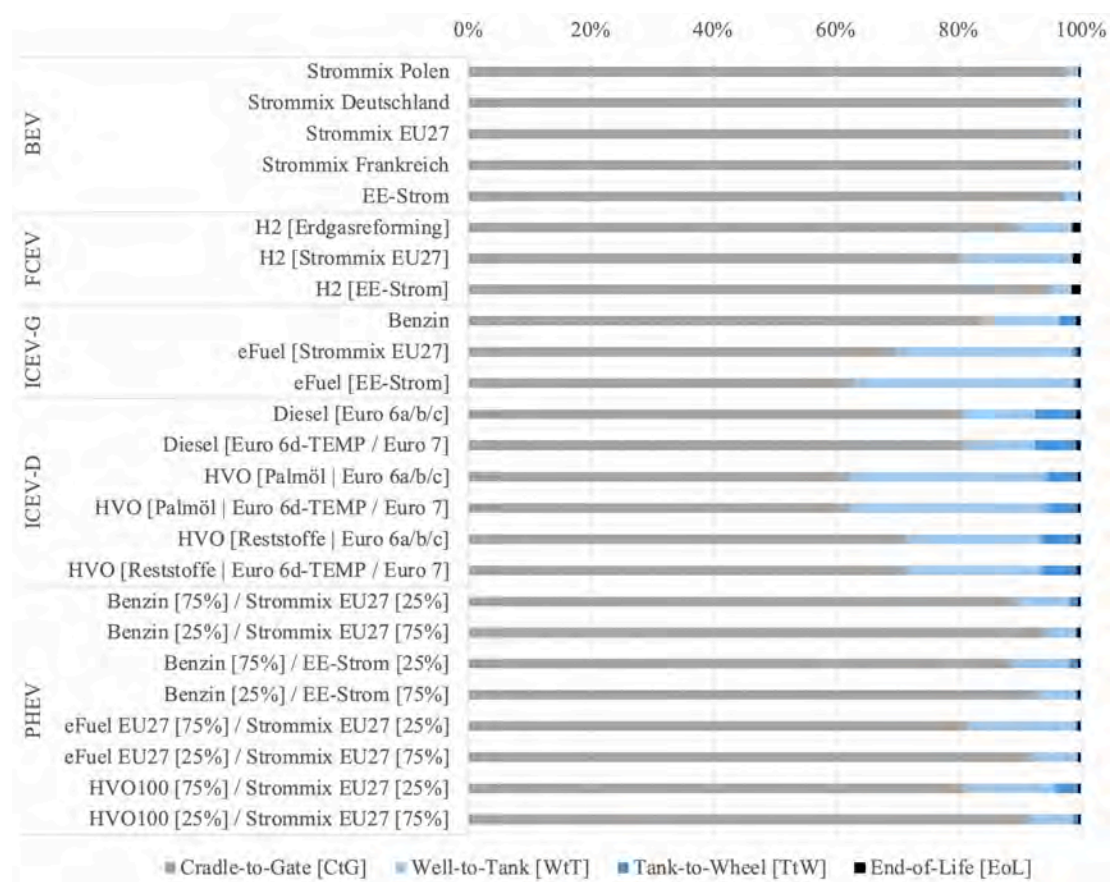


Abbildung 62: Prozentuale Verteilung der LCA-Feinstaubemissionen

Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen dominiert die Cradle-to-Gate-Phase mit einem Anteil von 95 % oder mehr. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen dominieren ebenfalls die PM_x -Emissionen der Herstellung mit einem Anteil von 80 % und mehr. Hier sollte der Fokus auf die signifikante Reduzierung der Feinstaubemissionen in der Herstellungsphase gesetzt werden.

Bei Verbrennungsmotoren dominieren bei Fahrzeugen, die mit fossilen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel betrieben werden, ebenfalls die Emissionen der Herstellung mit einem Anteil von ca. 80 %. Bei Fahrzeugen die mit alternativen Kraftstoffen wie eFuels oder HVO betrieben werden, sollte zusätzlich auch noch ein Fokus auf die Vorkette (Well-to-Tank) gelegt werden, um die Feinstaubbelastungen weiter zu reduzieren. Bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen überwiegen die Emissionen der Herstellung. Bei allen Antriebstechnologien betragen die PM_x -Emission in der End-of-Life-Phase weniger als 2 % und sind somit von untergeordneter Bedeutung.

Detaillierte Berechnungen zu diesem Kapitel sind in **Anlage II** verfügbar. Zusammenfassend sollte der Fokus der weiteren Reduzierung von Feinstaubbelastungen insbesondere auf die Lebenszyklusphasen der Herstellung der PKWs (Cradle-to-Gate) und auf die Vorkette bei der Herstellung der Energieträger (Well-to-Tank) gelegt werden, um Rebound-Effekte durch die Transformation zu alternativen Antriebstechnologien zu vermeiden. Als ein weiterer Aspekt bei der Reduzierung von Feinstaubemissionen sollten die zu Beginn dieses Kapitels erwähnten, abriebbedingten Feinstaubemissionen berücksichtigt werden, die voraussichtlich zunehmend an Bedeutung gewinnen werden.

6.3 Vergleichende Betrachtung zum Einsatz kritischer Rohstoffe für alternative Antriebstechnologien

EU-Liste kritischer Rohstoffe

Im Kontext der Europäischen Union gelten Rohstoffe als kritisch, wenn diese zugleich eine **hohe wirtschaftliche Bedeutung** aufweisen und zum anderen durch ein **hohes Versorgungsrisiko** gekennzeichnet sind. In einem Turnus von 3 Jahren veröffentlicht die Europäische Kommission eine aktualisierte Fassung der Studie zur EU-Liste kritischer Rohstoffe. Die letzte Aktualisierung hatte im Jahr 2023 stattgefunden und es wurden 34 Rohstoffe als kritische bzw. strategische Rohstoffe eingestuft. Die im Rahmen dieser Masterarbeit betrachteten Rohstoffe Lithium, Kupfer, Nickel, Kobalt, Platingruppenmetalle, Grafit, Mangan, Aluminium und Seltenerdmetalle sind alle als kritische bzw. strategische Rohstoffe gemäß der EU-Liste kritischer Rohstoffe aus dem Jahre 2023 eingestuft.²⁰⁸

²⁰⁸ Europäische Kommission, 2023, S. 3 ff.

Tabelle 19: EU-Liste kritischer und strategischer Rohstoffe im Kontext alternativer Antriebstechnologien

Kritischer Rohstoff		Veröffentlichungsjahr der EU-Liste					Weltweit wichtigstes Lieferland	Anteil
		2011	2014	2017	2020	2023		
Lithium	Li	x	x	x	K	K	China	56%
Kupfer	Cu	x	x	x	x	S	Chile	28%
Nickel	Ni	x	x	x	x	S	China	33%
Kobalt	Co	K	K	K	K	K	DR Kongo	63%
PGM - Palladium	Pd	K	K	K	K	K	Russland	40%
PGM - Platin	Pl	K	K	K	K	K	Südafrika	71%
PGM - Rhodium	Rh	K	K	K	K	K	Südafrika	81%
PGM - Ruthenium	Ru	K	K	K	K	K	Südafrika	94%
Grafit	Gr	K	K	K	K	K	China	67%
Mangan	Mn	x	x	x	x	K	Südafrika	29%
Aluminium	Al	x	x	x	x	K	Australien	28%
Schwere Seltenerdmetalle		K	K	K	K	K	China	100%
Leichte Seltenerdmetalle		K	K	K	K	K	China	85%

Legende

K	Kritischer Rohstoff
S	Strategischer Rohstoff
x	Rohstoff nicht kritisch

In Tabelle 19 werden die in Bezug auf alternative Antriebstechnologien kritischen bzw. strategischen Rohstoffe und das weltweit wichtigste Lieferland inklusive dem globalen Lieferanteil dargestellt. Zusätzlich werden auch noch die Bewertungen der vergangenen Jahre aufgezeigt.²⁰⁹ Die Platingruppenmetalle (PGM) werden im Rahmen der EU-Liste der kritischen Rohstoffe als eine Rohstoffgruppe zusammengefasst und als ein kritischer Rohstoff gewertet. In

²⁰⁹ Europäische Kommission, 2020, S. 4.

der Tabelle 19 wurden die verschiedenen Platinmetalle einzeln dargestellt, da bei diesen eine Abhängigkeit zu unterschiedlichen Lieferländern besteht.²¹⁰ Der Bedarf an kritischen Rohstoffen unterscheidet sich bei den verschiedenen Antriebstechnologien. In Tabelle 20 sind die Zusammenhänge zwischen den kritischen Rohstoffen und den konventionellen Antriebstechnologien (ICEV) und den alternativen Antriebstechnologien (BEV, FCEV und PHEV) dargestellt. Zusätzlich zum klassischen Verbrennungsmotor (ICEV) wird der Bedarf an kritischen Rohstoffen für Fahrzeuge, die auf einer Full-Hybrid-Technologie basieren dargestellt, da diese Art von Antrieb bei den Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 in den Kapiteln 4.6 und 5.3 bis 5.7 statt klassischen Verbrennungsmotoren angenommen wurde.

Tabelle 20: Bedarf an kritischen Rohstoffen für die unterschiedlichen Antriebstechnologien

Kritischer Rohstoff		Antriebstechnologien				
		BEV	FCEV	ICEV	ICEV Full-Hybrid	PHEV
Lithium	Li	✓	✓		✓	✓
Kobalt	Co	✓	✓		✓	✓
Kupfer	Cu	✓	✓	✓	✓	✓
Nickel	Ni	✓	✓		✓	✓
Mangan	Mn	✓	✓		✓	✓
Grafit	Gr	✓	✓	✓	✓	✓
Platingruppenmetalle			✓	✓	✓	✓
Aluminium	Al	✓	✓	✓	✓	✓
Seltenerdmetalle		✓	✓		✓	✓

Lithium und Kobalt sind insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge aber auch für Plug-in-Hybridfahrzeuge in signifikanten Mengen erforderlich. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen und Full-Hybrid-ICEV werden diese Rohstoffe ebenfalls benötigt, aber in deutlich geringeren Mengen. Bei den aktuell weit

²¹⁰ Europäische Kommission, 2023, S. 6.

verbreiteten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren sind diese Rohstoffe nicht relevant.²¹¹

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, ist Kupfer im Kontext der EU-Liste kritischer Rohstoffe als strategischer Rohstoff deklariert worden. Kupfer wird nicht nur bei traditionellen Benzin- und Dieselfahrzeugen in signifikanten Mengen benötigt, sondern auch bei alternativen Antriebstechnologien. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen ist der Kupferbedarf höher als bei ICEVs, jedoch steigt der Bedarf besonders stark bei PHEVs und BEVs an. Im Vergleich zu einem klassischen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor ist der Kupferbedarf bei einem BEV um den Faktor 4 höher. In Zukunft wird auch ein erhöhter Bedarf an Kupfer für Verbrennungsmotoren mit Full-Hybridtechnologie benötigt, jedoch bleibt der Kupferbedarf eines batterieelektrischen Fahrzeuges auch in Zukunft deutlich höher als bei allen anderen Antriebstechnologien.²¹²

Bei den Platingruppenmetallen ist der Bedarf aktuell und auch in Zukunft bei Brennstoffzellenfahrzeugen deutlich höher als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICEV, ICEV-Full-Hybrid und PHEV). Bei den aktuellen Brennstoffzellenkonzepten ist eine hohe Platinbeladung der Brennstoffzelle notwendig. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium) für die Abgasreinigung benötigt. Während bei einem Benzin- ca. 5 Gramm und einem Diesel ca. 7 Gramm an Platingruppenmetallen pro Fahrzeug benötigt werden, liegt der Bedarf bei einem Brennstoffzellenfahrzeug bei fast 50 Gramm pro Fahrzeug. Durch technologischen Fortschritt ist davon auszugehen, dass sich der Platinbedarf für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) mehr als halbieren lässt, dennoch bleibt der Bedarf deutlich höher als bei Verbrennungsmotoren.²¹³

Aus der Tabelle 20 ist ersichtlich, dass der Bedarf an kritischen Rohstoffen bei den alternativen Antriebstechnologien höher ist als bei Fahrzeugen mit klassischen Antriebstechnologien. Dieser erhöhte Bedarf an kritischen Rohstoffen wird durch die wichtigsten Fahrzeugkomponenten von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien hervorgerufen. Diese wichtigen Fahrzeugkomponenten und deren Zusammenhang zu den kritischen Rohstoffen sind in Tabelle 21 dargestellt.

²¹¹ Wietschel et al., 2022, S. 39.

²¹² Wietschel et al., 2022, S. 41.

²¹³ Wietschel et al., 2022, S. 40.

Tabelle 21: Bedarf an kritischen Rohstoffen für die unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten alternativer Antriebstechnologien

Kritischer Rohstoff		Fahrzeugkomponenten		
		Batterie (Akku)	Elektromotor	Brennstoffzelle
Lithium	Li	✓		
Kobalt	Co	✓		
Kupfer	Cu	✓	✓	
Nickel	Ni	✓		
Mangan	Mn	✓		
Grafit	Gr	✓		✓
Platingruppenmetalle				✓
Aluminium	Al	✓	✓	✓
Seltenerdmetalle			✓	

Lithium wird neben Kobalt, Nickel und Grafit für die Herstellung von Traktionsbatterien benötigt. Darüber hinaus werden große Mengen an Aluminium, Kupfer und Grafit bei der Herstellung benötigt.²¹⁴ Bei den Elektromotoren werden oftmals Synchronmotoren eingesetzt, die anhand eines Permanentmagneten angeregt werden.²¹⁵ Bei der Herstellung dieser Permanentmagneten kommen Seltenerdmetalle zum Einsatz.²¹⁶ Ein wesentlicher Rohstoff für Elektromotoren ist Aluminium, welches nicht nur bei Elektromotoren, sondern auch für Traktionsbatterien und Brennstoffzellen bedeutend ist.²¹⁷ In Bezug auf Brennstoffzellen werden insbesondere Platin und Iridium eingesetzt. In Bipolarplatten einer Brennstoffzelle wird in der Regel auch noch Grafit eingesetzt.²¹⁸

²¹⁴ Fritz et al., 2023, S. 14.

²¹⁵ Doppelbauer, 2024, S. 32.

²¹⁶ Fritz et al., 2023, S. 19.

²¹⁷ Biemann et al., 2024, S. 214.

²¹⁸ Fritz et al., 2023, S. 18.

Lithium

Lithium wird neben Kobalt, Nickel und Grafit für die Herstellung von Traktionsbatterien benötigt. Lithium wurde erstmalig im Jahr 2020 als kritischer Rohstoff im Kontext der EU-Liste kritischer Rohstoffe deklariert (vgl. Tabelle 19). Dieses Beispiel verdeutlicht die Bedeutung der regelmäßigen Neubewertung der Rohstoffe in Bezug auf deren wirtschaftliche Relevanz und des Versorgungsrisikos. In einer Veröffentlichung der NOW GmbH aus dem Jahr 2023 wird der signifikante Anstieg des globalen Bedarfs an Traktionsbatterien für den Zeitraum 2022 bis 2030 mit einer jährlichen Wachstumsrate von 25 % vorhergesagt.²¹⁹ Derzeit ist Lithium das wichtigste Element in Lithium-Ionen-Batterien. Aufgrund der fortschreitenden Transformation in Richtung Elektromobilität wird es voraussichtlich nach sich ziehen, dass die heutigen Fördermengen von Lithium deutlich erhöht werden müssen. Für eine Kapazität der Batterie von 10 kWh wird ca. 1 Kilogramm Lithium benötigt. Die NOW GmbH prognostiziert, dass die heutige Primärproduktion aus dem Jahr 2022 bis zum Jahr 2030 mehr als verdoppelt werden muss, um den globalen Lithium-Bedarf für Elektrofahrzeuge zu decken.²²⁰

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Rohstoffe von Lithium-Ionen-Batterien betrachtet, da diese Art von Traktionsbatterien derzeit und voraussichtlich auch in den nächsten Jahren dominieren wird. Aufgrund des rasanten technischen Fortschritts und hohem Innovationspotenzial bei Traktionsbatterien kann sich die Situation in Zukunft signifikant verändern. Dies würde eine Neubewertung der kritischen Rohstoffe für alternative Antriebstechnologien erfordern.²²¹ Eine der Optionen, um Lithium-Ionen-Batterien zu ersetzen sind Natrium-Ionen Batterien, die weder Lithium noch Kobalt benötigen.²²² Eine aktuelle Studie aus dem Jahr 2025 zeigt, dass seit dem Pariser Klimaschutzabkommen aus dem Jahr 2015 die Patente für alternative Antriebstechnologien wie BEV und FCEV signifikant zugenommen haben, während die Patente für klassische Verbrennungsmotoren deutlich zurückgegangen sind.²²³

Neben dem Versorgungsrisiko und der wirtschaftlichen Bedeutung von Lithium steht dieser Rohstoff auch mit negativen ökologischen und sozialen

²¹⁹ Dollenmaier, 2023, S. 2.

²²⁰ Dollenmaier, 2023, S. 4.

²²¹ Fritz et al., 2023, S. 15.

²²² Biemann et al., 2024, S. 71.

²²³ Zhang/Fujii, 2025, S. 8 ff.

Herausforderungen im Zusammenhang, da die Rohstoffgewinnung zum Absinken des Grundwasserspiegels führt.²²⁴ Zusätzlich zu dem Bedarf an Frischwasser entstehen weitere ökologische Risiken durch den Eingriff in sensible Ökosysteme wie Salzseen. Durch die steigenden Energiedichten der Traktionsbatterien ist davon auszugehen, dass die Bedarfe an Lithium pro Fahrzeug in Zukunft sinken werden.²²⁵

Kobalt

Der Rohstoff Kobalt und dessen Förderung wird schon seit langer Zeit von Menschenrechts- und Umweltschutzorganisationen kritisiert. Die Abbaubedingungen in dem weltweit wichtigsten Lieferland mit einem globalen Anteil von 63% werden insbesondere mit dem kleinbäuerlichen (artisanalen) Bergbau in Verbindung gebracht, der ca. 10 % bis 20 % des in Kongo abgebauten Kobalts ausmacht. Konkret werden mangelnde Schutzausrüstung (Kleidung und Helme) aber auch Kinder- und Zwangsarbeit beanstandet. Darüber hinaus sind viele dieser Minen illegal errichtet. Es gibt einige Initiativen von Großkonzernen und Menschenrechts- und Umweltschutzorganisationen zur Verbesserung dieser Situation. Dennoch ist die Wahrnehmung zum Thema Kobalt in der gesellschaftlichen Wahrnehmung negativ behaftet.²²⁶

Wie der Tabelle 19 entnommen werden kann, ist Kobalt seit der ersten Studie der EU zu kritischen Rohstoffen als solcher deklariert. Wie in Tabelle 21 ersichtlich ist der Abbau von Kobalt im Kontext des Europäischen PKW-Sektors nur in Bezug auf Traktionsbatterien von Bedeutung. Kobalt wird für die Batterietypen benötigt, die bei der Kathode auf NMC-Technologie setzen. NMC ist eine Abkürzung für Nickel-Mangan-Kobalt und ist derzeit weit verbreitet. Der globale Bedarf für Kobalt in Bezug auf Batterieanwendungen soll sich von 2022 bis zum Jahr 2030 verdreifachen.²²⁷

In der aktuellen Forschung zu Lithium-Ionen-Batterien wird ein verstärkter

²²⁴ Fritz et al., 2023, S. 6.

²²⁵ Wietschel et al., S. 39 f.

²²⁶ Fritz et al., 2023, S. 46.

²²⁷ Dollenmaier, 2023, S. 5.

Fokus auf kobaltfrei Alternativen gesetzt.²²⁸ Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) oder Lithium-Nickel-Mangan-Oxid (LNMO) Batterien sind kobaltfreie Alternativen, die statt Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) Batterien eingesetzt werden könnten.²²⁹

Kupfer, Nickel und Mangan

Seit dem Jahr 2023 sind erstmalig auch Kupfer und Nickel als kritische Rohstoffe deklariert worden. Obwohl beide Rohstoffe zwar als wirtschaftlich bedeutend, aber nicht als riskant in Bezug auf die Versorgung eingestuft wurden, sind diese trotzdem als **strategische Rohstoffe** deklariert. Mangan wurde im Jahr 2023 zum ersten Mal als kritischer Rohstoff deklariert. Alle drei Rohstoffe sind wichtig in Bezug auf Traktionsbatterien für alternative Antriebstechnologien (vgl. Tabelle 21). Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung von PKWs und der daraus resultierenden Steigerung des Bedarfs an kritischen Rohstoffen für Traktionsbatterien wurden Kupfer, Nickel und Mangan im Jahr 2023 erstmalig als strategische bzw. kritische Rohstoffe deklariert.²³⁰ Wie bereits in diesem Kapitel erwähnt, wird derzeit insbesondere NMC als Technologie für die Kathode von Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt.²³¹

Wie bereits zuvor in diesem Kapitel erwähnt, wird Kupfer sowohl für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch für alle alternativen Antriebstechnologien benötigt. Der Kupferbedarf ist von besonderer Bedeutung für Traktionsbatterien und Elektromotoren (Asynchronmotoren).²³² Darüber hinaus wird Kupfer auch bei Kabeln für das Bordnetz von PKWs aller Antriebstechnologien eingesetzt.²³³

Platingruppenmetalle und Grafit

Bei den Platingruppenmetallen stehen insbesondere Platin und Palladium mit erheblichen Umweltbelastungen im Zusammenhang. Platin und Palladium werden bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren für die Abgasnachbehandlung eingesetzt. Platin wird für die Brennstoffzellen bei FCEVs als Katalysator für die kalte Oxidation von Wasserstoff und Erzeugung elektrischer Energie

²²⁸ Fritz et al., 2023, S. 14.

²²⁹ Wietschel et al., 2022, S. 40.

²³⁰ Europäische Kommission, 2023, S. 3 ff.

²³¹ Öko-Institut, 2017, S. 29.

²³² Fritz et al., 2023, S. 34.

²³³ Wietschel et al., 2022, S. 40.

eingesetzt. Das Umweltbundesamt weist darauf hin, dass die Umweltbelastungen von Platin trotzdem signifikant bleiben, selbst wenn in den kommenden Jahren die Platinbeladung von Brennstoffzellen halbiert werden sollte. Platin trägt in erheblichen Maßen zu den Umweltbelastungen Treibhausgaspotenzial, Versauerungspotenzial, Eutrophierung und auch zu Feinstaub (PM_{2,5}) bei.²³⁴

Bei den Platingruppenmetallen besteht eine hohe Abhängigkeit von Südafrika und Russland. Platin wird zu 71% in Südafrika abgebaut (vgl. Tabelle 19). Ein ökologisches Problem wird durch den hohen Stromeinsatz beim Abbau von Platin verursacht. Die Minen liegen teilweise bis zu 1.500 Meter unter Tage und ausgiebige Kühlsysteme kommen beim Abbau zum Einsatz. Da Südafrika immer noch sehr viel Kohle bei der Stromerzeugung einsetzt ist der Emissionsfaktor der Stromerzeugung sehr hoch. Dies führt zur Freisetzung von erheblichen Mengen an Kohlendioxid, welches maßgeblich die negativen Folgen des Klimawandels verursacht.²³⁵ Bei der 26. Klimakonferenz (COP26) hatten neben Deutschland auch weitere führende Industrienationen eine Zusammenarbeit zur gerechten Energiewende angekündigt, um Südafrika bei der Verringerung der CO₂-Emissionen zu unterstützen.²³⁶ Mit einem Kohleanteil von 84 % im Jahr 2022 war das südafrikanische Stromsystem das emissionsintensivste der Welt.²³⁷

Seltenerdmetalle

„Seltene Erden sind keine Erden, sondern Mineralien, die in Form von Oxiden vorkommen. Eine Reihe von Bezeichnungen, wie z. B. Seltenerdoxide (SEO) oder Seltenerdmetalle, sind gebräuchlich.“²³⁸ Die Seltenerdmetalle werden nach leichten und schweren Seltenerdmetallen unterschieden. Bei den schweren Seltenerdmetallen besteht eine Monopolstellung mit 100% weltweitem Anteil aus China. Auch bei den leichten Seltenerdmetallen hat China mit 85% weltweitem Anteil eine dominierende Stellung.²³⁹

Permanent erregte Synchronmotoren werden aufgrund ihres geringen Gewichts und Volumens sowie ihrer Energieeffizienz häufig für Elektromotoren

²³⁴ Biemann et al., 2024, S. 213.

²³⁵ Fritz et al., 2023, S. 46 ff.

²³⁶ Europäische Kommission, 2021.

²³⁷ Agora Energiewende, 2025.

²³⁸ Fritz et al., 2023, S. 52.

²³⁹ Europäische Kommission, 2023, S. 6.

zum Antrieb von PKWs eingesetzt.²⁴⁰ In Bezug auf Fahrzeugkomponenten für alternative Antriebstechnologien spielt der Elektromotor eine entscheidende Rolle. Folglich stehen Seltenerdmetalle mit BEV, FCEV, Full-Hybrid-ICEV und PHEV im Zusammenhang (vgl. Tabelle 20 und Tabelle 21). Der Abbau der Seltenerdmetalle erfolgt über Säuren, mit denen die Metalle aus den Bohrlöchern gewaschen werden und durch unzureichende Absicherung der schlammartigen Rückstände das Grundwasser kontaminieren. Es entstehen giftige (Schwermetalle) und radioaktive Rückstände (Uran). Da die Seltenerdmetalle nur in einer geringen Konzentration vorliegen, ist ein entsprechend deutlich höherer Flächenbedarf notwendig als beispielsweise beim Abbau von Kupfer.²⁴¹

Recycling der kritischen Rohstoffe

Um die Abhängigkeit von anderen Ländern in Bezug auf kritische Rohstoffe zu reduzieren, rechnet die EU-Kommission bei Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan mit guten Abbauchancen in Europa. Für andere kritische Rohstoffe ist ein Abbau in Europa eher unwahrscheinlich, jedoch kann in diesen Fällen eine erhöhte Recyclingquote die Abhängigkeiten reduzieren. So beträgt die aktuelle Recyclingquote von Lithium 0 % und 22 % bei Kobalt. Prinzipiell besteht bei einigen der kritischen bzw. strategischen Rohstoffen, wie Kupfer, Nickel und Kobalt, die theoretische Möglichkeit eine Recyclingquote von ca. 99 % zu erzielen.²⁴²

²⁴⁰ Doppelbauer, 2025, S. 211 ff.

²⁴¹ Fritz et al., 2023, S 55.

²⁴² Fritz et al., 2023, S.25.

Zusammenfassung

Die EU-Liste kritischer Rohstoffe ist ein zentrales Instrument, um die Versorgungssicherheit mit kritischen Rohstoffen für die europäische Wirtschaft sicherzustellen. Der Übergang zu alternativen Antriebstechnologien erhöht den Bedarf einiger kritischer Rohstoffe erheblich. Lithium und Kobalt sind insbesondere für die Herstellung von Traktionsbatterien wichtig, jedoch steht deren Gewinnung aufgrund ökologischer und sozialer Herausforderungen in der Kritik. Kupfer spielt eine strategische Rolle und der Bedarf bei Elektrofahrzeugen ist deutlich höher als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, was die Nachfrage weiter antreibt. Platingruppenmetalle wie Platin und Palladium sind insbesondere für Brennstoffzellenfahrzeuge, aber auch für Verbrennungsmotoren zur Abgasreinigung von Bedeutung. Bei Seltenerdmetallen stellt die Dominanz Chinas ein erhebliches Versorgungsrisiko dar. Dennoch sind Seltenerdmetalle aufgrund ihrer Verwendung in Permanentmagneten von Bedeutung. Recycling bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeit von Importen zu reduzieren. Jedoch sind die Recyclingquoten von einigen kritischen Rohstoffen wie Lithium sehr gering. Eine Erhöhung dieser könnte dazu beitragen, die Versorgungssicherheit zu verbessern und den ökologischen Fußabdruck der Gewinnung dieser Rohstoffe erheblich zu reduzieren. Insgesamt erfordert die Transformation zu alternativen Antriebstechnologien eine ganzheitliche und umfassende Strategie zur Sicherstellung der Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe. Eine kontinuierliche Neubewertung der wirtschaftlichen Relevanz und des Versorgungsrisikos wird auch in Zukunft erforderlich sein, um die Ziele einer Verkehrswende im Kontext der Europäischen Union zu erreichen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse: Energieverbrauch und Potenzial zur Reduzierung der THG-Emissionen der verschiedenen Antriebstechnologien

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurden sowohl der Energieverbrauch als auch die CO₂e-Emissionen verschiedener Antriebstechnologien für PKWs im Kontext der Europäischen Union für die Jahre 2025, 2035 und 2050 untersucht. Schwerpunkt und Fokus der Arbeit lagen darin, im Gegensatz zu vielen bekannten Studien eine ganzheitliche Analyse durchzuführen, die den gesamten Lebenszyklus von Personenkraftwagen von der Herstellung (CtG) über die Nutzungsphase (WtW) bis zur Entsorgung (End-of-Life) der Fahrzeuge im Kontext der Europäischen Union bewertet. Die vergleichende Analyse dieser Ökobilanz legt einen wissenschaftlichen Beitrag mit belastbaren Daten vor, um fundierte Grundlagen für die erfolgreiche Transformation des europäischen PKW-Sektors bereitzustellen.

Die Masterarbeit basierte auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und berücksichtigte relevante Datenquellen wie Studien, Metastudien, Fachbücher, Fachliteratur und Statistiken von öffentlichen Institutionen. Bei der Berechnung der Energieverbräuche und entsprechenden CO₂e-Emissionen wurden alle für eine umfassende Analyse in Betracht zu ziehenden Faktoren mit einbezogen. Diese bewusst gewählten, ergebnisbeeinflussenden Faktoren waren Strommix bei BEV, Wasserstoffproduktionsmethoden bei FCEV, realistische Flottenverbräuche und alternative Kraftstoffe wie eFuels und HVO100 bei ICEVs, Sensitivitäten für verschiedene PHEV-Antriebskonzepte sowie spezifische Fahrzeuglebensdauer und Gesamtfahrleistungen der jeweiligen Antriebstechnologien.

In Tabelle 22 wird das Potenzial der Antriebstechnologien und Energieträger zur Reduzierung von Treibhausgasen vergleichend für die Zusammenfassung visualisiert. Die jeweiligen THG-Emissionen werden in einer Farbverlaufskarte dargestellt, um die aktuellen und auch zukünftigen Potenziale aufzuzeigen.²⁴³ Der Referenzwert, der in gelber Farbe und hervorgehobener Umrandung dargestellt ist, bezieht sich auf die THG-Emissionen von aktuellen ICEV-Benzinern aus dem Jahr 2025. Je mehr sich die Farbe in Richtung grün verändert umso höher ist das Potenzial. Farben, die sich in Richtung rot verändern,

²⁴³ Erneuerbare THG-Emissionen sind in dieser Betrachtung nicht mitberücksichtigt.

signalisieren, dass sogar mehr THG-Emissionen freigesetzt werden als bei dem Referenzwert des ICEV-Benziners.

Tabelle 22: Vergleichende Darstellung des Potenzials der Antriebstechnologien und Energieträger zur Reduzierung von Treibhausgasen

Antriebs- technologie	Energieträger	THG-Emissionen [g CO ₂ e / km]		
		2025	2035	2050
BEV	Strommix Polen	276	175	14
	Strommix Deutschland	189	128	13
	Strommix EU27	169	118	14
	Strommix Frankreich	122	95	14
	EE-Strom	115	95	14
FCEV	H2 [Erdgasreforming]	272	221	141
	H2 [Strommix EU27]	288	178	19
	H2 [EE-Strom]	105	79	19
ICEV-G	Benzin	267	223	163
	eFuel [EE-Strom]	74	77	25
	eFuel [Strommix EU27]	470	234	25
ICEV-D	Diesel	276	255	197
	HVO [Reststoffe]	69	73	25
	HVO [Palmöl]	404	385	337
PHEV	Benzin [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	261	191	118
	Benzin [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	175	116	35
	Benzin [75 %] / EE-Strom [25 %]	223	177	118
	Benzin [25 %] / EE-Strom [75 %]	106	89	35
	eFuel EU27 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	115	90	23
	eFuel EU27 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	137	94	16
	HVO100 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	401	199	23
	HVO100 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	202	117	15

Bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) zeigte sich, dass die CO₂e-Emissionen hauptsächlich vom jeweiligen Strommix abhängig sind, welcher sich jedoch zwischen den EU-Staaten deutlich unterscheidet. Insgesamt bieten Elektrofahrzeuge ein sehr großes Potenzial zur signifikanten Reduzierung der Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Jedoch lassen sich diese Potenziale nur in Verbindung mit dem umfangreichen Ausbau der erneuerbaren Energien realisieren. Bei der isolierten Betrachtung der Nutzungsphase zeigten sich für die meisten Länder der Europäischen Union bereits aktuell enorme Einsparpotenziale im Vergleich zu einem Fahrzeug mit fossil betriebenem Verbrennungsmotor. Die Betrachtung der Herstellungsphase (Cradle-to-Gate) zeigte auf, dass Elektrofahrzeuge deutlich höhere THG-Emissionen in dieser Phase des Lebenszyklus aufweisen als PKWs mit Verbrennungsmotoren, da insbesondere die energieintensive Herstellung der Traktionsbatterie mit signifikanten THG-Emissionen im Zusammenhang steht. Elektrofahrzeuge weisen von allen Antriebstechnologien mit Abstand die höchste Energieeffizienz auf.

Diese ist ein entscheidender Vorteil in Bezug auf die effiziente Nutzung von erneuerbaren Energien.

Die Lebenszyklusanalyse von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) zeigte auf, dass es maßgeblich von den Produktionsmethoden des Wasserstoffs abhängig ist, ob diese Antriebstechnologie zur Reduzierung von Treibhausgasen beitragen kann. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge bieten, ähnlich wie BEV, ein hohes Potenzial zur signifikanten Minderung der verkehrsbedingten THG-Emissionen. Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff ist derzeit sehr begrenzt und steht in Konkurrenz zu anderen Sektoren, die keine Alternativen zur Dekarbonisierung haben und auf grünen Wasserstoff angewiesen sind. Brennstoffzellenfahrzeuge können jedoch zukünftig eine sinnvolle Ergänzung, insbesondere bei besonders schweren PKWs oder Fahrzeugen mit sehr hohen Reichweitenanforderungen, bieten. Es wurde dargelegt, dass die Herstellung von FCEVs mit deutlich höheren THG-Emissionen als traditionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren verbunden ist.

Für die beiden wesentlichen alternativen Antriebstechnologien BEV und FCEV zeigte sich ein hohes Potenzial, um einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors zu leisten. Um Rebound-Effekte zu vermeiden, ist neben der Umstellung auf diese Antriebstechnologien auch die erfolgreiche Fortführung und Umsetzung der Energiewende für alle EU-Länder ein entscheidender Stellhebel.

Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel betrieben werden, verursachen die höchsten direkten CO₂e-Emissionen im Betrieb und weisen die geringste Energieeffizienz auf. Um die Klimaziele der Europäischen Union und des Pariser Klimaschutzabkommens zu erreichen, müssen die CO₂e-Gesamtemissionen im PKW-Sektor drastisch reduziert werden. Bei der Betrachtung der alternativen Kraftstoffe zeigte sich, dass auch Verbrennungsmotoren kurz-, mittel- und langfristig einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der THG-Emissionen leisten können. Der Biokraftstoff HVO100 ist bereits heute im europäischen Tankstellennetz verfügbar und die Marktverbreitung befindet sich im Hochlauf. Dennoch kann HVO100 nur einen begrenzten Beitrag leisten, da die Menge an verfügbaren Reststoffen einen limitierenden Faktor darstellt. Der synthetische Kraftstoff eFuels bietet mittel- und langfristig eine Option, um Treibhausgase signifikant zu reduzieren, jedoch nur, falls bei der sehr energieintensiven Herstellung zu 100 % erneuerbare Energiequellen eingesetzt werden. Die Herstellung von eFuels anhand des aktuellen durchschnittlichen Strommixes in der Europäischen Union würde sogar zu deutlich höheren THG-Emissionen als beim Einsatz von fossilen Kraftstoffen führen.

Es wurde deutlich, dass auch Plug-in-Hybridfahrzeuge unter bestimmten Bedingungen kurz- und mittelfristig einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der THG-Emissionen leisten können. Die Ökobilanz dieser Antriebstechnologie zeigt, dass der Beitrag von PHEVs zur Reduzierung der THG-Emissionen insbesondere vom Fahrverhalten abhängig ist. Ein hoher elektrischer Fahranteil ist entscheidend, um durch den Einsatz von PHEVs die Verkehrswende zusätzlich voranzutreiben. Darüber hinaus sind auch die maximale elektrische Reichweite und auch die Ladehäufigkeit durch die Fahrzeugnutzenden von entscheidender Bedeutung. Die Szenarien für das Jahr 2035 und insbesondere für 2050 zeigten, dass PHEVs auch langfristig einen Beitrag leisten können. Allerdings werden andere Antriebstechnologien wie BEVs, FCEVs oder auch ICEVs mit eFuels mit dem Fortschreiten der Energiewende ihr Potenzial kontinuierlich weiter erhöhen. Durch die Komplexität der hybriden Antriebstechnologie ist davon auszugehen, dass sich diese voraussichtlich als Brückentechnologie etablieren, jedoch nicht dauerhaft zum Einsatz kommen wird.

7.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse: Umweltbelastungen durch Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Einsatz kritischer Rohstoffe

Neben den im vorherigen Kapitel zusammenfassend dargestellten Ergebnissen zu Treibhausgasen, die direkt zu den negativen Folgen des Klimawandels beitragen, wurden zusätzlich detailliert die Wirkungen der verschiedenen Antriebstechnologien auf Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub analysiert. Diese Luftschadstoffe haben negative Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und stellen insbesondere in dicht besiedelten Ballungsräumen ein erhebliches Problem dar.

Die Problematik mit Stickoxiden ist insbesondere durch den Diesel-Abgasskandal aus dem Jahr 2015 der breiten Öffentlichkeit sehr bewusst geworden. Insbesondere Diesel-Fahrzeuge setzten im Realbetrieb signifikant höhere Mengen an Stickoxiden frei als in den Grenzwerten der AU-Abgasnorm vorgeschrieben. Diesel-Fahrzeuge, welche die aktuelleren EU-Abgasnormen (Euro 6d-TEMP oder Euro 7) erfüllen, liegen auch im Realbetrieb unter den Grenzwerten der EU-Abgasnorm. Ähnlich wie bei den Treibhausgasen wurden auch bei den Stickoxiden nicht nur die direkten Emissionen (Tank-to-Wheel), sondern auch alle anderen Phasen des Lebenszyklus betrachtet.

Tabelle 23: Vergleichende Darstellung des Potenzials der Antriebstechnologien und Energieträger zur Reduzierung von Luftschadstoffen (Stickoxide und Feinstaub)

Antriebs-technologie	Energieträger	Luftschadstoffemissionen [mg / km]		
		Stickoxide		Feinstaub
		Referenz: Diesel [Euro 6a/b/c]	Referenz: Diesel [Euro 6d-TEMP / Euro 7]	Referenz: Diesel [Euro 6d-TEMP / Euro 7]
BEV	Strommix Deutschland	284	284	160
	Strommix Polen	305	305	160
	Strommix Frankreich	257	257	159
	Strommix EU27	275	275	160
	EE-Strom	250	250	161
FCEV	H2 [Erdgasreforming]	441	441	115
	H2 [Strommix EU27]	617	617	128
	H2 [EE-Strom]	277	277	108
ICEV-G	Benzin	176	176	73
	eFuel [EE-Strom]	184	184	97
	eFuel [Strommix EU27]	426	426	87
ICEV-D	Diesel [Euro 6a/b/c]	773	773	71
	Diesel [Euro 6d-TEMP/Euro 7]	205	205	71
	HVO [Reststoffe Euro 6a/b/c]	847	847	80
	HVO [Reststoffe Euro 6d-TEMP/Euro 7]	295	295	80
	HVO [Palmöl Euro 6a/b/c]	952	952	92
	HVO [Palmöl Euro 6d-TEMP/Euro 7]	401	401	92
PHEV	Benzin [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	241	241	108
	Benzin [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	209	209	103
	Benzin [75 %] / EE-Strom [25 %]	221	221	109
	Benzin [25 %] / EE-Strom [75 %]	174	174	105
	eFuel EU27 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	430	430	119
	eFuel EU27 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	247	247	105
	HVO100 [75 %] / Strommix EU27 [25 %]	297	297	100
	HVO100 [25 %] / Strommix EU27 [75 %]	201	201	88

In Tabelle 23 wird ähnlich wie im vorherigen Kapitel eine Farbverlaufskarte eingesetzt, um eine vergleichende Darstellung des Potenzials der Antriebstechnologien und Energieträger zur Reduzierung von Stickoxiden und Feinstaubbelastungen zusammenfassend darzustellen. Als Referenzwert werden PKWs mit Diesel-Verbrennungsmotor verwendet, da diese beim Diesel-Abgasskandal durch signifikant erhöhte Stickoxide im Realbetrieb negativ aufgefallen waren. Bei den Stickoxiden wurden unterschiedliche Referenzwerte eingesetzt, da sich hier signifikante Unterschiede in der Bewertung des Potenzials zur Reduzierung von Stickoxiden ergeben. Wenn Diesel-Fahrzeuge, die anhand der Euro 6 a, b oder c zugelassen wurden, als Referenzwert verwendet werden, ergeben sich für nahezu alle anderen Antriebstechnologien und Energieträger erhebliche Einsparungen bei den Feinstaubemissionen über den gesamten Lebenszyklus.

Fahrzeuge mit modernen Verbrennungsmotoren (Euro 6d-TEMP oder Euro 7) weisen über den gesamten Lebenszyklus die geringsten Stickoxidemissionen auf. Bei Verbrennungsmotoren, die mit alternativen Kraftstoffen wie eFuels oder HVO100 betrieben werden, übersteigt die Stickoxidbelastung deutlich die Werte von Verbrennungsmotoren mit fossilen Kraftstoffen. Es wurde klar, dass diese insbesondere durch die hohen NO_x -Emissionen in der Vorkette bei der Herstellung dieser Kraftstoffe entstehen. Langfristig bieten eFuels vergleichbare Stickoxidemissionen wie heutige Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden.

Bei Elektroautos (BEV) werden hauptsächlich während des Herstellungsprozesses signifikante Mengen an Stickoxiden freigesetzt, welche die NO_x -Emissionen bei der Herstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren deutlich übersteigen. Brennstoffzellenfahrzeuge haben neben den hohen Stickoxidemissionen in der Herstellungsphase auch hohe Vorkettenemissionen bei der Herstellung, falls nicht zu 100 % Erneuerbare Energien bei der Wasserstoffherstellung eingesetzt werden. Die NO_x -Emissionsersparnisse, die bei PHEVs mit hohem elektrischen Fahranteil erzielbar sind, werden durch die erhöhten NO_x -Emissionen der Herstellung wieder kompensiert. Aufgrund dessen ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen ICEV-Benzinern bzw. ICEV-Dieseln und PHEVs.

Bei den Feinstaubemissionen ergibt sich bei den Herstellungsemissionen ein ähnliches Bild wie bei den Stickoxiden, da ICEVs im Vergleich zu anderen Antriebstechnologien die geringsten PM_x -Emissionsbelastungen in der Cradle-to-Gate-Phase aufweisen. Sowohl FCEVs als auch PHEVs weisen höhere Feinstaubbelastungen als Verbrennungsmotorfahrzeuge auf. Bei den Elektroautos liegt die Feinstaubbelastung sogar um den Faktor 2 höher als bei vergleichbaren ICEVs, was durch die hohen Feinstaubbelastungen in der

Herstellungsphase verursacht wird (vgl. Kapitel 6.2). Im Vergleich zu den Feinstaubemissionen, die bei der Herstellung freigesetzt wurden, sind die Werte in der Nutzungsphase deutlich niedriger. Es zeigte sich, dass neben der Reduzierung der Feinstaubemissionen in der Herstellungsphase insbesondere auch bei den Vorkettenemissionen bei der Herstellung von Wasserstoff für FCEVs oder alternativen Kraftstoffen für ICEVs Einsparpotenziale genutzt werden können.

Sowohl bei den Stickoxiden als auch beim Feinstaub wurde ersichtlich, dass die Emissionsbelastung in der End-of-Life-Phase im Vergleich zu den anderen Phasen des Lebenszyklus eines PKWs vernachlässigbar ist.

Die Ergebnisse der Betrachtung der kritischen Rohstoffe verdeutlichten, dass diese Thematik insbesondere die alternativen Antriebstechnologien wie Elektroautos (BEVs) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) betrifft. Durch den Übergang zu alternativen Antriebstechnologien erhöht sich der Bedarf an kritischen Rohstoffen wie beispielsweise Lithium und Kobalt, die zuvor bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren nicht von Bedeutung waren. Die Europäische Union hat diese Problematik anhand der EU-Liste kritischer Rohstoffe klar erkannt und adressiert. Neben der wirtschaftlichen Bedeutung dieser kritischen Rohstoffe stellt insbesondere das Versorgungsrisiko aufgrund der signifikanten Abhängigkeit von Ländern wie China ein erhebliches Risiko dar. Besonders gravierend zeigt sich die Problematik bei den Seltenerdmetallen, die je nach Art der Seltenerdmetalle zu einem Anteil von 85 bis 100 % in China abgebaut werden. Im Kontext der Nachhaltigkeit zeigt sich zudem, dass zum Teil erhebliche soziale und ökologische Herausforderungen im Zusammenhang mit kritischen Rohstoffen wie Lithium oder Kobalt stehen. Mittel- und langfristig kann die Abhängigkeit durch erhöhte Recyclingraten, aber auch durch den Einsatz alternativer Rohstoffe, wie beispielsweise kobaltfreier Batterietechnologien, weiter reduziert werden. Eine kontinuierliche Neubewertung der wirtschaftlichen Relevanz und des Versorgungsrisikos wird auch in Zukunft erforderlich sein, um die Ziele der Verkehrswende im Kontext der Europäischen Union zu erreichen.

7.3 Zusammenhang zwischen den 17 Sustainable Development Goals der UN und den Umweltfaktoren: Treibhausgase, Stickoxide, Feinstaub und kritische Rohstoffe

In der Tabelle 24 werden die Zusammenhänge zwischen den 17 SDGs und den in dieser Ökobilanz betrachteten Umweltfaktoren, wie Treibhausgasen, Stickoxiden, Feinstaub und der Nutzung von kritischen Rohstoffen, aufgezeigt. Diese Verbindungen verdeutlichen die starke Korrelation im Kontext der Nachhaltigkeit.

Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub belasten die „Gesundheit und das Wohlergehen“ (**SDG 3**), insbesondere in den dicht besiedelten Ballungsräumen (vgl. Kapitel 6.1 und 6.2). Kritische Rohstoffe wie Kobalt stehen in der Kritik, da diese zum Teil mit Menschenrechtsverletzungen in Zusammenhang gebracht werden (vgl. Kapitel 6.3) und haben Einfluss auf die Ziele „Keine Armut“ (**SDG 1**), „kein Hunger“ (**SDG 2**) und „Gesundheit und Wohlergehen“ (**SDG 3**).

Tabelle 24: Zusammenhänge zwischen den 17 SDGs und Umweltfaktoren: THG, Stickoxide, Feinstaub und kritische Rohstoffe

UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs)	THG	Stickoxide	Feinstaub	Rohstoffe
1 Keine Armut				✓
2 Kein Hunger				✓
3 Gesundheit und Wohlergehen		✓	✓	✓
4 Hochwertige Bildung				
5 Geschlechtergleichheit				
6 Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen				✓
7 Bezahlbare und saubere Energie	✓	✓	✓	
8 Menschenwürdige Arbeit & Wirtschaftswachstum	✓	✓	✓	✓
9 Industrie, Innovation und Infrastruktur	✓	✓	✓	✓
10 Weniger Ungleichheiten				

11 Nachhaltige Städte und Gemeinden	✓	✓	✓	
1 2 Nachhaltiger Konsum und Produktion	✓	✓	✓	✓
1 3 Maßnahmen zum Klimaschutz	✓			
1 4 Leben unter Wasser	✓	✓		
1 5 Leben an Land	✓	✓	✓	✓
1 Frieden, Gerechtigkeit & starke Institutionen 6	✓	✓	✓	✓
17 Partnerschaften zur Erreichung der Ziele	✓	✓	✓	✓

Die Ziele „Bezahlbare und saubere Energie“ (**SDG 7**), „Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum“ (**SDG 8**) und „Industrie, Innovation und Infrastruktur“ (**SDG 9**) haben einen engen Bezug zu fast allen Umweltwirkungen, da der Ausbau der Erneuerbaren Energien zur signifikanten Senkung der THG-Emissionen in der Well-to-Tank-Phase ausführlich behandelt und betont wird. Durch die Transformation der Automobilindustrie hin zu nachhaltigeren Antriebstechnologien werden Innovationen und die entsprechende Infrastruktur gefördert, was zu nachhaltigerem Wirtschaftswachstum führt.

Die detaillierten Betrachtungen zur Reduzierung sowohl von Treibhausgasen als auch von Luftschadstoffen (Stickoxide und Feinstaub) stellen fundierte Daten bereit, um das Ziel „Nachhaltige Städte und Gemeinden“ (**SDG 11**) zu unterstützen. Die Förderung der nachhaltigsten Antriebstechnologien und alternativer Kraftstoffe, die signifikant zur Reduktion von Treibhausgasen und Luftschadstoffen beitragen und den Bedarf an kritischen Rohstoffen deutlich senken, lenkt die Gesellschaft hin zu dem Ziel eines „Nachhaltigeren Konsums und Produktion“ (**SDG 12**).

Das globale Erderwärmungspotenzial (GWP) wird in Bezug auf nachhaltigere Mobilität als Leitindikator betrachtet (vgl. Kapitel 2.5). Aus den Ergebnissen dieser Masterarbeit können insbesondere „Maßnahmen zum Klimaschutz“ (**SDG 13**) abgeleitet werden, da der PKW-Sektor aktuell einen hohen Anteil der freigesetzten THG-Emissionen verursacht (vgl. Kapitel 1.1). Die anthropogenen THG-Emissionen aus Industrieprozessen und fossilen Energieträgern werden insbesondere mit dem weltweiten Anstieg der durchschnittlichen Temperatur in Verbindung gebracht. Dies führt zu Ernteeinbußen, Trockenheit,

Überschwemmungen, Meeresspiegelanstieg, uvm.²⁴⁴ Die Klimaänderung hat auch starke Auswirkungen auf andere planetare Grenzen (engl. Planetary Boundaries) wie dem Biodiversitätsverlust und der Versauerung der Ozeane.²⁴⁵ Folglich führen die anthropogenen Treibhausgase (THG) nicht nur zu den zu negativen Veränderungen für das „*Leben an Land*“ (**SDG 15**), sondern auch für das „*Leben unter Wasser*“ (**SDG 14**), aufgrund der zunehmenden Versauerung der Ozeane.

Streng wissenschaftlich fundierte Arbeiten leisten einen bedeutenden Beitrag dazu, wenig auf Fakten basierende Meinungsäußerungen und von Interessenvertretungen beeinflusste Publikationen zu widerlegen. Die Grundlagen und Annahmen dieser Masterarbeit basieren auf fundierten wissenschaftlichen Quellen (vgl. Kapitel 1.2), fördern somit die Verbreitung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und unterstützen dadurch aktiv das Ziel „*Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen*“ (**SDG 16**).

Viele Forschungsprojekte zu alternativen Antrieben sind auf spezifische Länder begrenzt. Die vorliegende Ökobilanz fördert durch den Fokus auf die Europäische Union die Kooperation zwischen den einzelnen EU-Staaten, um das gemeinsame Ziel der CO₂-Neutralität zu erreichen (vgl. Kapitel 5.7). Die Bedeutung der partnerschaftlichen Kooperation zwischen den einzelnen Sektoren wie Verkehrssektor, Industriesektor und Energiesektor (vgl. Kapitel 5.7) wurde mehrfach betont und hebt somit die Bedeutung von „*Partnerschaften zur Erreichung der Ziele*“ (**SDG 17**) hervor.

7.4 Grenzen der Lebenszyklusanalyse: kritische Würdigung der Lebenszyklusanalyse

Die vorliegende Masterarbeit betrachtete die Ökobilanz aller relevanten Antriebstechnologien von PKWs im Kontext der Europäischen Union. Der Fokus wurde nicht nur auf die Nutzungsphase im Rahmen einer WtW-Analyse gelegt, die bei vielen anderen Studien im Mittelpunkt steht. Vorteilhafterweise und für eine umfassende und vollständige Analyse wurden in dieser Masterarbeit alle Lebenszyklusphasen eines PKWs in die Betrachtungen mit einbezogen. Weiterhin wurden neben der durch Treibhausgase verursachten Klimawirkung auch Emissionen durch Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub untersucht. Abschließend zu erwähnen sind auch die gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Wechselwirkung zwischen der Transformation des Verkehrssektors und der Nutzung von kritischen Rohstoffen. Die ausgewählten

²⁴⁴ Zapf et al., 2021a, S. 26.

²⁴⁵ Zapf et al., 2021a, S. 55.

ökologischen Aspekte wie Klimawandel bzw. Treibhausgaspotenzial, Versauerungspotenzial und Feinstaubbelastung decken somit einen großen Bereich der Umweltwirkungen ab, welche durch den Verkehrssektor verursacht werden.



Abbildung 63: Berücksichtigung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten im Rahmen der Masterarbeit

Weitere Umweltwirkungen wie Eutrophierung (aquatisch und terrestrisch), Ozonbildung (Sommersmog), Ozonabbau, Ressourcenbeanspruchung, Naturraumbeanspruchung und Frischwasserbedarf konnten nicht bzw. nur ansatzweise im Rahmen dieser Masterarbeit betrachtet werden, da diese sonst den möglichen Rahmen deutlich überschritten hätten.²⁴⁶ Diese weiteren Umweltwirkungen werden auch in der betrachteten wissenschaftlichen Literatur nur ansatzweise oder gar nicht betrachtet. Dies lässt darauf schließen, dass für diese Umweltwirkungen weiterer Forschungsbedarf besteht, der dazu beitragen könnte, dass Rebound-Effekte reduziert bzw. vermieden werden können.

Diese Masterarbeit betrachtet nur die ökologischen, jedoch nicht die ökonomischen Aspekte wie beispielsweise Total Cost of Ownership (TCO) oder soziale Aspekte (Menschenrechte, sozialer Unfrieden, etc.). Ansatzweise werden beispielsweise bei den kritischen Rohstoffen auch ökonomische Aspekte, wie das

²⁴⁶ Biemann et al., 2024, S. 45f.

Versorgungsrisiko, und soziale Aspekte, wie Menschenrechtsverletzungen beim Abbau von Kobalt, berücksichtigt.

Die Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens und die Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen können nur durch eine enge und vertrauensvolle Kooperation der einzelnen Staaten der Weltgemeinschaft erreicht werden. Für die Klimawirkung ist es unerheblich, an welcher Stelle die Treibhausgasemissionen entstehen.²⁴⁷ Durch einseitige Betrachtungsweisen besteht das Risiko, dass die Emissionen in andere Sektoren oder Länder verlagert und dadurch Rebound-Effekte verursacht werden. Beispielsweise entstehen aktuell sehr große Mengen an Treibhausgasen bei der Fertigung von Batterien, die zum überwiegenden Teil in China produziert werden.²⁴⁸ Eine der Optionen für europäische Automobilhersteller könnte es sein, die Batterien zukünftig in Europa unter Einsatz eines deutlich geringeren Emissionsfaktors des Strommixes, oder im Idealfall, ausschließlich unter Einsatz von Erneuerbaren Energien herzustellen.

Ein weiterer Aspekt bei der Transformation des PKW-Sektors, ist der Ausbau der Ladeinfrastruktur für die alternativen Antriebstechnologien, der mit hohen Kosten und auch mit weiteren zusätzlichen Treibhausgasemissionen während der Herstellung der Anlagen verbunden sein kann.²⁴⁹ Der Aufbau der Ladeinfrastruktur für Elektroautos oder Wasserstofftankstellen für FCEVs wurde im Rahmen dieser Masterarbeit nur Ansatzweise im Kapitel 4.5 betrachtet (vgl. Tabelle 17).

Weiterhin sollte berücksichtigt werden, dass aufgrund der Beschränkung auf die EU, die Ergebnisse möglicherweise nicht unverändert auf andere Regionen übertragbar sind (z. B. Strommix, verbreitete Antriebstechnologien, Möglichkeiten zum Ausbau der Ladeinfrastruktur, etc.). Es wurde eine Vielzahl an alternativen Antriebstechnologien und alternativen Kraftstoffen betrachtet. Gasbetriebene Verbrennungsmotoren und Wasserstoffverbrennungsmotoren wurden aufgrund der mangelnden Relevanz für den PKW-Sektor nicht untersucht, da diese eher mit der Dekarbonisierung von Nutzfahrzeugen in Verbindung gebracht werden. Zwar wurde die Antriebstechnologie REEV (Range Extended Electric Vehicle) nicht betrachtet, jedoch hat diese Technologie im Jahr 2024 in China einen signifikanten Marktanteil bei PKWs eingenommen. Bei REEV handelt es sich um Hybridfahrzeuge, die einen

²⁴⁷ Europäisches Parlament, 2023c, S. 4.

²⁴⁸ Agora Verkehrswende et al., 2019, S. 46.

²⁴⁹ Bothe et al., 2020, S. 5 ff.

Verbrennungsmotor zur Reichweitenverlängerung einsetzen, wenn die Traktionsbatterie des Elektroantriebs entladen ist. EREV (Extended Range Electric Vehicle) wird als Synonym für REEV verwendet.²⁵⁰ Mögliche Effekte auf den EU-Raum können aus derzeitiger Sicht nur schwer eingeschätzt werden.

Aufgrund der Beschränkung auf SUVs ergibt sich bei anderen Fahrzeugkategorien eine veränderte Ökobilanz, insbesondere in Bezug auf die ermittelten Gesamtemissionen über die Fahrzeuglebensdauer oder pro gefahrenem Kilometer Fahrstrecke. Die Anteile der verschiedenen Fahrzeugkategorien in der Bestandsflotte und bei Neuzulassungen werden je nach EU-Mitgliedsstaat variieren, was zu unterschiedlichen Ergebnissen in der ökologischen Bewertung führen kann.

In der vorliegenden Masterarbeit wurde für alle aussagerelevanten Ergebnisse die aktuell zur Verfügung stehende Datenbasis zugrunde gelegt. Dies gilt genauso für die Annahmen zum Strommix, den Herstellungsmethoden des Wasserstoffs bis hin zu den relevanten Fahrzeugverbrauchen in Abhängigkeit vom jeweiligen Antriebskonzept. Auch wurden die heutigen Reifegrade der Antriebssysteme in dieser Studie berücksichtigt. Die Szenarien für 2035 und 2050 zeigten auf, wie sich die Ökobilanz der PKWs in Zukunft verändern könnte. Bei dieser Betrachtung wurden viele Annahmen zugrunde gelegt, die dazu beitragen, die Wirkungen der Veränderung der gewählten Annahmen zu verstehen. Die getroffenen Annahmen können durch Änderungseffekte beeinflusst werden und sollten im Verlauf regelmäßig überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Daher wäre es von Vorteil, wenn diese kritischen Faktoren im Rahmen zukünftiger Forschungen weitergehend betrachtet werden. Auch wenn sich die zugrunde gelegten Annahmen in der Zukunft verändern werden, bleiben die grundlegenden Zusammenhänge, die in dieser Masterarbeit dargelegt wurden, gültig.

Diese Ökobilanz leistet einen wissenschaftlichen Beitrag zur Diskussion der Antriebswende im PKW-Sektor. Abschließend ist an dieser Stelle noch einmal anzumerken, dass eine Mobilitätswende durch Verkehrsvermeidung und -verlagerung im Vordergrund stehen sollte.²⁵¹

²⁵⁰ Zhou et al., 2025.

²⁵¹ Biemann et al., 2025, S. 7.

Literaturverzeichnis

- ACEA (2024a)** European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) (2024a): *New car registrations: +13.9% in 2023; battery electric 14.6% market share*, European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), [online] https://www.acea.auto/files/Press_release_car_registrations_full_year_2023.pdf [abgerufen am 14.09.2024].
- ACEA (2024b)** European Automobile Manufacturers' Association (ACEA) (2024b): *Vehicles on European Roads*, European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), [online] <https://www.acea.auto/files/ACEA-Report-Vehicles-on-European-roads-.pdf> [abgerufen am 14.09.2024].
- ADAC (2024)** ADAC (2024): *Euro 6D und Euro 6E: alle Informationen zu den Abgasnormen*, ADAC, [online] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/neuwagenkauf/euro-6d-6e/> [abgerufen am 09.02.2025].
- Agora Energiewende (2025)** Agora Energiewende (2025): *Südafrika: Südafrika könnte ein Vorreiter für die Energiewende in Afrika werden*, Agora Energiewende, [online] <https://www.agora-energiewende.de/international/laender-und-regionen/suedafrika#:~:text=S%C3%BCdafrika%20k%C3%B6nnte%20ein%20Vorreiter%20f%C3%BCr%20die%20Energiewende%20in%20Afrika%20werden.&text=Mit%20einem%20Kohleanteil%20von%2084,Aussto%C3%9F%20in%20Subsahara%2DAfrika%20verantwortlich.> [abgerufen am 09.03.2025].
- Agora Verkehrswende et al. (2019)** Agora Verkehrswende; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu); Helms, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Meyer, K. (2019): *Klimabilanz von Elektroautos: Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial*, [online] https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf [abgerufen am 15.09.2024].
- Allekotte et al. (2024)** Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Heidt, C.; Kräck, J.; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) (2024): *Aktualisierung des Daten- und Rechenmodells: „Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland (TREMOD)“ und der Datenbank „Mobile Maschinen und Geräte (TREMOMM)“ 2022*, Umweltbundesamt, [online] <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen> [abgerufen am 03.12.2024].

- Bastos et al. (2024)** Bastos, J.; Monforti-Ferrario, F.; Melica, G.; European Commission (2024): *GHG Emission Factors for Electricity Consumption*, European Commission, Joint Research Centre (JRC), [online] <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/919df040-0252-4e4e-ad82-c054896e1641> [abgerufen am 03.11.2024].
- Biemann et al. (2024)** Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C.; Müller, J.; Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu), Heidelberg; ecoinvent Association (2024): *Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr*, TEXTE 13/2024, Umweltbundesamt, [online] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf [abgerufen am 08.09.2024].
- Biemann et al. (2025)** Biemann, K.; Helms, H.; Kämper, C.; Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg (2025): *Quo vadis Elektroauto? Update der Klimabilanz*, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg, Deutschland, [online] https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper/01_ifeu_Paper_Aktualisierte_Klimabilanz_von_Pkw_20250214_final.pdf [abgerufen am 18.02.2025].
- BMDV et al. (2023)** Bundesministerium für Digitales und Verkehr; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); Institut für Verkehrsforschung; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e. V. (DIW); Kraftfahrt-Bundesamt (2023): *Verkehr in Zahlen 2023/2024*: 52. Jahrgang, BMDV, [online] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehr-in-zahlen23-24-pdf.html> [abgerufen am 03.11.2024].
- BMDV (2024)** BMDV (2024): *FAQ zu HVO 100*, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, [online] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/faq-zu-hvo-100.html> [abgerufen am 27.12.2024].
- BMK (2022)** Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (2022): *Einigung: Neuwagen in Europäischer Union sollen ab 2035 emissionsfrei sein*, BMK Infothek, [online] <https://infothek.bmk.gv.at/einigung-neuwagen-in-europaeischer-union-sollen-ab-2035-emissionsfrei-sein/> [abgerufen am 30.12.2024].

- Bothe et al. (2020)** Bothe, D.; Steinfurt, T.; Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.; Frontier Economics Ltd. (2020): *Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor: Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe*, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., Frankfurt a.M., Deutschland, [online] <https://www.fvv-net.de> [abgerufen am 17.09.2024].
- Bundesregierung (o. J.)** Bundesregierung (o. J.): *Neuzugelassene Pkw ab 2035: EU-Umwelt-rat: Nur noch CO₂-frei fahren*, [online] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/verbrennermotoren-2058450> [abgerufen am 23.12.2024].
- Cazzola et al. (2023)** Cazzola, P.; Paoli, L.; Teter, J.; European Transport and Energy Research Centre; FIA Foundation; International Energy Agency IEA; International Transport Forum; United Nations Economic Commission for Europe; World Bank; United National Environment Programme; Instituto Superior Técnico, Lisbon; Joint Research Center; European Commission (2023): *Trends in the Global Vehicle Fleet 2023 - Managing the SUV Shift and the EV Transition*, [online] <https://www.globalfueleconomy.org/media/792523/gfei-trends-in-the-global-vehicle-fleet-2023-spreads.pdf> [abgerufen am 17.09.2024].
- Christ (o. J.)** Christ, A. (o. J.): *eFuels bieten CO₂-Minderungspotenziale für die Bestandsflotte*, Bosch, [online] <https://www.bosch-mobility.com/de/mobility-themen/energy/efuels/> [abgerufen am 21.01.2025].
- David et al. (2021)** David, F.; Heinfellner, H.; Lambert, S.; Umweltbundesamt GmbH (2021): *Die Ökobilanz von CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung: Personenkraftwagen Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung*, österreichisches Umweltbundesamt, [online] <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf> [abgerufen am 08.09.2024].
- DENA (2019)** Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA) (2019): *NO_x-Emissionen unterschiedlicher Antriebsarten*, Alternativ Mobil, [online] <https://alternativ-mobil.info/news-aktuelles/nachricht-1/nox-emissionen-unterschiedlicher-antriebsarten-1> [abgerufen am 09.02.2025].
- DGNV (2025)** DGNV (2025): *Ziele für Nachhaltige Entwicklung*, Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen e. V., [online] <https://dgvn.de/ziele-fuer-nachhaltige-entwicklung> [abgerufen am 22.03.2025].
- DIN EN ISO (2021)** DIN EN ISO 14040 (2021). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020)*; Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020, Beuth Verlag (Hrsg.).

- Dohm (2024)** Dohm (2024): *So fährt sich ein Diesel-Pkw mit HVO100*, [online] <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/motorentech-nik/so-faehrt-sich-ein-diesel-pkw-mit-hvo100/27059886> [abgerufen am 20.11.2024].
- Dollenmaier (2023)** Dollenmaier, V. (2023): *Was (ver)brauchen wir wirklich? – Die Rohstoff- und Energiebedarfe von E-Fahrzeugen*, NOW GmbH, [online] https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/03/EM-KON23_Was-verbrauchen-wir-wirklich-%E2%80%93-Die-Rohstoff-und-Energiebedarfe-von-E-Fahrzeugen_Dollenmaier-NOW.pdf [abgerufen am 08.03.2025].
- Doppelbauer (2024)** Doppelbauer, M. (2024): *Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, 2. Auflage, Karlsruhe, Deutschland: Springer Vieweg, [online] doi:10.1007/978-3-658-44828-8.
- DUH (2021)** Deutsche Umwelthilfe e. V. (2021): *Dieselgate: Das Märchen vom sauberen Diesel*, Deutsche Umwelthilfe e. V., [online] <https://www.duh.de/informieren/saubere-luft/dieselabgas-betrug/> [abgerufen am 22.02.2025].
- DUH et al. (2024)** DUH Deutsche Umwelthilfe; NABU Naturschutzbund; DNR Deutscher Naturschutzring; Greenpeace; Robin Wood; Transport and Environment T&E (2024): *Hype um HVO, Was steckt Dahinter und sind Kraftstoffe aus Biogenen Abfall- und Reststoffen gut fürs Klima? Faktencheck*, [online] https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Verkehr/Faktencheck_Abfall-_und_Reststoffe__2024_.pdf [abgerufen am 27.12.2024].
- efuelsnow (2024)** efuelsnow (2024): *Weltweite Karte HVO/XTL*, Efulesnow, [online] <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte> [abgerufen am 28.12.2024].
- Europäische Kommission (2020)** Europäische Kommission (2020): *Raw Materials Study on the EU's list of Critical Raw Materials: Final Report*, Publications Office of the European Union, [online] doi:10.2873/904613 [abgerufen am 08.03.2025].
- Europäische Kommission (2021)** Europäische Kommission (2021): *Die EU auf der COP26-Klimakonferenz*, Europäische Kommission, [online] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/climate-action-and-green-deal/eu-un-climate-change-conference/eu-cop26-climate-change-conference_de [abgerufen am 09.03.2025].
- Europäische Kommission (2023)** Europäische Kommission (2023): *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023: Final Report*, [online] doi:10.2873/725585 [abgerufen am 08.03.2025].
- Europäischer Rat (2024a)** Europäischer Rat (2024a): *Wie wird Strom in der EU erzeugt und verkauft*, [online]

	https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/#0 [abgerufen am 10.11.2024].
Europäischer Rat (2024b)	Europäischer Rat (2024b): „Fit für 55“: Warum verschärft die EU die CO ₂ -Emissionsnormen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge?, [online] https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/ [abgerufen am 28.12.2024].
Europäisches Parlament (2023a)	Europäisches Parlament (2023a): CO ₂ -Emissionen von PKW: Zahlen und Fakten (Infografik), [online] https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/3/story/20190313STO31218/20190313STO31218_de.pdf [abgerufen am 21.09.2024].
Europäisches Parlament (2023b)	Europäisches Parlament (2023b): Klimawandel: Treibhausgase, die globale Erwärmung verursachen, Europäisches Parlament, [online] https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/3/story/20230316STO77629/20230316STO77629_de.pdf [abgerufen am 21.09.2024].
Europäisches Parlament (2023c)	Europäisches Parlament (2023c): Treibhausgasemissionen nach Ländern und Sektoren (Infografik), Europäisches Parlament, [online] https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20180301STO98928/treibhausgasemissionen-nach-landern-und-sektoren-infografik [abgerufen am 21.09.2024].
Europäisches Parlament (2023d)	Europäisches Parlament (2023d): EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das? Europäisches Parlament, [online] https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das [abgerufen am 23.12.2024].
Europäisches Parlament und Rat (2018)	Europäisches Parlament und Rat (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), Amtsblatt der Europäischen Union, [online] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32018L2001 [abgerufen am 29.12.2024].
Europäisches Parlament und Rat (2024)	Europäisches Parlament und Rat (2024): Verordnung (EU) 2024/1257 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Emissionen und der Dauerhaltbarkeit von Batterien (Euro 7), [online] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401257 [abgerufen am 09.02.2025].
Eurostat (2024a)	Eurostat (2024a): Einwohnerzahl EU-Länder im Jahr 2022, Statistisches Amt der Europäischen Union Eurostat, [online] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tps00001/default/table [abgerufen am 07.10.2024].

- Eurostat (2024b)** Eurostat (2024b): *Nettostromerzeugung nach Brennstoff - monatliche Daten*, statistisches Amt der Europäischen Union Eurostat, [online] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_CB_PEM__custom_5180368/default/table [abgerufen am 19.02.2025].
- Fehrenbach et al. (2016)** Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S.; Vogt, R.; Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH (ifeu) (2016): *Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm)*, Texte 09/2016, Umweltbundesamt, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-eingangsdaten-emissionsbilanzen> [abgerufen am 29.12.2024].
- Fichtner (2021)** Fichtner, M. (2021): *Die Transformation der Antriebe: Vollelektrische Antriebe im Vergleich zu Wasserstoff- und Verbrennungsmotoren mit e-Fuels*, Göppinger Technikforum, [online] https://www.technikforum-gp.de/wp-content/uploads/2021/07/presentation_G%C3%B6ppinger-Technikforum_210630.pdf [abgerufen am 20.02.2025].
- Fritz et al. (2023)** Fritz, D.; Heinfellner, H.; Lambert, S.; Umweltbundesamt GmbH (2023): *Rohstoffe der Elektromobilität: Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen*, Umweltbundesamt, Report REP-0850, Umweltbundesamt GmbH, [online] <https://www.umweltbundesamt.at/> [abgerufen am 08.03.2025].
- Frontier Economics (2024)** Frontier Economics (2024): *Szenarien für den Markthochlauf von E-Fuel im Straßenverkehr: Eine Studie für UNITI Bundesverband Energie Mittelstand e. V.*, UNITI Bundesverband Energie Mittelstand e. V. (Hrsg.), [online] <https://www.uniti.de> [abgerufen am 30.11.2024].
- GermanZero (2022)** GermanZero (2022): *E-Fuels: Ein Überblick*, [online] https://german-zero.de/gz-media/pages/assets/b0a3e5ef41-1657187609/220705_gz-factsheet-efuels.pdf [abgerufen am 25.01.2025].
- Greenhouse Gas Protocol (2024)** Greenhouse Gas Protocol (2024): *IPCC Global Warming Potential Values*, [online] <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf> [abgerufen am 22.03.2025].
- HVO100 goes Germany (2024)** HVO100 goes Germany (2024): *Was ist der Unterschied zwischen E-Fuel und HVO100?* Mobil in Deutschland e. V., [online] <https://hvo100.team/was-ist-der-unterschied-zwischen-e-fuel-und-hvo100/> [abgerufen am 28.12.2024].
- IPCC (2023)** Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Summary for Policymakers, A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, [online] doi:10.59327/ipcc/ar6-9789291691647.001 [abgerufen am 07.10.2024].

- Jander et al. (2021)** Jander, B.; Moll, C.; Said El Nakschabandi, M.; Link, S.; Embia Yesilyurt, E.; Schneider, L.; Wietschel, M.; Plötz, P.; Zinnecker, V.; BIT GmbH; Fraunhofer ISI; Deutsche Energie-Agentur (DENA); Prognos AG; Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) (2021): *Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich*, dena-Studie, [online] <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/b281ef9a-fe32-49b3-a0b0-462677b9d3fb/details> [abgerufen am 08.09.2024].
- Knežić (2024)** Knežić, P. (2024): *Batterieelektrische-, Brennstoffzellen und Verbrennungsmotorfahrzeuge: Vergleich des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase im europäischen PKW-Sektor*, Vertiefungsarbeit, Wilhelm Büchner Hochschule, Darmstadt.
- Knost et al. (2024)** Knost, F.; Beidl, C.; TU Darmstadt (2024): *Potenzial von HVO in Dieselmotoren mit Millersteuerzeiten und interner Abgasrückführung*, In: MTZ, Bd. 85. Jahrgang, Nr. 12, S. 17, [online] <https://www.springer-professional.de/automobiltechnik> [abgerufen am 19.12.2024].
- Knörr et al. (2013)** Knörr, W.; Schacht, A.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Michaelis, J.; Wietschel, M.; Merten, F.; Viebahn, P.; Holdik, H.; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu); Wuppertal Institut; Fraunhofer ISI; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST); Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NOW GmbH (2013): *Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD: Schlussbericht Teil II*, [online] https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/germanhy_-_ueberleitung_der_ergebnisse_in_das_emissionsb.pdf [abgerufen am 16.02.2025].
- Kulzer et al. (2020)** Kulzer, A.; Deeg, H.; Villforth, J.; Schwarzenenthal, D.; Schilling, M.; Barrientos, E.; Kanach, B.; Lindner, M.; Porsche AG; ExxonMobil Research & Engineering Co. (2020): *Sustainable Mobility Using Fuels with Pathways to Low Emissions*, In: SAE International Journal Of Advances And Current Practices in Mobility, Bd. 2, Nr. 4, S. 1870–1892, [online] doi:10.4271/2020-01-0345 [abgerufen am 21.02.2025].

- Lauf et al. (2025)** Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S.; Umweltbundesamt (2025): *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2023*, Umweltbundesamt, [online] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/03_2025_cc_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2023.pdf [abgerufen am 18.02.2025].
- Liebich et al. (2020)** Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, 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.; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart; Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH; LIFE – Zentrum für Klima, Energie und Gesellschaft, Graz (2020): *Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien: Abschlussbericht*, Umweltbundesamt, [online] <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>. Forschungskennzahl 37EV 16 108 0 | FB000263 [abgerufen am 21.02.2025].
- OECD (2020)** OECD (2020): *Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge*, OECD, [online] doi:10.1787/4a4dc6ca-en [abgerufen am 01.03.2025].
- Öko-Institut (2017)** Öko-Institut (2017): *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität: Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen*, [online] https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf [abgerufen am 08.03.2025].
- Plötz et al. (2022)** Plötz, P.; Link, S.; Ringelschwendner, H.; Keller, M.; Moll, C.; Bieker, G.; Dornoff, J.; Mock, P.; International Council on Clean Transportation (ICCT); Fraunhofer ISI (2022): *Real-World Usage of Plug-In Hybrid Vehicles in Europe: A 2022 update in fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions*, Whitepaper, International Council on Clean Transportation, [online] <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/real-world-phev-use-jun22-1.pdf> [abgerufen am 03.04.2025].
- Prussi et al. (2020a)** Prussi, M.; Yugo, M.; De Prada, L.; Padella, M.; Edwards, R.; European Commission; Joint Research Centre (2020): *JEC Well-To-Wheels report v5*, Publications Office of The European Union, Luxembourg, Luxemburg, [online] doi:10.2760/100379 [abgerufen am 29.12.2024].

- Prussi et al. (2020b)** Prussi, M.; Yugo, M.; De Prada, L.; Padella, M.; Edwards, R.; Lonza, L. (2020b): *JEC Well-to-Tank Report v5: Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Publications Office of The European Union, [online] doi:10.2760/959137 [abgerufen am 30.12.2024].
- Riering (2024)** Riering, B. (2024): *Man darf sich von der Debatte in Deutschland nicht irritieren lassen*, Automobilwoche, [online] <https://www.automobilwoche.de> [abgerufen am 23.12.2024].
- Schaal (2024)** Schaal (2024): *BMW iX5 Hydrogen im Test: Er funktioniert – aber überzeugt er?*, electrive.net, [online] <https://www.electrive.net/2024/08/04/bmw-ix5-hydrogen-im-test-er-funktioniert-aber-ueberzeugt-er/> [abgerufen am 05.11.2024].
- Schrank et al. (2021)** Schrank, M.; Langer, V.; Jacobsen, B.; Von Unwerth, T.; Götze, U.; Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NOW GmbH (2021): *Wasserstoff-Verbrennungsmotor als Alternativer Antrieb, Metastudie*, NOW GmbH, [online] <https://www.tu-chemnitz.de/mb/alf> [abgerufen am 12.11.2024].
- Seibel (2021)** Seibel, T. (2021): *Ökobilanzen – Strittig, aber alternativlos*, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), [online] <https://www.springer-professional.de/automobiltechnik> [abgerufen am 15.11.2024].
- Soler et al. (2020)** Soler, A.; Concawe Low Carbon Pathways Joint Group (LCP JG); Concawe Fuels and Emissions Management Group (FEMG) (2020): *Role of e-fuels in the European transport system - Literature review*: Low Carbon Pathways, Concawe, [online] <https://www.concawe.eu/> [abgerufen am 30.12.2024].
- Stan (2020)** Stan, C. (2020): *Alternative Antriebe für Automobile*, 5. Aufl., Springer-Verlag GmbH Deutschland, [online] https://doi.org/10.1007/978-3-662-61758-8_1. Kapitel 1. Mobilität – Bedingungen, Anforderungen, Szenarien
- Statista (2024)** Statista (2024): *Total nitrogen oxide (NO_x) emissions in the European Union (EU-27) from 1990 to 2022, by sector*, Statista, [online] <https://www.statista.com/statistics/791190/nitrogen-oxide-emissions-european-union-eu-28/> [abgerufen am 09.02.2025].
- Strimitzer et al. (2022)** Strimitzer, L.; Dolna-Gruber, C.; Baumann, M.; Österreichische Energieagentur (2022): *gÖl.Mobil: Einsatz von grünen Treibstoffen in der Mobilität*, Österreichische Energieagentur, [online] <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/gOel-mobil.html> [abgerufen am 30.12.2024].

- Tödter (2024)** Tödter, O. (2024): *Ab sofort können Dieselmotoren auch klimaneutral betrieben werden*, publikationen.bibliothek.kit.edu, KIT Karlsruher Institut für Technologie, [online] doi:10.5445/IR/1000171437 [abgerufen am 27.12.2024].
- Ueckerdt et al. (2023)** Ueckerdt, F.; Odenweller, A.; Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2023): *E-Fuels - aktueller Stand und Projektionen*, [online] https://www.pik-potsdam.de/members/Ueckerdt/E-Fuels_Stand-und-Projektionen_PIK-Potsdam.pdf [abgerufen am 30.12.2024].
- Umweltbundesamt (2019a)** Umweltbundesamt (2019a): *Das Göteborg-Protokoll: Ein Meilenstein bei der Minderung grenzüberschreitender Luftverschmutzung*, Umweltbundesamt, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/nlrp2019> [abgerufen am 08.12.2024].
- Umweltbundesamt (2019b)** Umweltbundesamt (2019b): *Reale Stickoxid-Emissionen von Diesel-Pkw nach wie vor zu hoch: Diesel-Pkw der neuesten Generation (6d-TEMP) unterschreiten Grenzwerte im Realbetrieb allerdings deutlich*, Umweltbundesamt, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/reale-stickoxid-emissionen-von-diesel-pkw-nach-wie> [abgerufen am 09.02.2025].
- Umweltbundesamt (2024a)** Umweltbundesamt (2024a): *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> [abgerufen am 22.09.2024].
- Umweltbundesamt (2024b)** Umweltbundesamt (2024b): *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*, Umweltbundesamt, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> [abgerufen am 22.09.2024].
- Umweltbundesamt (2024c)** Umweltbundesamt (2024c): *Kyoto-Protokoll*, [online] <https://www.umweltbundesamt.de/nlrp2019> [abgerufen am 08.12.2024].
- VDA (2023)** Verband der Deutschen Automobilindustrie e. V. (2023): *Position Dekarbonisierung des Lebenszyklus eines PKWs: Auf dem Weg zur klimaneutralen Mobilität*, Verband der Deutschen Automobilindustrie e. V., [online] https://www.vda.de/dam/jcr:fa58be7c-f240-49f2-adc0-43e0270f4d1f/VDA_5937_Position_Dekarbonisierung%20des%20Lebenszyklus%20eines%20PKWs.pdf?mode=view [abgerufen am 23.09.2024].
- Weltenergierat Deutschland (2024)** Weltenergierat – Deutschland e. V. (2024): *Energie in der Europäischen Union: Zahlen und Fakten*, Weltenergierat, [online] <https://www.weltenergierat.de/energie-fuer-deutschland-2024/energie-in-der-europaeischen-union-zahlen-und-fakten/?cn-reloaded=1> [abgerufen am 17.02.2025].

- Weymar/ Finkbeiner (2016)** Weymar, E.; Finkbeiner, M.: (2016): *Statistical analysis of empirical lifetime mileage data for automotive LCA*, In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Bd. 21, Nr. 2, S. 215–223, [online] doi:10.1007/s11367-015-1020-6 [abgerufen am 23.09.2024].
- Wietschel et al. (2022)** Wietschel, M.; Link, S.; Biemann, K.; Hinrich, H.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Institut für Energie- und Umwelttechnik Heidelberg gGmbH (ifeu) (2022): *Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien*, Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), www.e-fi.de, [online] <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/78b7b2c5-14c2-4875-9298-9df2f26266e1/details> [abgerufen am 21.09.2024].
- Wirth/Fraunhofer ISE (2024)** Wirth, H.; Fraunhofer ISE (2024): *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*, [online] <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> [abgerufen am 08.11.2024].
- Zapf et al. (2021a)** Zapf, M.; Pegg, H.; Butler, T.; Bach, C.; Weint, C. (2021): *Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile: Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten - Heute und in Zukunft*, 2. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden, [online] https://doi.org/10.1007/978-3-658-33251-8_1. Kapitel 1. Systemtheoretische Grundlagen zur Klimawandel-Problematik mit spezieller Berücksichtigung von PKW.
- Zhang/Fujii (2025)** Zhang, Z.; Fujii, H. (2025): *A Global Analysis of Patent Invention Strategies in Automotive Technologies for Environmental Sustainability*, In: Sustainability 2025, Bd. 17, Nr. 696, [online] doi:10.3390/su17020696 [abgerufen am 04.02.2025].
- Zhou et al. (2025)** Zhou, X., Appel, D.; Alix Partners (2025): *Range Extender: Chinesische OEMs treiben den Siegeszug der E-Mobilität voran - mit fossilen Mitteln*, Lexology, [online] <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=63ea4e75-8eac-4b23-ab54-10f2c66b9d32> [abgerufen am 15.03.2025].

KI-Tools-Verzeichnis

In dieser Masterarbeit wurde zur Unterstützung bei der Recherche das **KI-Tool ChatX** mit dem Sprachmodell **GPT-4o** oder **o1** eingesetzt [<https://chatx.de>]. Die Nutzung dieses Tools diente dazu, Informationen zur Einarbeitung in die einzelnen Themengebiete zu generieren und Ideen zum Gesamtkonzept zu entwickeln, die in die wissenschaftliche Analyse eingeflossen sind. Die nachfolgende Tabelle enthält alle verwendeten Prompts sowie die Zuordnung zu den jeweiligen Kapiteln oder Themengebieten.

Kapitel	Prompt	ChatGPT Modell
Themenfindung	Antworte als Prof. für Innovations- und Technologiemanagement. Ich will eine wissenschaftliche Abschlussarbeit (Masterarbeit) über die Ökobilanz (ganzheitliche Lebenszyklusanalyse) von alternativen PKW-Antrieben und Kraftstoffen im Kontext der Europäischen Union schreiben. Gib mir zunächst relevante Aspekte dafür, um die Arbeit gut zu strukturieren.	GPT-4o
	Antworte als Prof. für Innovations- und Technologiemanagement. Gib mir 5 Vorschläge für einen Titel der Arbeit, um sie gut einzugrenzen und eine relevante Forschungsfrage zu stellen. Beachte bei der Findung der Titel, dass genügend Literatur dafür zur Verfügung stehen soll.	GPT-4o
	Ich will das Thema "Ökobilanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe im PKW-Sektor der Europäischen Union: Eine Lebenszyklusanalyse" bearbeiten. Nenne mir Gründe, weshalb dieses Thema noch nicht bestmöglich formuliert und eingegrenzt ist.	GPT-4o
	Antworte als Prof. für Innovations- und Technologiemanagement. Ich gebe dir eine vorläufige Forschungsfrage: „Wie beeinflussen Elektro-, Brennstoffzellen-, Hybrid- und Verbrennungsmotorfahrzeuge die Ökobilanz von PKWs im Kontext der Europäischen Union über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg?“. Deine Aufgabe ist es, mir eine sinnvolle Methodik dazu vorzuschlagen und zu erläutern. Orientiere dich dabei streng an der Methodik des Fachgebiets.	GPT-4o
	Ich gebe dir eine Forschungsfrage: „Wie beeinflussen Elektro-, Brennstoffzellen-, Hybrid- und Verbrennungsmotorfahrzeuge im PKW-Sektor der Europäischen Union die Treibhausgas-, Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie den Einsatz kritischer Rohstoffe über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg?“, die in einer wissenschaftlichen Arbeit ausgearbeitet werden soll. Bitte denke darüber nach und gib mir eine Liste aller relevanten Aspekte, die in der Arbeit behandelt werden sollten.	GPT-4o
Allgemein	Nenne mir alle Studien und Metastudien zu alternativen PKW-Antrieben für den deutschen oder europäischen Markt. Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen, verwende jedoch noch Quellen ab dem Jahr 2019.	GPT-4o

Kapitel	Prompt	ChatGPT Modell
Abbildung 1	Erstelle mir ein Bild, welches sehr realistisch aussieht und eine positive Ökobilanz symbolisieren soll mit überwiegend grüner und blauer Farbgebung. Auf diesem Bild sollen nebeneinander 4 verschiedene SUVs zu sehen sein. Ganz links soll ein Elektroauto abgebildet werden, welches mit Strom aus PV-Anlagen betrieben wird, daneben soll eine Brennstoffzellenfahrzeug abgebildet werden, welches durch grünen Wasserstoff betrieben wird. Rechts daneben soll einen SUV mit Verbrennungsmotor symbolisieren, welcher aber umweltfreundlich ist, da dieser mit eFuels betrieben wird. Und ganz rechts im Bild soll ein Plug-In-Hybridfahrzeug abgebildet sein, welches mit Strom aus Erneuerbaren Energie und eFuels als Kraftstoff betrieben wird.	GPT-4o
2.1	Welche Luftschadstoffe gibt es in Bezug auf den PKW-Verkehr. Bitte nenne mir auch die jeweiligen CO ₂ -Äquivalente. Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen.	GPT-4o
2.2	Aktuell sind Verbrennungsmotorenfahrzeuge immer noch der dominante Antrieb bei PKW-Neuzulassungen. Elektrofahrzeuge (BEV) erfahren kontinuierliche Steigerungen des Marktanteils. Brennstoffzellen-PKW gibt es nach wie vor nur zu einem kleinen Marktanteil bei den Neuzulassungen und auch im Bestand. Was sind die Hauptprobleme dafür, dass sich Brennstoffzellenfahrzeuge für den PKW-Sektor bisher noch gar nicht durchgesetzt haben? Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen.	GPT-4o
2.3	Nenne mir vertrauenswürdige Quellen, welche die geplanten CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung pro EU-Land für die kommenden Jahre nennt. Am besten sollen diese Schätzungen die geplante Energiewende jedes einzelnen EU-Landes individuell berücksichtigen.	o1
2.3	Nenne mir alle Arten (grüner, grauer, blauer, etc.) von Wasserstoff und erkläre mir genau die Unterschiede. Erkläre mir zusätzlich welche Art von Elektrolyseuren für die jeweilige Art des Wasserstoffes verwendet wird, falls es überhaupt Unterschiede gibt. Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen, verwende jedoch noch Quellen ab dem Jahr 2019.	o1
2.4	Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union vertreten unterschiedliche Positionen zum Thema Einsatz von eFuels bei PKWs. Ab 2025 soll es nur noch Neuzulassungen für PKWs geben, welche im Fahrbetrieb emissionsfrei sind. Dazu zählen zum Beispiel Elektroautos (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Ein sehr kontrovers diskutiertes Thema ist der Einsatz von eFuels auch ab dem Jahr 2035. Unter anderem wird darüber diskutiert, ob eine neue Fahrzeugkategorie geschaffen werden soll, welche ausschließlich mit eFuels betankt werden kann. Eine genaue Entscheidung gibt es bis heute zu diesem Thema nicht. Kannst Du mir bitte den aktuellen Stand zu dieser Thematik beschreiben und auch deine wissenschaftlich fundierten Quellen nennen und einen entsprechenden Link bereitstellen.	o1

Kapitel	Prompt	ChatGPT Modell
2.4	Gibt es seitens der Organe der Europäischen Union Stellungnahmen zum Thema HVO100? Würde HVO100 unter die gleichen Regelungen fallen wie eFuels? Ich habe in den vergangenen Monaten und Jahren nur Diskussionen in Bezug auf Zulassung von eFuels auch für die Jahre ab 2035 mitbekommen, aber mir ist keine Diskussion zum Thema HVO100 bekannt.	o1
2.4	Kannst du mir Links zu Berichten zum Thema HVO100 zum Beispiel über die Websites der Europäischen Kommission und des Europäischen Parlaments sowie aktuelle Pressemitteilungen nennen. Andere Quellen, die nicht von Organen der Europäischen Union stammen, sollten aus deiner Betrachtung ausgeschlossen werden.	o1
2.4	Wird der Einsatz von eFuels auch in der "Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (RED II)" geregelt?	o1
2.4	Was wäre im Sinne einer Ökobilanz kritisch, wenn nicht nur Abfälle/Reste für die Herstellung von HVO verwendet würden?	o1
2.4	Welchen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen kann der Kraftstoff HVO bzw. HVO100 leisten? Kann dieser Kraftstoff auch uneingeschränkt bei der Bestandsflotte eingesetzt werden? Gibt es derzeit oder möglicherweise in Zukunft ausreichende Mengen der erforderlichen Rohstoffe, um HVO in ausreichenden Mengen für die deutsche oder sogar Europäische Bestandsflotte and PKWs bereitzustellen? Wie ist die derzeitige Infrastruktur, um HVO an ausreichenden Tankstellen zu beziehen?	o1
2.5	Bei den Luftschadstoffen bei Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff, eFuels oder Biokraftstoffen entstehen immer Stickoxide. Wie ist die absolute Menge an Stickoxiden im Vergleich zu Benzinern oder Diesel-Motoren? Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen.	GPT-4o
2.5	Welche Luftschadstoffe verbleiben bei einem Elektrofahrzeug und einem mit Wasserstoff oder eFuels betriebenen Verbrennungsmotor, welche mit Energieträgern aus 100% erneuerbaren Energien betrieben werden und auch die Herstellung der Fahrzeuge komplett CO2-neutral erfolgte. Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen.	GPT-4o
2.5	Welche Aspekte außer Treibhausgasen sind in Bezug auf eine ganzheitliche Ökobilanz für PKWs wichtig. Nenne mir diese Stichpunktartig und begründe auch warum diese relevant sein könnten.	GPT-4o
2.6	Welche wissenschaftlichen Quellen gibt es, um die Gesamtkilometerleistung und die Gesamtlebensdauer von Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen bestmöglich abzuschätzen? Nenne mir auch einen sinnvollen Mittelwert, welchen ich nutzen kann. Bitte erkläre mir auch, wie Du zu diesem Mittelwert gekommen bist.	GPT-4o

Kapitel	Prompt	ChatGPT
---------	--------	---------

		Modell
3.1	Welche Aspekte sind wichtig, um Antriebssysteme in der Nutzungsphase fair und wissenschaftlich fundiert miteinander zu vergleichen? Zur Nutzungsphase sollen die Energieträger betrachtet werden, welche zum Vorschub des Fahrzeugs benötigt werden, aber auch der Energieaufwand, welcher zur Herstellung der Energieträger benötigt wird. Bitte berücksichtige bei Deiner Betrachtung Verbrennungsmotorenfahrzeuge, Elektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge. Bei den Verbrennungsmotoren bitte Diesel, Benzin, Wasserstoffverbrennung, eFuels, Biokraftstoffe, LPG und CNG gesondert betrachten. Bitte verwende nur wissenschaftlich fundierte Quellen und nenne mir auch die Quellen, welche du verwendet hast.	GPT-4o
3.4	Beschreibe mir genau welche Luftschadstoffen bei Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff, eFuels oder Biokraftstoffen in Verbindung stehen. Bitte unterscheide sehr genau zwischen CO ₂ , NO _x und anderen Luftschadstoffen. Bitte nenne mir auch hier die wissenschaftlichen Quellen.	GPT-4o
3.4	Nenne mir seriöse Quellen, welche realistische Flottenverbräuche von PKW-Flotten in Deutschland oder idealerweise in Europa darstellen.	GPT-4o
4.4	Nenne mir öffentlich verfügbare Statistiken, welche Informationen zu den EU-Ländern bereitstellen. Konkret benötige ich Daten zu Einwohnerzahlen, aktuelle Emissionsfaktoren der Stromerzeugung inklusive deren Entwicklung in den vergangenen Jahren, Anzahl der PKW-Bestandsfahrzeuge und Neuzulassungen.	GPT-4o
5.1	Durch welche Fahrzeugkomponenten werden Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von PKWs mit Verbrennungsmotor und vergleichend dazu bei alternativen Antriebstechnologien wie PHEV, BEV und FCEV freigesetzt?	GPT-4o
5.2	Welche Treibhausgasemissionen werden bei der Entsorgung von PKWs mit Verbrennungsmotor und vergleichend dazu bei alternativen Antriebstechnologien wie PHEV, BEV und FCEV freigesetzt?	GPT-4o
6.1	Kann es sein das HVO100 im Vergleich zu Diesel zwar deutlich weniger CO ₂ -Emissionen verursacht (bzw. es entstehen bei HVO100 nur erneuerbare Treibhausgase, da diese aus einem geschlossenen Kohlendioxidkreislauf stammen), aber dass HVO deutlich höhere Stickoxidemissionen hat als ein moderner Diesel nach neuester EU-Emissionsnorm Euro 6e?	GPT-4o
6.1	Mein Verständnis ist, dass die Stickoxide bei HVO100 besonders hoch sind, wenn man die Vorkette mitberücksichtigt!	GPT-4o

Kapitel	Prompt	ChatGPT Modell
6.1	Nach meinem Verständnis werden Stickoxidemissionen nur bei PKWs emittiert, welche einen Verbrennungsmotor haben. Ist meine Annahme richtig, dass nicht nur bei fossilen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel, sondern auch bei alternativen synthetischen Kraftstoffen wie eFuels oder Biokraftstoffen wie HVO100 auch immer Stickoxide aufgrund des Verbrennungsprozesses entstehen? Ist meine Annahme, dass bei BEV und FCEV keine Stickoxide im Rahmen der Tank-to-Wheel-Betrachtung emittiert werden, aber dennoch entstehen, wenn die Well-to-Wheel-Betrachtung mitberücksichtigt wird?	GPT-4o
6.1	Welche Grenzwerte gibt es in der EU für den Ausstoß von Stickoxiden bei PKWs?	GPT-4o
6.1	Wann genau sind diese einzelnen Stufen der Euro 6 in Kraft getreten und wann ist mit der Euro 7 zu rechnen?	GPT-4o
6.2	Welche Art von Feinstaub wird durch die Verbrennung von Kraftstoffen in PKW-Verbrennungsmotoren verursacht? Bitte gehe explizit auf Benzin, Diesel, eFuels und HVO100 als Kraftstoffe ein.	GPT-4o
6.2	Nenne mir wissenschaftliche Studien, welche sich mit der Thematik Vergleich der Feinstaubemissionen von BEV vs ICEV beschäftigen	GPT-4o
6.3	Welche kritischen Rohstoffe sind für die Herstellung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wie BEV, FCEV und PHEV von Bedeutung? Gibt es auch kritische Rohstoffe für Fahrzeuge mit klassischen Verbrennungsmotorenantrieb?	GPT-4o
6.3	Welche weiteren Aspekte sind in Bezug auf kritische Rohstoffe außer deren wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungssicherheit von Relevanz?	GPT-4o
7.3	Ich habe eine wissenschaftliche Arbeit mit dem Titel "Ökobilanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe im PKW-Sektor der Europäischen Union: Eine Lebenszyklusanalyse" geschrieben. Wichtige Themen, welche behandelt werden, sind Alternative Antriebstechnologien, Lebenszyklusanalyse, Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub sowie Bedarf kritischer Rohstoffe. Zu welchen der 17 Nachhaltigkeitszielen der UN (SDGs) trägt diese Arbeit bei. Begründe kurz Deine Meinung!	GPT-4o

Datei-Anhangverzeichnis zur Masterarbeit

Folgende **Excel-Dateien** ergänzen die Masterarbeit.

In Kapitel 1.2 wurden die Vorgehensweise der Literaturrecherche und die methodische Auswertung der verwendeten Studien und Metastudien beschrieben. Der folgenden Datei können weitere Informationen entnommen werden:

- Kapitel 1.2_Matrix zur Literaturlauswertung.xlsx

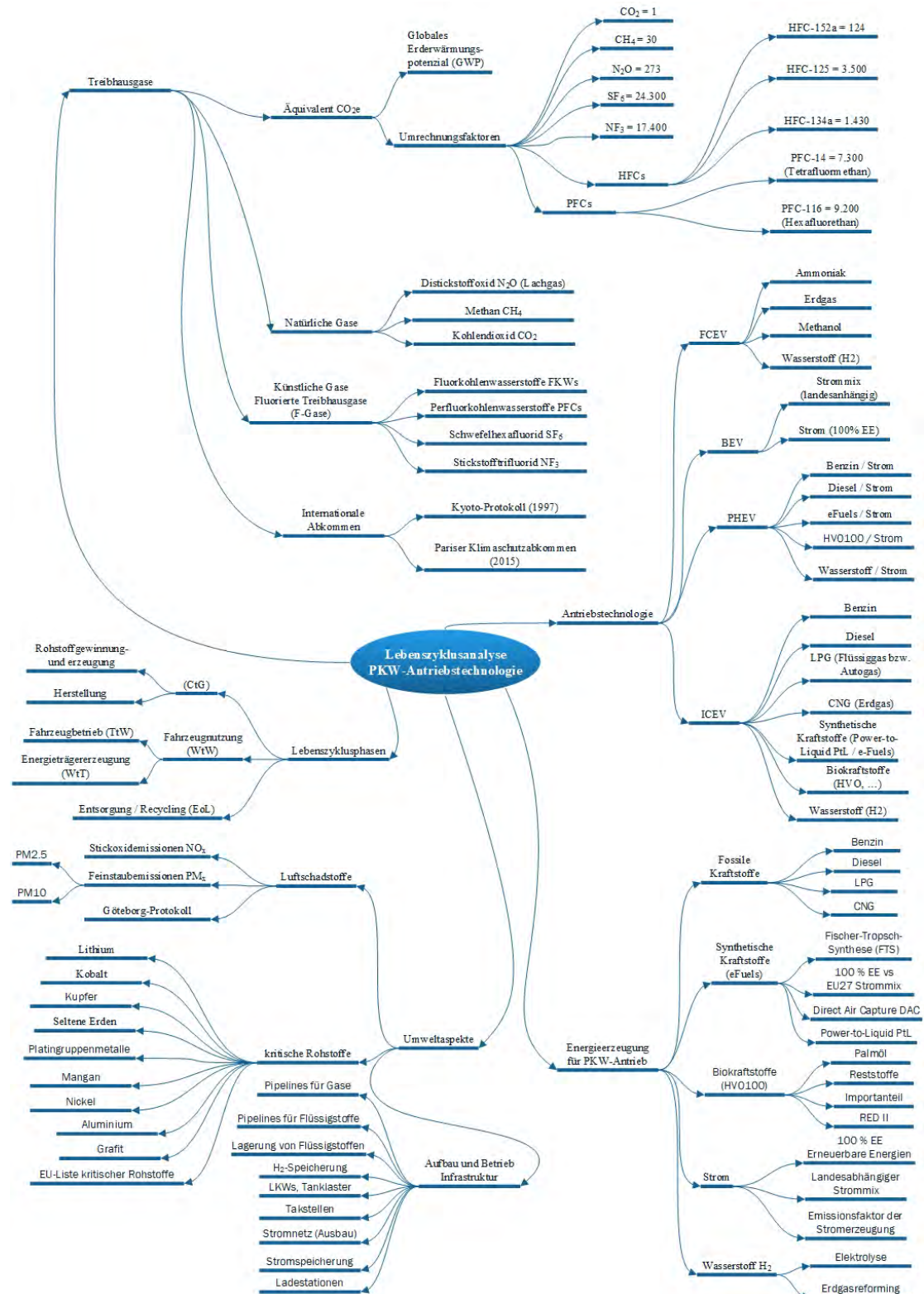
Der überwiegende Anteil der Tabellen und Abbildungen aus den Kapiteln 0 bis 0 und alle Berechnungen der Kapitel 3 bis 0 basieren auf den folgenden Excel-Tabellen:

- Kapitel 2-4_Diverse Auswertungen pro EU-Land.xlsx
- Kapitel 3-5_LCA_THG-Emissionen_2025 2035 2050.xlsx
- Kapitel 6_LCA_NOx PMx Emissionen_2025.xlsx

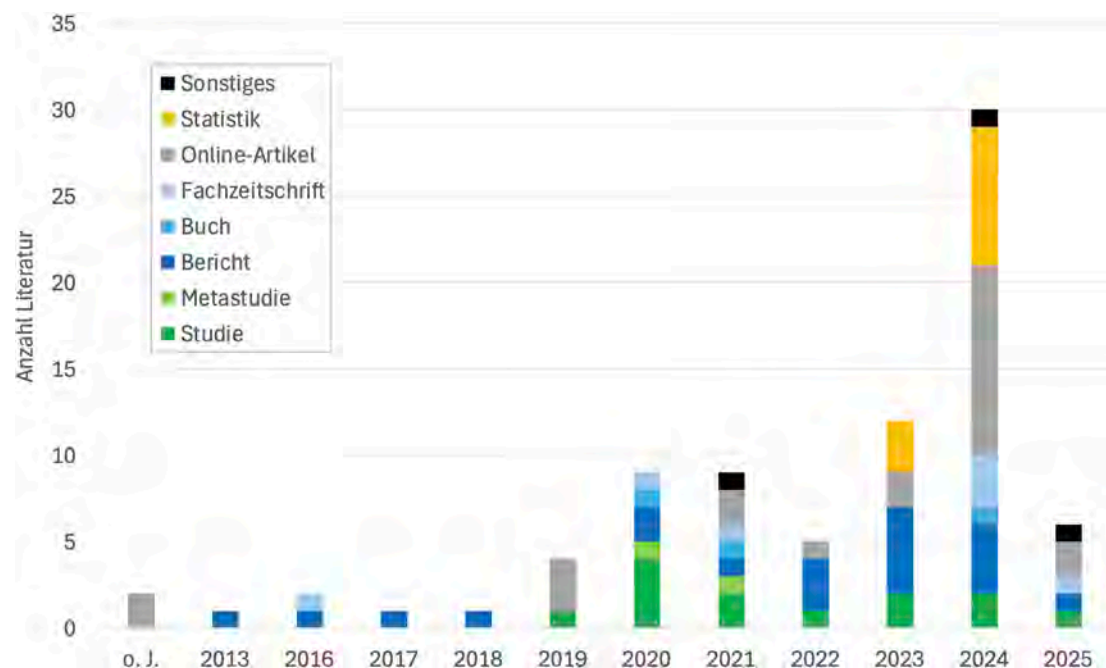
Dieser Anhang wird in einer gesonderten Datei abgelegt.

Anlage I: Methodische Instrumente und Literaturrecherche

Die folgende **Mind-Map** wurde zur Strukturierung der komplexen Themenvielfalt aufgebaut (vgl. Kapitel 1.2).



Die umfangreiche Literatursauswertung wurde in einer Matrix nach verschiedenen Themen kategorisiert (vgl. Kapitel 1.2). Die folgende Abbildung (Bestandteil der Excel-Datei) wertet die Literatur nach dem Erscheinungsjahr und der Art der Literatur aus. Wie bereits eingangs im Kapitel 1.2 erwähnt, ist der Großteil der verwendeten Literatur sehr aktuell. Etwa 60 % der Literatur wurde in den Jahren 2023 bis 2025 veröffentlicht. Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass die Ökobilanz auf aktuellen Daten basiert.



Anlage II: Berechnungen zu Kapitel 3 bis 6

Treibhausgasemissionen (Kapitel 3 bis 5)

Die folgende Tabelle zeigt alle relevanten Annahmen zur Berechnung des Energieverbrauchs und der CO₂e-Emissionen von BEV, FCEV, ICEV und PHEV, die in **Kapitel 3** für die **WtW-Analyse** verwendet wurden.

Antriebsart	Well-to-Wheel [WtW]						
	Well-to-Tank [WtT] Spezifische Emissionen in der Herstellung der Kraftstoffe		Tank-to-Wheel [TtW] Verbrauchswerte der Fahrzeuge			CO ₂ e-Emissionen und Energieverbrauch	
	Energiebereitstellung		Fahrbetrieb			Gesamtemissionen über Fahrzeuglebenszeit	Emissionen pro Kilometer
	Energieträger	WtT CO ₂ e-Emissionsfaktor	Fahrzeugverbrauch	Lebensdauer [Jahre]	Gesamtfahrleistung [km]		
BEV	Strommix Deutschland	383 g CO ₂ e / kWh	22 kWh / 100 km	12	150.000	12 t CO ₂ e	83 g CO ₂ e / km
BEV	Strommix Polen	779 g CO ₂ e / kWh	22 kWh / 100 km	12	150.000	25 t CO ₂ e	168 g CO ₂ e / km
BEV	Strommix Frankreich	68 g CO ₂ e / kWh	22 kWh / 100 km	12	150.000	2 t CO ₂ e	15 g CO ₂ e / km
BEV	Strommix EU27	287 g CO ₂ e / kWh	22 kWh / 100 km	12	150.000	9 t CO ₂ e	62 g CO ₂ e / km
BEV	EE-Strom	35 g CO ₂ e / kWh	22 kWh / 100 km	12	150.000	1 t CO ₂ e	8 g CO ₂ e / km
FCEV	H ₂ [Erdgasreforming]	394 g CO ₂ e / kWh	47 kWh / 100 km	12	180.000	33 t CO ₂ e	184 g CO ₂ e / km
FCEV	H ₂ [Strommix EU27]	427 g CO ₂ e / kWh	47 kWh / 100 km	12	180.000	36 t CO ₂ e	199 g CO ₂ e / km
FCEV	H ₂ [EE-Strom]	34 g CO ₂ e / kWh	47 kWh / 100 km	12	180.000	3 t CO ₂ e	16 g CO ₂ e / km
ICEV-G	Benzin	326 g CO ₂ e / kWh	67 kWh / 100 km	18	180.000	40 t CO ₂ e	220 g CO ₂ e / km
ICEV-D	Diesel	331 g CO ₂ e / kWh	69 kWh / 100 km	14	210.000	48 t CO ₂ e	230 g CO ₂ e / km
ICEV-G	eFuel [EE-Strom]	40 g CO ₂ e / kWh	66 kWh / 100 km	18	180.000	5 t CO ₂ e	27 g CO ₂ e / km
ICEV-G	eFuel [Strommix EU27]	637 g CO ₂ e / kWh	66 kWh / 100 km	18	180.000	76 t CO ₂ e	423 g CO ₂ e / km
ICEV-D	HVO [Reststoffe]	34 g CO ₂ e / kWh	67 kWh / 100 km	14	210.000	5 t CO ₂ e	23 g CO ₂ e / km
ICEV-D	HVO [Palmöl]	536 g CO ₂ e / kWh	67 kWh / 100 km	14	210.000	75 t CO ₂ e	358 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	316 g CO ₂ e / kWh	62 kWh / 100 km	14	175.000	34 t CO ₂ e	195 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	297 g CO ₂ e / kWh	36 kWh / 100 km	14	175.000	19 t CO ₂ e	108 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	253 g CO ₂ e / kWh	62 kWh / 100 km	14	175.000	27 t CO ₂ e	156 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	108 g CO ₂ e / kWh	36 kWh / 100 km	14	175.000	7 t CO ₂ e	39 g CO ₂ e / km
PHEV	HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	97 g CO ₂ e / kWh	61 kWh / 100 km	14	210.000	12 t CO ₂ e	59 g CO ₂ e / km
PHEV	HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	224 g CO ₂ e / kWh	36 kWh / 100 km	14	210.000	17 t CO ₂ e	81 g CO ₂ e / km
PHEV	eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	550 g CO ₂ e / kWh	61 kWh / 100 km	14	175.000	58 t CO ₂ e	334 g CO ₂ e / km
PHEV	eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	375 g CO ₂ e / kWh	36 kWh / 100 km	14	175.000	24 t CO ₂ e	135 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	316 g CO ₂ e / kWh	67 kWh / 100 km	14	175.000	37 t CO ₂ e	213 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	297 g CO ₂ e / kWh	40 kWh / 100 km	14	175.000	21 t CO ₂ e	118 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	316 g CO ₂ e / kWh	73 kWh / 100 km	14	175.000	40 t CO ₂ e	230 g CO ₂ e / km
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	297 g CO ₂ e / kWh	43 kWh / 100 km	14	175.000	22 t CO ₂ e	128 g CO ₂ e / km

Eingangsgrößen für Berechnungen:

- CO₂e-Emissionsfaktor des Energieträgers (Strom, Wasserstoff, Kraftstoff)
- Fahrzeugverbrauch (Energienmenge pro 100 Kilometer Fahrstrecke)
- Gesamtfahrleistung des PKWs (siehe Kapitel 2.6)

Ausgangsgrößen der Berechnungen:

- Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebensdauer (Tonnen CO₂e)
- Emissionen pro gefahrenem Kilometer (Gramm CO₂e pro Kilometer)

Die Berechnung der Emissionen über die gesamte Fahrzeuglebenszeit erfolgt, indem das Produkt aus Emissionsfaktor, Fahrzeugverbrauch und Gesamtfahrleistung gebildet wird.

- **Beispiel BEV [Strommix Deutschland]**

$$\frac{383 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{21,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \times 150.000 \text{ km} \times \frac{\text{t}}{1.000.000\text{g}} = \mathbf{12 \text{ t CO}_2\text{e}}$$

- **Beispiel FCEV [grauer Wasserstoff | Erdgasreforming]**

Umrechnung Fahrzeugverbrauch von kg/100 km auf kWh/100 km

$$1,4 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}} \times 33,33 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 46,7 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

$$\frac{394 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{46,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \times 180.000 \text{ km} \times \frac{\text{t}}{1.000.000\text{g}} = \mathbf{33 \text{ t CO}_2\text{e}}$$

- **Beispiel ICEV [Benzin]**

$$\frac{326 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{67,5 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \times 180.000 \text{ km} \times \frac{\text{t}}{1.000.000\text{g}} = \mathbf{40 \text{ t CO}_2\text{e}}$$

- **Beispiel PHEV [Benzin [75 %] / Strommix EU27 [25 %]]**

Berechnung Emissionsfaktor (75 % Verbrenner / 25 % elektrisch)

$$\frac{326 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times 75\% + \frac{287 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times 25\% = 316 \text{ g CO}_2\text{e}$$

Berechnung PKW-Energieverbrauch (75 % Verbrenner / 25 % elektrisch)

Inklusive 10 % erhöhtem Verbrauch aufgrund höheren Gewichtes von PHEVs

$$\left(\frac{67,5 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \times 75\% + \frac{21,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \times 25\% \right) \times 110\% = 61,7 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

Berechnung Gesamtemissionen über Fahrzeuglebensdauer

$$\frac{316 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{61,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \times 175.000 \text{ km} \times \frac{\text{t}}{1.000.000\text{g}} = \mathbf{34 \text{ t CO}_2\text{e}}$$

Die Emissionen pro Kilometer ergeben sich aus dem Produkt des Emissionsfaktors und des Fahrzeugverbrauchs.

- **Beispiel BEV [Strommix Deutschland]**

$$\frac{383 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{21,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = \mathbf{83 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{km}}}$$

- **Beispiel FCEV [grauer Wasserstoff]**

$$1,4 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}} \times 33,33 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 46,7 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$$

$$\frac{394 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{46,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = \mathbf{184 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{km}}}$$

- **Beispiel ICEV [Benzin]**

$$\frac{326 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{67,5 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = \mathbf{220 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{km}}}$$

- **Beispiel PHEV [Benzin [75 %] / Strommix EU27 [25 %]]**

$$\frac{316 \text{ g CO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times \frac{61,7 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = \mathbf{195 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{km}}}$$

Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnungsergebnisse, die für **Kapitel 4** für die vergleichende **WtW-Analyse** der verschiedenen Antriebstechnologien und Energieträger verwendet wurden.

Antriebsart	Well-to-Whol [WtW]						
	Well-to-Tank [WtT]		CO ₂ e-Emissionen und Energieverbrauch				Verbrennung [TtW] [Renewable Combustion Emissions]
	Emissionen in der Herstellung der Kraft		Emissionen pro Kilometer				Emission
	Energieerzeuger			Abweichungen zu ICEV-Bezug	Emissionen pro 100 Kilometer	Energieverbrauch pro 100 Kilometer	Wert Einheit Abweichungen zu ICEV-Bezug
BEV	Strommix Deutschland	83 g CO ₂ e / km	-137	-62%	8 kg CO ₂ e / 100km	78 MJ / 100 km	-137 -62%
BEV	Strommix Polen	168 g CO ₂ e / km	-52	-24%	17 kg CO ₂ e / 100km	78 MJ / 100 km	-52 -24%
BEV	Strommix Frankreich	15 g CO ₂ e / km	-205	-93%	1 kg CO ₂ e / 100km	78 MJ / 100 km	-205 -93%
BEV	Strommix EU27	62 g CO ₂ e / km	-158	-72%	6 kg CO ₂ e / 100km	78 MJ / 100 km	-158 -72%
BEV	EE-Strom	8 g CO ₂ e / km	-212	-97%	1 kg CO ₂ e / 100km	78 MJ / 100 km	-212 -97%
FCEV	H ₂ [Erdgasreformung]	184 g CO ₂ e / km	-36	-16%	18 kg CO ₂ e / 100km	168 MJ / 100 km	-36 -16%
FCEV	H ₂ [Strommix EU27]	199 g CO ₂ e / km	-21	-9%	20 kg CO ₂ e / 100km	168 MJ / 100 km	-21 -9%
FCEV	H ₂ [EE-Strom]	16 g CO ₂ e / km	-204	-93%	2 kg CO ₂ e / 100km	168 MJ / 100 km	-204 -93%
ICEV-G	Benzin	220 g CO ₂ e / km	0	0%	22 kg CO ₂ e / 100km	243 MJ / 100 km	0 0%
ICEV-D	Diesel	230 g CO ₂ e / km	10	4%	23 kg CO ₂ e / 100km	250 MJ / 100 km	10 4%
ICEV-G	eFuel [EE-Strom]	27 g CO ₂ e / km	-193	-88%	3 kg CO ₂ e / 100km	239 MJ / 100 km	175 g CO ₂ e / km -18 -8%
ICEV-G	eFuel [Strommix EU27]	423 g CO ₂ e / km	203	92%	42 kg CO ₂ e / 100km	239 MJ / 100 km	175 g CO ₂ e / km 378 172%
ICEV-D	HVO [Reststoffe]	23 g CO ₂ e / km	-197	-90%	2 kg CO ₂ e / 100km	240 MJ / 100 km	176 g CO ₂ e / km -21 -10%
ICEV-D	HVO [Palmöl]	358 g CO ₂ e / km	138	63%	36 kg CO ₂ e / 100km	240 MJ / 100 km	176 g CO ₂ e / km 314 142%
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	195 g CO ₂ e / km	-25	-11%	19 kg CO ₂ e / 100km	222 MJ / 100 km	-25 -11%
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	108 g CO ₂ e / km	-112	-51%	11 kg CO ₂ e / 100km	131 MJ / 100 km	-112 -51%
PHEV	Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	156 g CO ₂ e / km	-64	-29%	16 kg CO ₂ e / 100km	222 MJ / 100 km	-64 -29%
PHEV	Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	39 g CO ₂ e / km	-181	-82%	4 kg CO ₂ e / 100km	131 MJ / 100 km	-181 -82%
PHEV	HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	59 g CO ₂ e / km	-161	-73%	6 kg CO ₂ e / 100km	220 MJ / 100 km	121 g CO ₂ e / km -40 -18%
PHEV	HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	81 g CO ₂ e / km	-139	-63%	8 kg CO ₂ e / 100km	130 MJ / 100 km	24 g CO ₂ e / km -115 -52%
PHEV	eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	334 g CO ₂ e / km	114	52%	33 kg CO ₂ e / 100km	219 MJ / 100 km	120 g CO ₂ e / km 234 106%
PHEV	eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	135 g CO ₂ e / km	-85	-39%	14 kg CO ₂ e / 100km	130 MJ / 100 km	24 g CO ₂ e / km -61 -28%
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	213 g CO ₂ e / km	-7	-3%	21 kg CO ₂ e / 100km	242 MJ / 100 km	-7 -3%
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	118 g CO ₂ e / km	-102	-46%	12 kg CO ₂ e / 100km	143 MJ / 100 km	-102 -46%
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	230 g CO ₂ e / km	10	5%	23 kg CO ₂ e / 100km	262 MJ / 100 km	10 5%
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	128 g CO ₂ e / km	-92	-42%	13 kg CO ₂ e / 100km	155 MJ / 100 km	-92 -42%

Anmerkung: Der Umrechnungsfaktor von Megajoule (MJ) auf Kilowattstunden (kWh) beträgt 3,6.

Land	Bewölkerungszahlen in 2022	CO ₂ e-Emissionen durch Stromerzeugung 2021 [g/kWh]	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	Fahrzeugneuzulassungen in 2022	Bestandsfahrzeuge 2022	Durchschnittsalter der Bestandsfahrzeuge	Quote Neuzulassungen vs Bestandsfahrzeuge
Belgien	11.617.623	170	410	402	318	308	261	272	190	366.303	5.877.949	9,8	6,2%
Bulgarien	6.482.484	908	642	781	734	730	751	850	477	28.680			
Dänemark	5.873.420	106	510	628	416	272	376	136	86	148.282	2.794.055	8,9	5,3%
Deutschland	83.237.124	883	747	684	618	570	532	510	344	2.651.357	48.763.036	10,0	5,4%
Estland	1.331.796	253	1.343	2.092	1.593	1.421	1.263	589	232	20.426	849.294	16,6	2,4%
Finnland	5.548.241	32	182	230	166	149	236	91	57	81.695	2.740.393	12,9	3,0%
Frankreich	67.957.053	38	142	96	92	103	100	69	66	1.529.035	38.856.492	10,8	3,9%
Griechenland	10.459.782	412	1.248	1.093	1.025	959	836	680	454	105.283	5.495.927	17,3	1,9%
Irland	5.154.277	348	908	880	789	669	528	464	282	105.398	2.292.748	9,1	4,6%
Italien	59.030.133	285	585	583	512	498	423	336	271	1.316.926	40.213.061	12,5	3,3%
Kroatien	3.862.305	378	235	207	284	194	92	482	319	43.928	1.836.016	13,3	2,4%
Lettland	1.875.757	305	43	284	367	369	509	590	219	16.824	769.345	15,2	2,2%
Litauen	2.805.998	73	242	210	197	159	166	124	83	25.496	1.347.548	14,7	1,9%
Luxemburg	645.397	287	853	690	525	517	531	491	285	42.094	448.454	7,9	9,4%
Malta	520.174	856	1.941	1.269	1.027	1.067	1.026	571	384	6.409			
Niederlande	17.590.672	331	642	602	540	537	469	523	319	312.075	9.233.107	11,7	3,4%
Österreich	8.978.929	244	355	308	314	379	334	339	221	215.047	5.150.890	8,9	4,2%
Polen	36.889.761	778	1.284	1.380	1.208	1.136	1.038	906	728	419.749	26.457.659	14,9	1,6%
Portugal	10.421.117	181	635	686	567	578	293	404	215	157.295	5.560.000	13,6	2,8%
Rumänien	19.042.455	378	942	1.013	763	844	562	486	380	129.328	7.865.186	14,9	1,6%
Schweden	10.452.326	18	12	22	24	33	56	14	13	288.087	4.980.543	10,7	5,6%
Slowakei	5.434.712	354	547	512	489	445	361	459	342	78.841	2.721.252	14,7	2,9%
Slowenien	2.107.180	205	527	450	337	373	313	251	214	46.339	1.221.702	11,2	3,8%
Spanien	47.486.843	175	523	550	514	472	280	349	184	813.376	25.644.595	13,9	3,2%
Tschechien	10.516.707	546	1.067	1.043	932	874	788	719	515	192.084	6.425.417	15,9	3,0%
Ungarn	9.610.403	222	798	731	637	492	436	347	229	111.524	4.091.975	14,6	2,7%
Zypern	904.705	983	947	947	966	894	792	738	586	11.628	601.131		1,9%

Anmerkung 1: Zu Bulgarien, Malta und Zypern lagen keine Daten zu Bestandsfahrzeugen vor.

Anmerkung 2: Für den EU-Durchschnitt wurde der Median verwendet.

Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnungsergebnisse, die in **Kapitel 5** für die vergleichende **Lebenszyklusanalyse (LCA)** der verschiedenen Antriebs-technologien und Energieträger verwendet wurden.

Eingangsgrößen für die Berechnungen:

- CO₂e-Emissionen pro Fahrzeug für die Cradle-to-Gate-Phase
- CO₂e-Emissionsfaktor für die Well-to-Tank-Phase
- CO₂e-Emissionsfaktor für die Tank-to-Wheel-Phase
- CO₂e-Emissionen pro Fahrzeug für die End-of-Life-Phase

Ausgangsgrößen der Berechnungen:

- THG-Emissionen pro Lebenszyklusphase (Tonnen CO₂e pro Fahrzeug)
- Treibhausgasemissionen pro gefahrenem Kilometer für jede Lebenszyklusphase und den gesamten Lebenszyklus (Gramm CO₂e pro Kilometer)
- Prozentualer Anteil der Treibhausgase an den Lebenszyklusphasen (Prozent)

Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnungsergebnisse für THG-Emissionen pro Fahrzeug und Lebenszyklusphase für das **Jahr 2025**.

Jahr	Antriebstechnologie und Energieträger	Cradle-to-Gate [CtG]		Well-to-Wheel [WtW]		Nutzungsende	
		Well-to-Tank [WtT]		Tank-to-Wheel [TtW]		End-of-Life [EoL]	
2025	BEV Strommix Deutschland	14,656	t CO ₂ e / Fzg.	12,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	BEV Strommix Polen	14,656	t CO ₂ e / Fzg.	25,2	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	BEV Strommix Frankreich	14,656	t CO ₂ e / Fzg.	2,2	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	BEV Strommix EU27	14,656	t CO ₂ e / Fzg.	9,3	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	BEV EE-Strom	14,656	t CO ₂ e / Fzg.	1,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	FCEV H ₂ [Erdgasreforming]	14,927	t CO ₂ e / Fzg.	33,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	FCEV H ₂ [Strommix EU27]	14,927	t CO ₂ e / Fzg.	35,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	FCEV H ₂ [EE-Strom]	14,927	t CO ₂ e / Fzg.	2,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	ICEV Benzin	8,074	t CO ₂ e / Fzg.	7,4	t CO ₂ e / Fzg.	32,1	t CO ₂ e / Fzg.
2025	ICEV Diesel	9,092	t CO ₂ e / Fzg.	9,9	t CO ₂ e / Fzg.	38,4	t CO ₂ e / Fzg.
2025	ICEV eFuel [EE-Strom]	8,074	t CO ₂ e / Fzg.	4,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	ICEV eFuel [Strommix EU27]	8,074	t CO ₂ e / Fzg.	76,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	ICEV HVO [Reststoffe]	9,092	t CO ₂ e / Fzg.	4,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	ICEV HVO [Palmöl]	9,092	t CO ₂ e / Fzg.	75,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	12,7	t CO ₂ e / Fzg.	21,4	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	14,7	t CO ₂ e / Fzg.	4,2	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	5,9	t CO ₂ e / Fzg.	21,4	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	2,6	t CO ₂ e / Fzg.	4,2	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	12,5	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	17,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	58,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	23,6	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV (F1,2) Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	13,8	t CO ₂ e / Fzg.	23,3	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV (F1,2) Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	16,0	t CO ₂ e / Fzg.	4,6	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV (F1,3) Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	15,0	t CO ₂ e / Fzg.	25,3	t CO ₂ e / Fzg.
2025	PHEV (F1,3) Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,856	t CO ₂ e / Fzg.	17,3	t CO ₂ e / Fzg.	5,0	t CO ₂ e / Fzg.

Jahr	Antriebstechnologie und Energieträger	Life Cycle Assessment (LCA)									
		Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	Tank-to-Wheel [TtW] emissions	End-of-Life [EoL]	LCA	Cradle-to-Gate [CtG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	Tank-to-Wheel [TtW] emissions	End-of-Life [EoL]
2025	BEV Strommix Deutschland	83	0	0	8	189 g CO ₂ e / km	52%	44%	0%	0%	4%
2025	BEV Strommix Polen	168	0	0	10	276 g CO ₂ e / km	35%	61%	0%	0%	4%
2025	BEV Strommix Frankreich	15	0	0	10	122 g CO ₂ e / km	80%	12%	0%	0%	6%
2025	BEV Strommix EU27	62	0	0	10	169 g CO ₂ e / km	58%	37%	0%	0%	6%
2025	BEV EE-Strom	8	0	0	10	115 g CO ₂ e / km	85%	7%	0%	0%	8%
2025	FCEV H2 [Erdgasreformung]	184	0	0	5	272 g CO ₂ e / km	30%	68%	0%	0%	2%
2025	FCEV H2 [Strommix EU27]	199	0	0	6	288 g CO ₂ e / km	29%	69%	0%	0%	2%
2025	FCEV H2 [EE-Strom]	16	0	0	6	105 g CO ₂ e / km	79%	15%	0%	0%	6%
2025	ICEV Benzin	41	178	0	3	267 g CO ₂ e / km	17%	15%	67%	0%	1%
2025	ICEV Diesel	47	183	0	3	276 g CO ₂ e / km	16%	17%	66%	0%	1%
2025	ICEV eFuel [EE-Strom]	27	0	175	3	249 g CO ₂ e / km	18%	11%	0%	70%	1%
2025	ICEV eFuel [Strommix EU27]	423	0	175	3	646 g CO ₂ e / km	7%	66%	0%	27%	0%
2025	ICEV HVO [Reststoffe]	23	0	176	3	245 g CO ₂ e / km	18%	9%	0%	72%	1%
2025	ICEV HVO [Palmöl]	358	0	176	3	580 g CO ₂ e / km	7%	62%	0%	30%	0%
2025	PHEV Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	73	122	0	5	261 g CO ₂ e / km	24%	28%	47%	0%	2%
2025	PHEV Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	84	24	0	5	176 g CO ₂ e / km	35%	48%	14%	0%	3%
2025	PHEV Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	34	122	0	5	223 g CO ₂ e / km	28%	15%	55%	0%	2%
2025	PHEV Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	15	24	0	5	106 g CO ₂ e / km	58%	14%	23%	0%	5%
2025	PHEV HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	59	0	121	4	236 g CO ₂ e / km	22%	25%	0%	51%	2%
2025	PHEV HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	81	0	24	4	161 g CO ₂ e / km	32%	50%	0%	15%	3%
2025	PHEV eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	334	0	120	5	521 g CO ₂ e / km	12%	64%	0%	23%	1%
2025	PHEV eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	135	0	24	5	226 g CO ₂ e / km	27%	60%	0%	11%	2%
2025	PHEV (F1,2) Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	79	133	0	5	279 g CO ₂ e / km	22%	28%	48%	0%	2%
2025	PHEV (F1,2) Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	92	26	0	5	185 g CO ₂ e / km	34%	49%	14%	0%	3%
2025	PHEV (F1,3) Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	86	144	0	5	297 g CO ₂ e / km	21%	29%	49%	0%	2%
2025	PHEV (F1,3) Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	99	28	0	5	195 g CO ₂ e / km	32%	51%	15%	0%	3%

Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnungsergebnisse für THG-Emissionen pro Fahrzeug und Lebenszyklusphase für das **Szenario im Jahr 2035**.

Jahr	Antriebstechnologie und Energieträger	Cradle-to-Gate [CtG]		Well-to-Tank [WtT]		Tank-to-Wheel [TtW]		Nutzungsende
		Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	
2035	BEV Strommix Deutschland	14,181	t CO ₂ e / Fzg.	7,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,2 t CO ₂ e / Fzg.
2035	BEV Strommix Polen	14,181	t CO ₂ e / Fzg.	15,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,3 t CO ₂ e / Fzg.
2035	BEV Strommix Frankreich	14,181	t CO ₂ e / Fzg.	1,2	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,3 t CO ₂ e / Fzg.
2035	BEV Strommix EU27	14,181	t CO ₂ e / Fzg.	5,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,3 t CO ₂ e / Fzg.
2035	BEV EE-Strom	14,181	t CO ₂ e / Fzg.	1,2	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,3 t CO ₂ e / Fzg.
2035	FCEV H2 [Erdgasreformung]	12,552	t CO ₂ e / Fzg.	33,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,9 t CO ₂ e / Fzg.
2035	FCEV H2 [Strommix EU27]	12,552	t CO ₂ e / Fzg.	23,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,1 t CO ₂ e / Fzg.
2035	FCEV H2 [EE-Strom]	12,552	t CO ₂ e / Fzg.	3,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,1 t CO ₂ e / Fzg.
2035	ICEV Benzin	9,615	t CO ₂ e / Fzg.	5,7	t CO ₂ e / Fzg.	24,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,5 t CO ₂ e / Fzg.
2035	ICEV Diesel	10,362	t CO ₂ e / Fzg.	8,7	t CO ₂ e / Fzg.	33,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,6 t CO ₂ e / Fzg.
2035	ICEV eFuel [EE-Strom]	9,615	t CO ₂ e / Fzg.	3,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5 t CO ₂ e / Fzg.
2035	ICEV eFuel [Strommix EU27]	9,615	t CO ₂ e / Fzg.	32,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5 t CO ₂ e / Fzg.
2035	ICEV HVO [Reststoffe]	10,362	t CO ₂ e / Fzg.	4,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,6 t CO ₂ e / Fzg.
2035	ICEV HVO [Palmöl]	10,362	t CO ₂ e / Fzg.	69,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,6 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	8,1	t CO ₂ e / Fzg.	18,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,6 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	7,9	t CO ₂ e / Fzg.	3,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	5,2	t CO ₂ e / Fzg.	18,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	2,5	t CO ₂ e / Fzg.	3,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	7,5	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	8,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV eFuel [75%] / Strommix EU27 [25%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	28,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.
2035	PHEV eFuel [25%] / Strommix EU27 [75%]	10,720	t CO ₂ e / Fzg.	12,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,7 t CO ₂ e / Fzg.

Jahr	Antriebstechnologie und Energieträger	Life Cycle Assessment [LCA]									
		Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	Tank-to-Wheel [TtW] grosserhohe	End-of-Life [EoL]	LCA	Cradle-to-End-of-Life [CtEoL]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	Tank-to-Wheel [TtW] grosserhohe	End-of-Life [EoL]
2035	BEV Strommix Deutschland	40	0	0	7	128 g CO ₂ e / km	63%	32%	0%	0%	5%
2035	BEV Strommix Polen	86	0	0	8	175 g CO ₂ e / km	48%	49%	0%	0%	4%
2035	BEV Strommix Frankreich	7	0	0	8	95 g CO ₂ e / km	85%	7%	0%	0%	8%
2035	BEV Strommix EU27	29	0	0	8	118 g CO ₂ e / km	69%	25%	0%	0%	6%
2035	BEV EE-Strom	7	0	0	8	95 g CO ₂ e / km	85%	7%	0%	0%	8%
2035	FCEV H ₂ [Erdgasreformung]	157	0	0	4	221 g CO ₂ e / km	27%	71%	0%	0%	2%
2035	FCEV H ₂ [Strommix EU27]	113	0	0	5	178 g CO ₂ e / km	34%	64%	0%	0%	3%
2035	FCEV H ₂ [EE-Strom]	14	0	0	5	79 g CO ₂ e / km	76%	18%	0%	0%	6%
2035	ICEV Benzin	31	136	0	3	223 g CO ₂ e / km	24%	14%	61%	0%	1%
2035	ICEV Diesel	42	162	0	3	255 g CO ₂ e / km	19%	16%	63%	0%	1%
2035	ICEV eFuel [EE-Strom]	21	0	112	3	189 g CO ₂ e / km	28%	11%	0%	59%	1%
2035	ICEV eFuel [Strommix EU27]	178	0	112	3	346 g CO ₂ e / km	15%	51%	0%	32%	1%
2035	ICEV HVO [Reststoffe]	21	0	152	3	225 g CO ₂ e / km	22%	9%	0%	68%	1%
2035	ICEV HVO [Palmöl]	333	0	152	3	537 g CO ₂ e / km	9%	62%	0%	28%	1%
2035	PHEV Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	41	94	0	3	191 g CO ₂ e / km	28%	21%	49%	0%	2%
2035	PHEV Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	39	19	0	3	116 g CO ₂ e / km	46%	34%	17%	0%	3%
2035	PHEV Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	26	94	0	3	177 g CO ₂ e / km	30%	15%	55%	0%	2%
2035	PHEV Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	13	19	0	3	89 g CO ₂ e / km	60%	14%	22%	0%	4%
2035	PHEV HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	36	0	104	3	194 g CO ₂ e / km	26%	18%	0%	54%	2%
2035	PHEV HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	40	0	20	3	115 g CO ₂ e / km	45%	35%	0%	18%	3%
2035	PHEV eFuel [75%] / Strommix EU27 [25%]	142	0	78	3	277 g CO ₂ e / km	19%	53%	0%	28%	1%
2035	PHEV eFuel [25%] / Strommix EU27 [75%]	60	0	16	3	133 g CO ₂ e / km	40%	45%	0%	12%	2%

Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnungsergebnisse für THG-Emissionen pro Fahrzeug und Lebenszyklusphase für das **Szenario im Jahr 2050**.

Jahr	Antriebstechnologie und Energieträger	Cradle-to-Gate [CtG]		Well-to-Wheel [WtW]				Nutzungsende	
				Well-to-Tank [WtT]		Tank-to-Wheel [TtW]		End-of-Life [EoL]	
2050	BEV Strommix Deutschland	0,351	t CO ₂ e / Fzg.	1,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,8	t CO ₂ e / Fzg.
2050	BEV Strommix Polen	0,351	t CO ₂ e / Fzg.	1,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,1	t CO ₂ e / Fzg.
2050	BEV Strommix Frankreich	0,351	t CO ₂ e / Fzg.	1,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,1	t CO ₂ e / Fzg.
2050	BEV Strommix EU27	0,351	t CO ₂ e / Fzg.	1,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,1	t CO ₂ e / Fzg.
2050	BEV EE-Strom	0,351	t CO ₂ e / Fzg.	1,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	1,1	t CO ₂ e / Fzg.
2050	FCEV H ₂ [Erdgasreformung]	0,742	t CO ₂ e / Fzg.	32,3	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,7	t CO ₂ e / Fzg.
2050	FCEV H ₂ [Strommix EU27]	0,742	t CO ₂ e / Fzg.	3,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,8	t CO ₂ e / Fzg.
2050	FCEV H ₂ [EE-Strom]	0,742	t CO ₂ e / Fzg.	3,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,8	t CO ₂ e / Fzg.
2050	ICEV Benzin	0,371	t CO ₂ e / Fzg.	5,4	t CO ₂ e / Fzg.	23,2	t CO ₂ e / Fzg.	0,4	t CO ₂ e / Fzg.
2050	ICEV Diesel	0,409	t CO ₂ e / Fzg.	8,3	t CO ₂ e / Fzg.	32,2	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	ICEV eFuel [EE-Strom]	0,371	t CO ₂ e / Fzg.	3,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,4	t CO ₂ e / Fzg.
2050	ICEV eFuel [Strommix EU27]	0,371	t CO ₂ e / Fzg.	3,8	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,4	t CO ₂ e / Fzg.
2050	ICEV HVO [Reststoffe]	0,409	t CO ₂ e / Fzg.	4,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	ICEV HVO [Palmöl]	0,409	t CO ₂ e / Fzg.	69,9	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	5,6	t CO ₂ e / Fzg.	20,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	2,8	t CO ₂ e / Fzg.	4,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	5,6	t CO ₂ e / Fzg.	20,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	2,8	t CO ₂ e / Fzg.	4,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	4,1	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	2,4	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV eFuel [75%] / Strommix EU27 [25%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	4,3	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.
2050	PHEV eFuel [25%] / Strommix EU27 [75%]	0,339	t CO ₂ e / Fzg.	2,5	t CO ₂ e / Fzg.	0,0	t CO ₂ e / Fzg.	0,5	t CO ₂ e / Fzg.

Antriebstechnologie und Energieträger				Life Cycle Assessment (LCA)								
Jahr	Code	Wellen-Tank [WtT]	Tank-in- Wheel [TiW]	Tank-in- Wheel [TiW] [manubar]	End-of-Life [EoL]	LCA	Condition- Tank [CtG]	Wellen-Tank [WtT]	Tank-in- Wheel [TiW]	Tank-in- Wheel [TiW] [manubar]	End-of-Life [EoL]	
2050	BEV Strommix Deutschland	7	0	0	5	13 g CO ₂ e / km	13%	52%	0%	0%	35%	
2050	BEV Strommix Polen	7	0	0	5	14 g CO ₂ e / km	13%	49%	0%	0%	38%	
2050	BEV Strommix Frankreich	7	0	0	5	14 g CO ₂ e / km	13%	49%	0%	0%	38%	
2050	BEV Strommix EU27	7	0	0	5	14 g CO ₂ e / km	13%	49%	0%	0%	38%	
2050	BEV EE-Strom	7	0	0	5	14 g CO ₂ e / km	13%	49%	0%	0%	38%	
2050	FCEV H2 [Erdgasreforming]	134	0	0	3	141 g CO ₂ e / km	2%	96%	0%	0%	2%	
2050	FCEV H2 [Strommix EU27]	13	0	0	4	19 g CO ₂ e / km	16%	66%	0%	0%	18%	
2050	FCEV H2 [EE-Strom]	13	0	0	4	19 g CO ₂ e / km	16%	66%	0%	0%	18%	
2050	ICEV Benzin	30	129	0	2	163 g CO ₂ e / km	1%	18%	79%	0%	1%	
2050	ICEV Diesel	40	154	0	2	197 g CO ₂ e / km	1%	20%	78%	0%	1%	
2050	ICEV eFuel [EE-Strom]	21	0	112	2	137 g CO ₂ e / km	1%	15%	0%	82%	1%	
2050	ICEV eFuel [Strommix EU27]	21	0	112	2	137 g CO ₂ e / km	1%	15%	0%	82%	1%	
2050	ICEV HVO [Reststoffe]	21	0	152	2	177 g CO ₂ e / km	1%	12%	0%	86%	1%	
2050	ICEV HVO [Palmöl]	333	0	152	2	489 g CO ₂ e / km	0%	68%	0%	31%	0%	
2050	PHEV Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	25	89	0	2	118 g CO ₂ e / km	1%	21%	76%	0%	2%	
2050	PHEV Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	12	18	0	2	35 g CO ₂ e / km	4%	36%	53%	0%	7%	
2050	PHEV Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	25	89	0	2	118 g CO ₂ e / km	1%	21%	76%	0%	2%	
2050	PHEV Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	12	18	0	2	35 g CO ₂ e / km	4%	36%	53%	0%	7%	
2050	PHEV HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	19	0	104	3	127 g CO ₂ e / km	1%	15%	0%	82%	2%	
2050	PHEV HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	11	0	20	3	36 g CO ₂ e / km	5%	32%	0%	56%	7%	
2050	PHEV eFuel [75%] / Strommix EU27 [25%]	19	0	78	2	101 g CO ₂ e / km	1%	19%	0%	77%	2%	
2050	PHEV eFuel [25%] / Strommix EU27 [75%]	11	0	16	2	31 g CO ₂ e / km	5%	36%	0%	52%	8%	

Stickoxid- und Feinstaubemissionen (Kapitel 6.1 und 6.2)

Die folgenden Tabellen zeigen alle relevanten Annahmen zur Berechnung der Stickoxidemissionen von BEV, FCEV, ICEV und PHEV, die in **Kapitel 6.1** verwendet wurden.

Eingangsgrößen für Berechnungen:

- NO_x-Emissionen pro Fahrzeug für die Cradle-to-Gate-Phase
- Fahrzeugverbrauch (Energienmenge pro 100 Kilometer Fahrstrecke)
- Gesamtfahrleistung des PKWs (siehe Kapitel 2.6)
- NO_x-Emissionsfaktor des Energieträgers (Strom, Wasserstoff, Kraftstoff)
- NO_x-Emissionsfaktor für die Tank-to-Wheel-Phase
- NO_x-Emissionen pro Fahrzeug für die End-of-Life-Phase
- Der Fahrzeugverbrauch, die Lebensdauer und Laufleistung entsprechen den gleichen Werten wie bei den THG-Emissionen.

Ausgangsgrößen der Berechnungen:

- Stickoxidemissionen über die gesamte Fahrzeugslebensdauer (Kilogramm NO_x pro Fahrzeug)
- Stickoxidemissionen pro gefahrenem Kilometer für jede Lebenszyklusphase und für den gesamten Lebenszyklus (Milligramm NO_x pro Kilometer)
- Prozentualer Anteil der Stickoxide an den Lebenszyklusphasen (Prozent)

Annahmeschlüssel und Vorgehensweise		Stickoxide (NO _x)													
Antriebs- modenkategorie	Energieträger	Cradle-to-Gate [CTG]	Well-to-Wheel [WtW]						End-of-Life [EoL]						Gesamtschleife über Lebensdauer [LCA]
			Well-to-Tank [WtT]			Tank-to-Wheel [TtW]			End-of-Life [EoL]						
			kg NO _x / Fzg.	mg NO _x / kWh	kg NO _x / Fzg.	mg NO _x / kWh	kg NO _x / Fzg.	mg NO _x / kWh	kg NO _x / Fzg.	mg NO _x / kWh	kg NO _x / Fzg.	mg NO _x / kWh			
BEV	Strommix Deutschland	36,0	194	6,4	0	0	0	0,2	0,2	42,6	1,5	194			
	Strommix Polen	36,0	289	9,5	0	0	0	0,2	0,2	45,7	1,6	289			
	Strommix Frankreich	36,0	72	2,4	0	0	0	0,2	0,2	38,6	1,4	72			
	Strommix EU27	36,0	155	5,1	0	0	0	0,2	0,2	41,3	1,5	155			
FCEV	EE-Strom	36,0	38	1,3	0	0	0	0,2	0,2	37,5	1,3	38			
	H2 [Erdgasreform]	46,0	389	13,2	0	0	0	0,5	0,5	79,4	2,8	389			
	H2 [Strommix EU27]	46,0	70	2,4	0	0	0	0,5	0,5	111,1	4,0	70			
	H2 [EE-Strom]	46,0	40	1,3	0	0	0	0,5	0,5	49,9	1,7	40			
ICEV	Benzin	16,0	100	12,1	28	3,4	0,2	0,2	0,2	31,7	3,8	100			
	Diesel [Euro 6a/b/c]	21,0	84	12,2	890	128,9	0,2	0,2	0,2	162,3	21,1	84			
	Diesel [Euro 6d-TEMP / Euro 7]	21,0	84	12,2	67	9,7	0,2	0,2	0,2	43,0	5,1	84			
	eFuel [EE-Strom]	16,0	119	14,1	23	2,7	0,2	0,2	0,2	33,0	4,0	119			
	eFuel [Strommix EU27]	16,0	487	57,8	23	2,7	0,2	0,2	0,2	76,8	9,3	487			
	HVO [Reststoffe] Euro 6a/b/c]	21,0	223	31,4	890	125,2	0,2	0,2	0,2	177,8	24,4	223			
	HVO [Reststoffe] Euro 6d-TEMP / Euro 7]	21,0	223	31,4	67	9,4	0,2	0,2	0,2	62,0	8,4	223			
	HVO [Palmöl] Euro 6a/b/c]	21,0	381	53,6	890	125,2	0,2	0,2	0,2	200,0	28,0	381			
	HVO [Palmöl] Euro 6d-TEMP / Euro 7]	21,0	381	53,6	67	9,4	0,2	0,2	0,2	84,2	11,7	381			
	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	26,0	125	13,4	23	2,5	0,2	0,2	0,2	42,1	5,1	125			
PHEV	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	26,0	155	9,9	8	0,5	0,2	0,2	0,2	36,6	4,4	155			
	Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	26,0	83	10,0	23	2,5	0,2	0,2	0,2	38,7	4,7	83			
	Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	26,0	59	5,8	8	0,5	0,2	0,2	0,2	30,5	3,7	59			
	HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	26,0	227	29,2	55	7,1	0,2	0,2	0,2	62,5	8,1	227			
	HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	26,0	189	14,5	18	1,4	0,2	0,2	0,2	42,1	5,1	189			
	eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	26,0	344	47,0	19	2,0	0,2	0,2	0,2	75,2	9,5	344			
PHEV	eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	26,0	262	16,6	6	0,4	0,2	0,2	0,2	43,2	5,3	262			

Antriebstechnologie und Energieträger		Stickoxide [NO _x]									
		Stickoxide pro Kilometer Fahrstrecke					Prozentualer Anteil der Stickoxide an Lebensphasen				
		Cradle-to-Gate [CrG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	LCA	Cradle-to-Gate [CrG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	
BEV	Strommix Deutschland	240,0	42,7	0,0	1,3	284,0 mg NO _x / km	84,5%	15,0%	0,0%	0,5%	
	Strommix Polen	240,0	63,7	0,0	1,3	305,0 mg NO _x / km	78,7%	20,9%	0,0%	0,4%	
	Strommix Frankreich	240,0	15,9	0,0	1,3	257,3 mg NO _x / km	93,3%	6,2%	0,0%	0,5%	
	Strommix EU27	240,0	34,1	0,0	1,3	275,4 mg NO _x / km	87,2%	12,4%	0,0%	0,5%	
	EE-Strom	240,0	8,4	0,0	1,3	249,8 mg NO _x / km	96,1%	3,4%	0,0%	0,5%	
FCEV	H2 [Erdgasreformung]	255,6	182,7	0,0	2,8	441,1 mg NO _x / km	57,9%	41,4%	0,0%	0,6%	
	H2 [Strommix EU27]	255,6	358,7	0,0	2,8	617,0 mg NO _x / km	41,4%	58,1%	0,0%	0,5%	
	H2 [EE-Strom]	255,6	18,6	0,0	2,8	276,9 mg NO _x / km	92,3%	6,7%	0,0%	1,0%	
ICEV	Benzin	88,9	67,0	19,0	1,1	176,0 mg NO _x / km	50,5%	38,1%	10,8%	0,6%	
	Diesel [Euro 6a/b/c]	100,0	58,0	614,0	1,0	772,9 mg NO _x / km	12,9%	7,5%	79,4%	0,1%	
	Diesel [Euro 6d-TEMP / Euro 7]	100,0	58,0	46,0	1,0	204,9 mg NO _x / km	48,8%	28,3%	22,4%	0,5%	
	eFuel [EE-Strom]	88,9	78,5	15,0	1,1	183,5 mg NO _x / km	48,4%	42,8%	8,2%	0,6%	
	eFuel [Strommix EU27]	88,9	321,4	15,0	1,1	426,4 mg NO _x / km	20,8%	75,4%	3,5%	0,3%	
	HVO [Reststoffe / Euro 6a/b/c]	100,0	149,4	596,2	1,0	846,6 mg NO _x / km	11,8%	17,6%	70,4%	0,1%	
	HVO [Reststoffe / Euro 6d-TEMP / Euro 7]	100,0	149,4	44,7	1,0	295,0 mg NO _x / km	33,9%	50,6%	15,1%	0,3%	
	HVO [Palmöl / Euro 6a/b/c]	100,0	255,3	596,2	1,0	952,4 mg NO _x / km	10,5%	26,8%	62,6%	0,1%	
	HVO [Palmöl / Euro 6d-TEMP / Euro 7]	100,0	255,3	44,7	1,0	400,9 mg NO _x / km	24,9%	63,7%	11,1%	0,2%	
PHEV	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	148,6	76,7	14,3	1,1	240,8 mg NO _x / km	61,7%	31,9%	6,0%	0,5%	
	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	148,6	56,8	2,9	1,1	209,3 mg NO _x / km	71,0%	27,1%	1,4%	0,5%	
	Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	148,6	57,1	14,3	1,1	221,1 mg NO _x / km	67,2%	25,8%	6,5%	0,5%	
	Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	148,6	21,6	2,9	1,1	174,2 mg NO _x / km	85,3%	12,4%	1,6%	0,7%	
	HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	123,8	138,9	33,7	1,0	297,4 mg NO _x / km	41,6%	46,7%	11,3%	0,3%	
	HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	123,8	69,1	6,7	1,0	200,6 mg NO _x / km	61,7%	34,5%	3,3%	0,5%	
	eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	148,6	268,8	11,3	1,1	429,9 mg NO _x / km	34,6%	62,5%	2,6%	0,3%	
	eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	148,6	95,0	2,3	1,1	246,9 mg NO _x / km	60,2%	38,5%	0,9%	0,5%	

Die folgenden Tabellen zeigen alle relevanten Annahmen zur Berechnung der Feinstaubemissionen von BEV, FCEV, ICEV und PHEV, die in **Kapitel 6.2** verwendet wurden.

Eingangsgrößen für Berechnungen:

- PM_x-Emissionen pro Fahrzeug für die Cradle-to-Gate-Phase
- Fahrzeugverbrauch (Energienmenge pro 100 Kilometer Fahrstrecke)
- Gesamtfahrleistung des PKWs (siehe Kapitel 2.6)
- PM_x-Emissionsfaktor des Energieträgers (Strom, Wasserstoff, Kraftstoff)
- PM_x-Emissionsfaktor für die Tank-to-Wheel-Phase
- PM_x-Emissionen pro Fahrzeug für die End-of-Life-Phase
- Der Fahrzeugverbrauch, die Lebensdauer und Laufleistung entsprechen den gleichen Werten wie bei den THG-Emissionen

Ausgangsgrößen der Berechnungen:

- Feinstaubemissionen über die gesamte Fahrzeuglebensdauer (Kilogramm PM_x pro Fahrzeug)
- Feinstaubemissionen pro gefahrenem Kilometer für jede Lebenszyklusphase und für den gesamten Lebenszyklus (Milligramm PM_x pro Kilometer)
- Prozentualer Anteil der Feinstaubemissionen an den Lebenszyklusphasen (Prozent)

Antriebstechnologie und Energieträger		Feinstaub [PM _x]													
Antriebs- technologie	Energieträger	Feinstaub pro Kilometrier Fahrstrecke													
		Well-to-Tank [WtT]				Tank-to-Wheel [TtW]				End-of-Life [EoL]					
		Cradle-to-Gate [CoG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	LCA	Cradle-to-Gate [CoG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	End-of-Life [EoL]				
BEV	Strommix Deutschland	23,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	13	mg PM ₁₀ / kWh	0,439	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	24,0	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Strommix Polen	23,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	13	mg PM ₁₀ / kWh	0,436	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	24,0	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Strommix Frankreich	23,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	8	mg PM ₁₀ / kWh	0,274	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	23,9	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Strommix EU27	23,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	12	mg PM ₁₀ / kWh	0,385	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	24,0	kg PM ₁₀ / Fzg.
	EE-Strom	23,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	17	mg PM ₁₀ / kWh	0,561	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	24,2	kg PM ₁₀ / Fzg.
FCEV	H2 [Erdgasreformung]	18,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	22	mg PM ₁₀ / kWh	1,827	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,3	kg PM ₁₀ / Fzg.	20,6	kg PM ₁₀ / Fzg.
	H2 [Strommix EU27]	18,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	30	mg PM ₁₀ / kWh	4,264	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,3	kg PM ₁₀ / Fzg.	23,1	kg PM ₁₀ / Fzg.
	H2 [EE-Strom]	18,5	kg PM ₁₀ / Fzg.	7	mg PM ₁₀ / kWh	0,609	kg PM ₁₀ / Fzg.	0	mg PM ₁₀ / kWh	0,000	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,3	kg PM ₁₀ / Fzg.	19,4	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Benzin	11	kg PM ₁₀ / Fzg.	14	mg PM ₁₀ / kWh	1,688	kg PM ₁₀ / Fzg.	3,00	mg PM ₁₀ / kWh	0,362	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	13,2	kg PM ₁₀ / Fzg.
ICEV	Diesel [Euro 6a/b/c]	12	kg PM ₁₀ / Fzg.	12	mg PM ₁₀ / kWh	1,739	kg PM ₁₀ / Fzg.	7,00	mg PM ₁₀ / kWh	1,014	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	14,9	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Diesel [Euro 6d-TEMP / Euro 7]	12	kg PM ₁₀ / Fzg.	12	mg PM ₁₀ / kWh	1,739	kg PM ₁₀ / Fzg.	7,00	mg PM ₁₀ / kWh	1,014	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	14,9	kg PM ₁₀ / Fzg.
	eFuel [EE-Strom]	11	kg PM ₁₀ / Fzg.	33	mg PM ₁₀ / kWh	6,296	kg PM ₁₀ / Fzg.	1,05	mg PM ₁₀ / kWh	0,125	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	17,5	kg PM ₁₀ / Fzg.
	eFuel [Strommix EU27]	11	kg PM ₁₀ / Fzg.	38	mg PM ₁₀ / kWh	4,514	kg PM ₁₀ / Fzg.	1,05	mg PM ₁₀ / kWh	0,125	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	15,7	kg PM ₁₀ / Fzg.
	HVO [Reststoffe] Euro 6a/b/c]	12	kg PM ₁₀ / Fzg.	26	mg PM ₁₀ / kWh	3,658	kg PM ₁₀ / Fzg.	7,00	mg PM ₁₀ / kWh	0,985	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	16,7	kg PM ₁₀ / Fzg.
	HVO [Reststoffe] Euro 6d-TEMP / Euro 7]	12	kg PM ₁₀ / Fzg.	26	mg PM ₁₀ / kWh	3,658	kg PM ₁₀ / Fzg.	7,00	mg PM ₁₀ / kWh	0,985	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	16,7	kg PM ₁₀ / Fzg.
	HVO [Palmöl] Euro 6a/b/c]	12	kg PM ₁₀ / Fzg.	44	mg PM ₁₀ / kWh	6,191	kg PM ₁₀ / Fzg.	7,00	mg PM ₁₀ / kWh	0,985	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	19,3	kg PM ₁₀ / Fzg.
	HVO [Palmöl] Euro 6d-TEMP / Euro 7]	12	kg PM ₁₀ / Fzg.	44	mg PM ₁₀ / kWh	6,191	kg PM ₁₀ / Fzg.	7,00	mg PM ₁₀ / kWh	0,985	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	19,3	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	15	mg PM ₁₀ / kWh	1,584	kg PM ₁₀ / Fzg.	2,48	mg PM ₁₀ / kWh	0,266	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	18,9	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	13	mg PM ₁₀ / kWh	0,863	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,83	mg PM ₁₀ / kWh	0,053	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	18,0	kg PM ₁₀ / Fzg.
PHEV	Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	16	mg PM ₁₀ / kWh	1,742	kg PM ₁₀ / Fzg.	2,48	mg PM ₁₀ / kWh	0,266	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	19,1	kg PM ₁₀ / Fzg.
	Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	18	mg PM ₁₀ / kWh	1,145	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,83	mg PM ₁₀ / kWh	0,053	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	18,3	kg PM ₁₀ / Fzg.
	HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	25	mg PM ₁₀ / kWh	3,176	kg PM ₁₀ / Fzg.	5,78	mg PM ₁₀ / kWh	0,744	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	21,0	kg PM ₁₀ / Fzg.
	HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	17	mg PM ₁₀ / kWh	1,289	kg PM ₁₀ / Fzg.	1,93	mg PM ₁₀ / kWh	0,148	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	18,5	kg PM ₁₀ / Fzg.
	eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	35	mg PM ₁₀ / kWh	3,659	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,87	mg PM ₁₀ / kWh	0,092	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	20,9	kg PM ₁₀ / Fzg.
	eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	17	kg PM ₁₀ / Fzg.	20	mg PM ₁₀ / kWh	1,276	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,29	mg PM ₁₀ / kWh	0,018	kg PM ₁₀ / Fzg.	0,1	kg PM ₁₀ / Fzg.	18,4	kg PM ₁₀ / Fzg.

Antriebstechnologie und Energieträger		Feinstaub [PM _x]									
Antriebs- technologie	Energieträger	Feinstaub pro Kilometer Fahrstrecke				Prozentualer Anteil der Feinstaubemissionen an Lebensphasen					
		Cradle-to-Gate [CoG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	LCA	Cradle-to-Gate [CoG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	End-of-Life [EoL]
		Cradle-to-Gate [CoG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	LCA	Cradle-to-Gate [CoG]	Well-to-Tank [WtT]	Tank-to-Wheel [TtW]	End-of-Life [EoL]	End-of-Life [EoL]
BEV	Strommix Deutschland	156,7	2,9	0,0	0,7	160,3	mg PM ₁₀ / km	97,8%	1,8%	0,0%	0,4%
	Strommix Polen	156,7	2,9	0,0	0,7	160,2	mg PM ₁₀ / km	97,8%	1,8%	0,0%	0,4%
	Strommix Frankreich	156,7	1,8	0,0	0,7	159,2	mg PM ₁₀ / km	98,4%	1,1%	0,0%	0,4%
	Strommix EU27	156,7	2,6	0,0	0,7	159,9	mg PM ₁₀ / km	98,0%	1,6%	0,0%	0,4%
	EE-Strom	156,7	3,7	0,0	0,7	161,1	mg PM ₁₀ / km	97,3%	2,3%	0,0%	0,4%
FCEV	H2 [Erdgasreformung]	102,8	10,2	0,0	1,7	114,6	mg PM ₁₀ / km	89,7%	8,9%	0,0%	1,5%
	H2 [Strommix EU27]	102,8	23,7	0,0	1,7	128,1	mg PM ₁₀ / km	80,2%	18,5%	0,0%	1,3%
	H2 [EE-Strom]	102,8	3,4	0,0	1,7	107,8	mg PM ₁₀ / km	95,3%	3,1%	0,0%	1,5%
	Benzin	61,1	9,4	2,0	0,6	73,1	mg PM ₁₀ / km	83,6%	12,8%	2,8%	0,8%
ICEV	Diesel [Euro 6a/b/c]	57,1	8,3	4,8	0,5	70,7	mg PM ₁₀ / km	80,8%	11,7%	6,8%	0,7%
	Diesel [Euro 6d-TEMP / Euro 7]	57,1	8,3	4,8	0,5	70,7	mg PM ₁₀ / km	80,8%	11,7%	6,8%	0,7%
	eFuel [EE-Strom]	61,1	35,0	0,7	0,6	97,3	mg PM ₁₀ / km	62,8%	35,9%	0,7%	0,6%
	eFuel [Strommix EU27]	61,1	25,1	0,7	0,6	87,4	mg PM ₁₀ / km	69,9%	28,7%	0,8%	0,6%
	HVO [Reststoffe] Euro 6a/b/c]	57,1	17,4	4,7	0,5	79,7	mg PM ₁₀ / km	71,7%	21,8%	5,9%	0,6%
	HVO [Reststoffe] Euro 6d-TEMP / Euro 7]	57,1	17,4	4,7	0,5	79,7	mg PM ₁₀ / km	71,7%	21,8%	5,9%	0,6%
	HVO [Palmöl] Euro 6a/b/c]	57,1	29,5	4,7	0,5	91,8	mg PM ₁₀ / km	62,3%	32,1%	5,1%	0,5%
	HVO [Palmöl] Euro 6d-TEMP / Euro 7]	57,1	29,5	4,7	0,5	91,8	mg PM ₁₀ / km	62,3%	32,1%	5,1%	0,5%
	Benzin [75%] / Strommix EU27 [25%]	97,1	9,1	1,5	0,6	108,3	mg PM ₁₀ / km	89,7%	8,4%	1,4%	0,5%
	Benzin [25%] / Strommix EU27 [75%]	97,1	4,9	0,3	0,6	102,9	mg PM ₁₀ / km	94,4%	4,8%	0,3%	0,6%
PHEV	Benzin [75%] / EE-Strom [25%]	97,1	10,0	1,5	0,6	109,2	mg PM ₁₀ / km	89,0%	9,1%	1,4%	0,5%
	Benzin [25%] / EE-Strom [75%]	97,1	6,5	0,3	0,6	104,6	mg PM ₁₀ / km	92,9%	6,3%	0,3%	0,5%
	HVO100 [75%] / Strommix EU27 [25%]	81,0	15,1	3,5	0,5	100,1	mg PM ₁₀ / km	80,9%	15,1%	3,5%	0,5%
	HVO100 [25%] / Strommix EU27 [75%]	81,0	6,1	0,7	0,5	88,3	mg PM ₁₀ / km	91,7%	7,0%	0,8%	0,5%
	eFuel EU27 [75%] / Strommix EU27 [25%]	97,1	20,9	0,5	0,6	119,1	mg PM ₁₀ / km	81,5%	17,5%	0,4%	0,5%
	eFuel EU27 [25%] / Strommix EU27 [75%]	97,1	7,3	0,1	0,6	105,1	mg PM ₁₀ / km	92,4%	6,9%	0,1%	0,5%

Autor:innen



Petar Knežić,

Petar Knezic verfügt über langjährige Führungserfahrung in der Automobilzulieferindustrie, wo er seit 2004 in leitenden Positionen tätig ist. Seine fachlichen Schwerpunkte umfassen Produktentwicklung, Projektmanagement, Geschäftsentwicklung sowie Nachhaltigkeitsmanagement. Nach seinem erfolgreichen Abschluss des berufsbegleitenden Diplomstudiums Wirtschaftswissenschaften (FH) an der Fachhochschule Südwestfalen im Jahr 2009 absolvierte er im Frühjahr 2025 den MBA Nachhaltigkeitsmanagement an der Wilhelm Büchner Hochschule mit einer hervorragenden Masterthesis.



Prof. Dr. Ralf Isenmann

vertritt seit 2017 die Professur für BWL im Innovations- und Technologiemanagement am Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen und Technologiemanagement (WITM) an der WBH. Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre, Projekten und Publikationen liegen an den Schnittstellen zwischen Technologie- und Innovationsmanagement mit Schwerpunkten in Technologie-Roadmapping, Szenario-Analyse sowie Delphi-Methode einerseits und Nachhaltigkeitsmanagement mit Schwerpunkten in Sustainability Reporting, Industrial Ecology und Bildung für nachhaltige Entwicklung andererseits



Prof. Dr. Klaus-Michael Ahrend

ist Vorstand der HEAG Holding AG und Geschäftsführer des Technologie- und Gründerzentrums HUB31. Er war zuvor u.a. Strategieberater mit Projekten im In- und Ausland, hat in St. Gallen studiert, in Trier promoviert und ist Honorarprofessor an der Darmstadt Business School.

Als Beteiligungsmanager der HEAG ist er Mitglied in verschiedenen Aufsichtsgremien, hat M&A-Transaktionen verantwortet, Wachstums- und Kostensenkungsprojekte geleitet und war zusätzlich als Interim-Manager tätig.

Seine Veröffentlichungen befassen sich vor allem mit Beteiligungsmanagement, Smart Regions, Energiewirtschaft, der Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen und von Innovationsökosystemen.

Überblick über die Bände der Schriftenreihe

Band 1 / 2022	Christoph Sternberg, Ralf Isenmann Untersuchung regionaler Besonderheiten im Individualverkehr bei ausgewählten deutschen Smart-City-Projekten
Band 2 / 2022	Fabian Fries, Manfred Hahn Dynamik von Doppelstern-Systemen
Band 3 / 2022	Stefan Kaden, Ralf Isenmann IT based Framework facilitating Technology Roadmapping striving for Sustainability
Band 4 / 2022	Hannah Seibel, Manfred Hahn Von der Raupe zur Drohne – Leichtbau in Anlehnung an die Natur
Band 5 / 2022	Thomas König, Manfred Hahn Statische Festigkeitsberechnung einer 5-Speichen Fahrradfelge aus Faserverbund-kunststoff
Band 6 / 2022	Alrik Selle, Manfred Hahn Ertüchtigung der automatisierten Wetterbeobachtung unter extremen Vereisungen
Band 7 / 2022	Valerie Seitz, Birgit Zimmermann Nachhaltiges Energiekonzept für einen Bauernhaushalt im ländlichen Äthiopien
Band 8 / 2022	Volker Kempf, Helge Nuhn Validation of personality survey instruments using vector space representations of natural language
Band 9 / 2022	Torben Rippe, Klaus Fischer Umweltökonomische Instrumente und Stakeholdermanagement
Band 10/ 2023	Guido Walz Introduction to Extrapolation Algorithms in Numerical Analysis including New Results
Band 11 / 2024	René Kumpf, Rüdiger Breitschwerdt, Helge Nuhn Evaluationskriterien für IT-Reifegradmodelle eine Analyse aus der Literatur mit beispielhafter Anwendung der Ergebnisse
Band 12/ 2024	Kurt Becker, Henrik Bruns, Prof. Dr. Gernot Graebner, Ralf Isenmann Never stop learning – Aktuelle Entwicklung in Unternehmen Jahrestagung 2022 Forschungscluster Lebenslanges und Selbstgesteuertes Lernen (LSL)
Band 13/ 2024	Transformation gestalten - Wissenschaftsforum 2023 Klaus Fischer, Karsten Glöser, Michael Haag, Ralf Isenmann, Ursula Tischner Introduction to Extrapolation Algorithms in Numerical Analysis including New Results
Band 14/ 2024	Yanez Ahlfs, Nina Golowko Konzept zur Komplexitätsbewältigung für die Produktionsplanung und-steuerung in der auftragsorientierten Werkstattfertigung im Tischlerhandwerk

- Band 15/ 2026** **Valerie Seitz, Birgit Zimmermann**
Nachhaltigkeitsanalyse einer Bauerngemeinschaft in Äthiopien zur Identifikation von Förderpotential zur nachhaltigen ländlichen Entwicklung
- Band 16/ 2026** **Lukas Ebner, Thomas Wenisch**
Identifikation und Evaluation von Antriebstopologien in elektrischen Antriebssträngen von Elektrofahrzeugen mittels Patentanalyse
- Band 17/ 2026** **Jessica Riemer, Ralf Isenmann**
TRIGA – Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors – Eine vergleichende technologische Innovationssystemanalyse
- Band 18/ 2026** **Tobias Tannenhauer, Ralf Isenmann**
Zukunft autonom fahrender Straßenbahnen und Busse in Deutschland und Schweden im Nachhaltigkeitskontext bis zum Jahr 2035 – ein Mini-Delphi
- Band 19/ 2026** **Lea Hagedorn, Ralf Isenmann**
Innovation Champions in Sprints: Einsatz und Rahmenbedingungen
- Band 20/2026** **Lea Apfel, Martina Schwarz-Geschka**
Steigerung der Innovationsfähigkeit – Vorgehensmodell zur Entwicklung eines Innovationskonzeptes
- Band 21/2026** **Felix Häring, Klaus-Michael Ahrend**
Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens zur Erfüllung der Nachhaltigkeitsanforderungen von ecoVadis
– Ein lösungsorientierter Ansatz für KMU
- Band 22/2026** **Petar Knežić, Ralf Isenmann, Klaus-Michael Ahrend**
Ökobilanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe im PKW-Sektor der Europäischen Union: Eine Lebenszyklusanalyse



wbh

**WILHELM BÜCHNER
HOCHSCHULE**

Eine Hochschule der Klett Gruppe

Wilhelm Büchner Hochschule
Hilpertstraße 31
64295 Darmstadt

