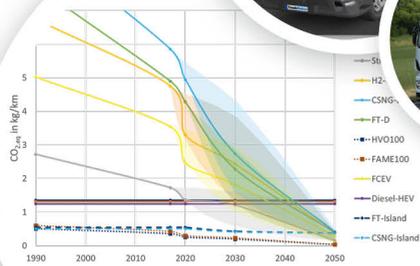


Systemische Analyse und Bewertung der Well-to-Wheel CO₂-Bilanz verschiedener Antriebs- und Energiesystemkombinationen in nutzfahrzeugspezifischen Anwendungen



Schriftenreihe des Instituts für
Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe
Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Hrsg.)

Band 27

SHAKER
VERLAG

**Systemische Analyse und Bewertung der Well-to-Wheel CO₂-Bilanz verschiedener
Antriebs- und Energiesystemkombinationen in nutzfahrzeugspezifischen
Anwendungen**

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Nicolas Hummel

aus Paris

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch
Tag der Einreichung: 22.02.2023
Tag der mündlichen Prüfung: 03.05.2023

Darmstadt 2023

D17

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfe, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, 22. Februar 2023



Nicolas Hummel, M.Sc.

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 27

Nicolas Hummel

**Systemische Analyse und Bewertung der Well-to-
Wheel CO₂-Bilanz verschiedener Antriebs- und
Energiesystemkombinationen in nutzfahrzeug-
spezifischen Anwendungen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2023



Dieses Buch ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 Internationalen Lizenz (CC-BY)

Weitere Informationen: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Shaker Verlag 2024

Print-ISBN 978-3-8440-9352-0

PDF-ISBN 978-3-8440-9353-7

ISSN 2365-3795

eISSN 2942-8270

<https://doi.org/10.2370/9783844093537>

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. techn. Christian Beidl für die Betreuung meiner Arbeit, aber auch für die Bereitstellung der Infrastruktur des Instituts und die vielen bereichernden fachlichen Diskussionen und nicht zuletzt das Vertrauen, das mir geschenkt wurde.

Ohne die uneingeschränkte Hilfsbereitschaft meiner Kollegen wären die Herausforderungen, die mir in meiner Zeit am Institut begegnet sind, nicht zu meistern gewesen. Ich hatte das Glück, dass aus Kollegen, enge Freunde wurden. Vielen herzlichen Dank dafür.

Ebenso möchte ich mich bei allen Studenten und hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern bedanken, die mich in meiner Zeit unterstützt und begleitet haben. Ohne ihre Hilfe und das geschaffene Arbeitsklima wäre vieles deutlich schwieriger gewesen.

Zu guter Letzt danke ich meiner Frau und meinen Kindern für den Rückhalt und die Sicherheit, die sie mir jeden Tag bieten. Meinen Eltern gilt ebenfalls ein besonderer Dank für die Möglichkeiten, die mir mein Leben lang geboten wurden und die Liebe, die ich immer verspüren durfte.

Abstract

Nowadays commercial vehicles are essential for the distribution of vital goods and groceries. They are an integral part of our logistic infrastructure. Nevertheless, through regulatory requirements and ecological aspects the necessity for a climate friendly distribution system grows. In this context, alternatives for fossil energy source have to be found in all parts of the energy system.

The purpose of this work is to propose a methodology to support the application oriented choice of a heavy-duty powertrain system with the best Well-to-Wheel $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -balance. The requirements of different heavy-duty application differ strongly in payload, environmental conditions and mission profile. In this context the optimum powertrain in terms of climate impact can differ between a refuse collection vehicle, a city bus, a delivery truck or a long-haul truck. The integration of multiple variation parameters within the methodology aims to identify the best powertrain-energy system combination under different boundary conditions.

A simulation environment is the most appropriate way to run these kinds of analysis. It enables the variation of parameters with a degree of comparability between all variants unreachable in real tests. Furthermore, it allows to include not yet available powertrain configurations and technologies to the comparison matrix. In the first step of this method, real measurements of the energy demand of diesel-reference trucks on real logistic routes are embedded into the virtual simulation environment. The comparison of real and simulated fuel consumption is used to validate the simulation of the reference vehicle. In further steps, alternative powertrains enrich in the simulation environment and enable the comparison of different powertrains under reproducible test conditions.

The holistic $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -emission analysis on a Well-to-Wheel basis, enables to calculate the climate impact of a given powertrain and energy system combination. The electrical and chemical energy carrier consumption of each powertrain does not necessarily correlate with the climate impact of the vehicle. It is also influenced by the $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -intensity of the used energy carrier. It is therefore mandatory to correctly assess the energy carriers $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -emissions from the extraction at the well until fuelling in the vehicle. In this context, the energy system in which the energy carrier is produced has a major influence on the final $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -balance. This aspect is also accounted for in this work as different energy production scenarios for 2030 and 2050 are defined and applied for each energy carrier.

The results of this work underline the discrepancy between the efficiency of a vehicle powertrain and its climate impact. This work considers a vehicle concept as the combination of a powertrain system and the energy system in which it is produced. Such a holistic approach is mandatory if a rating in terms of climate impact is considered.

Kurzfassung

Nutzfahrzeuge sind für die Verteilung von lebenswichtigen Gütern und Lebensmittel nicht aus unseren Versorgungssystem weggedenken. Hier besteht die Notwendigkeit durch gesetzliche Vorgaben, aber auch aus ökologischem Gesichtspunkt die Verteilung von Waren klimaneutral zu gestalten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Herausforderungen der anwendungsspezifischen Wahl eines Antriebskonzeptes im Sinne einer neutralen CO₂-Bilanz. Die Anforderungen an das Antriebssystem unterscheiden sich bei den betrachteten nutzfahrzeugspezifischen Anwendungen stark. Die Fahrprofile und Zuladungen von Abfallsammelfahrzeugen, Stadtbussen, Lastkraftwagen im Verteilerverkehr und Sattelzüge für den Fernverkehr variieren. In diesem Kontext müssen bei der Entwicklung eines methodologischen Ansatzes zur Analyse und Bewertung eines Systems bestehend aus Antriebs- und Energiesystem diese Anforderungen und Randbedingungen mitberücksichtigt werden.

Die angestrebten Untersuchungen auf einer simulativen Basis durchzuführen, ermöglicht es einen hohen Grad an Vergleichbarkeit zwischen den Antriebskonzepten zu erzielen der unter realen Bedingungen unerreichbar wäre. In diesem Zusammenhang, werden repräsentative, real gemessene Fahrprofile und Fahrzeuge in die Simulationsumgebung überführt und nach anschließender Validierung durch Energiebilanzierung, um weitere, zum Teil noch nicht verfügbare Antriebssysteme erweitert. Der Vergleich verschiedener Antriebsarten bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen sowie die Möglichkeit, einzelne Parameter wie die Zuladung oder die Umgebungstemperatur gezielt zu variieren, bildet den Kern der entwickelten Methode.

Der elektrische und der chemische Energieverbrauch eines Antriebskonzeptes lässt jedoch noch keinen Rückschluss über die Klimabilanz des betrachteten Fahrzeugs zu. Vielmehr muss hierfür die Klimabilanz des verwendeten Energieträgers von der Herstellung bis zur Nutzung mitberücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang spielt das Energiesystem, in dem das Fahrzeug eingebunden ist, eine wichtige Rolle. Dies wird in dieser Arbeit durch die Darstellung unterschiedlicher Szenarien für die Produktion der Energieträger berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die Diskrepanz zwischen Fahrzeugwirkungsgrad und Klimawirksamkeit eines Antriebskonzeptes auf, wobei ein Fahrzeugkonzept als die Kombination aus einem Energiesystem und einem Antriebssystem definiert wird. Demnach lässt lediglich eine ganzheitliche Betrachtungsweise Schlussfolgerungen über die Klimaeffizienz eines Antriebs zu.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Abstract	5
Kurzfassung	6
Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	xi
Formelverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xiv
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Konkretisierung der Problemstellung.....	2
1.3 Gliederung der Arbeit.....	3
2 Ausgewählte Studien und Abgrenzung der Arbeit	6
2.1 Auswahl aktueller Studien zur Bewertung der Nachhaltigkeit verschiedener Antriebsarten.....	6
2.2 Abgeleitete Anforderungen an die vorliegende Arbeit	10
3 Ansatz zur Digitalisierung der Fahrprofile von realen Nutzfahrzeuganwendungen	12
3.1 Datenaufnahme im realen Versuch	13
3.2 Streckendigitalisierung	14
3.2.1 Erstellung des x/y-Streckenprofils	15
3.2.2 Zuordnung einer Höhe z für jeden x/y-Punkt der digitalen Strecke.....	16
3.2.3 Übertrag des gemessenen Geschwindigkeitsprofils in die Simulation	16
3.2.4 Zusammenfassung der Streckendigitalisierung	18

3.3	Erstellung eines antriebsstrangneutralen Geschwindigkeitsprofils	19
3.4	Zusammenfassung der Digitalisierung realer Fahrprofile	26
4	Fahrzeugmodelle	27
4.1	Fahrwiderstände	27
4.1.1	Rollwiderstand	28
4.1.2	Luftwiderstand	29
4.1.3	Beschleunigungswiderstand	30
4.1.4	Steigungswiderstand	31
4.2	Erstellung der Simulationsmodelle der Diesel-Referenzfahrzeuge	31
4.3	Energiebedarf zur Konditionierung der Fahrgastzelle	36
4.4	Validierung des Diesel-Referenzfahrzeugmodells	40
4.4.1	Simulationsvalidierung mittels Daten aus realen Fahrversuchen am Beispiel des Abfallsammelfahrzeugs	40
4.4.2	Simulationsvalidierung ohne reale Motordaten am Beispiel des Stadtbusses	42
4.5	Erstellung von Fahrzeugmodellen mit alternativen Antrieben	45
4.5.1	Diesel-Hybrid Fahrzeug	45
4.5.2	Gasfahrzeug	47
4.5.3	Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)	51
4.5.4	Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	59
4.5.5	Fahrzeug mit Wasserstoffverbrennungsmotor (H2-VKM)	64
5	Definition der Energiesysteme: Szenarien zur Stromproduktion	69
5.1	Aktuelle Stromproduktion in Deutschland und der Europäischen Union	70
5.2	Stromproduktion in Deutschland und der Europäischen Union in 2030	72
5.3	Stromproduktion in Deutschland und der Europäischen Union in 2050	74
5.4	Zusammenfassung der Szenarien zur Stromproduktion	75
6	Well-to-Tank-Emissionsfaktoren nach Energieträger (WtT)	77
6.1	Strom	78
6.2	Fossile Energieträger	79

6.2.1	Diesel	79
6.2.1	Komprimiertes Erdgas (CNG) und verflüssigtes Erdgas (LNG).....	80
6.3	Strombasierte Energieträger auf Wasserstoffbasis (PtH ₂ und PtX).....	82
6.3.1	Produktion von Wasserstoff (PtH ₂).....	83
6.3.2	Strombasierte Kraftstoffe mit Kohlenwasserstoffkette (PtX)	85
6.3.3	Zusammenfassung strombasierter Energieträger auf Wasserstoffbasis	92
6.4	Fortschrittliche biogene Energieträger	94
6.4.1	Hydriertes Pflanzenöl (HVO)	95
6.4.2	Fettsäuremethylester (FAME).....	97
6.4.3	Zusammenfassung von fortschrittlichen biogenen Energieträgern.....	98
6.5	Wässrige Harnstofflösung	99
6.6	Zusammenfassung Well-to-Tank Bilanzierung	100
7	Tank-to-Wheel: Berechnung der Emissionsfaktoren im Betrieb (TtW)	102
8	Well-to-Wheel: CO_{2,eq}-Emissionen von der Quelle bis zum Rad (WtW)	105
8.1	Anrechnung von CO ₂ -Gutschriften.....	105
8.2	Well-to-Wheel CO _{2,eq} -Emissionsfaktoren der betrachteten Energieträger	105
9	Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Bilanz in den nutzfahrzeugspezifischen Anwendungen	109
9.1	Abfallsammelbetrieb.....	111
9.1.1	Einfluss der Umgebungstemperatur auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen	113
9.1.2	Vergleich der spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen bei 10°C Umgebungstemperatur	116
9.1.3	Zusammenfassung Abfallsammelbetrieb.....	119
9.2	Stadtbusbetrieb.....	120
9.2.1	Vergleich der spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen auf der Darmstädter Stadtbuslinie-L bei 10°C Umgebungstemperatur	122
9.2.2	Vergleich der spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen auf der Darmstädter Stadtbuslinie-L bei -20°C Umgebungstemperatur	124
9.2.3	Einfluss der Stadtbusroute auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen.....	125



9.2.4	Zusammenfassung Stadtbusbetrieb	126
9.3	Verteilerverkehr	128
9.3.1	Vergleich der spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen auf der Odenwald-Route bei 10°C Umgebungstemperatur und 7 t Zuladung	130
9.3.2	Einfluss der Route auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen	131
9.3.3	Einfluss der Änderung der Umgebungsbedingungen auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen	132
9.3.4	Einfluss der Änderung der Zuladung auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen	134
9.3.5	Zusammenfassung Verteilerverkehr	135
9.4	Fernverkehr	137
9.4.1	Einfluss der Route auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen	139
9.4.2	Einfluss der Variation der Zuladung auf die spezifischen CO _{2,eq} -Emissionen auf unterschiedlichen Routen.....	141
9.4.3	Einfluss der Variation der Umgebungsbedingungen auf die CO _{2,eq} -Emissionen einer Sattelzugmaschine.....	142
9.4.4	Zusammenfassung Fernverkehrsanwendung	143
10	Einfluss der Fahrzeugherstellung auf die Lebenszyklusanalyse	145
11	Zusammenfassung	150
11.1	Vergleich der Antriebs- und Energiesystemkombinationen mit fossilem Diesel	151
11.2	Vergleich der Antriebs- und Energiesystemkombinationen mit HVO33	152
11.3	Vergleich der Antriebs- und Energiesystemkombinationen mit Fischer-Tropsch-Diesel aus Island (FT-Island)	152
11.4	Wichtigste Erkenntnisse aus den Untersuchungen dieser Arbeit	152
12	Ausblick	154
Literatur		156
Anhang		170
A	Abfallsammelbetrieb.....	171
B	Stadtbusbetrieb.....	174



C	Verteilerverkehr	177
D	Fernverkehr	180
Curriculum Vitae Nicolas Hummel		183
Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit		184
Verzeichnis studentischer Arbeiten im thematischen Rahmen dieser Arbeit.....		185

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Life-Cycle-Analysis</i> (LCA) - Lebenszyklus eines Fahrzeugs (14)	2
Abbildung 2: Methodologischer Ansatz der vorliegenden Arbeit (8)	4
Abbildung 3: Softwarestruktur der vorgestellten Methodik zur Analyse und Bewertung der CO _{2,eq} -Bilanz unterschiedlicher Nutzfahrzeugantriebsstrang-Energiesystemkombinationen	12
Abbildung 4: Verwendete Fahrzeuge für die Datenaufnahme in den realen Anwendungen.	14
Abbildung 5: Aufgezeichnetes GPS-Signal verglichen mit der real gefahrenen Strecke	15
Abbildung 6: Vergleich der Geschwindigkeitssignale vom Abfallsammelfahrzeug aus der ECU und vom GPS- Empfänger	17
Abbildung 7: Zuordnung von ORS-Punkte und GPS-Punkte (37, S. 21)	18
Abbildung 8: Reale und simulierte Geschwindigkeit des Referenzfahrzeugs auf der Müllsammelroute (links). Korrelation zwischen gemessener und simulierter Fahrzeuggeschwindigkeit (rechts)	19
Abbildung 9: Reibkreise eines Kompaktwagens bei unterschiedlicher Fahrweise bei trockener Fahrbahn (39, S. 56)	20
Abbildung 10: Bearbeitete Strecke als "hügelige Gerade"	21
Abbildung 11: Einteilung des Geschwindigkeitsprofil in Beschleunigung und Verzögerungsmanöver anhand von lokalen Extrema	22
Abbildung 12: Simulation des Referenzfahrzeugs anhand der erstellten Manövereinteilung	23
Abbildung 13: Darstellung der Verzögerung mittels IPG-Truckmaker-Funktion <i>Stop Vehicle</i>	24
Abbildung 14: Beispiel für die Implementierung eines Verzögerungsmanövers (nach (37, S. 34))	25
Abbildung 15: Aufteilung des Energiebedarfs eines 40 t Sattelzugs in verschiedenen Anwendungen (41)	28
Abbildung 16: (links) Rollwiderstandsbeiwert von Nutzfahrzeugreifen zwischen 20 und 24 Zoll Durchmesser in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit. (rechts) Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen in Abhängigkeit der Radlast bei angepasstem Reifeninnendruck (42) ...	29
Abbildung 17: Luftwiderstandsbeiwerte unterschiedlicher Fahrzeugtypen (42, S. 50)	30
Abbildung 18: Drehmassenzuschlagsfaktor bei unterschiedlichen Nutzfahrzeugkonfigurationen (42)	31
Abbildung 19: Lambda-Temperatur-Kennfeld eines aktuellen Dieselmotors (56, S. 1134)....	34
Abbildung 20: Kenndaten eines modernen Dieselmotors mit 11100 L Hubraum (46)	34
Abbildung 21: Aufbau und Stickoxidkonvertierungseffizienz einer EURO VI Diesel Abgasanlage (60)	35
Abbildung 22: Mittlere Gesamtstrahlung in Deutschland in 2020 (68)	37
Abbildung 23: Erforderliche Kühl- und Heizleistung zur Konditionierung des Fahrgasraumes auf 22°C	39
Abbildung 24: Wärmebilanz eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors (56, S. 656)	40

Abbildung 25: Aufteilung der Fahrwiderstände eines Nutzfahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit (34).....	41
Abbildung 26: Real gemessener und simulierter Kraftstoffverbrauch eines Müllsammelfahrzeugs	41
Abbildung 27: Antriebsstrangaufbau eines parallelen und eines seriellen Hybrids (56, S. 1150).....	46
Abbildung 28: Einsparpotential durch Elektrifizierung eines Sattelzugs mit parallelem Hybrid (56, S. 1153).....	47
Abbildung 29: Well-to-Wheel Treibhausgasbilanz von Erdgasfahrzeuge (78, S. 11)	48
Abbildung 30: Gemischbildungskonzepte für Gasmotoren verglichen mit der Diesel-Direkteinspritzung (63, S. 401)	49
Abbildung 31: Leistung, Drehmoment und spezifischer Verbrauch eines modernen Nutzfahrzeug-Gasmotors (47)	50
Abbildung 32: Energiesystem eines batterieelektrischen Fahrzeugs (64, S. 29).....	52
Abbildung 33: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batteriezelle (88, S. 147).....	52
Abbildung 34: Lade- und Entladekurve einer Lithium-Ionen Batteriezelle (88, S. 137)	54
Abbildung 35: Veränderung der Entladekurve einer Lithium-Ionen-Batteriezelle in Abhängigkeit der Entladestromstärke (<i>links</i>) und der Umgebungstemperatur (<i>rechts</i>) (90) .	54
Abbildung 36: Einfluss der Außentemperatur auf die Kapazität und den Innenwiderstand einer Lithium-Ionen-Zelle (nach (94))	55
Abbildung 37: Wirkungsgradkennfeld einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) (88, S. 48).....	56
Abbildung 38: Wirkungsgrad der Leistungselektronik in Abhängigkeit der Eingangsleistung (97, S. 48).....	57
Abbildung 39: Kennfeld einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (64, S. 26)	57
Abbildung 40: Schematischer Aufbau des Brennstoffzellenantriebsstrangs (64, S. 31)	60
Abbildung 41: Speicherdichte und Arbeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffspeicherdruck (103)	61
Abbildung 42: Schnittbild eines Flüssigwasserstofftanks für die Nutzfahrzeuganwendung (104)	62
Abbildung 43: Brennstoffzellen-Wirkungsgrad in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung (51)	63
Abbildung 44: Vergleich der Wasserstoffverbrennungsmotor-Technologien (112).....	65
Abbildung 45: Wirkungsgradkennfeld eines Wasserstoffverbrennungsmotors (<i>links</i>) im Vergleich zum Diesel-Referenzmotor (<i>rechts</i>) (55)	66
Abbildung 46: Verlustteilung unterschiedlicher Kraftstoffe und Brennverfahren (117)	67
Abbildung 47: Treibhausgasemissionen für Deutschland seit 1990 bis 2045 (123).....	70
Abbildung 48: Bruttostromerzeugung nach Energieträger in Deutschland und der Europäischen Union (125–127)	72

Abbildung 49: Klimaschutzgesetz und dessen Folgen auf die Treibhausgasemissionen (129, S. 18)	73
Abbildung 50: Ambitioniertere Treibhausgas-Emissionsminderung bis 2050 (129, S. 19) ...	75
Abbildung 51: Emissionsfaktoren des Energiesektors in den betrachteten Strombereitstellungs-Szenarien	76
Abbildung 52: Well-to-Tank Emissionsfaktoren für Strom je nach Stromerzeugungsszenario	78
Abbildung 53: Well-to-Tank Emissionsfaktor von Dieselmotoren und CNG.	81
Abbildung 54: vereinfachte Darstellung der Produktionskette von strombasierten Kraftstoffen (146)	82
Abbildung 55: Well-to-Tank Pfad der Herstellung von grünem Wasserstoff (26, S. 44)	83
Abbildung 56: Well-to-Tank- Emissionsfaktoren für die Wasserstoffproduktion mit Strom aus dem deutschen Strommix	84
Abbildung 57: Schematische Darstellung eines Niedertemperatur-DAC-Prozesses (150, S. 22)	86
Abbildung 58: Theoretische Emissionsfaktoren für DAC, falls der gesamte Energiebedarf aus dem Stromnetz bezogen würde	87
Abbildung 59: Schematische Darstellung des Lebenszyklus des in Island hergestelltem SNG bis zum Verbrauch in der Schweiz (151, S. 7)	91
Abbildung 60: Fischer-Tropsch-Diesel- und CSNG-Emissionsfaktoren nach den Randbedingungen aus der Studie des Paul-Scherrer-Instituts	92
Abbildung 61: Well-to-Tank Emissionsfaktoren der PtX-Kraftstoffe in Abhängigkeit der Entwicklung des deutschen Strommix über der Zeit im Vergleich zu synthetisch hergestellten PtX aus Island	93
Abbildung 62: Biogener Kraftstoffverbrauch in Deutschland im Jahr 2021 bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch (153)	94
Abbildung 63: Verbreitung von HVO in Europa (158)	96
Abbildung 64: Auswirkung von HVO-Blends auf die motorischen Emissionen (156, S. 35–36)	96
Abbildung 65: Biokraftstoffnutzung in Deutschland in PJ (160)	98
Abbildung 66: Well-to-Tank Emissionsfaktoren von HVO und FAME im Vergleich zu fossilem Diesel und dem deutschen Strommix	99
Abbildung 67: Zusammenfassung der äquivalenten Well-to-Tank CO ₂ -Emissionen der betrachteten Energieträger	101
Abbildung 68: Tank-to-Wheel CO _{2,eq} -Emissionen	104
Abbildung 69: Well-to-Wheel Emissionsfaktoren	106
Abbildung 70: Well-to-Wheel CO ₂ -Emissionsfaktoren	107
Abbildung 71: Darstellung der Auswertung der CO ₂ -Emissionen	110
Abbildung 72: Streckenverlauf der abgebildeten Müllsammelroute (171, S. 82)	111
Abbildung 73: Verlauf der Zuladung und der Gesamtmasse bei der Abfallsammelrunde	113

Abbildung 74: Verbräuche der Müllsammelfahrzeuge mit den betrachteten Antriebsstrangkzepten	115
Abbildung 75: Fahrstrecke des batterieelektrischen Abfallsammelfahrzeug in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und des SOC-Hubs.....	116
Abbildung 76: CO ₂ -Emissionen eines Müllsammelfahrzeugs in unterschiedlichen Energie- und Antriebssystemen.....	117
Abbildung 77: Berechnete Flottenemission nach FAME-Diesel Blend-Anteil	118
Abbildung 78: Streckenverlauf der Stadtbuslinie L in Darmstadt.....	120
Abbildung 79: Leistungsbedarf zur Konditionierung des Fahrgastraumes eines Stadtbusses	121
Abbildung 80: Über alle Temperaturen gemittelte CO _{2,eq} -Emissionen von verschiedene Energie- und Antriebssystemen	122
Abbildung 81: CO _{2,eq} -Emissionen der betrachteten Energie- und Antriebssystemkombinationen bei -20 °C Umgebungstemperatur.....	124
Abbildung 82: Spezifische CO _{2,eq} -Emissionen der simulierten Stadtbusantrieb-Energiesystemkombinationen bei 10°C Außentemperatur.....	125
Abbildung 83: Spezifische CO _{2,eq} -Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombination en auf der Odenwald-Route bei 10°C Umgebungstemperatur und 7t Zuladung.....	130
Abbildung 84: Spezifische CO _{2,eq} -Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombination en auf der Odenwald-Route und im VECTO Urban-Delivery-Zyklus bei 10°C Umgebungstemperatur und 7t Zuladung.....	132
Abbildung 85: links: Spezifische CO _{2,eq} -Emisisonverläufe der Antriebs- und Energiesystemkombination en im Verteilerverkehr auf der odenwald-Route bei -20°C und 7t Zuladung. Rechts: Temperaturabhängiger Verbrauch der Antriebskonzepte auf der Odenwald-Route	134
Abbildung 86: Einfluss der Zuladung auf die CO _{2,eq} -Emissionen der betrachteten Fahrzeuge bei 10°C Außentemperatur auf der Odenwald-Route	135
Abbildung 87: Geschwindigkeitsprofil der betrachteten Fernverkehrsrouten	138
Abbildung 88: Spezifische CO _{2,eq} -Emissionen eines 20t Sattelzugs im VECTO Long-Haul und auf der Darmstadt-Pforzheim-Route	140
Abbildung 89: Auswirkung der Variation der Zuladung auf die CO _{2,eq} -Emissionen	142
Abbildung 90: Fahrstrecke der batterieelektrischen Sattelzugmaschine in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und des SOC-Hubs bei 20t Zuladung	143
Abbildung 91: Lebenszyklus CO _{2,eq} -Emissionen einer Sattelzugmaschine mit unterschiedlichen Antriebs- und Energiesystemkombinationen	146
Abbildung 92: Lebenszyklusemissionen einer Sattelzugmaschine mit verschiedenen Antriebs- und Energiesystemkombinationen bezogen auf die fossile Dieselreferenz	147



Abbildung 93: Anteile der Produktion und der Nutzung an den kumulierten Lebenszyklusemissionen 149

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leistungsgewichte der betrachteten Abfallsammelfahrzeuge.....	26
Tabelle 2: Spezifikationen der Diesel-Referenzfahrzeuge	32
Tabelle 3: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette eines Fahrzeugs mit dieselmotorischem Antrieb	35
Tabelle 4: Umgebungsparameter zur Berechnung der Wärmeströme im Fahrzeug	38
Tabelle 5: Validierung der Fahrzeugsimulation mittels Literaturwerte	43
Tabelle 6: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette eines Fahrzeugs mit gasmotorischem Antrieb.....	50
Tabelle 7: Spezifikation der Tanksysteme der simulierten Gasfahrzeuge	51
Tabelle 8: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette vom batterieelektrischen Fahrzeug	59
Tabelle 9: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette im Brennstoffzellenfahrzeug	64
Tabelle 10: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette im Fahrzeug mit Wasserstoffverbrennungsmotor	68
Tabelle 11: Treibhausgase in Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (121, S. 32, 5, S. 102)	69
Tabelle 12: CO _{2,eq} -Emissionsfaktoren fossiler Primärenergiequellen und Wirkungsgrad bezogen auf den Stromverbrauch (124, S. 17)	71
Tabelle 13: Spezifikation für Dieseldieselkraftstoff.....	80
Tabelle 14: Eigenschaften von komprimiertem und verflüssigtem Methan (63, S. 58).....	81
Tabelle 15: Erwartete Elektrolysewirkungsgrade bis 2050 (26, S. 37, 148, S. 64)	84
Tabelle 16: Angenommene technische Verbesserungen beim DAC-Prozess	86
Tabelle 17: Nutzung der Abwärme der nachgeschalteten Syntheseprozesse in DAC	88
Tabelle 18: Spezifikationen von synthetischem Methan (eCH ₄ /SNG) (121, S. 146).....	89
Tabelle 19: Spezifikationen Fischer-Tropsch-Diesel (121, S. 134) (5, S. 62).....	90
Tabelle 20: Well-to-Tank CO _{2,eq} -Emissionen für die Herstellung von HVO	97
Tabelle 21: Well-to-Tank CO _{2,eq} -Emissionen für die Herstellung von FAME	98
Tabelle 22: Harnstoffbedingte WtT CO _{2,eq} -Emissionen	99
Tabelle 23: Tank-to-Wheel CO _{2,eq} für die betrachteten Energieträger	103
Tabelle 24: Energiebedarf zur Klimatisierung der Fahrgastzelle des Abfallsammelfahrzeugs nach Szenario	114
Tabelle 25: Betrachtete Routen für den Verteilerverkehr	128
Tabelle 26: Energiebedarf zur Klimatisierung der Fahrgastzelle des Verteilerverkehrsfahrzeug nach Szenario	129
Tabelle 27: Betrachtete Routen für die Fernverkehr-Untersuchungen	137
Tabelle 28: Zusammenfassung der Unterschreitungszeitpunkte unterschiedlicher Antriebs- und Energiesystemkombinationen im Vergleich zu dieselmotorischen Referenzen	151
Tabelle 29: Eigenschaften der simulierten Müllsammelfahrzeuge.....	171
Tabelle 30: Parameter der Antriebssysteme der Stadtbusse	174
Tabelle 31: Eigenschaften der Verteilerverkehr-Fahrzeuge	177



Tabelle 32: Spezifikationen der Simulierten Sattelzugmaschinen zur Fernverkehrsanwendung 180

Formelverzeichnis

4-1	27
4-2	28
4-3	29
4-4	30
4-5	31
4-6	36
4-7	36
4-8	36
4-9	36
4-10	37
4-11	55
5-1	69
6-1	97
7-1	102
7-2	102
7-3	102
7-4	102
7-5	102
9-1	109
9-2	110

Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>Alternative Current</i> – Wechselstrom
ASC	<i>Ammonia Slip Catalyst</i> – Ammoniak-Schlupfkatalysator
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> – batterieelektrisches Fahrzeug
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CGH ₂	<i>Compressed Gaseous Hydrogen</i> – komprimierter gasförmiger Wasserstoff
CH ₄	Methan
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i> – Komprimiertes Erdgas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CO _{2,eq}	Kohlendioxidäquivalent
DAC	<i>Direct Air Capture</i> – CO ₂ -Abscheidung aus der Luft
DC	<i>Direct Current</i> – Gleichstrom
DGM	Digitales Geländemodell
DI	<i>Direct Injection</i> – Direkteinspritzung
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i> - Diesel-Oxidationskatalysator
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i> – Diesel-Partikelfilter
DVGW	Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V.
EC	<i>European Commission</i> – Europäische Kommission
CSNG	<i>Compressed Synthetic Natural Gas</i> - Komprimiertes synthetisch hergestelltes Gas
SNG	<i>Synthetic Natural Gas</i> - Synthetisch hergestelltes Gas
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Ester</i> - Fettsäuremethylester
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> – Brennstoffzellenfahrzeug
FES	Frankfurt Entsorgungs- und Service GmbH
FT	Fischer-Tropsch-Diesel

FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i> – Treibhausgaspotential
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> – Hybridantriebe
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoff
HNCO	Isocyanensäure
HVO	<i>Hydrated Vegetable Oils</i> – Hydrierte Pflanzenöle
IPCC	<i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
LCA	<i>Life-Cycle-Assessment</i> - Lebenszyklusanalyse
LH ₂	<i>Liquefied Hydrogen</i> – verflüssigter Wasserstoff
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i> – Verflüssigtes Erdgas
LSNG	<i>Liquefied Synthetic Natural Gas</i> – Verflüssigtes synthetisch hergestelltes Methan
MENA	<i>Middle East and North Africa</i>
N ₂	Distickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
(NH ₂) ₂ CO	Harnstoff
NH ₃	Ammoniak
NMC	<i>Nickel-Cobalt-Manganese</i> – Nickel-Kobalt-Mangan
NO _x	Stickoxide
OBD	<i>On-Board Diagnosis</i> - On-Board Diagnose

OCV	<i>Open-Circuit-Voltage</i> - Leerlaufspannung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ORS	Openroute Service
PEM	<i>Polymer Electrolyte Membrane</i> oder <i>Proton Exchange Membrane</i>
PFI	<i>Port Fuel Injection</i> – Saugrohreinspritzung
Pkw	Personenkraftwagen
PSI	Paul-Scherrer-Intitut
PtH ₂	<i>Power-to-Hydrogen</i> – synthetischer Wasserstoff
PtG	<i>Power-to-Gas</i> – synthetische gasförmige Kraftstoffe
PtL	<i>Power-to-Liquid</i> – synthetische flüssige Kraftstoffe
PtX	Strombasierte molekulare Energieträger (Power-to-X, e-Fuels)
RED II	<i>Renewable Energy Directive II</i>
ROZ	Oktanzahl
SCR	<i>Selective Catalyst Reduction</i> – Selektive katalytische Reduktion
SOC	<i>State of Charge</i> – Ladezustand
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> - Gesamtbetriebskosten
TtW	<i>Tank-to-Wheel</i> – vom Tank zum Rad
VECTO	<i>Vehicle Energy Consumption calculation Tool</i>
Vecto UD	VECTO Urban Delivery
Vecto LH	VECTO Long Haul
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VTG	Variable Turbinen Geometrie
WLTP	<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure</i>
WtT	<i>Well-to-Tank</i> – von der Quelle zum Tank
WtW	<i>Well-to-Wheel</i> – von der Quelle zum Rad

Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
B	m	Breite
b_e	kWh	Energieverbrauch
c_p	$J/(kg \cdot K)$	Spezifische Wärmekapazität
c_w	\backslash	Luftwiderstandsbeiwert
e	\backslash	Drehmassenzuschlagsfaktor
EF	g/kWh	Emissionsfaktor
F	N	Kraft
F_{An}	N	Antriebskraft
$F_{Beschleunigung}$	N	Beschleunigungswiderstandskraft
F_{Luft}	N	Luftwiderstandskraft
F_{Roll}	N	Rollwiderstandskraft
$F_{Steigung}$	N	Steigungswiderstandskraft
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
H	m	Höhe
I	W/m^2	Strahlungsintensität
i_K	\backslash	Getriebeübersetzung
k_R	\backslash	Rollwiderstandsbeiwert
m	kg	Masse
\dot{m}_{Luft}	kg/h	Luftmassenstrom
P_{An}	W	Antriebsleistung
Q_0	Ah	Kapazität
\dot{Q}	W	Wärmeleistung

$\dot{Q}_{Leitung}$	W	Wärmeleistung durch Wärmeübertragung
$\dot{Q}_{Stahlung}$	W	Wärmeleistung durch solare Einstrahlung
$\dot{Q}_{Übertrag}$	W	Wärmeleistung durch Luftaustausch
$T_{Außen}$	°C	Außen- Umgebungstemperatur
T_{Innen}	°C	Innentemperatur
U	J/(K · h)	Wärmedurchgangskoeffizient
U_0	V	Nennspannung
V	m ³	Volumen
v	m/s ²	Geschwindigkeit
W	kWh	Energie
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
ρ_{Luft}	kg/m ³	Luftdichte
λ	\	Luftverhältnis
ε	\	Verdichtungsverhältnis
ε_e	\	Emissionsgrad
η	°	Sonnenwinkel
η_C	%	Ladewirkungsgrad
τ	\	Transmission

1 Einleitung

Der Treibhausgaseneffekt wird schon vor rund 200 Jahren von Joseph Fourier beschrieben und in den 1850er-Jahren stellt Eunice Foote fest, dass Kohlenstoffdioxid (CO_2) die Temperatur eines Raumes steigen lässt. Daraufhin führen 1862 die Experimente von John Tyndall mit unterschiedlichen Gasen zur Erkennung weiterer Treibhausgase und der Zusammenhang zwischen den Schwankungen der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre und den Eiszeiten wird erkannt. Svante Arrhenius erkennt 1896 den Einfluss des Menschen auf die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Er sieht damals die daraus folgende stetige Erhöhung der Temperatur allerdings noch als eine Chance für die Menschheit durch die steigenden Erträge in der Landwirtschaft. Guy Stewart Callendar beweist in den 1930er-Jahren, dass sich die Erdatmosphäre jährlich um $0,005\text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt und schließt auf den anthropogenen Ursprung. Schließlich vergehen über 60 Jahre zwischen den ersten Warnungen des Meteorologen Hermann Flohn 1941 über die nicht einschätzbaren Folgen der Klimaveränderung und der offiziellen Anerkennung des Klimawandels durch den Weltklimarat *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) im Jahr 2007 (1, 2). Seither steigen die Bestrebungen in allen Sektoren Alternativen für fossile Energiequellen zu finden und einzusetzen, mit dem Ziel den anthropogenen CO_2 -Ausstoß zu verringern. Da weitere Gase wie Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid (N_2O) ebenfalls einen Treibhausgaseneffekt aufweisen, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Treibhausgasemissionen als äquivalenter Kohlenstoffdioxidausstoß - $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ dargestellt.

1.1 Motivation

Das Pariser Klimaabkommen (COP 21) von 2015 (3), mit dem Ziel die Erderwärmung anthropogenen Ursprungs auf $2\text{ }^\circ\text{C}$ zu begrenzen, stellt das verbindliche Ziel auf, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % im Vergleich zu 1990 zu senken (4). Zur Einhaltung dieses Ziels werden Emissionsreduktionsmaßnahmen für Kohlendioxid in allen Sektoren verabschiedet. Zudem werden nach der „*Renewable Energy Directive II*“ der europäischen Kommission (5) die Mitgliedsstaaten verpflichtet, bis 2030 mindestens 14 % ihres Endenergiebedarfs im Verkehrssektor erneuerbar zu gestalten. In diesem Sektor soll ein Teil der Treibhausgasemissionsminderung über die Elektrifizierung der Antriebsstränge erreicht werden. Im Personenkraftwagensektor (Pkw) waren im Jahr 2022 49,6 % der neuzugelassenen Fahrzeuge mit sogenannten alternativen Antrieben (alle Antriebsarten ausgenommen von reinem Diesel- und Benzinbetrieb) (6). Der Nutzfahrzeugverkehr verursacht jährlich ca. 35 % der Treibhausgasemissionen im deutschen Verkehr (35,5 % in 2019 (7, S. 36) und 36 % in 2020 (8)). Jedoch stellen Elektro- und Hybrid-Lastkraftwagen am 1. April 2021 gerade einmal 1 % des Bestands dar (9), sodass zusätzliche Alternativen zu den vorhandenen fossilbasierten Energieträgern gefunden werden müssen. Zudem wird eine weitere Steigerung des Transportaufkommens um 17 % von 3,1 Milliarden Tonnen im Jahr 2010 auf 3,6 Milliarden

Tonnen im Jahr 2030 und eine Steigerung der Transportleistung um 39 % von 437 Milliarden Kilometer im Jahr 2010 auf 607 Milliarden Kilometer im Jahr 2030 im Straßengüterverkehr erwartet (10, S. 10, 11, S. 36, 12, S. 79). In diesem Zusammenhang wird trotz der Verlagerung auf den Schienenverkehr, in 2030 der Straßengüterverkehr für über 83 % des Verkehrsaufkommens verantwortlich sein (10, S. 8). In diesem Kontext ist die Erarbeitung neuer Methoden zur Abschätzung der $CO_{2,eq}$ -Bilanz unterschiedlicher Antriebs- und Energiesystemkombinationen essentiell, damit für jede Anwendung der Zielkonflikt zwischen der ökonomisch und ökologisch besten Lösung adressiert werden kann. Demnach müssen sowohl die Energiebereitstellung als auch die Nutzung im Fahrzeug in die $CO_{2,eq}$ -Bewertung einfließen.

1.2 Konkretisierung der Problemstellung

Auf Basis der gesetzlichen Vorgaben zur Einhaltung der Klimaziele und $CO_{2,eq}$ -Emissionsgrenzwerte ist eine genaue Analyse und Bewertung der existierenden technischen Lösungen notwendig. Die Analyse einer Mobilitätslösung setzt die Einbeziehung des vorliegenden Energiesystems und des Fahrzeugs voraus (13). Die Aussagekraft der Ergebnisse ist von den gesetzten Systemgrenzen und den vorgegebenen Randbedingungen abhängig. Abbildung 1 zeigt wie eine vollständige Einbeziehung der Treibhausgasemissionen über den Produktlebenszyklus angestrebt werden kann. Darin wird die gesamte Wertschöpfungskette eines Fahrzeugs und des Energieträgers berücksichtigt: vom Abbau der Rohstoffe zur Herstellung bis zu deren Entsorgung am Lebensende.

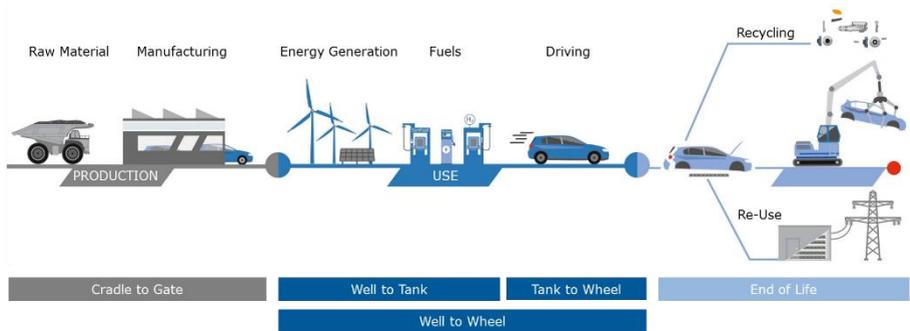


Abbildung 1: *Life-Cycle-Analysis (LCA)* - Lebenszyklus eines Fahrzeugs (14)

Die Systemgrenzen der vorliegenden Arbeit werden um die Energiebereitstellung und die Nutzung des Fahrzeugs gezogen und stellen somit die *Well-to-Wheel* Betrachtung (WtW) dar. Die WtW-Betrachtung, englisch von der Quelle bis zum Rad, berücksichtigt die Herstellung des Energieträgers sowie dessen Verbrauch im Fahrzeug bei der Bewertung der $CO_{2,eq}$ -Emissionen über die Nutzungsdauer des Fahrzeugs. Daraus folgt, dass auch das vorhandene

Energiesystem bei der Berechnung der Treibhausgasbilanz eines Energieträgers in das Ergebnis einfließt. Eine weitere Randbedingung dieser Arbeit ist die Ausklammerung der Bereiche der Fahrzeugherstellung und der Entsorgung (in Abbildung 1 *Cradle-to-Gate* und *End-of-Life*), die in der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz über den gesamten Lebenszyklus eine untergeordnete Rolle spielen (15). Im letzten Abschnitt dieser Arbeit (Kapitel 10) werden anhand des Beispiels einer Sattelzugmaschine, die aus der Produktion verursachten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen unterschiedlicher Antriebssträngen berechnet und in der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanzierung mitberücksichtigt. In diesem Zusammenhang können die Lebenszyklusemissionen (*Life-Cycle-Assessment* - LCA) unterschiedlicher Antriebssysteme für Sattelzugmaschinen berechnet und verglichen werden. In diesem Zusammenhang wird die Relevanz jeder einzelnen Produktlebensphasen für die LCA deutlich.

Zur Identifikation und Bezifferung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Quellen in der WtW-Betrachtung ist eine Unterteilung in Energiesystem und Fahrzeug hilfreich. *Well-to-Tank* (WtT), englisch vom Bohrloch/der Quelle zum Tank, beschreibt die Energiebereitstellung im vorhandenen Energiesystem, während *Tank-to-Wheel* (TtW), englisch vom Tank zum Rad, den Verbrauch des Energieträgers im Fahrzeug während der Nutzungsphase darstellt. Dieser systemische Ansatz ermöglicht, den Einfluss unterschiedlicher Energiesysteme auf die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz von unterschiedlichen Antriebssystemen zu bewerten. In diesem Kontext werden ausgewählte Szenarien zur Berechnung der Emissionsfaktoren zur Energieträgerherstellung für die Jahre 2030 und 2050 herangezogen. Aus den WtT- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der Energieträgerbereitstellungsszenarien und dem aus der Simulationsumgebung stammenden TtW-Verbrauch ist es demnach möglich, den WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Ausstoß für ein gefahrenes Profil mit einer Antriebs- und Energiesystemkombination zu berechnen. Nach diesem methodologischen Ansatz kann der Einfluss des Energieträgers und des Antriebssystems auf die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen getrennt beziffert werden und miteinander in unterschiedlichen Kombinationen mit weiteren Alternativen verglichen werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines methodologischen Ansatzes zur systemischen Analyse und Bewertung unterschiedlicher Energie- und Antriebssystemkombinationen. Demnach gliedert sich die vorliegende Arbeit in sechs Hauptteile der angewendeten Methodik, wie in Abbildung 2 dargestellt wird. Dabei werden die einzelnen Bausteine des methodologischen Ansatzes in den Kapiteln 3 bis 9 aufeinander folgend beschrieben. Nach der Aufnahme von Fahrzeug-, Motor- und Streckendaten in verschiedenen realen Nutzfahrzeuganwendungen werden die Strecken und die Fahrzeuge in die Simulationsumgebung überführt und validiert. Anschließend werden alternative Antriebssysteme parametrisiert und ebenfalls in die Fahrzeugsimulation eingebunden. Nachdem die Energiesysteme definiert wurden, können

aus dem simulierten Energiebedarf und dem WtW-Emissionsfaktor jeder Antriebs- und Energiesystemkombination die WtW-CO_{2,eq}-Bilanz ermittelt und verglichen werden.

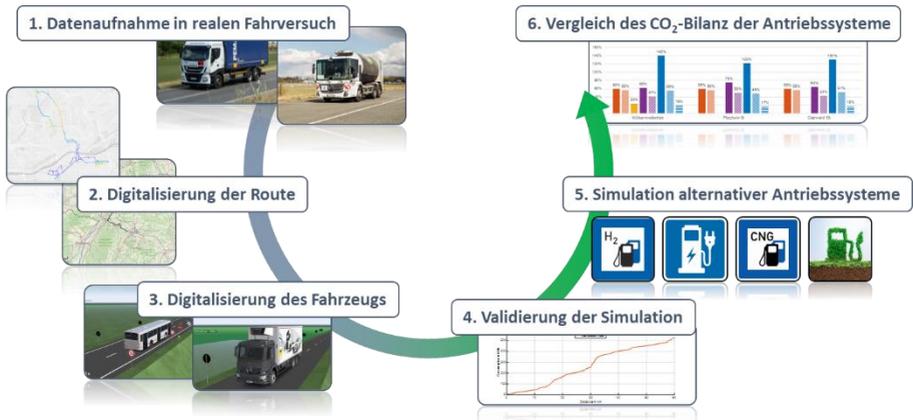


Abbildung 2: Methodologischer Ansatz der vorliegenden Arbeit (8)

Weiterhin wird auf die Datengrundlage sowie auf die Erstellung der daraus resultierenden digitalisierten Strecken- und Fahrzeugmodelle eingegangen. Der zweite Teil der Arbeit wird durch die Validierung der Simulationen mit dem Vergleich zwischen real-gemessenem und simuliertem Kraftstoffverbrauch abgeschlossen. Nach Abschluss der fahrzeugeitigen Betrachtung der CO_{2,eq}-Emissionen (TtW) wird das Energiesystem, der WtT-Anteil, untersucht. Im dritten Abschnitt der Arbeit werden die Randbedingungen zur Berechnung der Emissionsfaktoren der verwendeten Energieträger in den verschiedenen Energiesystemen erläutert. Darin enthalten sind verschiedene Zukunftsszenarien über der Entwicklung des deutschen Strommix bis 2050. Schließlich werden die Antriebs- und Energiesystemkombination bezüglich ihrer WtW-CO_{2,eq}-Bilanzen je nach Energiebereitstellungsszenario sowie Umgebungs- und Betriebsbedingung verglichen und bewertet.

Die vorliegende Arbeit wird mit einem Fazit und einem Ausblick abgeschlossen. Hierfür werden die Ergebnisse der Simulationen der unterschiedlichen Antriebsstränge in den betrachteten Nutzfahrzeuganwendungen verglichen und es werden die Herausforderungen einzelner technischer Lösungen benannt. Zudem werden die gesetzten Systemgrenzen dieser Arbeit verschoben und die Produktion der Fahrzeuge in einem Beispiel in die CO_{2,eq}-Bilanz miteinbezogen.

Das Ziel dieser Arbeit beinhaltet eine methodologische Betrachtung und nicht die Formulierung von Handlungsempfehlungen, da die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass besonders bei Nutzfahrzeugen die vielseitigen Anwendungen und Betriebsbedingungen einen großen

Einfluss auf die CO_{2,eq}-Bilanz einer Antriebs- und Energiesystemkombination hat. Die Variation einzelner Randbedingungen kann zu einer Verschiebung des Ergebnisses führen. Vielmehr weist die vorliegende Arbeit auf die Potentiale und Herausforderungen aller Antriebs- und Energiesystemkombinationen hin und bietet einen Ansatz zur individuellen klima- und bedarfsoptimalen Wahl eines Nutzfahrzeugs.

In diesem Kontext ist die Verfügbarkeit vieler verschiedener Antriebssysteme und Energieträger auf erneuerbarer Basis wünschenswert. Darüber hinaus ist dies die Grundlage für die Erreichung der politischen Klimaziele auf nationaler und europäischer Ebene. Nur so wird es möglich sein, das Ziel der Europäischen Kommission, eine klimaneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2050, zu erreichen.

2 Ausgewählte Studien und Abgrenzung der Arbeit

Die Frage, welche Antriebsart heute und in Zukunft den geringsten klimatischen Einfluss hat und haben wird, ist allgegenwärtig und wurde in verschiedenen Studien schon mehrfach adressiert. Hier wird eine Auswahl an verschiedenen Arbeiten zu dem Thema vorgestellt. Sie sollen stellvertretend für die polarisierende und ideologische Diskussion Argumente der Befürworter reiner Elektromobilität, der Wasserstoffverfechter und der Vertreter von strombasierten Kraftstoffen mit Wasserstoffkette (PtX) offenlegen. Aus den Kernaussagen lassen sich die Anforderungen an die vorliegende Arbeit ableiten sowie eine Abgrenzung zu bereits existierenden Arbeiten darlegen.

Die Darstellung erfolgt chronologisch und hat keinerlei Aussage über die Wichtigkeit der Quelle.

2.1 Auswahl aktueller Studien zur Bewertung der Nachhaltigkeit verschiedener Antriebsarten

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und Technische Universität Hamburg, *Klimabilanz, Kosten und Potentiale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw*, 2019.

In der vom Fraunhofer ISI 2019 veröffentlichten Arbeit (16) werden unter Annahme verschiedener Szenarien unterschiedliche Nutzfahrzeugantriebe hinsichtlich $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen verglichen. Dabei wird zwischen Diesel, Erdgas und synthetisch hergestelltem Methan unterschieden. Unter den in der Studie getroffenen Annahmen wird deutlich, dass synthetisches Methan aus deutschem Strommix 2020 und sogar über 2030 hinaus keine positive Klimabilanz gegenüber Diesel oder Erdgas hat. Wird der Elektrolyseur zur Wasserstoffherzeugung jedoch mit überwiegend erneuerbarem Strom, zum Beispiel in Perioden mit Überangebot betrieben, ist ab 2030 eine Senkung des Emissionsfaktors unterhalb der fossilen Quellen erreichbar. Wird der Elektrolyseur ausschließlich mit erneuerbarem Strom betrieben, ist schon 2020 eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber Diesel und Erdgas möglich.

Für die Herstellung von Sattelzugmaschinen mit konventionellem Diesel- oder Gasmotor werden 20 t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ emittiert. Unter Annahme einer gesamten Laufleistung von 684 000 km, spielen die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen bei der Herstellung der Fahrzeuge eine untergeordnete Rolle in der Lebenszyklusanalyse dar.

In dieser Studie bleibt die Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Nutzfahrzeugfahrprofilen sowie der Vergleich mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor (H_2 -VKM), Brennstoffzelle (FCEV) und batterieelektrischem Nutzfahrzeug (BEV) offen. Des Weiteren

werden mittlere Verbräuche angenommen, die keine Aussage über den Klimatischen Einfluss einzelner Antriebsarten in bestimmten Anwendungen zulässt.

Agora Verkehrswende, *Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen*, 2019.

Agora Verkehrswende, *Klimabilanz von Elektroautos*, 2019.

In den Studien der Agora Verkehrswende (17, 18), basierend auf Untersuchungen an Personenkraftwagen von 2019, werden den batterieelektrischen Personenkraftwagen in allen untersuchten Fällen einen Klimavorteil gegenüber dem Verbrenner vorausgesagt. Beim Vergleich mit strombasierten Kraftstoffen wie Wasserstoff, Fischer-Tropsch-Diesel oder synthetischem Methan wird von einer Produktion ausgegangen, die auf dem deutschen Strommix basiert. In diesem Zusammenhang legen die Treibhausgasemissionen eines Verbrenners mit strombasierten Kraftstoffen rund dreimal und die eines Brennstoffzellenfahrzeugs rund 75 % so hoch wie die eines Batteriefahrzeugs mit 35 kWh Batteriekapazität.

In den vorliegenden Untersuchungen bleiben die besonderen Anforderungen des Nutzfahrzeugsektors genauso wie der Einfluss des verwendeten Energiesystems zur Produktion des Energieträgers unberücksichtigt.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), *Greenhouse Gas Emissions for Battery Electric and Fuel Cell Electric Vehicles with Ranges over 300 Km*, 2019.

In den Untersuchungen des Fraunhofer ISE von 2019 (19) wird die Klimabilanz von der Herstellung bis zur Entsorgung von Brennstoffzellen- und batterieelektrischen Fahrzeugen mit der von Dieselfahrzeugen unter der Annahme von 150 000 km Laufleistung verglichen. Des Weiteren werden unterschiedliche Herstellungspfade für Wasserstoff und Strom zugrunde gelegt. In diesem Zusammenhang sind trotz der höheren Emissionen während der Herstellung, eine Reduktion um ca. 35 % für batterieelektrische Personenkraftwagen (0,16 kg CO_{2,eq}/km) und rund 48 % für Brennstoffzellenfahrzeuge (0,13 kg CO_{2,eq}/km) gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen (0,25 kg CO_{2,eq}/km) erreichbar.

Diese Studie betrachtet den Lebenszyklus von Personenkraftwagen mit einer im Vergleich zu Nutzfahrzeugen geringen Laufleistung von 150 000 km. Die Berechnung der CO_{2,eq}-Emissionen basiert auf den Herstellerangaben in der Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) und stellt nur einen unspezifischen Mittelwert dar. Des Weiteren bleiben die synthetischen Kraftstoffe und der Zusammenhang zum Energiesystem unberücksichtigt.

Vehicle Energy Consumption calculation TOol – VECTO, *Joint Research Center der Europäischen Kommission, 2019*

Ab dem 1. Januar 2019 müssen neu zugelassene Nutzfahrzeuge in VECTO parametrieren und bewertet werden. Die Simulationssoftware soll den Verbrauch und somit die Tank-to-Wheel $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der Fahrzeuge erfassen. In diesem Zusammenhang dienen Daten aus Prüfstandversuchen der einzelnen Antriebskomponenten und Verbraucher als Eingangsgrößen für die Parametrierung der Simulationsumgebung. So werden aus den Fahrzeug-, Reifen-, Getriebe-, Motor- und Nebenaggregatdaten die Fahrwiderstände für einen betrachteten Zyklus berechnet. Daraus lässt sich ein Kraftstoffverbrauch und somit eine Tank-to-Wheel $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz für das Fahrzeug errechnen. Die dargestellten Fahrzeuge werden entsprechend ihrer geplanten Anwendung in einer der zehn vordefinierten Zyklen simuliert (20–24).

Das Ziel von VECTO liegt in der Bewertung existierender Systeme in repräsentativen Fahrscenarien bezüglich der Tank-to-Wheel $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen vielmehr als eine Potentialanalyse verschiedener Antriebssysteme. Die hier vorgestellte Arbeit grenzt sich von VECTO insofern ab, dass noch nicht im Nutzfahrzeug verfügbare Antriebskomponenten über der Well-to-Wheel Betrachtung bezüglich ihres klimatischen Einflusses bewertet werden können und mit existierende Referenzfahrzeugen verglichen werden. Des Weiteren ist in der in dieser Arbeit vorgestellten Digitalisierung realer Fahrprofile ein Modul zur antriebsstrangneutralen Gestaltung der Geschwindigkeitsvorgabe enthalten, sodass die Potentiale und Grenzen alternativer Antriebsstränge zur Geltung kommen. Das Modul zur Streckenerstellung ermöglicht die Einbindung jeder beliebigen Strecke und bietet somit eine individuell gestaltbare Vergleichsumgebung.

Öko-Institut e.V., *E-Fuels im Verkehrssektor. Kurzstudie über den Stand des Wissens und die mögliche Bedeutung von E-Fuels für den Klimaschutz im Verkehrssektor, 2020.*

Die Kurzstudie „E-Fuels im Verkehrssektor“ des Öko-Instituts e.V. von 2020 (25) befasst sich mit der zukünftigen Bedeutung von synthetischen Kraftstoffen im Verkehrssektor und deren klimatischen Einfluss. Ein Kernpunkt der Studie ist die Steigerung der Energieeffizienz und der Elektrifizierung der Verkehrsmittel. In diesem Zusammenhang hat der elektrische Antrieb im Fahrzeug einen Vorteil gegenüber einem Verbrenner um den Faktor 2,5 bis 3. In Verbindung mit dem zweiten Kernpunkt der Studie, der Verwendung Treibhausgas-neutraler Energieträger, sieht das Öko-Institut e.V. vor allem Strom, Wasserstoff und klimaneutrale Kohlenwasserstoffe aus Strom und nachhaltiger Biomasse für den Verkehrssektor vor.

Diese Studie des Öko-Instituts e.V. sieht die Elektromobilität, auch im Nutzfahrzeugsektor zum Beispiel mittels Oberleitungen, als zentrales Element für den Klimaschutz im Verkehrssektor.

Diese technischen Lösungen sollen eine breite Elektrifizierung des Straßenverkehrs ermöglichen und e-Fuels (strombasierte Kraftstoffe mit Kohlenwasserstoffkette – PtX) sollen primär in Verkehrsmittel ohne Alternativen wie zum Beispiel in der Luft- und Schifffahrt Anwendung finden.

Die starke Fokussierung der Kurzstudie „*E-Fuels im Verkehrssektor*“ auf den Fahrzeugwirkungsgrad lässt außer Acht, dass dieser keinerlei Hinweis auf die Klimawirksamkeit eines Antriebskonzept ist, wenn die Treibhausgasemissionen des Energiesystems unberücksichtigt bleiben.

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., *Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV. Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter, 2021*

In der „*Kraftstoffstudie IV*“ der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. von 2021 (26) werden die möglichen Pfade der Mobilität adressiert, um bis 2050 zu einem klimaneutralen Verkehrssektor zu gelangen. Die Studie setzt eine regenerative Stromerzeugung aus Wind und Sonne voraus und vergleicht die CO_{2,eq}-Bilanz verschiedener Energieträger von der Herstellung bis zum Verbrauch im Fahrzeug. Hierbei wird die Nutzung elektrischer Energie im batterieelektrischen Fahrzeug mit dem Wasserstoffpfad beim Brennstoffzellenfahrzeug und Wasserstoffverbrenner und dem sogenannten Power-to-X-Pfad verglichen. Dabei stellt die Direktnutzung von Strom den besten Wirkungsgrad und die Umwandlung in PtX über Wasserstoff die geringste Effizienz dar.

Bei der Studie werden 100 %-Szenarien verglichen. Das heißt, es wird angenommen, dass eine Technologie den ganzen Bestand darstellt. Diese Annahme wurde, wenn auch unrealistisch, getroffen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu vereinfachen. Die Studie hebt hervor, dass eine Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund des besten Fahrzeugwirkungsgrads die geringste Energiemenge benötigt, 3,5 bis 4-mal weniger als beispielsweise Fischer-Tropsch-Diesel. Jedoch macht die Studie auch deutlich, dass nicht die Energiemenge, sondern die notwendige installierte Leistung an erneuerbarer Energie die Treibhausgasbilanz maßgeblich beeinflusst: die Verfügbarkeit eines Kraftwerks gibt indirekt vor, wie viele dieser Kraftwerke benötigt werden um den Energiebedarf zu decken. In diesem Zusammenhang stellt sich heraus, dass alle lokal hergestellten erneuerbaren Energiearten aufgrund der begrenzten Volllaststunden einen höheren Klimatischen Einfluss haben, als wenn sie in anderen Weltregionen erzeugt und nach Europa importiert werden. Zudem wird auch deutlich, dass die Bestandsflotte, die weiterhin mit fossilen Kraftstoffen betrieben wird, den Hauptteil der Treibhausgasemissionen bis 2050 ausmacht. Bei ähnlicher Marktdurchdringung erreichen aus Kohlenwasserstoffketten bestehende, synthetische Kraftstoffe, Wasserstoff und batterieelektrische Mobilität vergleichbare kumulierte

Treibhausgasemissionen. Dabei benötigen batterieelektrische Fahrzeuge am wenigsten Energie und kurzkettinge synthetische Kraftstoffe wie Methan oder Methanol die niedrigsten infrastrukturellen Investitionen.

Bei der Erstellung der Szenarien werden mittlere Verbräuche verwendet. Damit lässt sich das Ziel dieser Studie, einen allgemeinen Zukunftstrend der Klimawirksamkeit einzelner Energieträger zu beschreiben, erreichen. Allerdings liegen die detaillierte Simulation und Beschreibung einzelner Anwendungen außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

Fazit zur Aussage der ausgewählten Studien und Arbeiten

Anhand der vorgestellten Studien und Untersuchungen wird deutlich, dass es keine eindeutige Antwort auf die Frage „*Welches Antriebskonzept in der zukünftigen Mobilität Anwendung finden soll?*“ gibt. Vielmehr zeigt sich, dass manche Anwendungen und Randbedingungen verschieden Antriebsformen favorisieren und dass die Systemgrenzen der Betrachtung häufig das Energiesystem ausschließen. Die vorliegende Arbeit soll demnach diese Lücke schließen und einen Vergleich verschiedener Antriebs- und Energiesystemkombinationen in nutzfahrzeugtypischen Anwendungen ermöglichen.

2.2 Abgeleitete Anforderungen an die vorliegende Arbeit

Aus dieser Aufstellung lassen sich die Anforderungen an die hier vorgestellte Arbeit für das Nutzfahrzeugsegment ableiten. Das Thema „***Systemische Analyse und Bewertung der Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Bilanz verschiedener Antriebs- und Energiesystemkombinationen in nutzfahrzeugspezifischen Anwendungen***“ setzt die Einbeziehung von Energiesystem und Antriebssystem in die Bewertung voraus. In diesem Zusammenhang werden als übergeordnete Ziele dieser Arbeit folgende Anforderung definiert:

- Die Analyse der Ergebnisse muss technologie-neutral und technologie-offen sein
- Es muss eine breite Auswahl an Antriebssträngen dargestellt sein,
- Die Auswahl der betrachteten Energieträger soll wissenschaftlich und nicht auf aktuellen politischen Entscheidungen basierend erfolgen,
- Unterschiedliche Energiebereitstellungspfade für die betrachteten Energieträger sollen berücksichtigt werden,
- Es sollten verschiedene Szenarien zur Darstellung der zukünftigen Entwicklung der Emissionsfaktoren für die betrachteten Energieträger erarbeitet werden
- Die dargestellten Anwendungsbeispiele sollten aus Fahrprofilen aus realen Daten abgeleitet werden,
- Die Entwicklungspotentiale der einzelnen Technologien sollten mitberücksichtigt werden.

Zu guter Letzt sollte bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse darauf geachtet werden, dass sich die Aussagen lediglich auf den dargestellten Fahrzeugbestand auf den betrachteten Strecken beziehen. Eine allgemeine Aussage über das vielseitige Nutzfahrzeugsegment machen zu können, ist nicht das Ziel dieser Arbeit.

3 Ansatz zur Digitalisierung der Fahrprofile von realen Nutzfahrzeuganwendungen

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Analyse und Bewertung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz unterschiedlicher Antriebs- und Energiesystemkombinationen basierend auf der Rückwärtssimulation nach dem am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe entwickelten V-Prozess (27) verwendet und nach Abbildung 2 angewendet. Die Methodik setzt sich im Wesentlichen aus sechs Hauptpunkten zusammen und gliedert sich in die durch Abbildung 3 dargestellte Softwarestruktur ein.

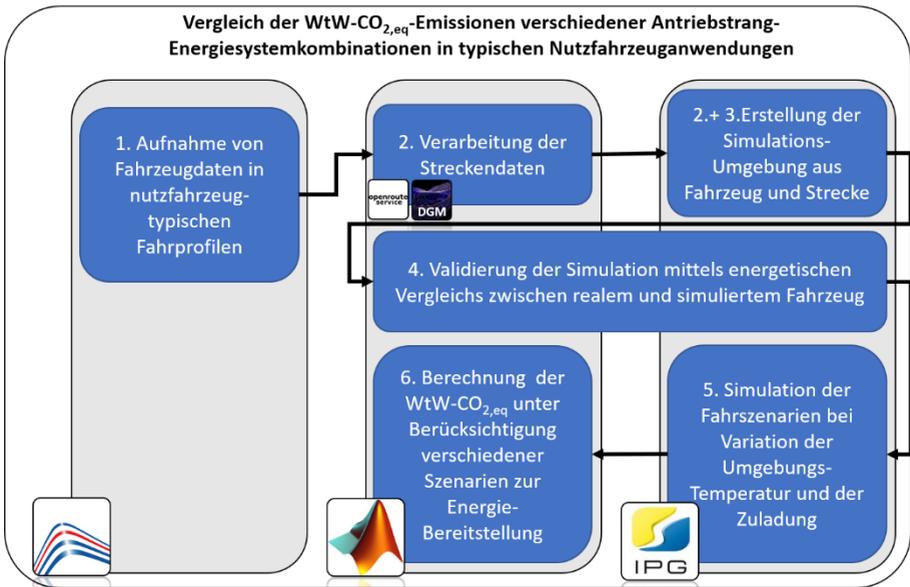


Abbildung 3: Softwarestruktur der vorgestellten Methodik zur Analyse und Bewertung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz unterschiedlicher Nutzfahrzeugantriebsstrang-Energiesystemkombinationen

Die Hauptbestandteile des methodologischen Ansatzes zur Digitalisierung der Fahrprofile von realen Nutzfahrzeuganwendungen:

- Datenaufnahme im Fahrzeug
- Aufbau der Simulationsumgebung
- Erstellung des Referenzfahrzeugmodells
- Validierung der Simulationen
- Aufbau von Simulationen für alternative Antriebssysteme

-
- Definition der Energiesysteme samt CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren
 - Vergleich der CO_{2,eq}-Emissionen der Antriebs-Energiesystemkombinationen in den jeweiligen Anwendungsfällen

werden nach Abbildung 3 mit den Softwarelösungen von Ipetronik, Mathworks und IPG durchgeführt (28–30).

Im Kern des Datenverarbeitungsprozesses steht die Validierung der Referenzsimulation (4. in Abbildung 3) auf der die abgeleiteten alternativen Antriebe aufbauen. Durch den energetischen Vergleich zwischen realem und simuliertem Fahrzeug wird die Referenzsimulation validiert. Ziel der Methode und der Datenverarbeitung ist der simulative Vergleich der unterschiedlichen Antriebsstränge hinsichtlich CO_{2,eq}-Emissionen in den jeweiligen Anwendungen. Der vorgestellte methodologische Ansatz gepaart mit den genannten Softwarelösungen ermöglicht es, auf der Basis der Daten einer realen Anwendung, relevante Größen für die Erstellung einer Simulation des Referenzfahrzeugs und der Strecke abzuleiten.

3.1 Datenaufnahme im realen Versuch

Im Rahmen der dargestellten Methodik nach dem V-Modell (8) aus Abbildung 2 dient ein reales Fahrzeug zur Datenaufnahme. Dieses wird mit Messtechnik ausgestattet und unter üblichen Betriebsbedingungen und Routen betrieben. Die Datenaufnahme im Regelbetrieb bildet die Grundlage für die darauffolgende Erstellung der Simulationsmodelle. In diesem Zusammenhang sind folgende Anforderungen an die Messtechnik zur Datenaufnahme gestellt:

- Automatisiertes Ein- und Ausschalten,
- Betrieb mit Bordnetzspannung,
- CAN- und OBD-Anschluss zur Messung der Fahrzeugdaten,
- CAN-Anschluss für den Anschluss von Abgasmesssonden,
- Ortungsmöglichkeit,
- Speicherung der Daten,
- Kompakter Aufbau.

Aus den zuvor aufgelisteten Anforderungen wird zur Datenaufnahme ein Datenlogger *FLEETlog2* der Firma Ipetronik (31) ausgewählt. Die Stromversorgung des Loggers ist an die Zündung des Fahrzeugs gekoppelt, sodass jeder neue Motorstart den automatisierten Beginn einer neuen Messung initiiert. Nach Zündungsstopp erfolgt die Spannungsversorgung direkt von der Batterie bis zur selbständigen Abschaltung des Loggers nach dem Datenübertrag auf einen FTP-Server (*File Transfer Protocol*). Über den CAN-Anschluss (*Controller Area Network*) und die OBD-Schnittstelle (*On-Board Diagnosis*) des Fahrzeugs werden motorische und fahrzeugspezifische Größen aufgenommen und gespeichert. Zudem sind über eine weitere Ansatz zur Digitalisierung der Fahrprofile von realen Nutzfahrzeuganwendungen

CAN-Schnittstelle Abgasmesssonden zur Messung der Stickoxid- und Ammoniakkonzentration angeschlossen. Die verbaute GPS-Antenne (*Global Positioning System*) gibt zusätzlich zum Fahrzeug noch Ortungsdaten zur Bestimmung der Geschwindigkeit, der Höhe und der Position des Fahrzeugs.

Mit dem beschriebenen Aufbau ist eine automatisierte Messung im realen Betrieb möglich. Die vom Fahrer unabhängige Messung ermöglicht es, ein unbeeinflusstes Fahrprofil aufzunehmen. So wird sichergestellt, dass ein realistisches Fahrverhalten als Basis für die Simulationen vorliegt. Zudem ist eine kontinuierliche Überwachung der relevanten Größen in Echtzeit möglich.

In der vorliegenden Arbeit werden nach diesem Ansatz die Route für das Abfallsammelfahrzeug, das Regionalverteilerfahrzeug und den Fernverkehr in realen Anwendungen aufgenommen. Die Stadtbus-Anwendung, wird mit einem abweichenden Ansatz aufgenommen. Hierfür steht lediglich ein GPS-Ortungsgerät ohne Verbindung zum Fahrzeugsteuergerät zur Verfügung. Die Strecke kann somit analog zu den anderen Anwendungen digitalisiert werden. Für das Fahrzeug hingegen, muss der Ansatz aus 4.4.2 angewendet werden. Abbildung 4 zeigt die verwendeten Fahrzeuge für die Datenaufnahme in den realen Anwendungen auf.

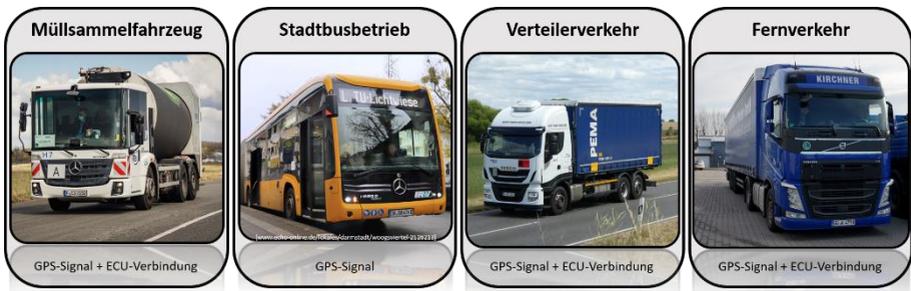


Abbildung 4: Verwendete Fahrzeuge für die Datenaufnahme in den realen Anwendungen

3.2 Streckendigitalisierung

Aus den im realen Fahrversuch mittels Datenlogger aufgenommenen Daten wird in diesem Abschnitt die Erstellung eines digitalen Abbilds der Strecke in IPG-Truckmaker dargestellt. Dabei sind für die hier vorgestellten Ansätze Informationen über die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Koordinaten (Breiten- und Längengrad) sowie das Höhenprofil der Strecke erforderlich. Die Erstellung der digitalen Strecke wird in drei Schritten aufgeteilt und nacheinander sequentiell durchgeführt. Als erstes werden die Informationen der x/y -Ebene bearbeitet. Daraufhin wird jeder x/y -Koordinatenpunkt mit einer Höhe versehen und schließlich wird im letzten Verarbeitungsschritt die Geschwindigkeitsvorgabe auf das $x/y/z$ -

Profil gelegt. Dieser Abschnitt wird analog zu den Verarbeitungsschritten zur Erstellung der Strecke aufgebaut.

Eine Nutzung des Profils zum Vergleich des Verbrauchs unterschiedlicher Antriebssysteme setzt folgende Anforderungen für die Streckendigitalisierung voraus:

- Abbildung der realen Streckenlänge,
- Zuordnung einer Höhe zu jedem Streckenpunkt zur realistischen Abbildung des Höhenprofils der realen Strecke,
- Übertrag des gemessenen Geschwindigkeitsprofil in die Simulationsumgebung,
- Gestaltung einer antriebsneutralen Geschwindigkeitsvorgabe zur Evaluierung der Potentiale der unterschiedlichen Antriebskonzepte.

3.2.1 Erstellung des x/y-Streckenprofils

Die im *Global-Positioning-System* (GPS) aufgenommenen Daten sollen im folgenden Schritt zur Erstellung der Simulationsrouten genutzt werden. Die Genauigkeit der GPS-Daten ist mit sieben Meter in 95 % der Messungen (32, S. 44) zu gering, um eine Abbildung der realen Strecke zu gewährleisten. In Abbildung 5 ist das aufgezeichnete GPS-Signal in einem Streckenabschnitt der Verteilerverkehrsrouten zu sehen. In diesem Ausschnitt sind Verschiebungen des GPS-Signals gegenüber der Fahrbahn sowohl auf den geraden als auch in den kurvigen Streckenabschnitten zu erkennen. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die direkte Digitalisierung des GPS-Signals zu einer Änderung der Streckenlänge führen könnte und somit die Güte der digitalen Strecke maßgeblich vom aufgezeichneten Signal abhängt.



Abbildung 5: Aufgezeichnetes GPS-Signal verglichen mit der real gefahrenen Strecke

Damit die Abbildungsgüte der digitalen Strecke in allen Anwendungen vergleichbar bleibt, wird im ersten Verarbeitungsschritt das aufgezeichnete GPS-Signal in einen Routenplaner importiert. In dieser Arbeit kommt hierfür der *Openroute Service* (ORS) des *Heidelberg Institute for Geoinformation Technology* zum Einsatz (33). Mit diesem Ansatz wird die

Übereinstimmung der Länge der digitalen und der realen Strecke sichergestellt. Die aus dem Routenplaner exportierte Strecke in Form einer x/y-Tabelle dient als Grundlage für die weiteren Verarbeitungsschritte.

3.2.2 Zuordnung einer Höhe z für jeden x/y-Punkt der digitalen Strecke

Die Abbildung des Höhenprofils der Strecke ist der nächste wichtige Bearbeitungsschritt in der Streckendigitalisierung. Bei 80 km/h konstanter Fahrt auf der Ebene werden ca. ein Drittel der Antriebsleistung eines Nutzfahrzeuges aufgewendet. Bei Steigungen reicht in manchen Situationen die Motorleistung hingegen nicht aus (34). In diesem Kontext wird deutlich, dass der Übertrag des Höhenprofils einen essenziellen Anteil der Streckendigitalisierung darstellt. Dabei stehen neben den aufgezeichneten GPS-Höhendaten zwei weitere Quellen zur Verfügung:

- GPS-Daten vom Datenlogger
- Höhendaten aus ORS (Openroute Service)
- Digitale Geländemodell Daten (DGM)

DGM beschreibt die Geländeformen der Erdoberfläche. Dabei sind die Höhendaten in Quadrate mit fünf Metern Gitterlänge eingeordnet. Die Genauigkeit der Daten ist sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene mit 0,3 bis 1 m bei einer Auflösung von 0,1 m angegeben (35, S. 3). Im Rahmen dieser Arbeit stehen für die Stadtgebiete von Frankfurt (36) und Darmstadt jeweils ein DGM-Modell zur Verfügung, während außerstädtische Bereiche lediglich in ORS verfügbar sind. In diesem Kontext erfolgt die Bedatung der Höhenprofile für die Abfallsammel- und die Stadtbus-Route mittels DGM- und die weiteren Fahrprofile (Verteiler und Langstrecke) mittels ORS-Daten.

Mit den unter 3.2.1 ermittelten x/y-Koordinaten werden in einem Matlab-Skript automatisiert die vorhandenen ORS-Höhendaten, falls verfügbar, mit den genaueren DGM-Daten ersetzt (37, S. 21–22). Als Ergebnis dieses Abschnitts steht somit ein Abbild der realen Strecke als x/y/z-Verlauf zur Verfügung.

3.2.3 Übertrag des gemessenen Geschwindigkeitsprofils in die Simulation

Das Vorgehen zur Digitalisierung des gemessenen Geschwindigkeitsprofil wird in diesem Abschnitt am Beispiel des Abfallsammelfahrzeugs dargestellt. Das Sollgeschwindigkeitsprofil für die digitale Strecke kann aus zwei Quellen abgeleitet werden:

- Aus dem Fahrzeugsteuergerät,
- Aus dem GPS-Signal des Datenloggers.

Aufgrund der höheren Genauigkeit und Stetigkeit des Signals, empfiehlt es sich, die Geschwindigkeit aus dem Fahrzeugsteuergerät zu verwenden und der Geschwindigkeit des

GPS-Signals vorzuziehen. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Geschwindigkeitsprofil einer Abfallsammelroute aus dem Steuergerät (ECU) und aus dem GPS-Empfänger über der Zeit aufgetragen. Des Weiteren ist auf der rechten y-Achse die daraus integrierte Strecke dargestellt. Dabei fällt auf, dass besonders während der Stillstandphasen im Sammelbetrieb das Grundrauschen des GPS-Signals zu einer Verfälschung der Streckenlänge führt. Allein der blau markierte Haltestopp mit einer Dauer von 80 s stellt einen Anstieg der GPS-Streckenlänge um 23 m gegenüber der aufgenommenen Strecke des Fahrzeugsteuergeräts dar.

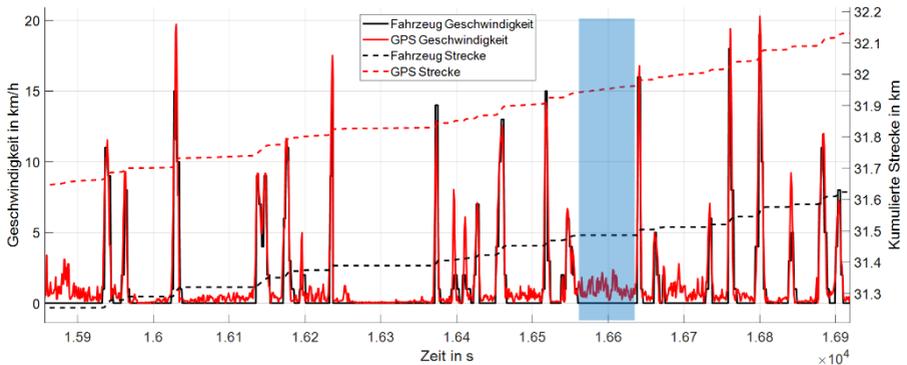


Abbildung 6: Vergleich der Geschwindigkeitssignale vom Abfallsammelfahrzeug aus der ECU und vom GPS- Empfänger

Zu diesem Bearbeitungszeitpunkt besteht kein Zusammenhang zwischen der zuvor in 3.2.1 und 3.2.2 erstellten dreidimensionalen Strecke und dem Geschwindigkeitsprofil, unabhängig davon, ob die Fahrzeug- oder die Datenlogger-Geschwindigkeitsdaten verwendet werden. Tatsächlich steht das gemessene Geschwindigkeitssignal in Zusammenhang mit dem gemessenen GPS-Profil und der verwendeten Abtastrate. Wie in 3.2.2 gezeigt, liegen die gemessenen GPS-Punkte zum Teil neben der realen Strecke (hier ORS). Da die Ableitung der Distanz zwischen zwei aufgezeichneten GPS-Datenpunkten und die Abtastrate die Geschwindigkeit darstellt, muss das Geschwindigkeitsprofil einem GPS-Datenpunkt und nicht einem ORS-Datenpunkt zugeordnet werden. Im letzten Verarbeitungsschritt muss somit jeder der in 3.2.1 und 3.2.2 ermittelten x/y/z-Punkte der ORS-Strecke dem zugehörigen gemessenen x/y-Punkt des GPS-Signals zugeordnet werden.

In diesem Zusammenhang wird nach Abbildung 7 jedem gemessenen GPS-Punkt die Höhe des nächsten ORS-Punkt zugewiesen. Das daraus entstehende diskrete Höhenprofil wird durch Glättung zu einem kontinuierlichen Höhenprofil weiterverarbeitet. Nach dieser Methode wird sichergestellt, dass keine Verschiebung zwischen der dreidimensionalen Strecke und dem

Geschwindigkeitsprofil entsteht. In diesem Kontext stimmt die Geschwindigkeitsvorgabe mit dem Höhenprofil stets überein.

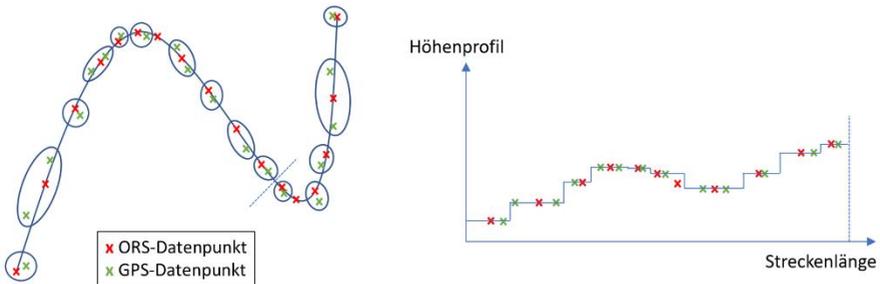


Abbildung 7: Zuordnung von ORS-Punkten und GPS-Punkten (37, S. 21)

3.2.4 Zusammenfassung der Streckendigitalisierung

Die Bearbeitung der Strecke mit dem Ansatz aus 3.2.1 bis 3.2.3 stellt eine dreidimensionale Strecke mit dem aus dem Referenzfahrzeug abgeleiteten Geschwindigkeitsprofil dar. In Abbildung 8 sind der reale und der simulierte Geschwindigkeitsverlauf eines Abfallsammelfahrzeugs aufgezeigt. Das Bestimmtheitsmaß von 79 % über den gesamten Streckenverlauf spiegelt die Abbildungsgüte des simulierten Geschwindigkeitsprofils wider. Dieser Wert wird erreicht, obwohl an manchen Stellen unterschiedlich lange Sammelstopps zu einer zeitlichen Verschiebung führen. Diese sind in Abbildung 8 rechts anhand einer Beispielsbeschleunigung dargestellt (orange): die Geschwindigkeit des simulierten Fahrzeugs nimmt zu, während das reale Abfallsammelfahrzeug noch steht (Geschwindigkeit 0 km/h). Sobald eine konstante Geschwindigkeit erreicht wird, gleichen sich die Geschwindigkeiten wieder an. Die dargestellte Verschiebung ist nur zeitlicher Natur, sodass das Höhenprofil und die Geschwindigkeit weiterhin der Realfahrt entsprechen.

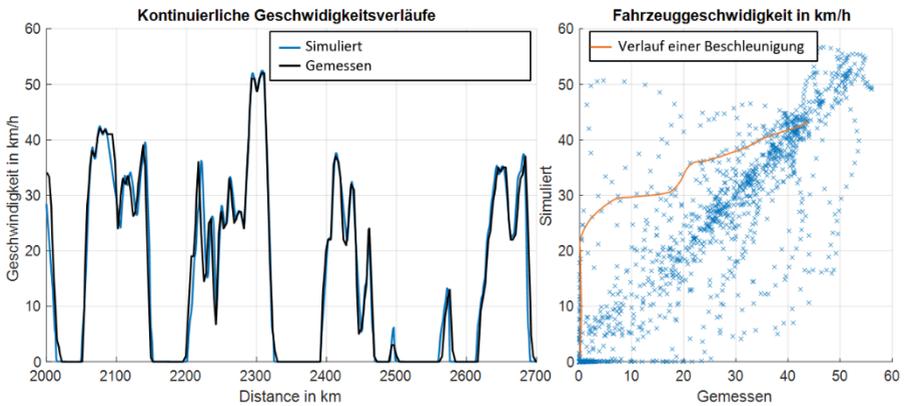


Abbildung 8: Reale und simulierte Geschwindigkeit des Referenzfahrzeugs auf der Müllsammelroute (links). Korrelation zwischen gemessener und simulierter Fahrzeuggeschwindigkeit (rechts)

Bei einem Bestimmtheitsmaß von 70 bis 90 % kann auf eine starke lineare Korrelation geschlossen werden, sodass von einer guten Abbildung des Geschwindigkeitsprofils des Referenzfahrzeugs ausgegangen werden kann (38, S. 90). Die Abbildung des Geschwindigkeitsprofil hängt ebenfalls von der Parametrierung des Fahrzeugs ab. Dies wird im Abschnitt 4 näher behandelt und wird an dieser Stelle nur als zusätzliche Einflussgröße benannt.

3.3 Erstellung eines antriebsstrangneutralen Geschwindigkeitsprofils

Ein Vergleich unterschiedlicher Antriebsstränge auf derselben Strecke ist dann zulässig, wenn das Fahrverhalten und das Geschwindigkeitsprofil in allen Fahrzeugen realistisch sind. Dies setzt voraus, dass die Sollgeschwindigkeit weder den dargestellten Antriebsstrang hemmt noch unverhältnismäßig beansprucht. In diesem Kontext wird in diesem Abschnitt die Erstellung eines antriebsstrangneutralen Geschwindigkeitsprofils aus den vorhandenen Referenzfahrzeugmessungen erläutert.

Die in der Simulation nach 3.2.3 implementierte Geschwindigkeitsvorgabe entspricht der des Referenzfahrzeugs. Es bildet in jeder Anwendung die Geschwindigkeit des Diesel-Fahrzeugs im realen Verkehr ab und wird durch Faktoren topologischer und verkehrsbedingter Art sowie von der Streckenführung beeinflusst. Während die Topologie der Route in den Verarbeitungsschritten unter 3.2.1 bis 3.2.3 bereits abgebildet wurde, müssen die streckenbedingten und die verkehrsbedingten Einflüsse noch gesondert behandelt werden.

Unter der Streckenführung werden die Kurvenfahrten zusammengefasst. Diese beeinflussen die Fahrzeuggeschwindigkeit durch physikalische Kraftschlussgrenzen und Komfortgrenzen

für die Passagiere. Die Kurvengeschwindigkeit eines Fahrzeugs ist durch die maximale Querbeschleunigung bei gegebener Längsbeschleunigung begrenzt, sodass die Fahrzeuggeschwindigkeit von der Streckenführung und den herrschenden Straßenverhältnissen definiert wird. Der Kammsche Kreis aus Abbildung 9 stellt beispielhaft den nutzbaren Bereich des Reifens durch unterschiedliche Fahrer eines Fahrzeugs dar. Die dargestellten unterschiedlichen Querbeschleunigungen deuten auf die gefahrenen Kurvengeschwindigkeiten hin. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass das Geschwindigkeitsprofil auch stark vom Fahrer beeinflusst werden kann.

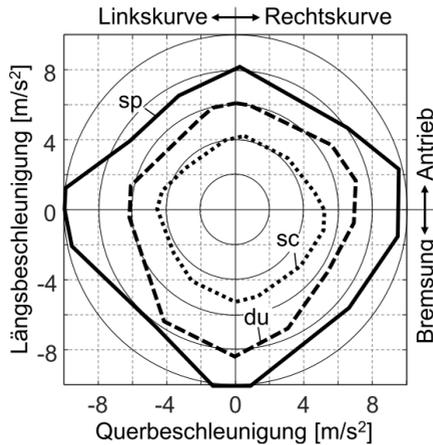


Abbildung 9: Reibkreise eines Kompaktwagens bei unterschiedlicher Fahrweise bei trockener Fahrbahn (39, S. 56)

Die verwendete Simulationssoftware (IPG-Truckmaker) ermöglicht die Parametrierung von Fahrer und Fahrzeug, sodass unterschiedliche Fahrweisen dargestellt werden können. In dieser Arbeit wird jedoch bewusst auf diese Möglichkeit verzichtet. Vielmehr werden die Kurven aus der simulierten Strecke entfernt, sodass eine hügelige Gerade in der y -Ebene nach Abbildung 10 als finale Strecke vorliegt. Diese Vereinfachung reduziert den Freiheitsgrad der Simulation um den Einflussfaktor der Trajektorienwahl des Fahrers. Nichtsdestotrotz sind die realen kurvenbedingten Geschwindigkeitsänderungen in Form von Geschwindigkeitsvorgaben abgebildet. Mit diesem Schritt wird sichergestellt, dass die zu vergleichenden Antriebsstränge die gleiche Distanz zurücklegen ohne Einfluss des Kurvenschneidekoeffizienten von IPG-Truckmaker (30, S. 756).

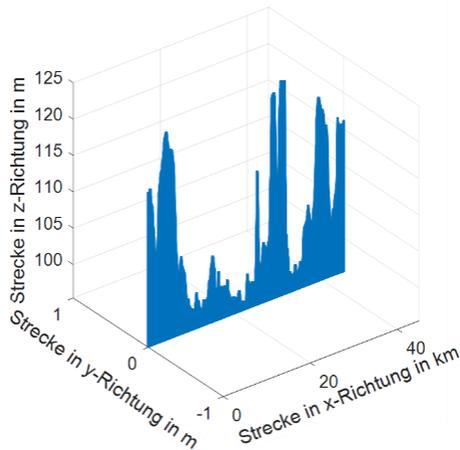


Abbildung 10: Bearbeitete Strecke als "hügelige Gerade"

Im letzter Streckenabbildungsschritt wird der Verkehrseinfluss behandelt. In diesem Kontext kann jedes Fahrprofil grundsätzlich in vier Fahrzustände unterteilt werden:

- Stillstand,
- Konstante Geschwindigkeit,
- Verzögerung,
- Beschleunigung.

Bei der Fahrt bei konstanter Geschwindigkeit in der Ebene wirken weder Einflussfaktoren topologischer oder geographischer Art, noch spielt der Verkehr eine Rolle. Bei Verzögerungsvorgängen folgt das Geschwindigkeitsprofil einem äußeren Einflussfaktor. Unabhängig davon, ob es eine rechtliche Vorgabe in Form einer Geschwindigkeitsbegrenzung oder verkehrs- oder kurvenbedingt ist, muss das Fahrzeug der Geschwindigkeitsanpassung folgen, um nicht von der Strecke abzukommen oder um eine Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer zu verhindern. Es bedeutet für die dargestellte Anwendung, dass das Fahrzeug dem vorgegebenen Profil folgen muss. Bei der Beschleunigung hingegen gibt es zwei unterschiedliche Arten. Während die Beschleunigung im dichten Verkehr wenig Spielraum lässt, kann die Beschleunigung bei freier Straße offen gestaltet werden. Wird die Geschwindigkeitsvorgabe nach diesen Anforderungen umgesetzt, ist es möglich, ein antriebsneutrales Geschwindigkeitsprofil zu gestalten, in dem besonders bei freier Beschleunigung eine Differenzierung der Antriebsstränge möglich ist (37, S. 27).

Durch Glättung des vorhandenen Geschwindigkeitsprofil wird das transiente Verhalten reduziert. Das zugrundeliegende Geschwindigkeitsprofil wird in Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver eingeteilt. Zur Abgrenzung der Manöver werden lokale Extrema

erkannt. Abbildung 11 stellt ein beispielhaftes Profil dar. Darin enthalten ist die Einteilung in Manöver anhand der erkannten Minima und Maxima der Geschwindigkeitsprofils. Gemeinsam mit der Vorgabe eines räumlichen (Distanz in m) und absoluten (Geschwindigkeitsdelta in km/h) Mindestabstands zwischen zwei Extrema, verhindert dies den ständigen Wechsel zwischen Beschleunigung und Verzögerung. Demzufolge wird das synthetische und unrealistische Reglerverhalten (Fahrpedalpumpen) verhindert.

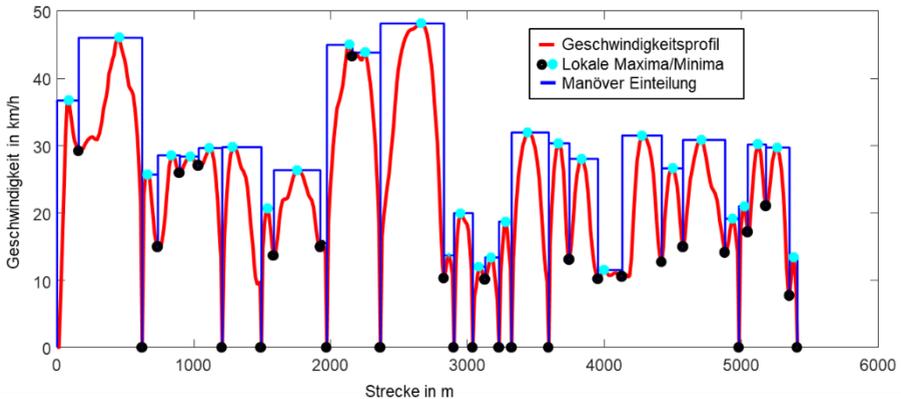


Abbildung 11: Einteilung des Geschwindigkeitsprofil in Beschleunigung und Verzögerungsmanöver anhand von lokalen Extrema

Abbildung 12 stellt die Simulation des Referenzfahrzeugs anhand der Manövereinteilung aus Abbildung 11 dar. Dabei wird der grundsätzliche Geschwindigkeitsverlauf erkennbar. Allerdings werden sowohl die möglichen maximalen Beschleunigungen als auch die maximalen definierten Verzögerungswerte erreicht. Diese Art „digitale“-Fahrpedalnutzung entspricht jedoch nicht einem realen vorausschauenden Fahrverhalten. Besonders bei der Verzögerung ist auffällig, dass erst kurz vor dem Ende eines Manövers (blauer Kasten) der virtuelle Fahrer stark bremst, während der reale, vorausschauende Fahrer eine frühere und sanftere Verzögerung einleitet.

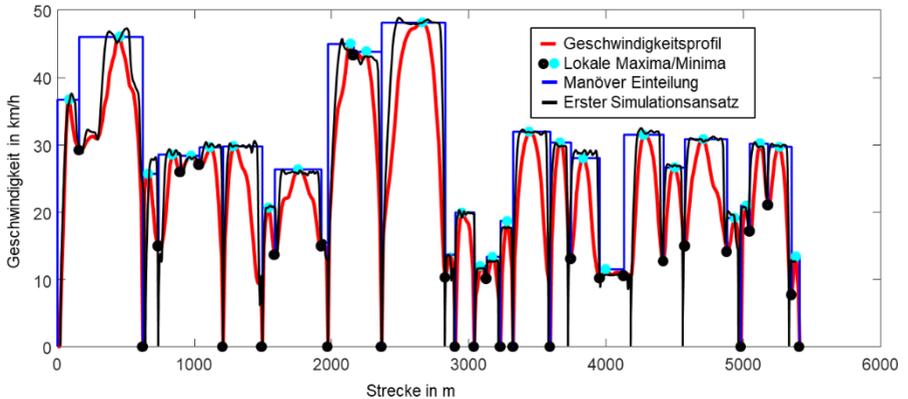


Abbildung 12: Simulation des Referenzfahrzeugs anhand der erstellten Manövereinteilung

3.3.1.1 Abbildung des Verzögerungsvorgangs

Zur Anpassung der Verzögerung können lokale Geschwindigkeitsbegrenzungen in geringem Abstand aufgestellt werden. Dieser Ansatz kann bei Änderung der Randbedingungen, zum Beispiel der Fahrzeugmasse bei unterschiedlichen Antriebskonzepten, jedoch zu variierender Bremspedalkraft führen und folglich zu unrealistischem Regelverhalten (Bremspedalpumpen) führen. In diesem Kontext stellt die Anpassung der Verzögerung mittels linearer Interpolation des lokalen Verzögerungswerts eine hier sinnvolle Alternative dar. Mit der Funktion *Stop Vehicle* des IPG-Truckmaker wird dem Fahrzeug ein lokaler Geschwindigkeitsgradient mittels Vorgabe des Bremswegs oder des Verzögerungswerts übermittelt. Bei Verwendung der Funktion *Stop Vehicle* werden vorgegebene Geschwindigkeitsbegrenzungen weiterhin eingehalten, während Stoppanforderungen durch z.B. ein Stoppschild ignoriert überfahren werden. Die Anpassung der Bremskraft ermöglicht eine menschenähnliche Abbildung eines Bremsmanövers, bei dem ebenfalls die Kraft auf das Bremspedal entsprechend der Wunschgeschwindigkeit kontinuierlich nachgeregelt wird. Dieser Ansatz bildet somit ein ganzes Manöver mit einem Befehl ab und reduziert den Simulationsaufwand und die externen Vorgaben an die verschiedenen Antriebskonzepte (37, S. 30).

Wie in Abbildung 13 zu erkennen ist, bildet die linearisierte Verzögerung der Funktion *Stop Vehicle* nicht jeden Bremsvorgang korrekt ab. Die Abweichung zwischen simuliertem Sollwert und dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil beeinflusst jedoch nicht die Energiebilanz, da auch bei Antriebssystemen mit Rekuperationspotential die kinetische Energie über das Verzögerungsmanöver identisch bleibt. Lediglich die zeitliche Aufteilung innerhalb des Manövers unterscheidet sich vom realen Verlauf. Des Weiteren wird in der Simulation nicht der lineare Sollwert erreicht. Vielmehr stellt sich, ähnlich dem realen Fahrerverhalten, ein parabelförmiger Verlauf ein. Aufgrund dieses Sachverhalts werden Korrekturfaktoren zur

Verlängerung des Bremswegs in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit und des Gefälles eingeführt. Nach dieser Methode wird sichergestellt, dass die Haltepunkte eingehalten werden können und nicht überfahren werden (37, S. 30–34).

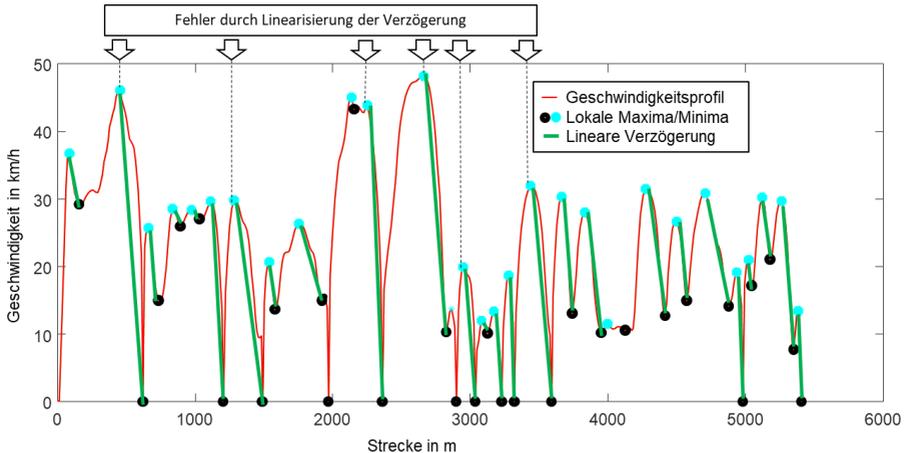


Abbildung 13: Darstellung der Verzögerung mittels IPG-Truckmaker-Funktion *Stop Vehicle*

Abbildung 14 zeigt beispielhaft die Regelung eines Anhaltevorgangs mit angepasstem Verzögerungswert auf. Die blaue Kurve stellt den nach Startgeschwindigkeit und Gefälle angepassten Soll-Verzögerungsverlauf dar. Die gelbe Kurve zeigt den Geschwindigkeitsverlauf bei zu starker Korrektur, die rote bei zu geringer Korrektur. Dabei fällt auf, dass auch bei einer fehlerhaften Korrektur des mittleren Verzögerungswert, der Regelalgorithmus so konzipiert ist, dass einer gegebenen Distanz s vor dem Stoppschild die Geschwindigkeit von 5 km/h erreicht wird. An dieser Stelle wechselt die Fahrzeugführung vom Manöver *Stop Vehicle* zum *IPG-Fahrer* über. Letzterer schließt das Bremsmanöver bis zum Stillstand ab.

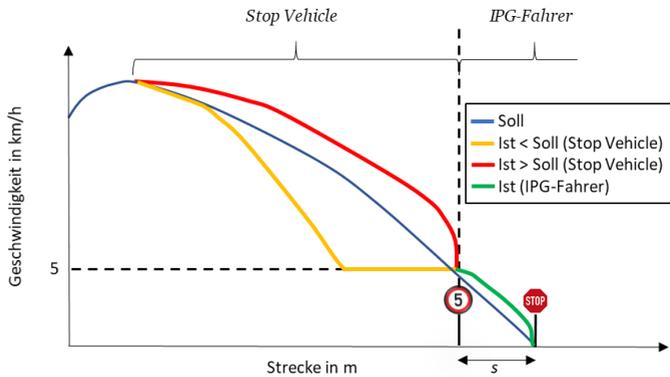


Abbildung 14: Beispiel für die Implementierung eines Verzögerungsmanövers (nach (37, S. 34))

3.3.1.2 Abbildung des Beschleunigungsvorgangs

Die Implementierung der Beschleunigungsvorgänge erfolgt ebenfalls entsprechend der getroffenen Annahmen. Dabei gilt es insbesondere Abschnitte mit freier Beschleunigung zu erkennen und die Beschilderung antriebsstrangneutral zu gestalten. Im Gegensatz zum Verzögerungsvorgang gibt es kein Manöver in IPG-Truckmaker, das diesen Prozess vollständig abdeckt. Es besteht zwar die Möglichkeit, auf das Manöver *Speed Control* zurückzugreifen, jedoch erfüllt es nicht alle Anforderungen. Die Vorgabe der Zielgeschwindigkeit erfolgt unabhängig vom Profilverlauf zwischen Start- und Wunschgeschwindigkeit, sodass kein Sollverlauf definiert werden kann. In diesem Zusammenhang wird auf die Geschwindigkeitsvorgabe mittels Geschwindigkeitsbegrenzungen durch z.B. Verkehrsschilder zurückgegriffen. Bei einer Beschleunigung im Verkehr werden somit in regelmäßigen Abständen Geschwindigkeitsbegrenzungen vorgegeben. Der Beschleunigungsvorgang ist somit zu bestimmten Streckenpunkten, dem Verkehr entsprechend, durch eine Geschwindigkeit limitiert. Bei einer freien Beschleunigung wird sofort die auf dem Abschnitt zulässige maximale Geschwindigkeit freigegeben. Diese Methode zur Erstellung des Geschwindigkeitsprofils ermöglicht eine Unterscheidung der Geschwindigkeitsverläufe verschiedener Fahrzeuge je nach verfügbarem Beschleunigungsvermögen.

3.4 Zusammenfassung der Digitalisierung realer Fahrprofile

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Erstellung einer virtuellen x/y/z-Strecke aus real aufgenommenen Daten vorgestellt. Dabei ist sichergestellt, dass sowohl die Länge als auch das Höhenprofil zueinander korrelieren und die reale Strecke abgebildet wird. Anschließend dient das im realen Referenzfahrzeug aufgenommene Geschwindigkeitsprofil als Grundlage für die Erstellung einer antriebsstrangunabhängige Geschwindigkeitsvorgabe. Dieser Ansatz berücksichtigt die unterschiedlichen Leistungsgewichte der Fahrzeuge. Als Beispiel sind die Leistungsgewichte der betrachteten Abfallsammelfahrzeuge in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Leistungsgewichte der betrachteten Abfallsammelfahrzeuge

	Diesel	FCEV	H₂-VKM	GAS	BEV
Gesamtgewicht in kg	13420	13394	14370	13730	14223
Leistung in kW	220	330	210	222	330
Leistungsgewicht in kW/tonne	16,39	24,64	14,61	16,17	23,20

Weiterhin werden durch die antriebsneutrale Gestaltung der Geschwindigkeitsvorgabe beim Vergleich unterschiedlicher Antriebsstränge die unterschiedlichen Leistungsvermögen der Antriebsquellen berücksichtigt.

4 Fahrzeugmodelle

Der dritte Schritt des methodologischen Ansatzes zur Analyse und Bewertung unterschiedlicher Nutzfahrzeug-Antriebs- und Energiesystemkombinationen aus Abbildung 2 beinhaltet die Modellierung der Fahrzeuge in IPG-Truckmaker. Als erstes wird das Diesel-Referenzfahrzeug aus den realen Fahrversuchen in IPG-Truckmaker überführt. Dabei werden die Fahrwiderstände gemäß den Daten des realen Referenzfahrzeugs parametrisiert. Aus der Summe der Fahrwiderstände werden mittels der Geschwindigkeit die Antriebsleistung und die Antriebsarbeit berechnet. Abschließend wird über die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Übersetzungsverhältnisse des Antriebsstrangs zu jedem Zeitpunkt die Motordrehzahl und das zugehörige Motormoment ermittelt. Dieser methodologische Ansatz ermöglicht es, den Verbrauch des Fahrzeugs durch Rückwärtssimulation zu ermitteln und mit dem realen Kraftstoffverbrauch zu vergleichen. Dieser Vergleich dient zur Validierung der Simulationsumgebung (Strecke und Fahrzeug). Auf dieser Basis wird im nächsten Schritt der Methodik zur Analyse und Bewertung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz unterschiedlicher Antriebs- und Energiesystemkombinationen nach Abbildung 2 der Referenzantriebsstrang durch alternative Konzepte ersetzt und in die Simulationsumgebung überführt (8). Darin werden Fahrzeuge mit Gasmotoren, Brennstoffzellenantriebe (*Fuel Cell Electric Vehicle* - FCEV), batterieelektrischem Antrieb (*Battery Electric Vehicle* - BEV), Wasserstoffverbrenner (H_2 -VKM) und Hybridantriebe (*Hybrid Electric Vehicle* - HEV) dargestellt und verglichen.

4.1 Fahrwiderstände

Die notwendige Antriebsleistung hängt von den Fahrwiderständen des Reifens, der Luft, der Steigung und der Beschleunigung sowie von der gefahrenen Geschwindigkeit nach Formel 4-1 (40, S. 36) ab. Das Produkt aus der Antriebskraft F_{An} und der Geschwindigkeit v bildet die notwendige Antriebsleistung P_{An} .

$$P_{An}[W] = (F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Beschleunigung} + F_{Steigung}) \cdot v \quad 4-1$$

Im Nutzfahrzeug sind auf der ebenen Fahrbahn bis zur maximalen gesetzlich zugelassenen Geschwindigkeit von 80 km/h der Roll- und der Luftwiderstand zu ähnlichen Anteilen am Kraftstoffverbrauch beteiligt (41, 34). Aufgrund der hohen Gesamtmasse ist die Topographie der Strecke ein wichtiger Einflussfaktor für den Kraftstoffverbrauch und somit kann, wie in Abbildung 15 dargestellt, in manchen Fällen der Steigungswiderstand den Hauptteil der Fahrwiderstände ausmachen.

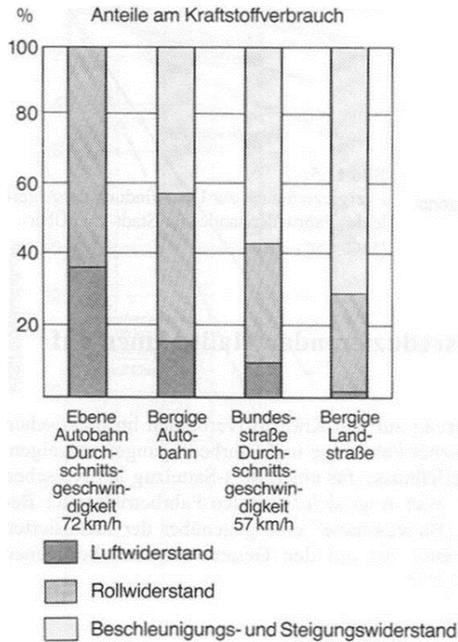


Abbildung 15: Aufteilung des Energiebedarfs eines 40 t Sattelzugs in verschiedenen Anwendungen (41)

4.1.1 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand F_{Roll} setzt sich aus dem Fahrzeuggewicht und dem Rollwiderstandsbeiwert k_R nach Formel 4-2 zusammen und hat besonders im Nutzfahrzeugsegment einen wichtigen Stellenwert, da er je nach Geschwindigkeit einen Anteil von 30 % bis 50 % am Kraftstoffverbrauch besitzt. Zum Vergleich, ein Personenkraftwagenreifen trägt hingegen nur zu 15 % bis 20 % am Gesamtverbrauch bei (40, S. 42).

$$F_{Roll}[N] = mg \cdot k_R \quad 4-2$$

Der Rollwiderstandsbeiwert kann in erster Näherung als konstant und geschwindigkeitsunabhängig betrachtet werden. Abbildung 16 (links) zeigt den linearen Zusammenhang zwischen dem Rollwiderstandsbeiwert k_R und der Fahrzeuggeschwindigkeit. In diesem Zusammenhang sind Werte von 0,007 für den Rollwiderstandsbeiwert eines Nutzfahrzeugreifens bis 80 km/h realistisch (42). Abbildung 16 (rechts) zeigt den Zusammenhang zwischen Normalkraft und Rollwiderstandsbeiwert bei unterschiedlichen Luftdrücken. Die untere Kurve in Abbildung 16 rechts zeigt den minimalen

Rollwiderstandsbeiwert bei gegebener Radlast. In diesem Zusammenhang bieten bei Nutzfahrzeuge Luftdrücke von ca. 8 bar den besten Kompromiss aus Haftung und Rollwiderstand (43).

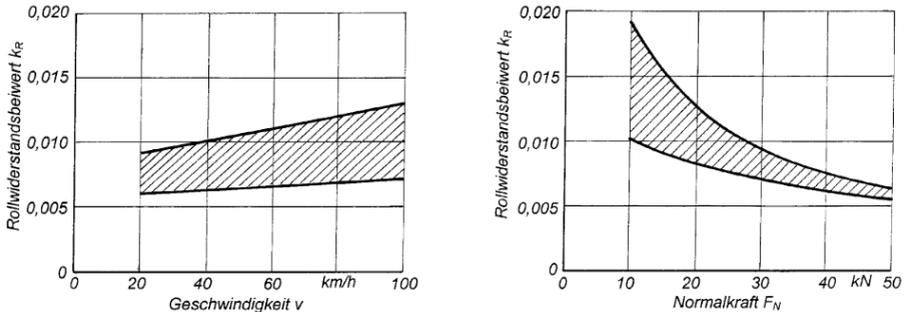


Abbildung 16: (links) Rollwiderstandsbeiwert von Nutzfahrzeugreifen zwischen 20 und 24 Zoll Durchmesser in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit. (rechts) Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen in Abhängigkeit der Radlast bei angepasstem Reifeninnendruck (42)

4.1.2 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand eines Fahrzeugs aus Formel 4-3 entsteht überwiegend durch Druckdifferenzen am Fahrzeug in Strömungsrichtung. Er hängt von der Luftdichte ρ_{Luft} , dem Luftwiderstandsbeiwert c_W und der Querschnittsfläche A sowie von der Fahrzeuggeschwindigkeit v ab (42, S. 49).

$$F_{Luft}[N] = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot c_W \cdot A \cdot v^2 \quad 4-3$$

Durch die unterschiedlichen Bauformen der Nutzfahrzeuge entsteht eine Streubreite der c_W -Werte (siehe Abbildung 17). Moderne Busse erreichen mit 0,37 den niedrigsten Luftwiderstandsbeiwert der betrachteten Nutzfahrzeugtypen (44, 40, S. 67). Bei der Entwicklung von Abfallsammelfahrzeugen hingegen wird aufgrund des Einsatzes und den niedrigen gefahrenen Geschwindigkeiten dem Luftwiderstandsbeiwert wenig Aufmerksamkeit geschenkt, sodass Werte um $c_W=0,75$ (40, S. 50) erreicht werden. Fern- und Verteilerfahrzeug liegen je nach Aufbau bei $c_W=0,5\pm 0,1$ (42, 45).

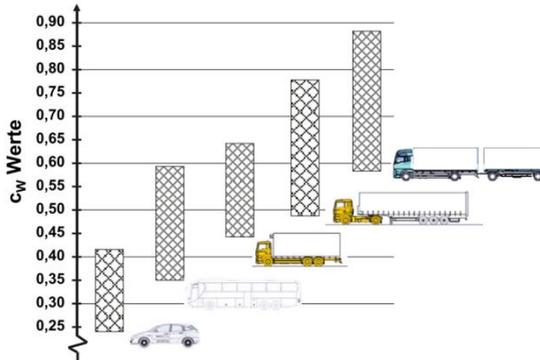


Abbildung 17: Luftwiderstandsbeiwerte unterschiedlicher Fahrzeugtypen (42, S. 50)

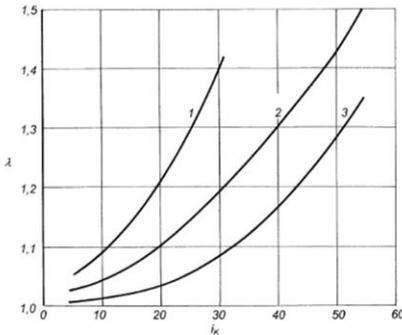
Demnach ist ausgehend von einer Breite von 2,5 m und einer Höhe von 3,8 m bei einem modernen Nutzfahrzeug mit Luftwiderstandsbeiwert von $c_W=0,53$ ein typischer Wert für $c_W \cdot A = c_W \cdot H \cdot B = 0,53 \cdot 3,8 \cdot 2,5 = 5,04 \text{ m}^2$ (46).

4.1.3 Beschleunigungswiderstand

Der Beschleunigungswiderstand eines Körpers beschreibt die Kraft, die zum Überwinden dessen Trägheit notwendig ist. Dabei müssen sowohl der translatorische als auch der rotatorische Teil der Trägheit berücksichtigt werden. Bei der Berechnung der Fahrwiderstände ist es somit üblich, einen Massenzuschlagsfaktor e einzuführen, der die rotatorischen Trägheit des Antriebsstrangs berücksichtigt. In diesem Zusammenhang wird der Beschleunigungswiderstand nach Formel 4-4 berechnet (39, S. 171).

$$F_{\text{Beschleunigung}} [N] = e \cdot m \cdot \ddot{x} \quad 4-4$$

Abbildung 16 stellt den Drehmassenzuschlagsfaktor unterschiedlicher Nutzfahrzeugkonfigurationen dar. Dabei wird deutlich, dass eine Erhöhung des Beschleunigungswiderstands um 50 % in bestimmten Fahrsituation durchaus möglich ist: sowohl die Getriebeübersetzung als auch die Fahrzeuggeschwindigkeit sind neben der Fahrzeugmasse dabei entscheidend. Besonders bei niedrigen Gängen mit hohen Übersetzungsverhältnissen werden Massenzuschlagsfaktoren von $e = 1,2$ bis $e = 1,3$ erreicht. Bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf der Autobahn, je nach Zuladung und Fahrzeugaufbau variiert der Massenzuschlagsfaktor zwischen $1,0 < e < 1,05$ (42).



Drehmassenzuschlagsfaktor λ von Nutzfahrzeugen als Funktion der Getriebeübersetzung i_k :
 1 Lkw mit $m = 15$ t,
 2 Lkw mit $m = 13$ t,
 3 Lkw mit Anhänger

Abbildung 18: Drehmassenzuschlagsfaktor bei unterschiedlichen Nutzfahrzeugkonfigurationen (42)

4.1.4 Steigungswiderstand

Als letzte Fahrwiderstandskraft tritt beim Befahren einer Steigung noch zusätzlich der Steigungswiderstand auf. Er wird nach Formel 4-5 berechnet, wobei α den Winkel zur Horizontale darstellt.

$$F_{\text{Steigung}}[N] = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad 4-5$$

Die Steigfähigkeit eines Sattelzugs variiert zwischen 100 % im ersten Gang bei 7 km/h und etwa 6 % im letzten Gang bei 90 km/h (46).

4.2 Erstellung der Simulationsmodelle der Diesel-Referenzfahrzeuge

Auf Basis der Daten der realen Fahrzeuge werden in den Aufbau-, Antrieb- und Aerodynamik-Modulen in IPG-Truckmaker die Fahrzeugparameter definiert. Als erster Schritt gilt es, den Fahrzeugtyp und den Aufbau zu wählen, sowie die Gesamtleermasse des Fahrzeugs zu definieren. Der Stadtbus und das Fahrzeug für den Verteilerverkehr sind als Zwei-Achsfahrzeuge (4x2) mit Tandembereifung auf der Antriebsachse gemäß des Aufbaus des Mercedes-Benz Citaro (47) und des Mercedes-Benz Atego (48) oder MAN TGL (49) ausgeführt. Das Abfallsammelfahrzeug wird als Drei-Achsfahrzeug (6x2) mit festem Aufbau mit einer angetriebenen Achse mit Tandembereifung dargestellt (50, 48). Das Fahrzeug für den Fernverkehr wird hingegen als Sattelzugmaschine (4x2) mit Auflieger (+2) ausgeführt. Das Leergewicht eines Sattelzugs setzt sich dabei aus Sattelzugmaschine und Auflieger zusammen, wobei die Sattelzugmaschinen der bekannten Hersteller zwischen 7192 kg und 7410 kg wiegen (51). Die Aufbauspezifikationen und die Kenndaten der verwendeten Antriebsstränge der Diesel-Referenzfahrzeuge sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Spezifikationen der Diesel-Referenzfahrzeuge

		Diesel-Referenzfahrzeuge			
		Abfallsammel- fahrzeug (50)	Stadt-Bus (47)	Verteiler- Verkehr (52)	Fernverkehr (46)
Gewicht in kg	Gesamtgewicht vollgetankt	13420	10284	9218	15775
	Fahrzeug Leergewicht	7400	10037	7049	7485
	Anhänger /Aufbau Leergewicht	5823(53)	/	2035	7365(51)
	Zulässiges Gesamt-Gewicht	25700	18000	18000	40000
Geometrie	Radstand in m	4,2	5,9	3,79	4,8
	Länge in m	8,44	12,14	6,25	11,51
	Breite in m	2,5	2,55	2,55	2,55
	Höhe in m	2,83	3,1	3,79	3,79
	Luftwiderstandsbeiwert	0,75	0,37 (44)	0,45 (45)	0,54 (54)
	Querschnitt in m ²	7,08	7,9	10,2	10,2 (54)
	Überhang in m (hinten)	/	3,3	/	3,43
	Antriebsstrang	6x2	4x2	4x2	4x2+2
Chemischer	Tankvolumen in m ³	0,2	0,26	0,125	1
	Tankgewicht in kg	30	30	30	90
	Kapazität in kg	167	217,1	104	835
	Kapazität in kWh	1987	2583	1242	9800

Chemischer Energiewandler	Hubraum in ccm^3	7698	7698	11100 (46)	12900 (55)
	Gewicht in kg	1100	1100	1300	1300
	Leistung in kW	220	220	220	407
	Drehmoment in Nm	1200@ 1200-1400 upm	1200@ 1200-1400 upm	1200@ 1200-1400 upm	2550@ 1000-1500 upm
	Getriebeabstufung	6	6	12	12
	AdBluetank in l	27	27	27	100
	Nebenaggregate in kW	22 (34)	22 (34)	2,52	2,52

Mit 221 721 von 224 978 zugelassenen Sattelzugmaschinen sind über 98,5 % der schweren Nutzfahrzeuge in Deutschland mit einem Dieselmotor ausgestattet. Werden alle Lastkraftwagen in Deutschland mitbetrachtet, sind 93,7 % mit einem Dieselmotor angetrieben (9). Moderne Dieselmotoren sind thermodynamische Energiewandler mit den Verfahrenseigenschaften: luftverdichtend, direkteinspritzend, qualitätsgeregelt und selbstzündend (56, S. 1134). Demnach findet die Gemischbildung im Brennraum statt und entzündet sich spontan ohne externe Zündquelle. Die Regelung des Wunschdrehmoments erfolgt durch das Einbringen von mehr Kraftstoff in den Brennraum. In diesem Zusammenhang wird beim Dieselmotor die Qualität des Luft-Kraftstoffgemisches geändert und nicht die Quantität eines annähernd gleichbleibenden Gemischs, wie es beim Ottomotor der Fall ist. Die motorische Verbrennung wird mit einem idealen Kreisprozess abgebildet. Der Seiliger-Prozess bildet die Verbrennung am oberen Totpunkt durch ein Gleichraumprozess gefolgt von einer Gleichdruckphase ab. Dabei erreicht der ideale Dieselmotor mit einem Verdichtungsverhältnis von $\varepsilon = 16$, einem lokalen Luftverhältnis von $\lambda = 2$ und einem Spitzendruck von 150 bar einen thermischen Wirkungsgrad von $\eta = 62\%$ (56, S. 20). Die reale Dieselverbrennung beinhaltet jedoch Verluste durch unvollständige Verbrennung, Wandwärmeverluste, Ladungswechselperluste, Reibungsverluste und die Verwendung realer Medien und Prozesse, sodass der reale Wirkungsgrad im Bestpunkt des Kennfeldes ca. $\eta = 45\%$ bis 46% beträgt (57, 58, S. 20).

Das Lambda-Temperatur-Kennfeld aus Abbildung 19 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der lokalen Qualität des Gemischs, der lokalen Flammentemperatur und den entstehenden Schadstoffemissionen. Die Optimierung von Einspritzsystemen und Maßnahmen zur Gemischaufbereitung können in Zukunft das dieseltypische Soot- NO_x -Trade-Fahrzeugmodelle

off in günstigere Bereiche des Lambda-Temperatur-Kennfelds verschieben und somit die Schadstoffemissionen reduzieren.

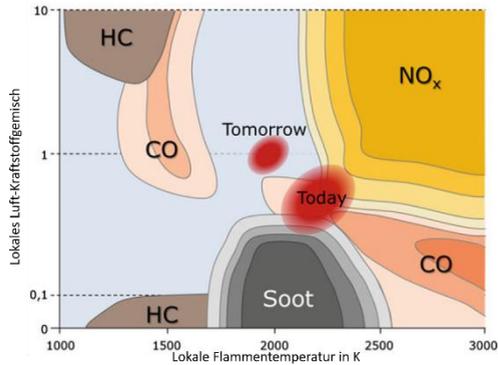


Abbildung 19: Lambda-Temperatur-Kennfeld eines aktuellen Dieselmotors (56, S. 1134)

Das Einspritzsystem eines modernen Dieselmotors wird als Common-Rail-System mit Einspritzdrücken um 1800 bar (59, S. 55) ausgeführt. Des Weiteren ermöglicht die Aufladung, durch typischerweise Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG), die Nutzung des maximalen Drehmoments über einen breiten Drehzahlbereich. Der in Abbildung 20 dargestellte Dieselmotor erreicht sein maximales Drehmoment über 42 % seines Drehzahlbereichs (950 upm bis 1500 upm).

CURSOR 11	Typ	F3G
Motorleistung	kW (PS)	353 (480)
bei Drehzahl	min ⁻¹	1500 - 1900
Max. Drehmoment	Nm	2250
bei Drehzahl	min ⁻¹	950 - 1500
Zylinderzahl	-	6
Bohrung x Hub	mm	128 mm x 144 mm
Hubraum	cm ³	11100
Mittlere Kolbengeschwindigkeit	m/s	9,1 bei Nenndrehzahl
Motorbremsleistung	kW / PS	372 kW / 506 PS bei 2400 min ⁻¹
Spez. Kraftstoffverbrauch	g/kWh	.. bei max. Drehmoment
Grüner Drehzahlbereich	min ⁻¹	1000-1500
Gewicht ohne Öl	kg	1200
Einzyliner-Luftpresser	cm ³	352
Geräuschwerte entsprechen	-	70/157/EG
einschließlich aller Änderungen	-	1999/101/EG
Abgaswerte entsprechen Richtlinie	-	595/2009/EG Euro VI

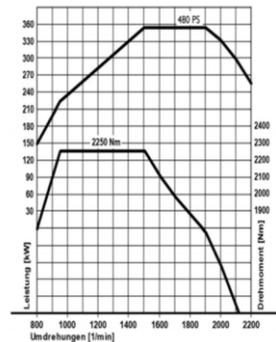


Abbildung 20: Kenndaten eines modernen Dieselmotors mit 11100 L Hubraum (46)

Modernen Dieselmotoren (Stand EURO VI) ist ein Abgasnachbehandlungssystem mit Diesel-Oxidationskatalysator (DOC), Diesel-Partikelfilter (DPF) und selektive katalytische Reduktionskatalysator (SCR) nach Abbildung 21 links nachgeschaltet. Die Reduktion der

Stickoxide findet im SCR-Katalysator mit Hilfe der zuvor eindosierten wässrigen Harnstofflösung (Markenname AdBlue®) statt. Der Harnstoff reagiert in Thermolyse und Hydrolyse zu Ammoniak (NH₃) und Kohlendioxid (CO₂). Wie in Abbildung 21 rechts dargestellt, erreicht eine EURO VI Abgasnachbehandlungsanlage in großen Bereichen des Kennfelds Stickoxidkonvertierungsraten von über 85 % (60). Zur Adressierung der kommenden strengeren Emissionsgesetzgebung EURO VI werden die zukünftigen Diesel-Abgasnachbehandlungsanlagen mit einem zweiten, motornahen SCR-Katalysatorsystem aufgebaut werden. Der zusätzliche CO₂-Eintrag durch den reagierenden Harnstoff könnte somit in Zukunft zunehmen (61, 62).

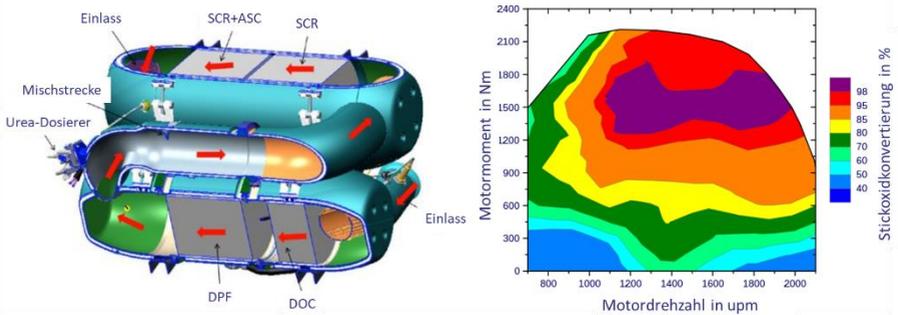


Abbildung 21: Aufbau und Stickoxidkonvertierungseffizienz einer EURO VI Diesel Abgasanlage (60)

Der Antriebsstrangwirkungsgrad eines Fahrzeugs mit Diesel-Verbrennungsmotor setzt sich aus den einzelnen Wirkungsgraden des Motors, des Getriebes und des Differentials zusammen. In Tabelle 3 ist die Wirkungsgradkette eines modernen Diesel-Antriebsstrangs im Bestpunkt dargestellt.

Tabelle 3: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette eines Fahrzeugs mit dieselmotorischem Antrieb

Teilsystem	Wirkungsgrad im Bestpunkt	Gesamt
Well-to-Tank	/	100
Verbrennungsmotor	46 % (63, S. 67)	46
Getriebe	Direkter Gang 98 % (64, S. 13)	45
	Indirekter Gang 96 % (64, S. 13)	
Differential	96 % (64, S. 13)	43

4.3 Energiebedarf zur Konditionierung der Fahrgastzelle

Der Vergleich der Antriebsstränge in den unterschiedlichen Nutzfahrzeuganwendungen soll unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur erfolgen. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, die Temperierung der Fahrgastzelle zu berücksichtigen. Die Interaktion zwischen der Umgebung und dem Fahrzeug findet über drei Mechanismen statt (65) und wird über Formel 4-6 beschrieben.:

- Luftaustausch,
- Wärmeübertragung,
- solare Einstrahlung.

$$\dot{Q}[W] = \dot{Q}_{\text{Übertrag}} + \dot{Q}_{\text{Leitung}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung}} \quad 4-6$$

Der Wärmeübertrag des Luftaustauschs $\dot{Q}_{\text{Übertrag}}$ nach Formel 4-7 setzt sich aus kontrolliertem Luftwechsel über die Lüftung und ungewollter Infiltration durch Dichtungen und Spalten zusammen und ist vom Fahrzeug und vom Nutzerverhalten abhängig. Dabei stellen \dot{m}_{Luft} den Frischluftmassenstrom im Fahrzeug und c_p die spezifische Wärmekapazität der Luft dar.

$$\dot{Q}_{\text{Übertrag}} [W] = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{Innen}} - T_{\text{Außen}}) \quad 4-7$$

Die Wärmeleitung über die Fahrzeugkarosserie \dot{Q}_{Leitung} ist mathematisch über eine Reihenschaltung von Widerständen und Wärmekapazitäten gut beschreibbar, da alle Materialschichten bekannt sind. Allerdings hängen die Wärmeübergänge an Innen- und Außenseite von der Fahrzeuggeschwindigkeit ab und sind somit von der Fahrsituation abhängig (65). Vereinfacht lässt sich der Wärmeübertrag durch die Karosserie \dot{Q}_{Leitung} laut dem Fourierschen Gesetz von Formel 4-8 mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten $U = k \cdot A_{\text{Leitung}} = 1/R_{th}$ und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum beschreiben (66, S. 35).

$$\dot{Q}_{\text{Leitung}} [W] = U \cdot (T_{\text{Innen}} - T_{\text{Außen}}) = k \cdot A_{\text{Leitung}} \cdot (T_{\text{Innen}} - T_{\text{Außen}}) \quad 4-8$$

Für den $k \cdot A$ Wert wird in der Literatur 60 W/K bei einem Fahrgastraum von 2,5 m³ angenommen. Zur Umrechnung auf andere Volumina dient Formel 4-9 (67, S. 74).

$$k \cdot A_2 = 60 \cdot \left(\frac{V_2}{2,5}\right)^{\frac{2}{3}} \quad 4-9$$

Der Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung $\dot{Q}_{\text{Strahlung}}$ ist von der Strahlungsintensität I , der Transmission des Körpers τ , dem Winkel zur Flächennormale und der Richtung der Sonne

η sowie von der Scheibenfläche $A_{Strahlung}$ abhängig. So lässt sich die Wärmestrahlung $\dot{Q}_{Strahlung}$ vereinfacht nach Formel 4-10 berechnen (67, S. 111–113).

$$\dot{Q}_{Strahlung}[W] = \sum (A_{proj} \cdot I \cdot \tau) = \sum (A_{Strahlung} \cdot \cos\eta \cdot I \cdot \tau)$$

4-10

Die mittlere Gesamtstrahlung für jeden Monat über das gesamte Jahr ist in Abbildung 22 dargestellt. Dabei sind jedoch Tageshöchstwerte bis zu 1000 W/m^2 bei strahlendem Sonnenschein an einem Sommertag erreichbar (65, 67).

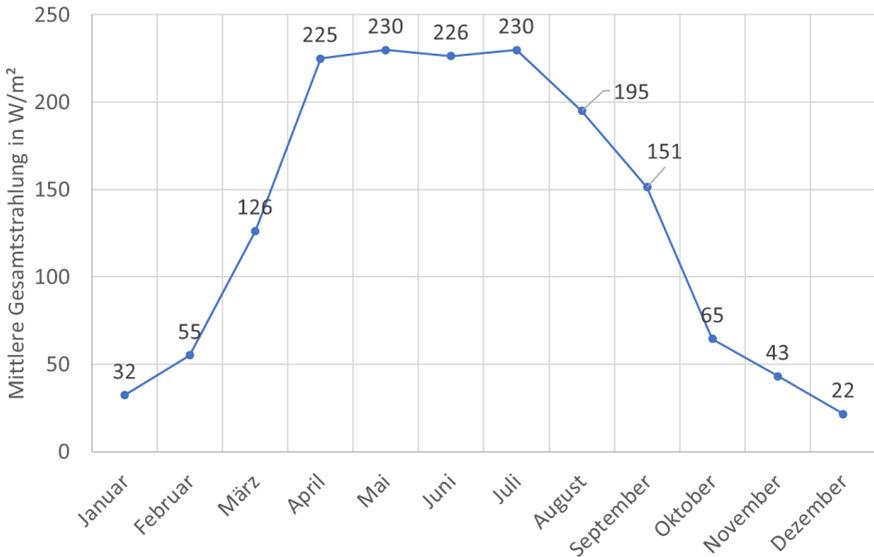


Abbildung 22: Mittlere Gesamtstrahlung in Deutschland in 2020 (68)

In diesem Kontext stellten sich für die betrachteten Umgebungsbedingungen für jeden Fahrzeugtyp die Parameter nach Tabelle 4 ein.

Tabelle 4: Umgebungsparameter zur Berechnung der Wärmeströme im Fahrzeug

Variablen	Müll-Fahrzeug	Stadtbus	Verteiler/-Fern-Verkehr-Lkw
Spezifische Wärmekapazität der Luft c_p in $\frac{J}{kg \cdot K}$	1010		
Frischlufmassenstrom in kg/s	0,1	0,7	0,1
Innenraumtemperatur in $^{\circ}C$	22		
Fahrgastraumvolumen in m^3	6	66,1	8
Emissionsgrad ε_e	0,8 (weißer Lack(69))		
Stefan-Boltzmann-Konstante σ in $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$	$5,67 \cdot 10^{-8}$		
Scheibenfläche $A_{Strahlung}$ in m^2 mi bei 45° Sonnenwinkel zur Scheibennormalen	2,1 (Front- Scheibe)	12,2 (Seiten- Scheibe)	2,1 (Front-Scheibe)
Transmission τ in	0,8 (67, S. 114)		
Strahlungsintensitäten in W/m^2 bei			
-20 °C bis 5 °C	30		
0°C	30		
10°C	200		
25°C	350		
40°C	900		
Elektrische Zusatzheizung für die ersten 10 min nach Start in kW	1,2 (67, S. 89)		

Anhand der Formeln 4-6 bis 4-10 und der Daten aus Tabelle 4 lassen sich die erforderliche Heiz- und Kühlleistungen zur Konditionierung des Innenraums auf 22 °C für jedes Fahrzeug berechnen. Dabei wird die Heizleistung durch Körperwärme der Passagiere vernachlässigt und es wird der Energiebedarf zum Erhalt der Innenraumtemperatur bei Außenluftbetrieb betrachtet. Des Weiteren wird der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit nicht als Variable

mitberücksichtigt, obwohl sie die Konvektion der Karosserie und Leistung der Klimaanlage beeinflusst. Abbildung 23 stellt die erforderlichen Kühl- und Heizleistungen für einen zwölf Meter langen Bus, ein Abfallsammelfahrzeug und einem Verteiler- oder Fernverkehr-Lastkraftwagen dar. Dabei ist das Volumen des Fahrgastraumes der Haupteinflussfaktor für die notwendige Leistung zur Konditionierung. In diesem Zusammenhang sind bei -10 °C und 40 °C beim Busbetrieb bis zu 20 kW notwendig, während die anderen Nutzfahrzeugtypen weniger als 8 kW benötigen.

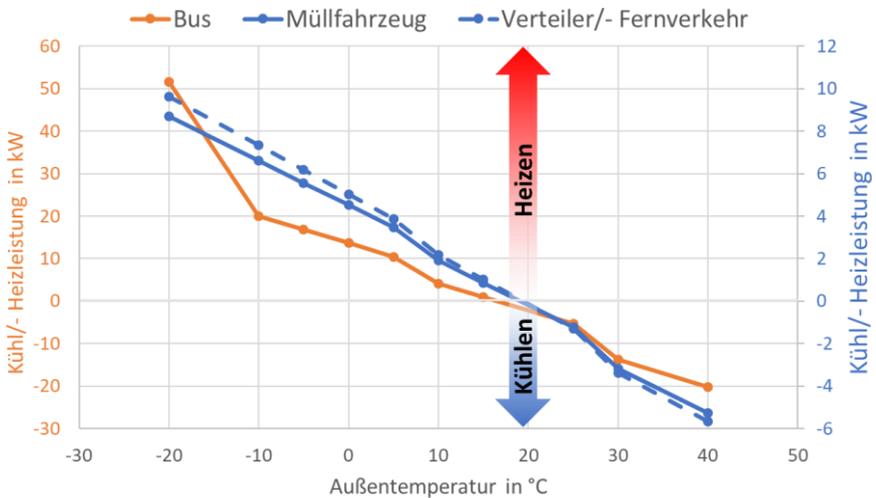


Abbildung 23: Erforderliche Kühl- und Heizleistung zur Konditionierung des Fahrgastraumes auf 22°C

Die Verluste eines Verbrennungsmotors werden gemäß Abbildung 24 in Wärme umgesetzt. Bei einer Nutzarbeit von 42 % werden somit 58 % der im Kraftstoff gebundenen Energie als Wärme an die Umgebung abgegeben. Davon wird in etwa die Hälfte über das Abgas abgeführt. Es bleiben somit ca. ein Viertel der Motorleistung, die über das Kühlsystem abgeführt werden muss. Durch Kopplung über Wärmetauscher mit den Heizungssystem des Innenraums kann diese Energie zum Heizen der Fahrgastzelle genutzt werden (56, S. 656).

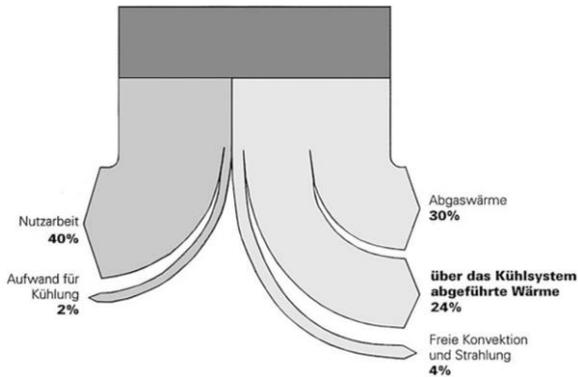


Abbildung 24: Wärmebilanz eines Nutzfahrzeug-Dieselmotors (56, S. 656)

4.4 Validierung des Diesel-Referenzfahrzeugmodells

Im vierten Abschnitt des methodologischen Ansatzes aus Abbildung 2 werden die Simulationsmodelle der Diesel-Referenzfahrzeuge auf den nach 3.2 erstellten Strecken validiert. Dabei wird der energetische Vergleich zwischen Simulation und realer Fahrt herangezogen. Der gemessene Kraftstoffverbrauch im realen Versuch dient dabei als Referenz für das simulierte Fahrzeug. Im Falle des Stadtbusses stehen keine Motordaten zur Verfügung, sodass die Validierung anhand ausgewählter wissenschaftlicher Arbeiten durchgeführt wird.

In diesem Abschnitt wird exemplarisch für die Validierung einer Simulation mit bekannten Motordaten die Validierung der Abfallsammelroute dargestellt. Dieser Ansatz wird ebenfalls beim Verteiler- und beim Fernverkehr-Lastkraftwagen verfolgt. Der Fall der Validierung der Simulation ohne reale Motordaten wird mit dem Stadtbus dargestellt.

4.4.1 Simulationsvalidierung mittels Daten aus realen Fahrversuchen am Beispiel des Abfallsammelfahrzeugs

Für das Abfallsammelfahrzeug stehen die in der Realfahrt aufgenommenen Strecken-, Fahrzeug- und Motordaten zur Verfügung, sodass über die Zeit integriert der Gesamtverbrauch berechnet wird. Unter Annahme von einer Dichte von Diesel von $\rho_{\text{Diesel}} = 835 \text{ kg/m}^3$ und einem Heizwert $Hu_{\text{Diesel}} = 11,8 \text{ kWh/kg}$ lässt sich die im verbrauchten Kraftstoff gebundene Energie berechnen. Über den zeitlichen Verlauf des Kraftstoffverbrauchs lassen sich mit Hilfe des Geschwindigkeitsverlaufs die Anteile der einzelnen Fahrwiderstände am Gesamtverbrauch ermitteln. Abbildung 25 zeigt dabei eine typische Aufteilung der Antriebsenergie für ein Nutzfahrzeug bei unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten.



Abbildung 25: Aufteilung der Fahrwiderstände eines Nutzfahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit (34)

Abbildung 26 stellt den Verlauf des kumulierten realen und simulierten Verbrauchs sowie die über 300 s gemittelte Fahrzeuggeschwindigkeit über die Fahrstrecke dar. Im kumulierten Verbrauch eines Abfallsammelfahrzeugs sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Bereiche zu erkennen: die Zu- und Abfahrten zu bzw. von den Sammelgebieten, im weiteren Verlauf als Transportphasen beschrieben, und die Sammelphasen. In den Transportphasen ist die Geschwindigkeit durch den Verkehr, den gesetzlichen Vorgaben, der Topografie und der Streckenführung vorgegeben.

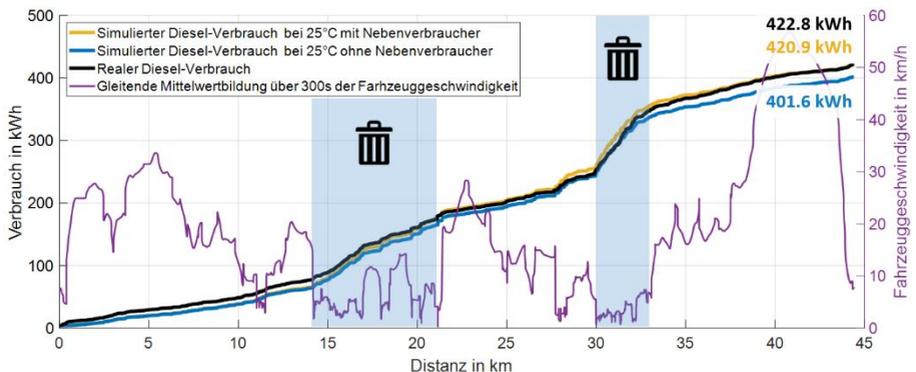


Abbildung 26: Real gemessener und simulierter Kraftstoffverbrauch eines Müllsammelfahrzeugs

Nach Abbildung 25 und Abbildung 26 ist beim Abfallsammelfahrzeug in den Sammelphasen mit mittleren Geschwindigkeiten unter 10 km/h hauptsächlich der Rollwiderstand der Reifen für den Kraftstoffverbrauch verantwortlich, während der Luftwiderstand bis zu 50% des Verbrauchs in den Transportphasen ausmacht. Zusätzlich zum Verbrauch als Antriebsenergie kommt noch im Falle des Abfallsammelfahrzeugs der Nebenverbrauch der Müllpresse in den Sammelphasen hinzu.

In Abbildung 26 sind zwischen Kilometer 14 und 21 und zwischen 30 und 33 die Sammelphasen durch die niedrigeren Fahrzeuggeschwindigkeiten und dem höheren Gradienten im kumulierten Verbrauch zu erkennen (blau hinterlegt). Dabei ist auch ein Anstieg der Differenz zwischen dem Verbrauch mit und ohne Nebenverbraucher (gelbe und respektive blaue Kurve) zu erkennen. Demnach ist zur korrekten Abbildung des Gesamtverbrauchs die richtige Dimensionierung der Nebenverbraucher elementar. In diesem Zusammenhang deuten die vergleichbaren Gradienten der realen und simulierten kumulierten Verbräuche in den Sammelphasen auf eine korrekte Dimensionierung der Rollwiderstandsparameter hin. Zu guter Letzt weisen die parallel verlaufenden Kurven der realen und simulierten Verbräuche in den Transportphasen auf die richtige Parametrierung der Luftwiderstandsparameter hin.

Im vorgestellten Ansatz lassen sich durch den Vergleich der Kraftstoffverbräuche in unterschiedlichen Fahrsituationen die Simulationsparameter der einzelnen Fahrwiderstände überprüfen und validieren.

Der Abgleich des simulierten Verbrauchs mit dem real gemessenen Verbrauch bestätigt die korrekte Dimensionierung der Fahrwiderstandsparameter und Nebenaggregate: mit einem Verbrauchsunterschied von weniger als 1 %, ist die Abbildungsgüte höher als die Varianz in den realen Fahrversuchen: über drei Messtage auf der abgebildeten Abfallsammelroute wurden Verbräuche mit ± 2 % gegenüber dem abgebildeten Mittel gemessen.

Die Validierung der Fahrzeuge für den Verteiler- und Fernverkehr erfolgt analog zum hier vorgestellten Ansatz.

4.4.2 Simulationsvalidierung ohne reale Motordaten am Beispiel des Stadtbusses

Die Messdaten des Stadtbusses beinhalten keine Motordaten, sodass die Simulationsergebnisse nicht direkt anhand des realen Dieselverbrauchs validiert werden können. In diesem Zusammenhang werden stattdessen Ergebnisse vergleichbarer Studien zugrunde gelegt. In diesem Abschnitt werden die Erstellung und Bewertung der Fahrzeugmodelle mit alternativen Antrieben aus Kapitel 4.5 vorweggenommen. Der methodologische Ansatz aus Abbildung 2 hat jedoch weiterhin Bestand, sodass methodologisch zunächst die richtige Parametrierung des Diesel-Referenzfahrzeug sichergestellt werden muss.

In „*Berechnung des Energieverbrauchs und Treibhausgasemissionen des ÖPNV*“ des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (70) werden die Verbräuche verschiedener Stadtbusse unter variierenden Verkehrsbedingungen dargelegt. Dabei hat je nach Verkehrslage, ein Stadtbuss mit 18 t zulässigem Gesamtgewicht einen Verbrauch von 30,3 l/100 km im frei fließenden Verkehr (a), 44,1 l/100 km im dichten Verkehrsfluss (b) und 56,4 l/100 km im Stop-and-Go-Verkehr (c) (70, S. 23).

Die „Busstudie“ des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (71) gibt die Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Emissionen eines mit fossilem Diesel betriebenen Stadtbusses mit 1,21 kg CO_{2,eq}/km an. Der Betrieb eines Erdgasbusses (CNG) ist hingegen mit 1,16 kg CO_{2,eq}/km angegeben (71, S. 9).

Im Tank-to-Wheel Vergleich unterschiedlicher Stadtbusantriebssystemen auf drei verschiedenen Routen von Millo. F et al. (72) werden die Antriebsstränge Diesel, Hybrid-Diesel (HEV-Diesel), Hybrid-Wasserstoff-Verbrenner und Wasserstoff-Brennstoffzelle (FCEV) betrachtet. Dabei verbraucht der Diesel-Stadtbuss im Mittel über den Braunschweig-, den Ghillingham- und den MTLB-Zyklus 41 kg_{Diesel}/100 km. Die Hybridantriebe mit Diesel- und Wasserstoffverbrenner (H2-VKM) verbrauchen respektiv 37,8 kg_{Diesel}/100km und 13,7 kg_{H2}/100 km während der Brennstoffzellenbus 9,4 kg_{H2}/100 km benötigt (72).

Unter Berücksichtigung der 55,17 km Länge der simulierten Darmstädter Buslinie, dem Heizwert und dem Tank-to-Wheel Emissionsfaktor jedes Energieträgers, lassen sich die Verbräuche in kWh berechnen und mit den simulierten Verbräuche nach Tabelle 5 vergleichen (Delta zur Simulation).

Tabelle 5: Validierung der Fahrzeugsimulation mittels Literaturwerte

Verbräuche in kWh	Diesel	HEV-Diesel	CNG	H2-VKM	FCEV
Simulation bei 0°C	251,4	235,0	262,7	272,8	159,9
BMVI	166 (a) 241 (b) 309 (c)	/	/	/	/
DVGW e.V. (71)	253,8	222,3	299,0	/	
Millo et al. (72)	271,1	248,4	/	284,7 (aus HEV-H2)	173,5
Delta zur Simulation					
	Diesel	HEV-Diesel	CNG	H2-VKM	FCEV
BMVI	4,1 % (b)	/	/	/	/
DVGW e.V.	0,94 %	0,59 %	12,1 %	/	13,2 %
Millo et al.	7,3 %	5,4 %	/	4,1 %	8 %

Das gefahrene Profil beeinflusst den spezifischen Verbrauch maßgeblich: In den drei von Millo et al. (72) simulierten Routen unterscheiden sich die spezifischen Verbräuche um 17 % bis 19 % je nach Antriebsstrangkonzzept.

Die Abweichung der simulierten Verbräuche mit den Verbrauchsergebnissen von Millo et al. liegen zwischen +4 % und +8 % und lassen auf eine korrekte Dimensionierung der motorischen Größen der Diesel-, Diesel-Hybrid-, Wasserstoffverbrenner- und Brennstoffzellenbusse schließen. Die Verwendung der bestmöglichen Gasmotortechnologie gegenüber einem veralteten Stand in der „Busstudie“ des DVGW e.V. erklärt den um 12 % niedrigeren Verbrauch in der Simulation. Dies entspricht einer Wirkungsgradverbesserung um ca. 2 %.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Verbrauchsdaten der genannten Studien des BMVI, des DVGW e.V. und vom Millo et al. zeigen, dass die Dimensionierung und Parametrierung der motorischen und der geometrischen Daten des Stadtbusses eine gute Abbildung der realen Fahrzeuge darstellen.

4.5 Erstellung von Fahrzeugmodellen mit alternativen Antrieben

Die validierten Diesel-Referenzfahrzeuge auf den digitalisierten Strecken aus 4.4 ermöglichen die Substitution des Dieselerbrennungsmotors mit einem alternativen Antriebssystem samt Energiespeicher und Energieversorgung. In diesem Abschnitt werden die ausgewählten Antriebsstränge beschrieben und es wird ein Überblick über die jeweils verfügbaren Technologien gegeben. Die Parametrierung der Vergleichsfahrzeuge erfolgt entweder mittels vorhandener Datenblätter oder anhand des „*Tank-to-Wheel Reports v5*“ der Europäischen Kommission und des Joint Research Centre (64). Dabei wird die Weiterentwicklung der einzelnen Antriebsstränge mitberücksichtigt, sodass ein Technologiestand von ca. 2025 in den Simulationen dieser Arbeit dargestellt wird.

4.5.1 Diesel-Hybrid Fahrzeug

Auch im Nutzfahrzeugsegment findet die Hybridisierung der Antriebsstränge Anwendung. Dabei werden die elektrifizierten Antriebsstränge je nach Anwendung entweder als paralleler oder serieller Hybrid aufgebaut (siehe Abbildung 27). Während beim parallelen Hybrid sowohl der Verbrenner als auch der Elektromotor Drehmoment an die Räder leiten kann, erfolgt der Vortrieb beim seriellen Hybrid ausschließlich über den Elektromotor. In der seriellen Konfiguration liefert der chemische Energiewandler über den Generator elektrische Energie an die Batterie. Diese speist wiederum den elektrischen Antrieb mit Strom zur Erzeugung der Antriebsleistung.

Parallele Hybride kommen aufgrund der Antriebsstrang-Performance überwiegend in Anwendungen mit längeren Fahrstrecken und hohen Geschwindigkeiten zum Einsatz (z.B. in Fahrzeugen für den Fernverkehr). Serielle Hybride hingegen, haben den Vorteil des modularen Aufbaus mit austauschbaren Komponenten. Der Verbrenner und der Generator können durch eine andere Energiequelle ersetzt werden (z.B. einer Brennstoffzelle). So stellen Busse und innerstädtische Fahrzeuge typische Anwendungen für einen seriellen Antriebsstrang dar (56, S. 1149–1151).

Abb. 1 Parallelhybrid.

- 1 Verbrennungsmotor;
- 2 elektrischer Energiespeicher;
- 3 Kupplung;
- 4 Leistungselektronik;
- 5 elektrische Maschine;
- 6 Getriebe

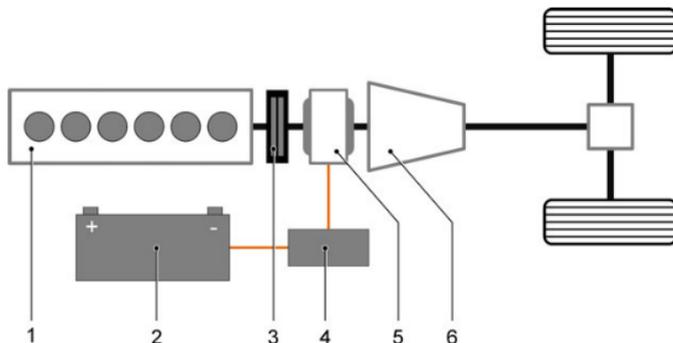


Abb. 2 Serieller Hybrid.

- 1 Verbrennungsmotor;
- 2 Hochvoltgenerator;
- 3 Leistungselektronik;
- 4 elektrischer Energiespeicher;
- 5 elektrische Maschine

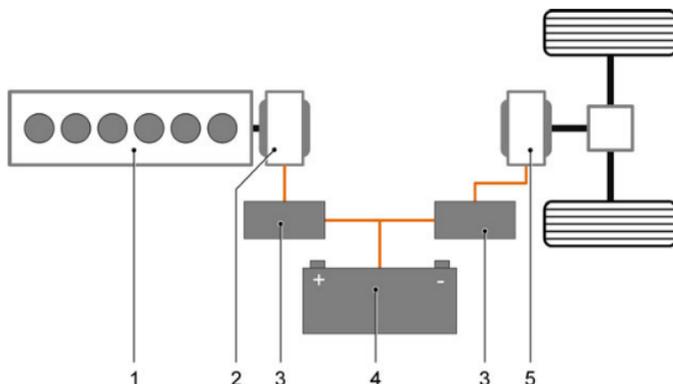


Abbildung 27: Antriebsstrangaufbau eines parallelen und eines seriellen Hybrids (56, S. 1150)

Im Falle eines parallelen Hybridfahrzeugs in der P2-Konfiguration ermöglicht die im Antriebsstrang integrierte elektrische Maschine (E-Maschine) sowohl das Rekuperieren bei einem Verzögerungsmanöver als auch das Boosten bei einer Beschleunigung. So werden bei einem Gefälle von 1,5 % bei einem 40 t Sattelzug bei 85 km/h über 30 kW rekuperiert. In diesem Zusammenhang ist bei der Elektrifizierung eines Sattelzugs mit einem 120 kW Elektromotor und einer 8 kWh Batterie (mit 2 kWh Ladehub) eine Einsparung von bis zu 5 % möglich (siehe Abbildung 28) (56, S. 1152–1153). Der Vergleich zwischen den parallelen Hybridisierungstypen zeigt, dass beim P2-Hybrid, der ein vollelektrisches Fahren bei abgekoppelten Verbrennungsmotor ermöglicht, die größte Verbrauchsreduktion möglich ist. Dabei sind im Autobahnbetrieb im Mittel über verschiedene Zuladungen und Verkehrsdichten eine Reduktion des Verbrauchs um 10 % möglich (73).

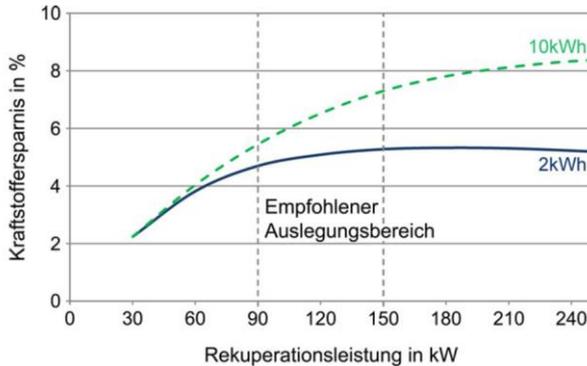


Abbildung 28: Einsparpotential durch Elektrifizierung eines Sattelzugs mit parallelem Hybrid (56, S. 1153)

Im Verteilerverkehr ist ein Einsparpotential durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs von bis zu 15 % zu erwarten (74), jedoch wird im städtischen Verkehr die Kraftstoffeinsparung eher durch die Start-Stopp-Funktion erzielt. Auch im Verteilerverkehr sind 2 kWh Batterien bei 160 kW Elektromotoren üblich (48, 49).

Im Busbetrieb ist durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs eine Wirkungsgradsteigerung gegenüber einem Standard Diesel-Stadtbus von ca. 3 % möglich. Bei einem Anstieg des Wirkungsgrads von 20 % auf 23 % entspricht dies einer Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs um 12 % (72, 71).

Weitere Konzepte zur Hybridisierung des Nutzfahrzeugverkehrs bietet die Hybridisierung des Aufliegers. Demnach ist die Ausführung als P4-Hybrid über einen Anhänger mit elektrischer Achse eine weitere Möglichkeit den Verbrauch zu reduzieren (75). Untersuchungen zeigen, dass der elektrifizierte Trailer mit 150 kW Motorleistung und einer 100 kWh Batterie zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Fernverkehr um bis zu 25 % führen kann (76, 77).

4.5.2 Gasfahrzeug

Gasmotoren werden in den allermeisten Anwendungen als fremdgezündete Ottomotoren mit Saugrohreinblasung ausgeführt. Sie bieten im Nutzfahrzeugbetrieb Vorteile hinsichtlich der Betriebskosten und der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz unter der Voraussetzung, dass der Methanschluß bei der Verbrennung minimiert wird. Abbildung 29 zeigt das Potential der Nutzung von Methan als Energiequelle im Fahrzeug. Dabei ist zu erkennen, dass trotz des niedrigeren Wirkungsgrads des Ottomotors im Vergleich zum Dieselmotorischer Antrieb, bis zu 15 % $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ mit fossilem Gas eingespart werden können und sogar eine Reduzierung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen um bis zu 94 % mit komprimiertem synthetischen Gas (CSNG – in Abbildung 29 *Compressed Synthetic Methane* - CSM) aus erneuerbarem Strom möglich ist (78).

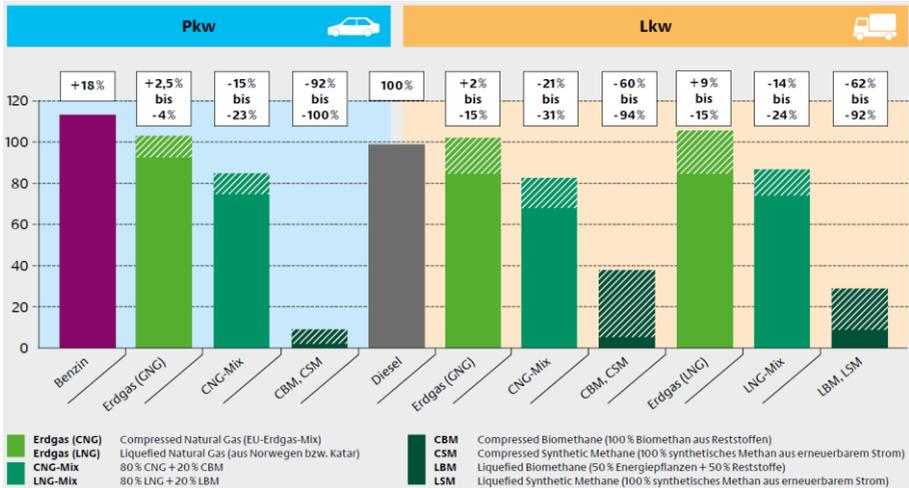


Abbildung 29: Well-to-Wheel Treibhausgasbilanz von Erdgasfahrzeuge (78, S. 11)

4.5.2.1 Tanksystem eines Fahrzeugs mit Gas-Verbrennungsmotor (63, S. 240–242)

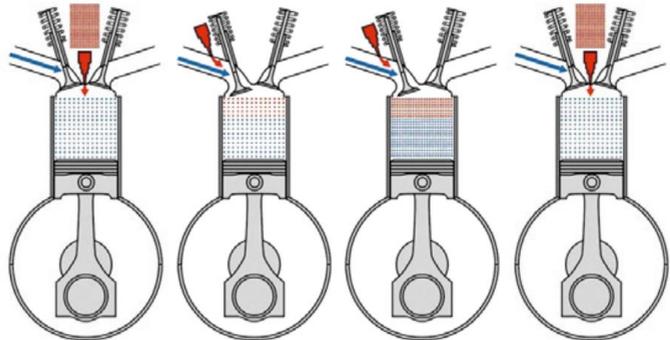
Gasförmige Erdgasspeicher sind im Fahrzeug zylindrisch mit gerundeten Enden ausgeführt. Es gibt vier verschiedene Typen, von Vollmetall- bis voll Fiberglas/Carbon-Tanks, wobei besonders der Typ-1 Vollmetalltank im Nutzfahrzeug Anwendung findet. Die Vorteile eines solchen Tanksystems sind die hohe Energieaufnahmefähigkeit im Crashfall sowie die hohe Widerstandsfähigkeit im Falle von Abrasion. Zudem ist der Betankungsvorgang aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von Vergütungsstahl vergleichsweise effizient. Die Wärme wird schnell nach außen geleitet, sodass ein hoher Füllgrad erreicht werden kann. Im Vergleich zu einem Nutzfahrzeug-Dieseltank, wird das Mehrgewicht des Tanks durch die geringere Masse des Kraftstoffs teilweise kompensiert, aber nicht völlig ausgeglichen. Moderne faserverstärkte Typ-4-Kunststofftanks sind deutlich leichter und erreichen spezifische Gewichte von 0,35 kg/l Tankvolumen (63, S. 242). In diesem Zusammenhang wiegt ein 650 l 200 bar CNG Typ-4-Drucktank ca. 250 kg oder 0,24 kg/kWh. Zum Vergleich, ein Dieseltank hat ein spezifisches Gewicht von 0,1 kg/kWh. Liquefied Natural Gas oder LNG-Kryogentanks erreichen durch Abkühlung des Gases auf $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei ca. 10 bar eine gravimetrische Energiedichte von ca. 0,20 kg/kWh, haben somit den Vorteil das Volumen gegenüber dem gasförmigen 200 bar-Tank zu halbieren. Ein Nachteil dieses Tanksystems ist das sogenannte „Boil-Off“, bei dem das flüssige Gas im Tank langsam über das Druckbegrenzungsventil abgelassen wird (79, 63, S. 398). In Anwendungen mit hohem Reichweitenbedarf wird daher der Speicher eher in flüssiger Form ausgeführt, während in Anwendungen mit geringerem Reichweitenbedarf die kostengünstigeren Druckspeicher genutzt werden (z.B. bei Bussen).

4.5.2.2 Gas-Verbrennungsmotor

Als Gasbrennverfahren kann entweder eine magere oder eine stöchiometrische Verbrennung verwendet werden. Trotz einem mit dem Luftverhältnis steigendem Wirkungsgrad liegen die Effizienzen des Vollmotors in beiden Fällen um zwei bis drei Prozentpunkte unterhalb derer eines vergleichbaren Dieselaggregats (80). Des Weiteren führt eine Abmagerung des Gemisches zu einem Anstieg der Kohlenwasserstoffemissionen, hauptsächlich bestehend aus Methan. Gleichzeitig sinken die Stickoxid Emissionen allerdings nicht ausreichend ab, sodass zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der EURO VI Norm heutzutage ausschließlich stöchiometrische Verbrennungskonzepte verwendet werden (81, S. 8–9). Abbildung 30 zeigt die verfügbaren Gemischbildungskonzepte von Gasmotoren im Vergleich zum modernen Dieselmotor. Dabei stellt die Saugrohrreinblasung von CNG den Stand der Technik dar, während die aufwendigere und teurere tiefkalte LNG-Saugrohrreinblasung aufgrund der höheren Reichweite überwiegend in Fernverkehrsfahrzeugen eingesetzt wird.

Annahme:

$\lambda_a = \text{const.}$
 $\eta_e = \text{const.}$
 $n = \text{const.}$
 $V_H = \text{const.}$



Kraftstoff	Diesel	CNG	LNG	CNG
Gemischbildung	Direkteinspritzung	Saugrohr	Saugrohr „kryo“	Direkteinblasung
Gemischtemperatur [K]	293	293	273	293
Luftverhältnis [-]	1.2	1	1	1
Gemischheizwert [MJ/m ³]	2.93	3.17	3.40	3.50
Spezifische Leistung [%]	100	108	116	119

„Stand der Technik“

„Forschung“

Abbildung 30: Gemischbildungskonzepte für Gasmotoren verglichen mit der Diesel-Direkteinspritzung (63, S. 401)

Trotz niedrigerem Wirkungsgrad gegenüber dem Dieselmotor erzielt der Erdgasmotor aufgrund des niedrigeren Kohlenstoff- zu Wasserstoff-Verhältnis eine positive CO_{2,eq}-Bilanz im Vergleich zum Dieselmotor. (63, S. 404–411). Die Volllastkurve, der Drehmomentverlauf und der spezifische Verbrauch eines modernen Gasmotors (Daimler Trucks M 936 G (47)) ist in Abbildung 31 dargestellt.

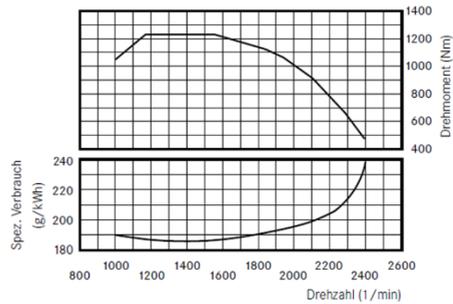
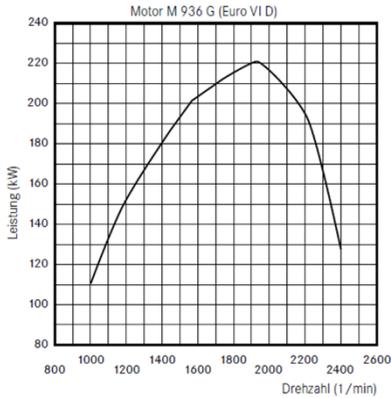


Abbildung 31: Leistung, Drehmoment und spezifischer Verbrauch eines modernen Nutzfahrzeug-Gasmotors (47)

Der weitere Antriebsstrang mit Kupplung, Getriebe und Differential entspricht dem des Referenz-Dieselfahrzeugs aus Tabelle 3 (47). Gemäß Tabelle 6 erreicht ein gasmotorischer Antriebsstrang einen Spitzenwirkungsgrad von 39,5 %.

Tabelle 6: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette eines Fahrzeugs mit gasmotorischem Antrieb

Teilsystem	Wirkungsgrad im Bestpunkt	Gesamt
Well-to-Tank	/	100
Verbrennungsmotor	46 % (63, S. 67)	42
Getriebe	Direkter Gang 98 % (64, S. 13)	41
	Indirekter Gang 96 % (64, S. 13)	
Differential	96 % (64, S. 13)	39,5

4.5.2.3 Zusammenfassung der Parametrierung der gasmotorischen Nutzfahrzeuge

Die Daten des Referenz-Dieselfahrzeugs aus 4.2 können für die gasmotorischen Nutzfahrzeuge übernommen werden mit Ausnahme des Motorkennfelds und des Tanksystems. In diesem Zusammenhang sind die Fahrzeugdaten der Gasfahrzeuge aus Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Spezifikation der Tanksysteme der simulierten Gasfahrzeuge

	Abfall-Sammel-Fahrzeug (47)	Stadtbus (47)	Verteiler-Verkehr	Fernverkehr
Hubraum in ccm³	7700	7700	8700	12900(82, 83)
Leistung in kW	222	222	243	338(83, 82)
Drehmoment in Nm	1200@1200-1600 upm	1200@1200-1600 upm	1700@1200-1600 upm	2000@1100-1600 upm(83)
Medium	CNG			LNG
Zustand	Gasförmig 200 bar Umgebungstemperatur			Flüssig 10 bar -162 °C
Tankvolumen in m³	0,650	0,650	0,920	1,02(82, 84)
Kapazität in kg (kWh)	105 (1515)		149 (1803)	205 (2850)

4.5.3 Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)

Bei der Erstellung des Simulationsmodells des batterieelektrischen Fahrzeugs wird der Antrieb aus dem Diesel-Referenzfahrzeug durch elektrische Komponenten ersetzt. Dabei werden die Fahrzeugmassen nach dem „*Tank-to-Wheels report v5*“ der Europäischen Kommission (64, S. 36–37) angepasst. Demnach weist ein Fahrzeug der Klasse 4 mit einer 420 kWh Batterie ein Mehrgewicht von 1220 kg gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug auf. Ein Fahrzeug der Klasse 5, mit einer 616 kWh Batterie, wiegt dagegen 1415 kg mehr als das Dieselpendant (64, S. 29–37).

In dieser Arbeit wird das Energiesystem eines Elektrofahrzeugs nach Abbildung 32 angenommen. Ausgehend von verfügbarer elektrischer Energie aus dem Stromnetz wird die Batterie des Fahrzeugs entweder über Gleich- oder Wechselstrom geladen. In der Nutzfahrzeuganwendung wird davon ausgegangen, dass die allermeisten Ladevorgänge mittels Gleichstrom in sogenannten Schnellladestationen mit bis zu 750 kW erfolgen (85). Bei einer Batterie mit 1000 kWh Speicherkapazität, würde bei 25 kW Ladeleistung eines mit Wechselstrom betriebenen Level 3 Laders, der Ladevorgang einer komplett entladenen

Batterie bis zu 20 h dauern (86). Dabei treten Verluste sowohl an der Ladestation als auch im Fahrzeug durch mechanische Reibung und elektrische Widerstände auf, sodass mit einem Tank-to-Wheel-Fahrzeugwirkungsgrad von 64,4 % bis 86 % je nach Anwendung gerechnet wird (86, 87).

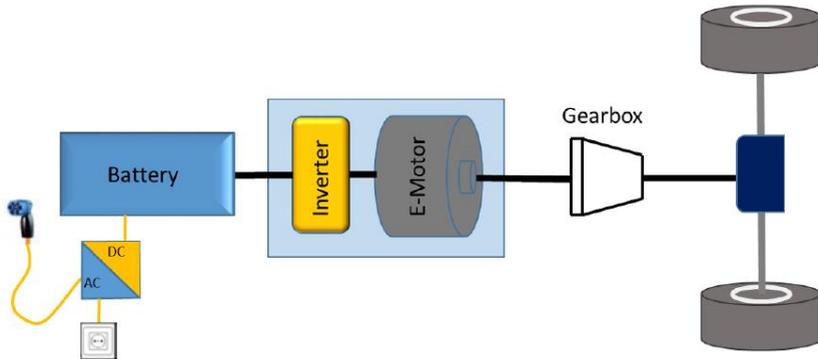


Abbildung 32: Energiesystem eines batterieelektrischen Fahrzeugs (64, S. 29)

4.5.3.1 Batterie eines elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugs

Im Kontext dieser Arbeit wird von den vorhandenen Batterietechnologien ausschließlich die Lithium-Ionen-Batterie betrachtet, da sie den heutigen Stand der Technik darstellt und das aktuelle Optimum zwischen gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte sowie der Sicherheit vereint. Aktuelle Lithium-Ionen-Batteriezellen verwenden Lithium mit verschiedenen Legierungen als Kathodenmaterial und Graphit als Anodenmaterial. Typisch verwendete Materialien für die Kathode sind Eisen, Chrom, Kobalt, Mangan oder Phosphat. In der Batterie wandern die Lithium-Ionen nach Abbildung 33 beim Laden von der Kathode zur Anode und beim Entladen von der Anode zur Kathode über den Verbraucher (88, S. 147).

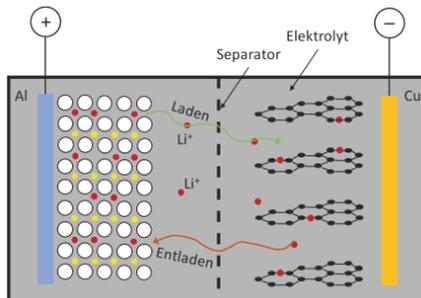


Abbildung 33: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batteriezelle (88, S. 147)

In der Literatur bewegt sich die spezifische Energiedichte einer aktuellen (2020) Lithium-Ionen-Zelle im Bereich von 110 bis 220 Wh/kg (89, 88, S. 133, 90, S. 231, 91, S. 4) bei spezifischen Leistungen von 1500 W/kg (90, S. 231). Es werden Anstiege der spezifischen Kapazitäten der Spitzentechnologien bis 2030 auf bis zu 350 Wh/kg (91, S. 5) oder 400 Wh/kg prognostiziert (88, S. 183). Das Fraunhofer ISE stellt zwei Nickel-Cobalt-Manganese (NMC) Lithium-Ionen Technologien für den breiten Markt für 2020 und 2030 mit unterschiedlichen Nickel-Anteilen vor. Dabei wird im Automobilbereich erwartet, dass durch die Erhöhung des Nickelanteils an der Kathode von 60 % auf 90 % die Energiedichte von 135 Wh/kg auf 185 Wh/kg anwächst (19). Dementsprechend wird ein spezifisches Gewicht von 5,41 kg/kWh für die Traktionsbatterien dieser Arbeit gewählt.

In der Praxis ist aus Batterieschutzgründen und um die Alterungsgeschwindigkeit der Zellen zu minimieren nicht die gesamte Batteriekapazität für den Vortrieb nutzbar. Typische Werte für den nutzbaren Bereich liegen zwischen 70 % und 80 % der Batteriekapazität. Dieser nutzbare Bereich der Batteriekapazität nennt sich nutzbarer SOC-Hub (92, 11, 64, S. 25). Demnach stehen zum Beispiel einer 100 kWh Batterie mit 80 % SOC-Hub nur 80 kWh Energie zur Verfügung. Typischerweise werden eine minimale Spannung (cut-off Spannung) als unteres SOC-Limit und ein maximaler SOC-Stand definiert (zum Beispiel 10 % und 90 % SOC).

Neben der eingeschränkten Nutzungsbereich der Batterie, treten im Betrieb drei Arten von Verlusten auf:

- Die Stromwärmeverluste die das Aufheizen der Batterie durch den ohmschen Innenwiderstand darstellen
- Die Ladungsverluste durch Gasung der Elektrolyte
- Die Selbstentladung die einen temperaturabhängigen, elektrochemischen Vorgang beschreibt

Abbildung 34 zeigt einen typischen Verlauf einer Lade- und Entladekurve einer Lithium-Ionen-Batteriezelle. Dabei stellt der *Open-Circuit-Voltage* (OCV) den Spannungsverlauf ohne Belastung der Zelle dar. Der typische Zyklus-Wirkungsgrad (Laden und Entladen) einer unbeschädigten Lithium-Ionen-Batterie liegt bei über 95 % (88, S. 137). Dabei ist aufgrund der geringen Innenwiderstände der Ladewirkungsgrad nahezu $\eta_c \approx 100\%$. Der Spannungswirkungsgrad steigt hingegen mit der Temperatur von 90 % bei 0 °C auf 98 % bei 40 °C (90, S. 235).

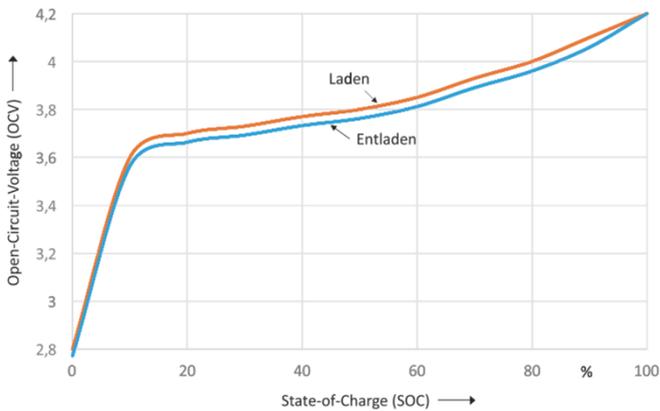


Abbildung 34: Lade- und Entladekurve einer Lithium-Ionen-Batteriezelle (88, S. 137)

Der Verlauf der Entladekurve (und Ladekurve) ist von der Temperatur, von der Entladerate in C und vom Alterungszustand der Zelle abhängig. Die Entladerate C (und Laderate C) mit der Einheit h^{-1} stellt das Verhältnis von Entladestrom (oder Ladestrom) zur Kapazität dar. Abbildung 35 stellt diese Abhängigkeiten dar. Im linkem Diagramm fällt auf, dass mit steigender Entladerate die absolute verfügbare Spannung in der Zelle abnimmt, es also zu einer vertikalen Verschiebung der Kurve kommt (88, S. 143). In diesem Zusammenhang sinkt in der Realität der theoretische Zykluswirkungsgrad ($>95\%$). Tatsächlich erreichen Fahrzeugbatterie beim Laden Wirkungsgrade von 85 % bis 93 % (64, S. 30, 93).

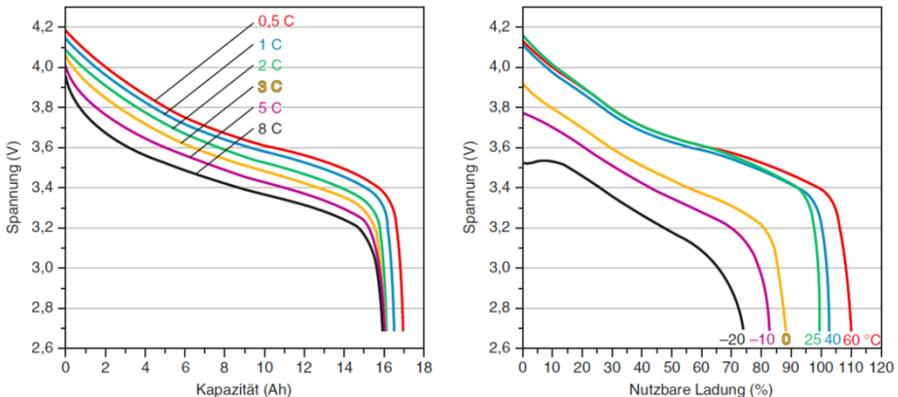


Abbildung 35: Veränderung der Entladekurve einer Lithium-Ionen-Batteriezelle in Abhängigkeit der Entladestromstärke (*links*) und der Umgebungstemperatur (*rechts*) (90)

Im rechten Diagramm hingegen kommt es bei sinkender Außentemperatur gleichzeitig zu einer Verringerung der verfügbaren Spannung und der nutzbaren Ladung, was zu einer diagonalen Verschiebung der Kurve in Richtung des Koordinatenursprungs führt. In diesem Zusammenhang sind beim Betrieb einer Batterie bei niedrigen Außentemperaturen sowohl die Leistung als auch die Kapazität der Batterie limitiert.

Der Energienutzungsgrad η_W lässt sich nach Formel 4-11 durch den Quotienten der beim Entladen verfügbaren Energie W und der Nennenergie W_0 , die der Batterie beim Laden eingespeist wird, berechnen. Oder anders ausgedrückt, der entnommenen Kapazität Q bei der Betriebsspannung U in Verhältnis zum Speichervermögen Q_0 bei gegebener Nennspannung U_0 .

$$\eta_W = \frac{W}{W_0} = \frac{QU}{Q_0U_0} \quad 4-11$$

Das linke Bild der Abbildung 36 stellt den Zusammenhang zwischen dem Batteriewirkungsgrad, der Außentemperatur und der nutzbaren Batteriekapazität Q , bezogen auf den Referenzwert Q_0 bei 25 °C, dar. Dabei wird deutlich, dass der durch Formel 4-11 definierte Energienutzungsgrad η_W stark abfällt, sobald die Außentemperatur unter 0 °C sinkt. Bei 0 °C sind nur noch 80 % der Referenzkapazität (bei 25 °C) vorhanden, bei -20 °C nur noch 70 %. Der Kapazitätsabfall bei niedrigen Temperaturen lässt sich durch den steigenden Zelleninnenwiderstand unter 0 °C und der daraus folgend sinkenden Betriebsspannung U aus dem rechten Bild erklären. Bei Temperaturen unter 0°C steigen die Verluste in der Batterie. Demnach wird die gespeicherte Energie vermehrt für das Aufheizen der Batterie statt für den Vortrieb genutzt.

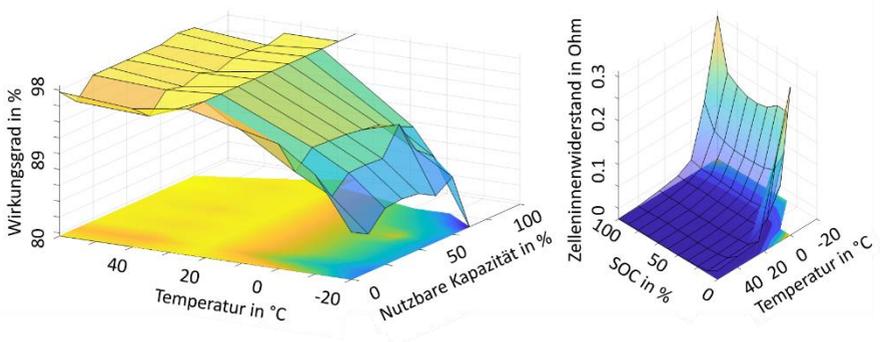


Abbildung 36: Einfluss der Außentemperatur auf die Kapazität und den Innenwiderstand einer Lithium-Ionen-Zelle (nach (94))

4.5.3.2 Elektromotor eines elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugs

Die Traktionsmaschinen der Automobilindustrie sind meistens Drehstrommaschinen, die entweder als permanentmagnet- oder fremderregte Synchronmaschinen (54) oder als Asynchronmaschinen ausgeführt sind (88, S. 189). Zur Erzeugung der mechanischen Leistung wird ein drehendes Magnetfeld genutzt, das durch den fließenden Strom in den Wicklungen des Rotors entsteht (88). Im Folgenden wird eine permanentmagneterregte Synchronmaschine verwendet, da diese Bauform den besten Kompromiss zwischen Baugröße, Gewicht und Wirkungsgrad darstellt und im Nutzfahrzeugsbereich am weitesten verbreitet ist (64, S. 25). Die permanentmagneterregten Synchronmaschinen erreichen gemäß Abbildung 37 über einen weiten Kennfeldbereich Wirkungsgrade größer 97 % (88, S. 48). Dabei ist auf der horizontalen Achse die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute (min^{-1}) und auf der vertikalen Achse das Drehmoment in Newtonmeter (Nm) der E-Maschine abgebildet.

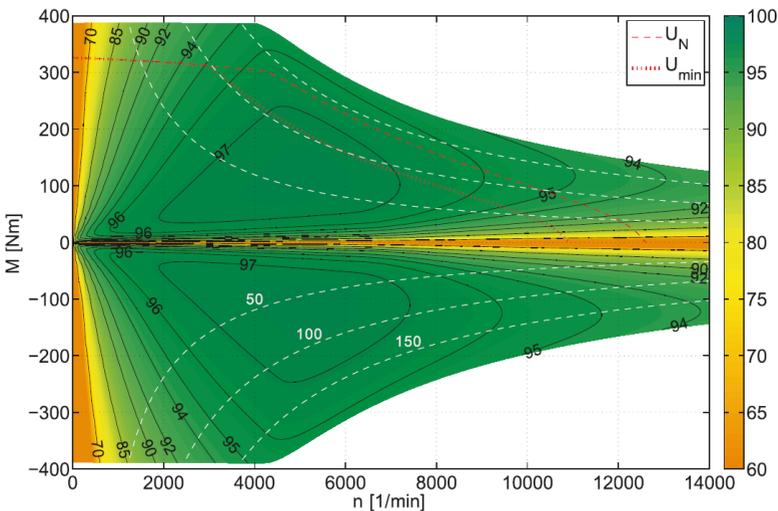


Abbildung 37: Wirkungsgradkennfeld einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) (88, S. 48)

Die aktuelle durchschnittliche Leistungsdichte von Elektromotoren im Nutzfahrzeugsbereich liegt bei 1 kW/kg (95, S. 38). In dieser Arbeit wird eine Steigerung der Leistungsdichte auf das Niveau des Tesla Model 3 erwartet, somit wird eine Leistungsdichte von $2,1 \text{ kW/kg}$ für die Berechnungen verwendet (95, S. 38)(96, S. 4). Demnach wiegt der 460 kW Elektromotor der Fernverkehr-Sattelzugmaschine 219 kg . Zum Vergleich, ein Verbrennungsmotor einer Sattelzugmaschine mit 11 l bis 13 l Hubraum hat ein Trockengewicht von 1200 kg bis 1500 kg (46).

4.5.3.3 Wechselrichter/ Leistungselektronik (englisch Inverter)

Die in Form von Gleichstrom in der Batterie gespeicherte elektrische Energie muss in einem Wechselrichter in Wechselstrom gewandelt werden, um vom Elektromotor genutzt werden zu können. In diesem Zusammenhang muss der Synchronmaschine noch ein DC/AC-Wechselrichter (englisch *Inverter*) zur Wandlung von Gleich- (englisch *Direct Current* - DC) in Wechselstrom (englisch *Alternativ Current* – AC) vorgeschaltet werden. Der Wirkungsgrad der Leistungselektronik ist von der elektrischen Eingangsleistung abhängig und entspricht dem Verlauf aus Abbildung 38 (97, S. 47). Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad des Wechselrichters über einen weiten Betriebsbereich über 95 % liegt. Lediglich bei ein Leistungsabgabe unter 30% der Nennleistung sinkt der Wirkungsgrad auf bis zu 70 % ab.

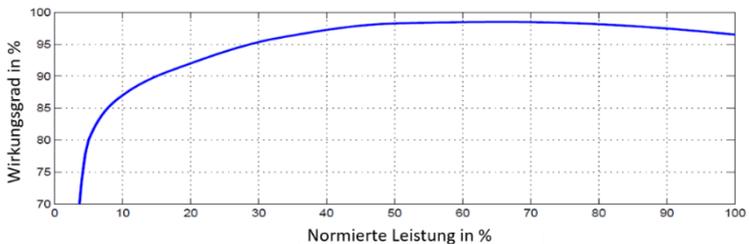


Abbildung 38: Wirkungsgrad der Leistungselektronik in Abhängigkeit der Eingangsleistung (97, S. 48)

Das kombinierte Wirkungsgradkennfeld von Wechselrichter und Synchronmaschine ist in Abbildung 39 dargestellt.

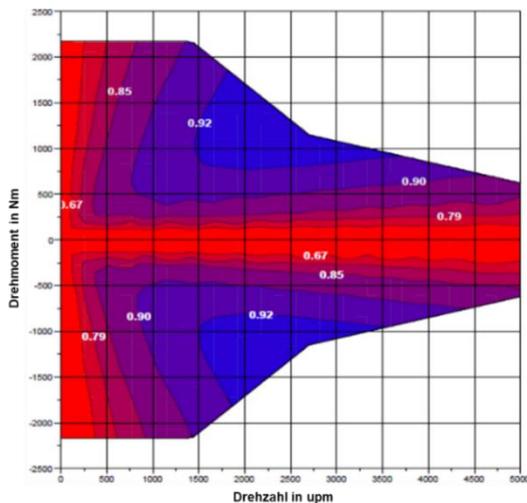


Abbildung 39: Kennfeld einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (64, S. 26)

4.5.3.4 Getriebe und Differential eines Fahrzeugs mit elektrischem Antrieb

Auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen wird ein Getriebe genutzt. Ein Getriebe ermöglicht die Reduktion der Größe der elektrischen Maschine um ca. 16 % und bewirkt somit eine Verbrauchsminderung von 1 bis 2 % ohne Einbußen bei der Endgeschwindigkeit und dem Beschleunigungsvermögen (89). Der Wirkungsgrad des zweiten (direkten) Gangs ist mit 98 % um zwei Prozentpunkte höher als der Anfahrangang. So wird bei der Reisegeschwindigkeit der beste Antriebsstrangwirkungsgrad erreicht. Des Weiteren hat die Kegelradstufe im Differential hat einen Wirkungsgrad von 96 % (64, S. 13).

In Tabelle 8 ist die Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette des elektrischen Antriebsstrangs im Bestpunkt dargestellt. Dabei stehen im Bestpunkt 69 % der Energie des an der Ladestation durchfließenden Stroms zum Antrieb zur Verfügung.

Tabelle 8: Tank-to-Wheel Wirkungskette vom batterieelektrischen Fahrzeug

Teilsystem	Wirkungsgrad im Bestpunkt	Gesamt
Well-to-Tank	/	100
Ladevorgang	An der Ladestation 93 % (64, S. 30) An Fahrzeug 93 % (64, S. 30) Gesamter Ladevorgang 85 % (19) bis 86.5 % (64, S. 30)	85
Batterie	Zykluswirkungsgrad (laden/entladen) >95 % (88, S. 137)	81
Inverter	~95 %	77
Elektromotor	>97 % (88, S. 48)	74
Getriebe	>95 % (88, S. 56) Direkter Gang 98 % (64, S. 13) Indirekter Gang 96 % (64, S. 13)	72
Differential	96 % (64, S. 13)	69

4.5.4 Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der in der hier vorgestellten Variante die chemische Energie von Wasserstoff in elektrische Energie wandelt. In der Anwendung im Automobilbereich hat sich die *Polymer Electrolyte Membrane* oder auch *Proton Exchange Membrane* (PEM) Brennstoffzelle sowohl im Personenkraftwagen- als auch in der Nutzfahrzeuganwendung etabliert (98). Eine PEM-Brennstoffzelle erreicht eine Leistungsdichte von etwa 0,75 kW/kg bis 1 kW/kg (99, 100, S. 78). Der Aufbau des Antriebsstrangs ähnelt dem des batterieelektrischen Fahrzeugs mit der Ausnahme, dass anstelle der Batterie die Brennstoffzelle als Stromlieferant dient. Dennoch ist auch eine kleine Batterie im Brennstoffzellenantriebsstrang enthalten, um die transiente Leistung zu verbessern (boosten), die Bremsenergie zu rekuperieren oder den Kaltstart der Brennstoffzelle zu unterstützen (86). Mit 40 kg bis 60 kg gasförmigem Wasserstoff unter 350 bar erreicht ein typischer Lastkraftwagen 800 km bis 1600 km (101). Abbildung 40 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Brennstoffzellenantriebsstrangs auf.

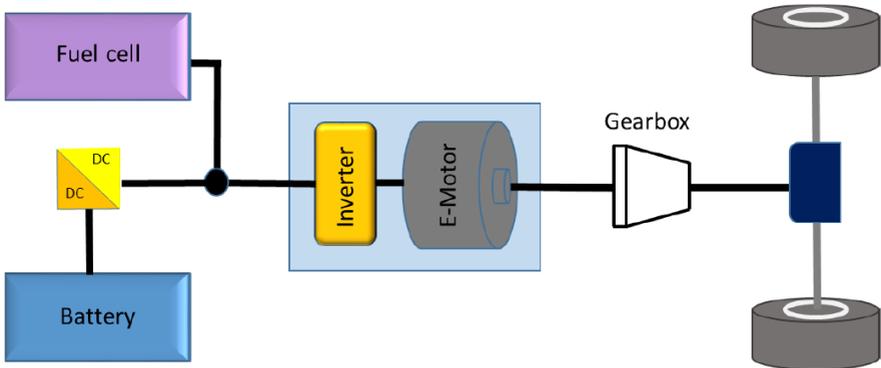


Abbildung 40: Schematischer Aufbau des Brennstoffzellenantriebsstrangs (64, S. 31)

4.5.4.1 Wasserstoff Tanksystem

Zur Speicherung von Wasserstoff im Brennstoffzellenfahrzeug und im Fahrzeug mit Wasserstoffverbrennungsmotor werden die gleichen Tanktechnologien eingesetzt. Es kommen entweder Gasdruckspeichertanks mit 350 bar bis 700 bar Betriebsdruck (102, S. 117–119) oder Kryotanks zur Speicherung von flüssigem Wasserstoff bei 12 bar bis 60 bar bei -253 °C (102, S. 126–127).

In Abbildung 41 ist neben der Dichte in Abhängigkeit vom Wasserstoffdruck auch der Energieinhalt und die notwendige Verflüssigungs- oder Verdichtungsarbeit dargestellt.

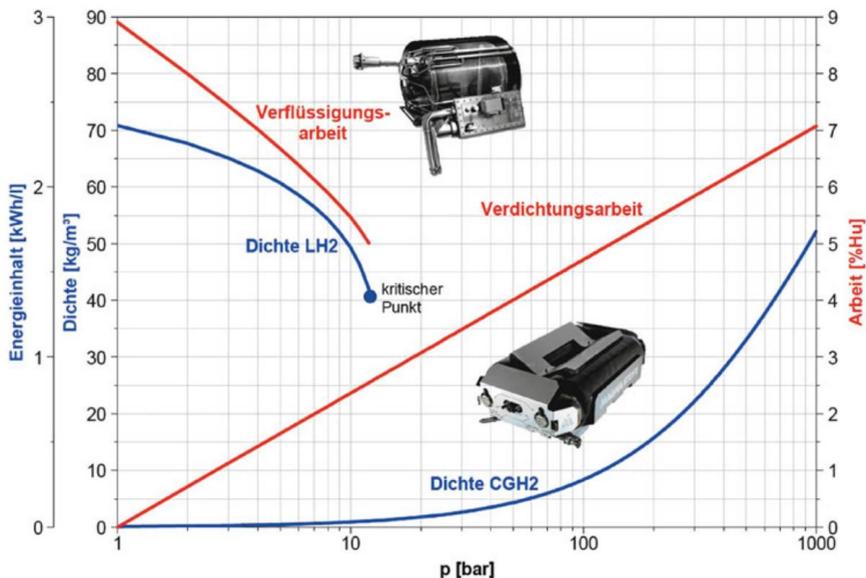


Abbildung 41: Speicherdichte und Arbeit in Abhängigkeit vom Wasserstoffspeicherdruck (103)

Bei der gasförmigen Speicherung liegen die typischen Speicherdrücke für gasförmigen Wasserstoff bei 350 bar oder 700 bar. Bei 350 bar beträgt die Wasserstoffdichte $23,3 \text{ kg/m}^3$, bei 700 bar $39,3 \text{ kg/m}^3$. Dabei besitzt der Tank ein Speichergewicht von etwa 20 bis 40 kg pro Kilogramm gespeichertem Wasserstoff. Dies entspricht bei einem Stadtbus mit 40 kg Wasserstoff je nach Tanktyp 800 kg bis 1600 kg Tankgewicht. Die gasförmige Speicherung bietet den Vorteil der verlustlosen Wasserstoffspeicherung bei relativ geringen Kosten und begrenzten Speicherdichten (102, S. 117–119).

Im Falle der flüssigen Speicherung bewahren Kryotanks den bei -253°C flüssigen Wasserstoff bei Drücken von 12 bar bis 60 bar in einem doppelwandigen Tank auf. Dabei gibt es keine aktive Kühlung im Tanksystem. Der Innentank besteht aus austenitischem Edelstahl und ist durch Vakuum und Superisolation vom Außentank getrennt. Ein beispielhafter Aufbau eines Kryotanks ist in Abbildung 42 zu sehen. Durch den unvermeidbaren Wärmeeintrag durch die Leitungen kommt es zu einem Verdampfen des siedenden Wasserstoffs. Dieser Effekt wird *Boil-off* genannt. Täglich dampfen zwischen 0,3 % und 5 % des Tankinhalts ab (104). Dabei liegen die volumetrische und gravimetrischen Energiedichten bei $0,06 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{kg}$ und 2 kWh/kg (102, S. 126–127).

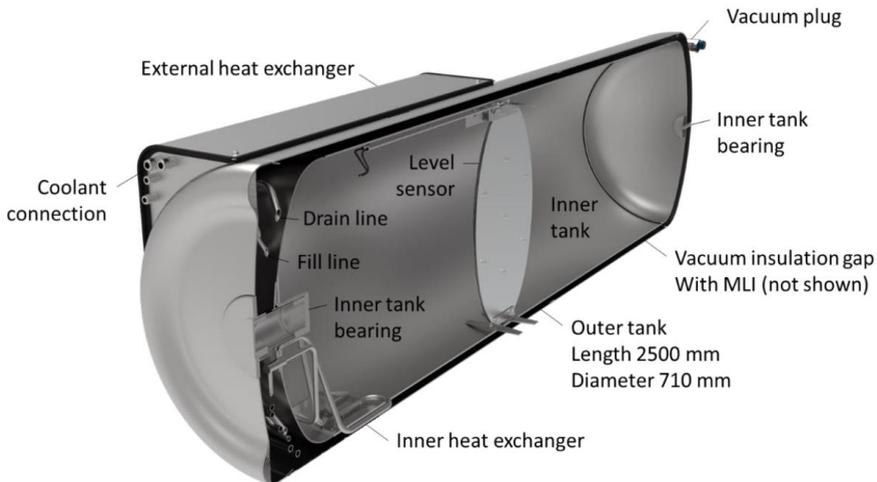


Abbildung 42: Schnittbild eines Flüssigwasserstofftanks für die Nutzfahrzeuganwendung (104)

Bei allen Anwendungen außer dem Stadtbuss schränkt das limitierte freie Volumen im Fahrzeug die Größe des Tanks ein. Der geringe Reichweitenbedarf des Abfallsammelfahrzeugs und des Verteilerfahrzeugs erlaubt es einen kostengünstigeren Gasdrucktank zu verwenden statt eines tiefkalten Kryotanks. Das Fernverkehrsfahrzeug wird hingegen in dieser Arbeit mit einem Flüssigwasserstofftank ausgestattet und erreicht somit eine mehr als doppelt so große energetische Speicherkapazität wie das Verteilerfahrzeug. Aufgrund der verfügbaren Fläche auf dem Dach des Stadtbusses wird der Tank in dieser Anwendung aus Kostengründen als gasförmiger Drucktank mit 350 bar ausgeführt (105, 106). Für die Berechnung des Gewichts des Tanks wird die beste Technologie mit 20 kg/kg_{H₂} angenommen.

4.5.4.2 Brennstoffzelle

Der energetische Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenantriebs liegt im Mittel bei 45 % und schwankt je nach Technologie zwischen 41 % und 54 % (87). Im städtischen Stop-and-Go-Busbetrieb sinkt der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems auf ca. 33 % (72). Der Brennstoffzellen-Stapel allein erreicht Wirkungsgrade von über 60 % bei niedriger Last. Jedoch zeigt Abbildung 43, dass der Stapelwirkungsgrad mit der abgegebenen Leistung abnimmt, sodass eine Brennstoffzelle im Dauerbetrieb idealerweise in der unteren Hälfte des Leistungsspektrums betrieben werden sollte (51).

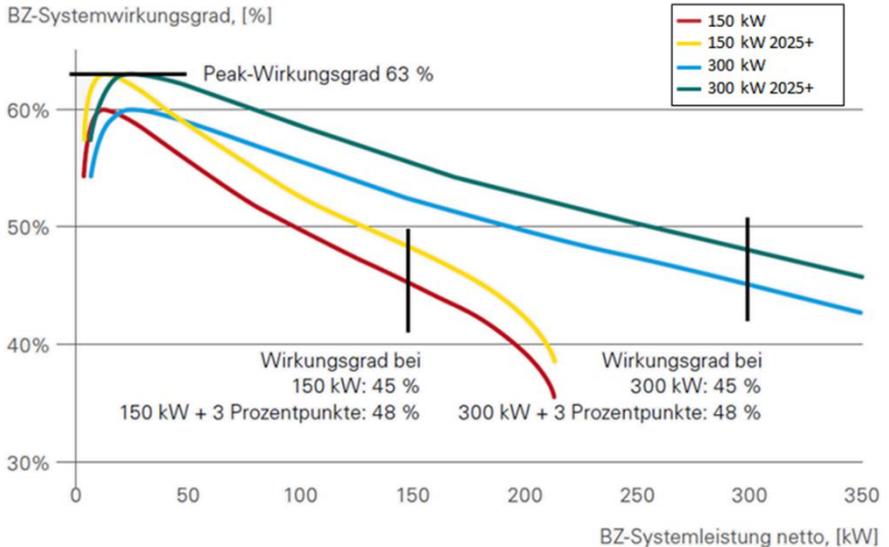


Abbildung 43: Brennstoffzellen-Wirkungsgrad in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung (51)

Neben den Betankungsverlusten ist bei der Verwendung von Kryotanks zur Speicherung des flüssigen Wasserstoffs das kontinuierliche Abdampfen von Wasserstoff zu nennen. So gehen durch den stetigen Wärmeeintrag und den somit steigenden Drucks in etwa 0,3 % bis 5 % des Tankinhaltes täglich verloren (102, S. 126, 104). Der höhere Systemwirkungsgrad und die geringere Betriebstemperatur der Brennstoffzelle (ca. 80 °C) gegenüber dem Verbrennungsmotor bringt ebenfalls einige Herausforderungen mit sich. Es muss deutlich mehr Abwärme über den Fahrzeugkühler abgeführt werden, sodass dieser um den Faktor 2,5 größer gestaltet werden muss. Demzufolge wird eine Bergauffahrt bei hohen Brennstoffzellenleistungen und niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten und unter Umständen hohen Außentemperaturen eine kritische Situation für das System (51). Im schlimmsten Fall müsste die Antriebsleitung limitiert werden, um einer Schädigung der Brennstoffzelle vorzubeugen. In der Kaltstartphase, bis zum Erreichen der Betriebstemperatur bei ca. 75 °C bis 80 °C, stehen nur ca. zwei Drittel der Nennleistung zur Verfügung (100, S. 97). Die thermischen Herausforderungen des Betriebs eines Brennstoffzellenfahrzeugs werden in den Simulationen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, jedoch könnten diese die Verwendung in manchen Anwendungen ausschließen.

Die Wirkungsgradkette des restlichen Antriebsstrangs (Inverter, Elektromotor, Getriebe und Differential) entspricht dem des batterieelektrischen Fahrzeugs (siehe 4.5.3), sodass sich nach Tabelle 9 ein Fahrzeugwirkungsgrad von 54,5 % im Bestpunkt ergibt.

Tabelle 9: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette im Brennstoffzellenfahrzeug

Teilsystem	Wirkungsgrad im Bestpunkt	Gesamt
Well-to-Tank	/	100
Betankungsvorgang	~100% gasförmig	100
	85%-95% flüssig (102, S. 131)	95
Brennstoffzellen-Stapel	63 % (87)	63
Inverter	~95 %	60
Elektromotor	>97 % (88, S. 48)	58
Getriebe	>95 % (88, S. 56)	57
	Direkter Gang 98 % (64, S. 13)	
	Indirekter Gang 96 % (64, S. 13)	
Differential	96 % (64, S. 13)	54 gasförmig
		51 flüssig

4.5.5 Fahrzeug mit Wasserstoffverbrennungsmotor (H2-VKM)

Die Hauptmotivation Wasserstoff als Energieträger im Verbrennungsmotor zu verwenden, liegen in der theoretisch CO₂-neutralen Verbrennung und den vielen positiven Brenneigenschaften von Wasserstoff. Praktisch führt der Ölverbrauch zu einem geringen Kohlenstoffeintrag in das Abgas, der aber an der Nachweisgrenze aktueller Messgeräte liegt. Je nach λ -Betrieb können aber die hohen Stickoxidemissionen und die somit notwendige SCR-Katalyse mittels Harnstoffes zu einem messbaren CO_{2,eq}-Eintrag über die Abgasreinigung führen. Die Europäische Kommission definiert emissionsfreie Lastkraftwagen als Fahrzeuge, die im Betrieb weniger als 1 g CO_{2,eq}/kWh emittieren (107, S. 3). Die Applikation des Motors und der Abgasreinigung zur Einhaltung der von der Europäischen Kommission gesetzten CO_{2,eq}-Limitierungen und Schadstoffgrenzwerte bei gleichzeitiger Maximierung der Effizienz bestimmt die zukünftigen Entwicklungen von Wasserstoffverbrennungsmotoren. Dabei ist die geringe volumetrische Energiedichte für die mobile Anwendung eine Herausforderung, da insbesondere für hohe Reichweiten ein großes Tankvolumen im Fahrzeug bereitgestellt werden muss. In diesem Zusammenhang wird in Fahrzeugen des Fernverkehrs vermehrt auf flüssigen Wasserstoff in Kryotanks statt auf gasförmige Druckspeicherung gesetzt

Vergleich zum Diesel-Referenzmotor dar (55). Dabei ist zu erkennen, dass der Wasserstoffverbrennungsmotor ein geringeres Maximalmoment (2100 Nm gegenüber 2500 Nm bei Dieselmotor) und somit eine geringere Nennleistung erreicht. Zudem liegt das maximale Moment in einem kleineren Drehzahlbereich an (1000 min⁻¹ bis 1200 min⁻¹ gegenüber 1000 min⁻¹ bis 1600 min⁻¹ beim Dieselmotor). Diese Effekte sind auf die geringe Dichte des Wasserstoffs und somit den geringeren Gemischheizwert zurückzuführen und werden durch den im Volllastbereich notwendigen Magerbetrieb noch verstärkt. Das Unterbinden von Rückzündungen durch zündfähiges Wasserstoff-Luft-Gemisch außerhalb des Brennraums stellt eine der größten Herausforderungen bei Wasserstoffmotoren mit äußerer Gemischbildung dar (102, S. 211).

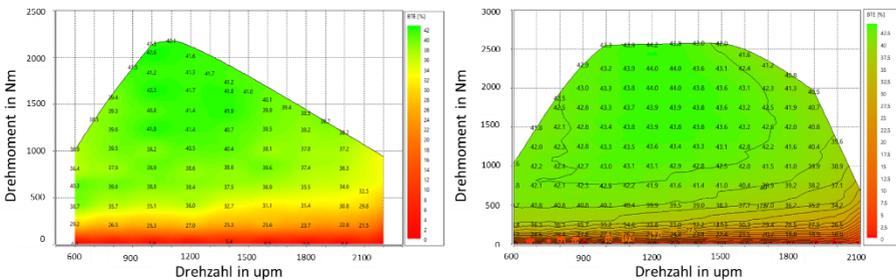


Abbildung 45: Wirkungsgradkennfeld eines Wasserstoffverbrennungsmotors (links) im Vergleich zum Diesel-Referenzmotor (rechts) (55)

Die Verwendung von innerer Gemischbildung oder Direkteinblasung (DI) von Wasserstoff hat den Vorteil einer höheren erreichbaren Leistung bei verbessertem Dynamikverhalten gegenüber der äußeren Gemischbildung (PFI). Der beschriebene Effekt der Luftverdrängung bei der Wasserstoff-Saugrohreinblasung findet hier nicht statt, sodass der Wirkungsgrad im stöchiometrischen Betrieb bei ca. $\eta = 44,5\%$ über dem der äußerer Gemischbildung liegt ($\eta = 42\%$) (114, S. 33, 55, 113, 115, 64). Des Weiteren sind Rückzündungen zu Beginn des Kompressionstakts aufgrund des inhomogenen Gemischs eher unwahrscheinlich, sodass eine stabilere und sicherere Verbrennung im Vergleich zur Saugrohreinblasung stattfindet (102, S. 212, 116).

In Abbildung 46 ist im Diagramm der Verlustteilung zu erkennen, dass durch die Direkteinblasung von Wasserstoff der Wirkungsgrad des direkteinspritzenden Dieselmotors in der Teillast nahezu erreicht wird (102, S. 219).

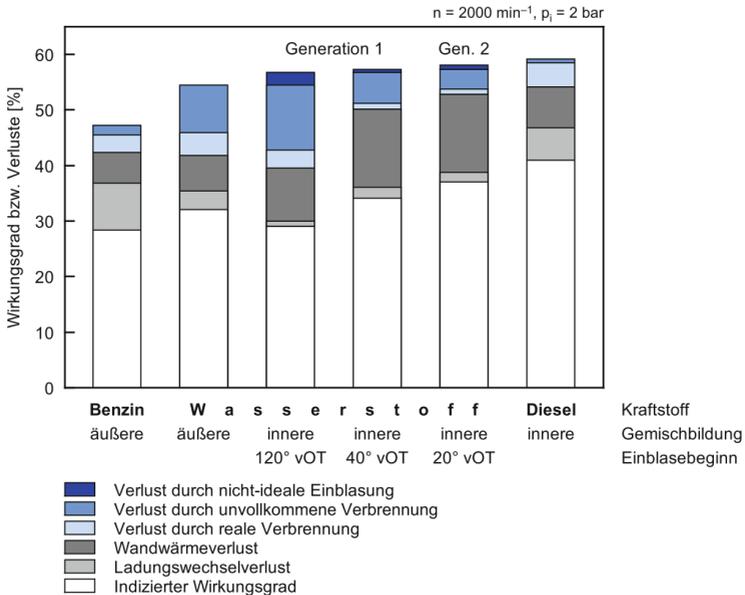


Abbildung 46: Verlustteilung unterschiedlicher Kraftstoffe und Brennverfahren (117)

Eine weitere Unterteilung der Wasserstoffmotorkonzepte stellt der Wasserstoff-Einspritzdruck dar. Hauptfokus der Forschung und Entwicklung im Nutzfahrzeugsegment sind aktuell fremdgezündete Wasserstoffverbrennungsmotoren mit Niederdruck-Direkteinblasung (LP-DI). Dennoch wird auch an der Hochdruck-Direkteinblasung (HP-DI) von Wasserstoff geforscht, da Potentiale im Wirkungsgrad durch eine stabilere Verbrennung erkannt wurden (116).

Die noch nicht etablierte Technologie und das damit verbundene finanzielle Risiko für Unternehmen führt dazu, dass es eine Mehrzahl an PFI-Wasserstoffmotoren auf dem Markt vertreten sind, auch wenn der geringere volumetrische Wirkungsgrad einen Nachteil gegenüber Direkteinspritzern darstellt (115). Zudem gibt es noch keinen weit verbreiteten Tankstandard, sodass hier sowohl günstigere Gasdruckspeicher als auch kryogene Flüssigspeicher in der Praxis Anwendung finden.

4.5.5.3 Abgasnachbehandlungsanlage von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren

Die hohen Stickoxidemissionen erfordern eine Abgasnachbehandlung zur Erfüllung heutiger und zukünftiger Gesetzgebungen. Ähnlich wie beim Diesel-Verbrennungsmotor findet zur Erfüllung der EURO VI Abgasnorm ein SCR-Abgassystem Anwendung. Für die Adressierung der

zukünftigen EURO VII Abgasnorm sind zweistufige Systeme mit einer motornahen Anwendung wahrscheinlich. Diese sollen die Stickoxid-Konvertierungsrate im Kaltstart und bei niedrigen Abgastemperaturen begünstigen. (51, S. 48). Die Abstimmung des Systems bestehend aus Motor und Abgasnachbehandlung ist entscheidend zur Einhaltung der Abgasgesetzgebungen auf der einen Seite und der Limitierung der sekundären CO_{2,eq}-Emissionen aus der Abgasnachbehandlung auf der anderen. Ziel ist eine gesamte CO_{2,eq}-Emission unterhalb des Grenzwertes der Europäischen Kommission zur Einstufung als emissionsfreies Fahrzeug (<1 g CO_{2,eq}/kWh).

Zusammenfassend ist die Wirkungsgradkette des Antriebsstrangs eines Fahrzeugs mit Wasserstoffverbrennungsmotor in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Tank-to-Wheel Wirkungsgradkette im Fahrzeug mit Wasserstoffverbrennungsmotor

Teilsystem	Wirkungsgrad im Bestpunkt	Gesamt
Well-to-Tank	~100 % gasförmig	100
	85 %-95 % flüssig	95
Verbrennungsmotor	42 % (118, 116)	42
Getriebe	Direkter Gang 98 % (64, S. 13)	41
	Indirekter Gang 96 % (64, S. 13)	
Differential	96 % (64, S. 13)	39 gasförmig 37 flüssig

5 Definition der Energiesysteme: Szenarien zur Stromproduktion

Im Jahr 2020 stellen die energiebedingten Treibhausgasemissionen 92,77 % der gesamten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen dar. Unter energiebedingte Emissionen wird der Ausstoß von Treibhausgasen bei der Erzeugung von Wärme und Strom verstanden. Davon sind wiederum 88 % CO_2 -bedingt, während die restlichen 12 % auf Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (N_2O) und fluorierte Treibhausgase zurückzuführen sind (119). In diesem Zusammenhang werden die drei langlebigen Treibhausgase Kohlendioxid, Distickstoffmonoxid und Methan definiert (120, S. 39). N_2O und CH_4 werden als Kohlenstoffdioxid-Äquivalent über einen Zeithorizont von 100 Jahren angegeben und beziehen sich auf den Treibhausgaseffekt der äquivalenten Masse an CO_2 . In diesem Zusammenhang haben nach Tabelle 11 CH_4 und N_2O bei gleichem gravimetrischem Aufkommen ein um ein Vielfaches höheren Treibhausgaseffekt als CO_2 . Die drei Treibhausgase werden in dieser Arbeit zusammengefasst und als Kohlenstoffdioxid-Äquivalent ($\text{CO}_{2,\text{eq}}$) aufgeführt.

Tabelle 11: Treibhausgas in Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (121, S. 32, 5, S. 102)

Treibhausgas	Tonne $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ pro Tonne Treibhausgas
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

In diesem Kapitel werden in einem ersten Schritt die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsfaktoren unterschiedlicher Szenarien zur Stromherstellung für die Jahre 2030 und 2050 aufgezeigt, bevor anschließend in Kapitel 6 auf die Herstellung der Energieträger eingegangen wird. In diesem Zusammenhang wird zuerst das Energiesystem definiert, bevor anschließend auf den Herstellungspfad einzelner Energieträger eingegangen wird.

Die Stromherstellung in der Europäischen Union und in Deutschland nutzt einen Mix aus unterschiedlichen Primärenergiequellen und besitzt somit einen Emissionsfaktor EF (122, S. 12). Dabei stellt der Emissionsfaktor den $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Ausstoß bezogen auf die gesamte Stromerzeugung in $\text{g CO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$ dar.

$$EF\left[\frac{\text{g}}{\text{kWh}}\right] = \frac{\text{CO}_{2,\text{eq}} - \text{Emissionen}}{\text{Stromerzeugung}} \quad 5-1$$

Im Folgenden werden unterschiedliche Szenarien zur Stromerzeugung betrachtet. Ausgehend vom Status-Quo werden Szenarien für die Entwicklung des Emissionsfaktors des deutschen Strommix bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus bis 2050 erarbeitet. Der Emissionsfaktor vom

Jahr 1990 wird ebenfalls als Vergleich verwendet, da viele CO_{2,eq}- Emissionsreduktionsziele von Regierungen Bezug auf das Jahr 1990 nehmen.

In diesem Zusammenhang sind in Abbildung 47 die jährlichen CO_{2,eq}-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland seit 1990 aufgetragen: im Jahr 1990 wurden in Deutschland 1242 Millionen Tonnen CO_{2,eq} ausgestoßen. Im Jahr 2020 waren es 729 Millionen Tonnen oder eine Reduktion um 42 % gegenüber 1990.

Treibhausgas-Emissionen seit 1990 nach Gasen

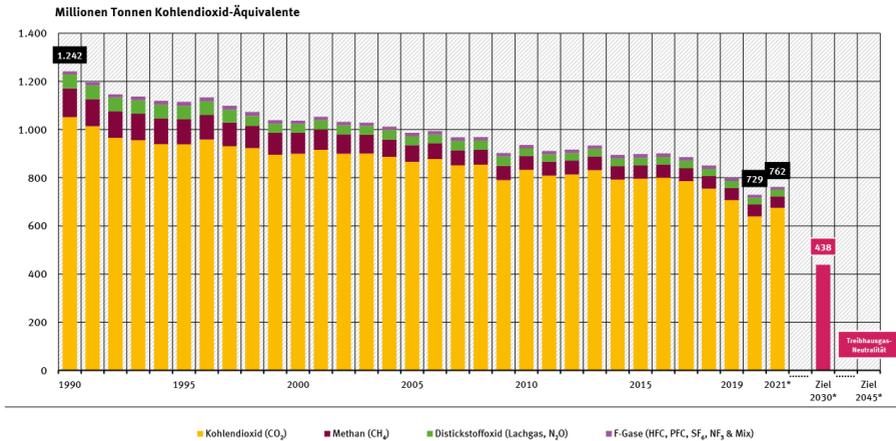


Abbildung 47: Treibhausgasemissionen für Deutschland seit 1990 bis 2045 (123)

5.1 Aktuelle Stromproduktion in Deutschland und der Europäischen Union

Die Zusammensetzung des Strommix aus den verfügbaren Primärenergiequellen und deren zugehörigen spezifischen CO_{2,eq}-Ausstoß ergibt den Emissionsfaktor für das betrachtete Jahr. Zwischen den Jahren 1990 bis 2019 wurde der Emissionsfaktor für die deutsche Stromerzeugung von 764 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} auf 411 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} um ca. 46 % gesenkt (124, S. 20). Die anteilige Bruttostromerzeugung der einzelnen Primärenergieträger in Deutschland in 2021 sind in Abbildung 48 dargestellt und ergeben ein Emissionsfaktor für Deutschland in 2020 von 375 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} und für 2021 von 420 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} (124, S. 20). Der Anstieg vom Jahr 2020 auf das Jahr 2021 ist auf den Atomausstieg und den vermehrten Einsatz von Braunkohle statt Erdgas aufgrund gestiegener Gaspreise zurückzuführen. Anhand dieser Entwicklung wird deutlich, wie stark sich die Substitution von Energieträgern mit niedrigerem CO_{2,eq}-Emissionsfaktor durch Energieträger mit höherem CO_{2,eq}-Emissionsfaktor auf den Emissionsfaktor des Strommix auswirkt (124, S. 21). Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Berechnung der Emissionsfaktoren ist der Wirkungsgrad der Kraftwerke, in Tabelle 12 in Form des Brennstoffausnutzungsgrad aufgeführt. Dabei ergibt sich

der Strom-Emissionsfaktor eines Kraftwerks aus dem Wirkungsgrad (dem Brennstoffausnutzungsgrad) und dem Emissionsfaktor des Brennstoffes selbst. In diesem Zusammenhang führen sowohl der hohe Emissionsfaktor von Kohle als auch der niedrige Kraftwerkwirkungsgrad zu einem zwei bis drei Mal höheren Emissionsfaktor verglichen mit Erdgas.

Tabelle 12: CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren fossiler Primärenergiequellen und Wirkungsgrad bezogen auf den Stromverbrauch (124, S. 17)

	CO_{2,eq}- Emissionsfaktor bezogen auf den Brennstoffeinsatz in g/kWh	Brennstoff- Ausnutzungsgrad bezogen auf den Stromverbrauch in %	CO_{2,eq}- Emissionsfaktor bezogen auf den Stromverbrauch in g/kWh
Erdgas	201	50	399
Steinkohle	335	40	835
Braunkohle	406	36	1137

Aus den in Tabelle 12 definierten CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren und der in Abbildung 48 dargestellten Zusammensetzung des deutschen Strommix aus den unterschiedlichen Primärenergiequellen lässt sich für jedes Jahr der CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren des Strommix berechnen.

Bruttostromerzeugung nach Primärenergieträger im Jahr 2020

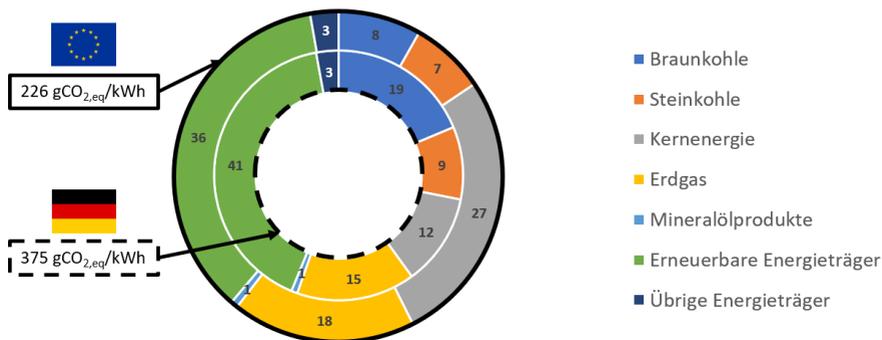


Abbildung 48: Bruttostromerzeugung nach Energieträger in Deutschland und der Europäischen Union (125–127)

Die abweichende Zusammensetzung der Strommixe aus Deutschland und der Europäischen Union sind der Grund für die unterschiedlichen Emissionsfaktoren von „deutschem“- und „europäischem“ Strom. Obwohl in Deutschland 2020 der Anteil an erneuerbaren Stromquellen 5 % höher war als im europäischen Vergleich, treibt der hohe Kohlestromanteil den Emissionsfaktor in die Höhe. Im Jahr 2020 lag somit der Emissionsfaktor für Strom in Deutschland um 66 % über dem mittleren europäischen Emissionsfaktor.

5.2 Stromproduktion in Deutschland und der Europäischen Union in 2030

Die unter dem Namen „Fit for 55“ von der Europäischen Kommission am 14.07.2021 veröffentlichte Resolution stellt das Ziel dar, bis 2030 mindestens 55 % Netto-CO_{2,eq}-Emissionen im Vergleich zu 1990 einzusparen (128, S. 2). Das von der Bundesregierung im Herbst 2019 vorgestellte Klimaschutzprogramm soll mittels Klimaschutzgesetz und geeigneter Maßnahmen das 55 %-Ziel erreichen. Nach Abbildung 49 sollen die notwendigen sektoralen CO_{2,eq}-Einsparungen bis 2030 eine Reduktion der CO_{2,eq}-Emissionen gegenüber 1990 um 55 % ermöglichen. Seit 1990 wurden die Treibhausgasemission in Deutschland von 1251 Mio. t CO_{2,eq} in 1990 auf 858 Mio. t CO_{2,eq} in 2018 um ca. 32 % reduziert (124, S. 13). Bis 2030 müssen weitere 37 % gegenüber 2018 eingespart werden, um die angestrebte Reduktion um 55% gegenüber 1990 zu erreichen.

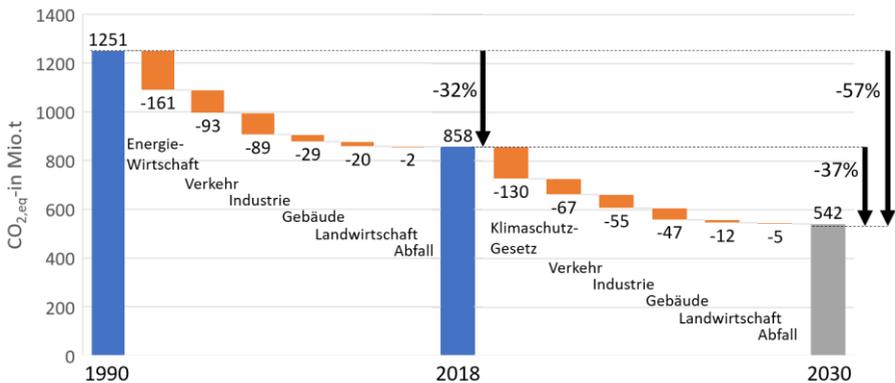


Abbildung 49: Klimaschutzgesetz und dessen Folgen auf die Treibhausgasemissionen (129, S. 18)

Im Jahr 1990 waren 481 Mio. t CO_{2,eq} (ca. 38 %) auf die Energiewirtschaft zurückzuführen. Im Jahr 2018 emittiert die Energiewirtschaft immer noch 320 Mio. t CO_{2,eq} und erreicht eine Reduktion um 34 % gegenüber 1990. Bezogen auf die Treibhausgasemissionen in 2018, unter Anwendung des von der Bundesregierung formulierten Klimaschutzplans und eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Energiesektor um 130 Mio t CO_{2,eq}, entsteht laut ersten Prognosen (130, S. 69) eine Lücke um drei bis vier Prozentpunkte zum Erreichen der sektoralen Emissionsminderungsziele. Die Treibhausgasemissionen des Energiesektors belaufen sich somit auf 190 Mio t CO_{2,eq} und ergeben bei einem Stromverbrauch von 643 TWh in 2030 einen Emissionsfaktor von 295 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom}.

In der Studie „Klimaneutrales Deutschland“ (129, S. 19) wird bis 2030 eine Emissionsminderung von 65 % als realistisch angesehen. Demnach wird die zusätzliche Einsparung der Energiewirtschaft um weitere 77 Mio. t CO_{2,eq} gegenüber dem Sektorziel des Klimaschutzgesetzes durch den Kohleausstieg im Jahr 2030 und einen Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromproduktion auf 70 % erzielt (129, S. 20). Der steigende Strombedarf zur Elektrifizierung aller Sektoren erhöht den gesamten Stromverbrauch um 51 TWh auf 643 TWh gegenüber 2018 (131). Der Anteil der Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft sinkt trotz steigendem Strombedarf von 320 Mio. t CO_{2,eq} in 2018 auf 113 Mio. t CO_{2,eq} in 2030. Somit beträgt der Emissionsfaktor der Energiewirtschaft in 2030 laut Formel 5-1 175 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom}. Die einzelnen korrigierten Sektorziele ergeben eine Senkung der Treibhausgasemissionen um 65 % gegenüber 1990 und 49 % gegenüber 2018.

Mögliche Szenarien bei der Berechnung des Emissionsfaktors des deutschen Strommix in 2030 bilden die vier Entwicklungspfade aus den Kopernikus-Projekten (132, S. 21). Dabei werden die Treibhausgasemissionen für 2030 auf Basis der Ziele aus dem Klimaschutzplan der Bundesregierung (130, S. 69) nach unterschiedlichen Annahmen berechnet.

1. Als „**Referenzszenario**“ werden die Ziele aus dem „Netzentwicklungsplan 2030“ angenommen. Dabei werden die Treibhausgasemissionen um **53 % gegenüber 1990** reduziert (132, S. 14). Dies entspricht einer Verfehlung der von der Bundesregierung angestrebten Reduktion um 55 % (128). Der Anteil an erneuerbarer Stromerzeugung steigt auf 65 % gemäß den gesetzten Zielen (132, S. 14) und führt zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen im Energiesektor um 39 % (133, S. 12).
2. Das „**Paris-15-Szenario**“ lehnt sich an das im Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 formulierte Ziel an, die menschenbedingte globale Klimaerwärmung möglichst auf 1,5 °C bis 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu beschränken (3). Dabei müssen bis 2030 die Treibhausgasemissionen der Bundesregierung um **78 %** gegenüber 1990 reduziert werden. Der Anteil erneuerbar erzeugten Stroms steigt bis 2030 in Deutschland auf 83 % und der Kohleausstieg ist bis 2030 vollzogen. Die Elektrifizierung aller Sektoren führt zu einer Erhöhung des Strombedarfs um 9 % gegenüber 2017 (132, S. 16).
3. Im dritten Szenario „**Energiewende-EU**“ wird eine Umsetzung der Energiewende auf europäischer Ebene angenommen, um eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 67 % über alle Sektoren hinweg zu erreichen (132, S. 21). Dabei werden die Zwischenergebnisse für 2030 im „**Klimaschutzszenario 95**“ angenommen und eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Energiesektor um **77 %** gegenüber 1990 vorausgesetzt (133, S. 12). Der Anteil der erneuerbaren Stromproduktion in Europa wird auf 58 % geschätzt und verdrängt somit weitestgehend die Kohle als Primärenergieträger (132, S. 17).
4. Im letzten Szenario „**Energiewende-Lokal**“ wird durch die dezentral durchgeführte Energiewende eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um **61 %** im Energiesektor bei einer gleichen Gesamtreduktion der Treibhausgase um 67 % wie im dritten Szenario angenommen (133, S. 12).

5.3 Stromproduktion in Deutschland und der Europäischen Union in 2050

Für den deutschen Strommix 2050 werden zwei Szenarien aus der Studie „**Klimaschutzszenario 2050**“ des Fraunhofer ISI und des Öko-instituts e.V. von 2020 (133, S. 12–15) angenommen. Die Erstellung der Klimaschutzszenarien basieren auf dem im Dezember 2014 veröffentlichten „**Aktionsprogramm Klimaschutz 2020**“. Des Weiteren stützen sich die Szenarien auf dem von der Bundesregierung Deutschland angegebenen Zielkorridor bezüglich der angestrebten Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990. Im Jahr 2040 soll eine Reduktion um mindestens 70 % und im Jahr 2050 eine Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 80 % bis 95 % erzielt werden (134).

1. Im Szenario „**Klimaziel-80**“ erreichen die meisten Sektoren bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 %. Dabei erreicht der Energiesektor mit einer Reduktion um 395 Mio. t CO_{2,eq} eine Minderung um **82 %** gegenüber 1990. Das Szenario stellt das Mindestziel der Bundesregierung dar, bei dem 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 erreicht wird (134).
2. Das zweite Stromszenario für 2050, „**Ambitioniert-95**“, geht von einer Reduktion der Treibhausgasemissionen des Energiesektors gegenüber 1990 um **96 %** aus. Der Anteil der regenerativen Stromerzeugung am deutschen Strommix beträgt 95 %, während bei der geringen restlichen fossilen Stromerzeugung Kohle durch Gas mit geringerer CO_{2,eq}-Intensität ersetzt wird. Die Energieverfügbarkeit wird über Wasserstoffspeicher mit anschließender Rückverstromung gelöst. Es knüpft an das „65 Prozent Minderung bis 2030“ Szenario der „Klimaneutrales Deutschland“ der Prognos AG und des Öko-Instituts e.V. aus dem Jahr 2020 an (129) und somit an das dritte Szenario für das Jahr 2030 „**Energiewende-EU**“ aus 5.2 an. Darin werden die Ziele der Bundesregierung mit dem Klimaschutzgesetz erweitert, sodass bis 2030 eine Minderung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 65 % erfolgt. Der Energiesektor muss durch die steigende Herstellung von Wasserstoff und die weitere Elektrifizierung aller Sektoren 50 % mehr Strom gegenüber 2030 bereitstellen. Die Entwicklung der sektoralen Treibhausgasemissionen in den Szenarien „**Energiewende-EU**“ im Jahr 2030 und „**Ambitioniert 95**“ im Jahr 2050 sind in Abbildung 50 dargestellt.

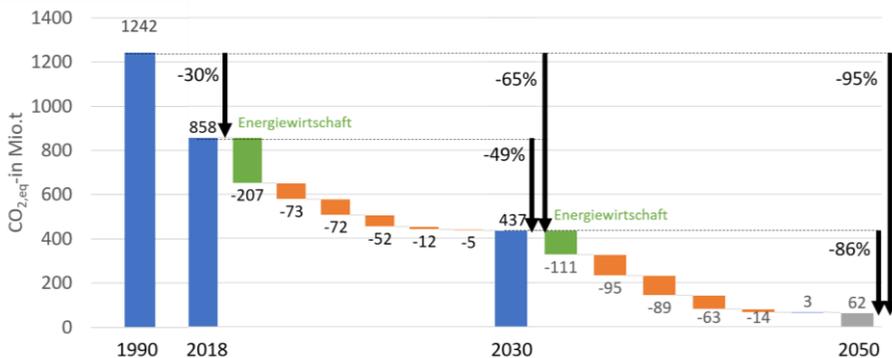


Abbildung 50: Ambitioniertere Treibhausgas-Emissionsminderung bis 2050 (129, S. 19)

5.4 Zusammenfassung der Szenarien zur Stromproduktion

Aus den vorgegebenen CO_{2,eq}-Emissionsminderungsziele der Europäischen Kommission im Rahmen des „Green Deals“ (135, 128) und der Bundesregierung Deutschland (136) lassen sich

Anforderungen an das europäische und deutsche Energiesystem definieren. Daraus lassen sich wiederum Stromerzeugungsszenarien zur Einhaltung der Ziele ableiten.

Abbildung 51 fasst die in 5.2 und 5.3 definierten Stromerzeugungsszenarien zusammen. Dabei wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf die dargestellten Emissionsfaktoren für die Berechnung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der betrachteten Prozesse Bezug genommen.

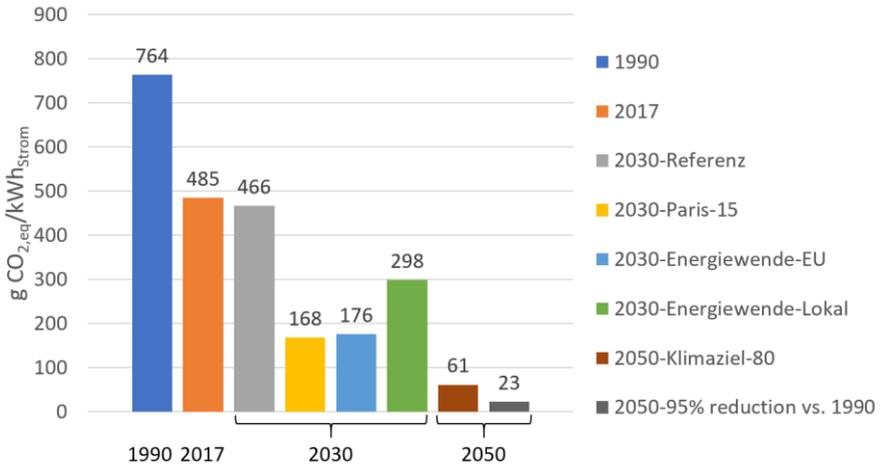


Abbildung 51: Emissionsfaktoren des Energiesektors in den betrachteten Strombereitstellungs-Szenarien

Die Erreichung der Ziele setzt eine Beschleunigung der jährlichen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsreduktion voraus. Im Zeitraum 1990 bis 2020 wurden mit einer jährliche Rate von 17 Mio. t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /Jahr die Gesamtreibhausgasemissionen von 1251 Mio. t auf 750 Mio. t gesenkt. Ab 2020 ist eine jährliche Reduktion um 25 Mio. t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /Jahr notwendig, um 2030 die angestrebten 438 Mio. t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ zu erreichen (129, S. 32).

Weltweit sind seit 1990 die jährlichen Treibhausgasemissionen um 60 % gestiegen. Um das Ziel des Pariser Klimaabkommens von 2015 (3), den anthropologischen Temperaturanstieg auf 2 °C zu begrenzen, dürfen weltweit bis 2040 nicht mehr als 400 Gigatonnen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ ausgestoßen werden. Ab dem Jahr 2021 dürfen die jährlichen weltweiten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen nicht 36 Gt/Jahr überschreiten, um dieses $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Budget nicht zu übertreffen (137).

6 Well-to-Tank-Emissionsfaktoren nach Energieträger (WtT)

In diesem Abschnitt wird im Einzelnen auf die im Fahrzeug verwendete Energieträger eingegangen. Nach Definition sind primäre Energieträger in der Natur zu finden, während sekundäre Energieträger durch Umwandlung von Primärenergie gewonnen werden (138). In diesem Kontext lassen sich die in dieser Arbeit geführten Energieträger wie folgt einteilen:

Primärenergie:

- Fossile Energie wie Erdgas und Erdöl
- Regenerative Energie wie Sonnenenergie, Biomasse, Wasserkraft, Windenergie und Geothermie
- Kernenergie

Sekundärenergie:

- Strom
- Fossile Kraftstoffe (Diesel, Benzin)
- Strombasierte Kraftstoffe (Wasserstoff, PtX)
- Biogene Kraftstoffe (HVO, FAME)

Nach der oben genannten Einteilung werden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Sekundärenergieträger für die Anwendung in verschiedenen Nutzfahrzeugen verglichen. Dabei werden die Energieträger hinsichtlich ihres Treibhausgaspotentials in $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ (Global Warming Potential – GWP) bewertet.

Die Einteilung in Primär- und Sekundärenergieträger impliziert einen verlustbehafteten Prozess zur Erzeugung von Sekundärenergie aus Primärenergiequellen. Somit sind alle in dieser Arbeit untersuchte Energieträger sekundärer Natur und bedürfen einem Energieaufwand in Form von Strom zum Betrieb der Anlagen zur Erzeugung, Umwandlung und/oder Verdichtung. In diesem Kontext sind alle Energieträger vom Energiesystem indem sie hergestellt werden abhängig. Bei den synthetisch hergestellten Energieträgern spiegelt sich der Emissionsfaktor des verwendeten Strommix wider, so dass die Stromerzeugungsszenarien aus Kapitel 5 auch die Emissionsfaktoren der Energieträger beeinflussen.

6.1 Strom

Bei der Verwendung von Strom als Energieträger ist der Emissionsfaktor aus dem Strommix für die WtT-CO_{2,eq}-Bilanz anzunehmen. Dabei setzt sich der WtT-Emissionsfaktor ausfolgenden Teilprozesse zusammen:

1. Stromproduktion/Herstellung
2. Transport
3. Laden

Die Herstellung deckt sich mit dem Emissionsfaktor des verwendeten Strommix. Im Transport sind die Verluste im Stromnetz inbegriffen und im Ladevorgang die Verluste beim Laden der Fahrzeugbatterie. Unter Transport werden die Übertragungsverluste im Stromnetz verstanden. Primär handelt es sich dabei um Wärmeverluste in den Hochspannungstrassen (~800 kV) in der Höhe von 3%/1000 km für Gleichstromtrassen und 7%/1000 km für Wechselstromtrassen (139). In Deutschland liegen die Übertragungsverluste im Mittel bei 4% (140). Bei der Ladeinfrastruktur wird aufgrund der Batteriekapazität von Nutzfahrzeugen von mehreren 100 kWh vorrangig von Leistungsstarke Gleichstrom-Schnellladesysteme (*Direct Current* – DC) ausgegangen (85). Die Ladeverluste steigen mit der Leistung sowohl seitens der Ladeeinheit als auch batterieseitig. In diesem Zusammenhang liegt der gesamten Wirkungsgrad des Ladevorgangs bei 86,5% (64, S. 30). In diesem Zusammenhang steigen die Energiefaktoren des Stroms als Energieträger in den unterschiedlichen Strombereitstellungsszenarien um 17,5% entsprechend Abbildung 52.

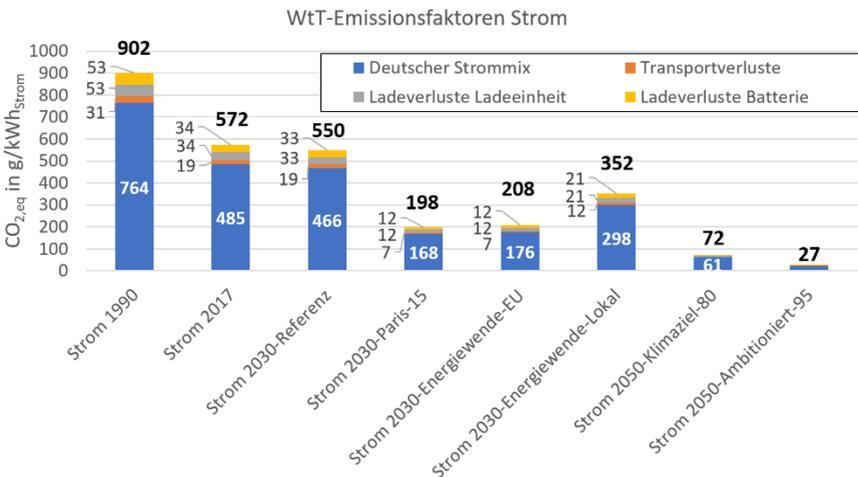


Abbildung 52: Well-to-Tank Emissionsfaktoren für Strom je nach Stromerzeugungsszenario

6.2 Fossile Energieträger

Bei der Berechnung der Emissionsfaktoren im Herstellungspfad von fossilen Kraftstoffen werden vier Teilprozesse unterschieden (141, S. 33):

1. Gewinnung an der Quelle
2. Transport
3. Verarbeitung
4. Verteilung

Die Summe der einzelnen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen in den vier Teil-Prozessschritten stellt den Well-to-Tank (WtT) Emissionsfaktor eines Energieträgers dar.

In diesem Abschnitt werden die Well-to-Tank $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von Diesel, komprimiertem Erdgas (englisch *Compressed Natural Gas* - CNG) und flüssigem Erdgas (englisch *Liquefied Natural Gas* – LNG) hergeleitet.

6.2.1 Diesel

Der raffinierte Dieselkraftstoff besteht aus einer Kette von neun bis 22 Kohlenstoffatomen und wird aus einem Teil des aus der Erdkruste geförderten Rohöls gewonnen. Dabei werden für die Gewinnung und Verarbeitung des Rohöls $8,3 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{MJ}_{\text{Rohöl}}$ angenommen (141, S. 39). Der mittlere Ausstoß des Rohöltransports von der Gewinnungsstelle zur Raffinerie in Europa wird auf $0,7 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{MJ}_{\text{Rohöl}}$ geschätzt (141, S. 40). In der Raffinerie wird das Rohöl mittels Destillation in seine Bestandteile aufgeteilt, anschließend entschwefelt und gemäß den Anforderungen der DIN EN 590 zu Dieselkraftstoff weiterverarbeitet (142). Unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs zum Betrieb der Raffinerie wird Dieselkraftstoff ein Emissionsfaktor für den Verarbeitungsschritt von $7,2 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{MJ}_{\text{Diesel}}$ zugeschrieben (141, S. 41). Bei der Verteilung des Dieselkraftstoffs an Tankstellen wird $1 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{MJ}_{\text{Diesel}}$ angerechnet. Aus der Summe der aufgeführten Teilschritte lässt sich der WtT Emissionsfaktor für Diesel mit $17,2 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{MJ}_{\text{Diesel}}$ oder $62 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{Diesel}}$ errechnen.

In Tabelle 13 sind die in dieser Arbeit angenommenen Spezifikationen für den Dieselkraftstoff. Sie entsprechen den Werten der EN 590 (142). Der Emissionsfaktor von Sommer- und Winterdiesel unterscheidet sich mit $3,165 \text{ kg CO}_{2,\text{eq}}/\text{kg}_{\text{Diesel}}$ und respektiv $3,168 \text{ kg CO}_{2,\text{eq}}/\text{kg}_{\text{Diesel}}$. Unter der Annahme, dass acht Monate lang Sommerdiesel angeboten wird, lässt sich der gewichtete mittlere Emissionsfaktor aus Tabelle 13 berechnen (143, S. 34).

Tabelle 13: Spezifikation für Dieseldieselkraftstoff

Dichte in kg/m³	835
Cetanzahl	51
Heizwert in kWh/kg (MJ/kg)	11,8 (42.5)
CO₂-Emissionen bei der Verbrennung g/kg	3166 (143, S. 34)
Emissionsfaktor in g/kWh (g/MJ)	62 (17.2)

In Abbildung 53 sind die Well-to-Tank CO_{2,eq}-Emissionen von fossilem Diesel dargestellt. Die Verarbeitungsschritte sind zusammen für ca. 89 % der Emissionen verantwortlich, während der Transport per Tankerschiff nach Europa und die lokale Verteilung für die restlichen 11 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich sind.

6.2.1 Komprimiertes Erdgas (CNG) und verflüssigtes Erdgas (LNG)

Bei der Gewinnung von Erdgas sind drei Hauptquelle für CO_{2,eq}-Emissionen bei der Produktion und Konditionierung an der Quelle auszumachen: der Energiebedarf der Anlage, das Abfackeln und der Methanschluß bei der Gewinnung. Der Energiebedarf in diesem Prozessschritt wird direkt aus dem Gas gedeckt und beläuft sich auf 0,03 MJ/MJ_{Gas}. Des Weiteren werden in Abhängigkeit von der Gasqualität bis zu 1 % des Gases als Inertgas in die Atmosphäre geblasen, sodass zusammen mit dem Methanschluß der Emissionsfaktor von 4,4 g CO_{2,eq}/MJ_{Gas} (15,84 g CO_{2,eq}/kWh_{Gas}) im ersten Prozessschritt „Produktion und Konditionierung an der Quelle“ entstehen (141).

Bei der Berechnung der Well-to-Tank Emissionsfaktoren werden die Daten vor dem Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine verwendet. Deutschland importiert zu diesem Zeitpunkt 90 % seines Erdgasverbrauchs. Davon wurden im Jahr 2020 55,2 % aus Russland und 30,6 % aus Norwegen bezogen (144). Unter dieser Randbedingung müssen die Emissionen durch Methanschluß in den Langdistanz-Pipelines berücksichtigt werden. Dabei entstehen weitere 4,1 g CO_{2,eq}/MJ_{Gas} an CO_{2,eq}-Emissionen. Zuletzt werden für die Komprimierung und Verteilung 1,89 g CO_{2,eq}/MJ_{CNG} und respektiv 5,86 g CO_{2,eq}/MJ_{CNG} angerechnet.

So ergibt das europäische Mittel für komprimiertes Erdgas einen Emissionsfaktor von 16,25 g CO_{2,eq}/MJ_{CNG} oder 58,5 g CO_{2,eq}/kWh_{CNG}. In der Studie „Wie klimafreundlich ist LNG?“ vom Umweltbundesamt (145) werden die Emissionsfaktoren für LNG aus Qatar und Pipeline-CNG aus Russland mit 15 g CO_{2,eq}/MJ_{LNG} oder 54 g CO_{2,eq}/kWh_{LNG} angegeben (145, S. 20). Die weiteren Stoffeigenschaften von CNG und LNG sind aus Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 14: Eigenschaften von komprimiertem und verflüssigtem Methan (63, S. 58)

	CNG	LNG
Dichte in kg/m³	162	421
Heizwert in kWh/kg (MJ/kg)	13,9 (50,03)	
Oktanzahl (ROZ)	130	
CO₂-Emissionen bei der Verbrennung g/kg	2740	
Emissionsfaktor in g/kWh (g/MJ)	58,5 (16,25)	54 (15)

Zusammenfassend sind die Well-to-Tank Emissionsfaktoren in g CO_{2,eq}/kWh_{Treibstoff} in Abbildung 53 für fossilen Diesel, komprimiertes Erdgas und verflüssigtes Erdgas dargestellt.

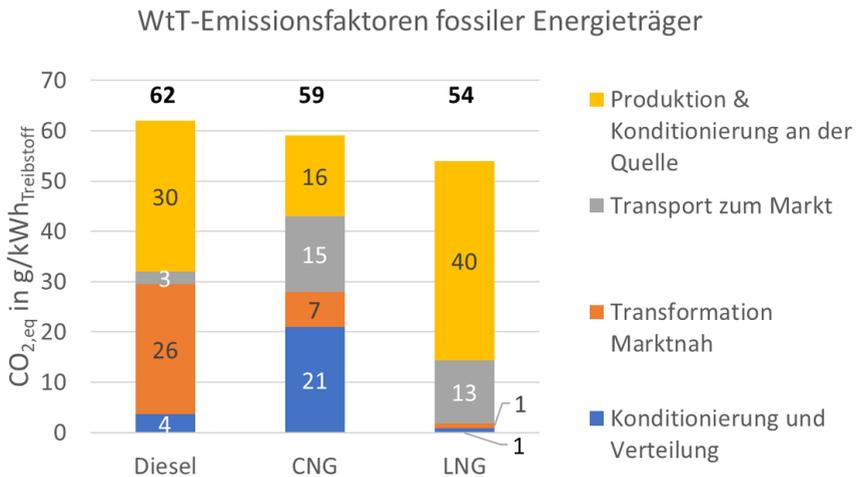


Abbildung 53: Well-to-Tank Emissionsfaktor von Dieselmotorkraftstoff und CNG.

6.3 Strombasierte Energieträger auf Wasserstoffbasis (PtH₂ und PtX)

Als strombasierte Kraftstoffe werden in dieser Arbeit Energieträger definiert, die aus einer Stromquelle und Wasser über den Elektrolyseprozess hergestellt werden. Dazu gehören Wasserstoff (PtH₂), flüssige Kraftstoffe (PtL) und gasförmige Kraftstoffe (PtG). Bei den letzteren zwei findet nach der Elektrolyse noch ein Syntheseprozess statt. Diese benötigt eine Energiequelle, um die Synthese von Kohlendioxid und Wasserstoff zu betreiben (17, S. 35). Somit werden bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen im flüssigen oder gasförmigen Zustand immer die Edukte Wasser und Kohlendioxid, sowie eine Stromquelle zu Beginn der Produktionskette benötigt (PtX). In diesem Abschnitt und dem Rest der Arbeit wird der Energiebedarf der einzelnen Prozessschritte mit dem Emissionsfaktor des verwendeten Stroms multipliziert. In diesem Zusammenhang ist bei der Bewertung der CO_{2,eq}-Bilanz eines synthetisch erzeugten Energieträgers die Betrachtung des Emissionsfaktors des verwendeten Stroms und der Edukte essentiell. Abbildung 54 zeigt ein vereinfachtes Flussdiagramm zur Herstellung von strombasierten Kraftstoffen. Dabei stellen die Art des verwendeten Stroms, die CO₂-Quelle sowie die bei der Elektrolyse und Synthese verwendeten Technologien eine entscheidende Rolle bei der Berechnung der CO_{2,eq}-Bilanz eines Energieträgers.

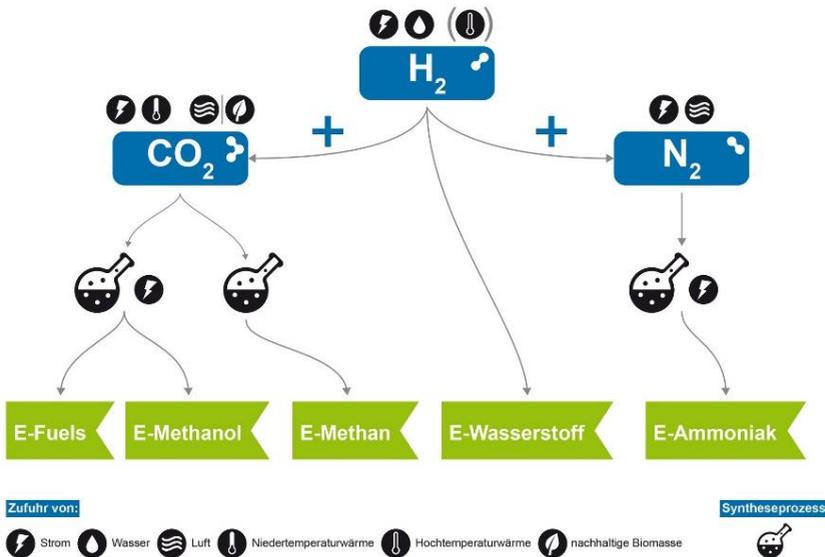


Abbildung 54: vereinfachte Darstellung der Produktionskette von strombasierten Kraftstoffen (146)

6.3.1 Produktion von Wasserstoff (PtH₂)

Wie in Abbildung 54 zu erkennen ist Wasserstoff und somit die Elektrolyse Teil des Herstellungspfads von allen strombasierten Kraftstoffen. Der Well-to-Tank Herstellungspfad von Wasserstoff ist in Abbildung 55 dargestellt. Der Strom zum Betrieb des Elektrolyseurs stammt in dieser Arbeit aus dem deutschen Strommix, sodass nach Abbildung 47 der verwendete Strom einen Emissionsfaktor zwischen 764 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} in 1990 und 23 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} in 2050 besitzt. Des Weiteren wird angenommen, dass die Elektrolyse in der Nähe der Stromquelle aufgebaut wird. So werden Strom-Transportverluste minimiert und der Elektrolyseur kann nach Bedarf verwendet werden. Die Verteilung von Wasserstoff in Deutschland und Europa soll in Zukunft per Pipelines stattfinden. Dabei soll sowohl ein neues Netz aufgebaut werden, als auch das Erdgasnetz modernisiert werden (26, S. 45). Unter diesen Randbedingungen kommen für den europäische Markt ebenfalls der Aufbau solcher Anlagen in MENA Länder (Middle East and North Africa) in Frage. Der Transport nach Europa soll ebenfalls mittels Pipelines erfolgen. Aufgrund der Teilwirkungsgrade der Einzelschritte ist ein Emissionsfaktor für den importierten Wasserstoff aus sogenannten "Sweet-Spots" wie die MENA Länder auf dem Niveau des deutschen Strommix 2050 zu erwarten.

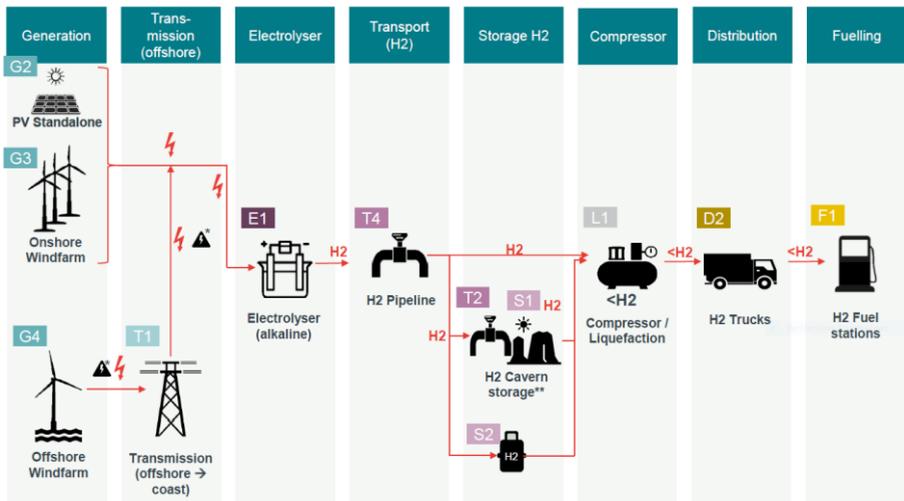


Abbildung 55: Well-to-Tank Pfad der Herstellung von grünem Wasserstoff (26, S. 44)

In der Betrachtung wird die Weiterentwicklung der Technologie der Elektrolyseure mitberücksichtigt. Dabei wird erwartet, dass der Elektrolyseprozess in Zukunft gemäß Tabelle 15 effizienter wird (26, S. 37, 147). Demnach ist bis 2050 eine Verbesserung des Wirkungsgrads, um ca. 15 % bei der Niedertemperaturelektrolyse und ca. 10 % bei der Hochtemperaturelektrolyse zu erwarten. Im weiteren Verlauf der Arbeit, werden für das Well-to-Tank-Emissionsfaktoren nach Energieträger (WtT)

Referenzjahr 2017 der Technologiestand und die Wirkungsgrade von 2020 angenommen. Für 2030 und 2050 werden die Wirkungsgrade entsprechend Tabelle 15 angenommen.

Tabelle 15: Erwartete Elektrolysewirkungsgrade bis 2050 (26, S. 37, 148, S. 64)

	2017/2020	2030	2050
Niedrigtemperatur-Elektrolysewirkungsgrad in kWh_{H2}/kWh_{Strom}	64%-67%	69%-71%	71%-80%
Hochtemperatur- Elektrolysewirkungsgrad in kWh_{H2}/kWh_{Strom}	81%	84%	90%

Falls Wasserstoff als Energieträger verwendet werden soll, zum Beispiel in einer Brennstoffzelle oder einem Verbrennungsmotor, muss er aufgrund seiner geringen volumetrischen Dichte, für den Transport und die Speicherung im Fahrzeug auf 500 bar bis 700 bar verdichtet werden. Für die Verdichtung, die Verteilung und die Betankung wird eine Energiemenge benötigt, die 28 % des Elektrolyse-Energieaufwands entspricht (26, S. 58). Dementsprechend sind gemäß der in Abbildung 51 definierten CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren der Stromproduktion in Deutschland und der in Tabelle 15 dargestellten Elektrolyseurwirkungsgrade die Emissionsfaktoren aus Abbildung 56 für die Wasserstoffproduktion zu erwarten. Die angegebenen Emissionsfaktoren beziehen sich auf die Mindestwirkungsgrade der Niedertemperaturelektrolyse aus Tabelle 15.

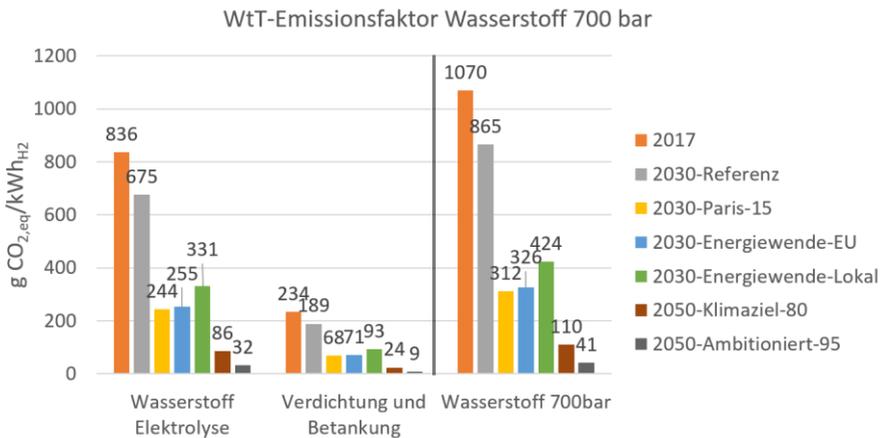


Abbildung 56: Well-to-Tank- Emissionsfaktoren für die Wasserstoffproduktion mit Strom aus dem deutschen Strommix

Der produzierte Wasserstoff wird anschließend entweder direkt zur Produktion von PtX weiterverwendet oder verdichtet und eventuell verflüssigt falls er als Energieträger Anwendung finden soll. In diesem Zusammenhang besitzt gemäß Abbildung 56 der auf 700 bar verdichtete Energieträger-Wasserstoff einen um etwa 20 % höheren WtT-Emissionsfaktor als der Wasserstoff zur Weiterverarbeitung. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird von einem Druck von 700 bar für Wasserstoff als Energieträger angenommen, da dies dem aktuellen Druckniveau der Tanktechnologien entspricht.

6.3.2 Strombasierte Kraftstoffe mit Kohlenwasserstoffkette (PtX)

Bei der Synthese der strombasierten Kraftstoffe mit Kohlenstoffanteil wie Methan, Methanol, Fischer-Tropsch-Diesel und Dimethylether ist ausgehend vom Wasserstoff beim nächsten Syntheseprozess eine CO₂-Quelle notwendig, aus der das Kohlenstoffatom „gewonnen“ wird. Zur Herstellung von Synthesegas werden in diesem Abschnitt ausschließlich der CO₂-Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture - DAC) und die auch in Zukunft schwer vermeidbare CO₂-Quelle aus Industrieprozessen, wie zum Beispiel der Stahl- und Betonproduktion, betrachtet. Es wird angenommen, dass die CO₂-Quellen aus der Wasserstoffproduktion via Dampfreformierung sowie aus Raffinerien der Stahl-, Ammoniak- und Erdgasverarbeitung in Zukunft durch andere, nachhaltige, Prozesse ersetzt werden (149, S. 18).

Bei der CO₂-Abscheidung und dem Syntheseprozess sind Energie und Wärme notwendig. Dieser Bedarf spiegelt sich auch im elektrischen und thermischen Wirkungsgrad des Prozesses wider. In Abbildung 57 ist der Ablauf eines Niedertemperatur-CO₂-Abscheideprozesses dargestellt. Darin wird deutlich, dass sowohl im Adsorption- als auch im Desorptionsprozess eine Energiezufuhr in Form von Elektrizität und/oder Wärme notwendig ist.

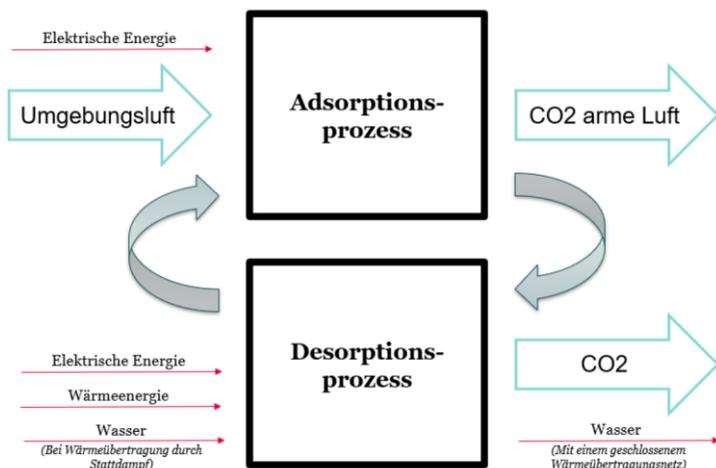


Abbildung 57: Schematische Darstellung eines Niedertemperatur-DAC-Prozesses (150, S. 22)

Es werden beim gesamten DAC-Prozess sowie bei den Teilprozessen technische Optimierungen und die Skalierung der Anlagen prognostiziert, sodass eine Steigerung des Wirkungsgrads und eine Senkung des Energiebedarfes bis 2050 gemäß Tabelle 16 zu erwarten sind (150). Die angegebenen CO₂-Entnahmeeffizienzen berücksichtigen unterschiedliche Stromquellen. Bei der Berechnung der Entnahmeeffizienz wird angenommen, dass Photovoltaik, On- und Offshore-Windkraft zu gleichen Anteilen verwendet werden. So lassen sich die Werte für die genannten Stromquellen aus „Auslegung, Analyse und Bewertung von Direct Air Capture (DAC)-Anlagen zur Nutzung für Power-to-X Prozesse [...]“ vom Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie GmbH mitteln (150, S. 41).

Tabelle 16: Angenommene technische Verbesserungen beim DAC-Prozess

	2017/2020	2030	2050
CO₂-Entnahmeeffizienz in % (150, S. 38)	81%	91%	95%
Strombedarf in kWh_{Strom}/kg CO₂	0,5	0,4	0,28
Wärmebedarf in kWh_{Thermisch}/kg CO₂	2,2	1,5	1,39

Ausgehend von den betrachteten Strommix-Szenarien (Abbildung 52) und den Prognosen für den Strombedarf des CO₂-Abscheidungsprozesses aus Tabelle 16 lassen sich die

Emissionsfaktoren für den DAC-Prozess berechnen. Abbildung 58 soll verdeutlichen, inwiefern die Prozessoptimierungen und die Wirkungsgradsteigerungen bis 2050 den Emissionsfaktor für DAC beeinflussen würden, falls die gesamte Energie aus dem Strommix bezogen würde.

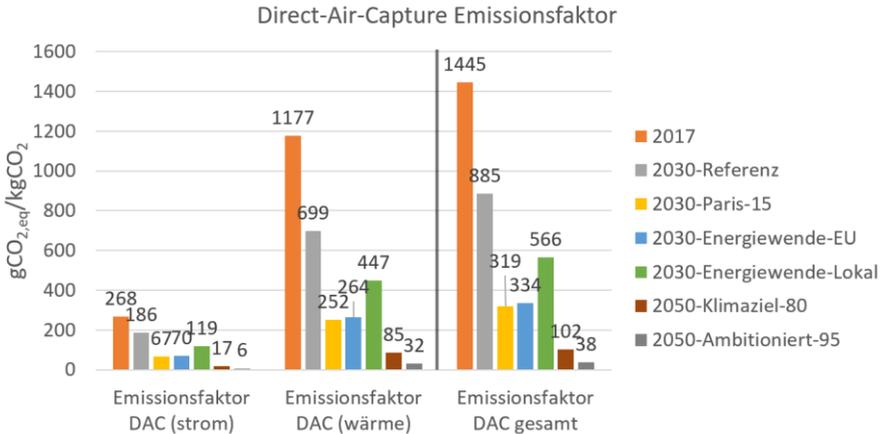


Abbildung 58: Theoretische Emissionsfaktoren für DAC, falls der gesamte Energiebedarf aus dem Stromnetz bezogen würde

In der Realität werden moderne PtX-Anlagen als Komplettanlage mit DAC, Elektrolyseur und der nachgeschalteten Syntheseanlage geplant. Demnach können die Energieaufwände für die einzelnen Prozessschritte nicht einfach addiert werden. Zum Beispiel kann ein Teil des Wärmebedarfs im DAC-Teilprozess der Desorption aus den Syntheseprozessen gewonnen werden. Demnach sind Gesamtwirkungsgrade möglich die höher als die Summe der Teilprozesswirkungsgrade sind. Die Synergieeffekte zwischen DAC und dem nachgeschalteten Syntheseprozess sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Nutzung der Abwärme der nachgeschalteten Syntheseprozesse in DAC

DAC: CO ₂ -Desorptionsprozess	SCNG	eMeOH	Fischer-Tropsch-Diesel
CO ₂ -Bedarf in kg CO ₂ /kg _{Kraftstoff}	2,67	1,37	3,14
Wärmerückgewinnung in kWh/kWh _{Kraftstoff}	0,19	0,18	0,52
Anteil am Wärmebedarf in % gemäß Wirkungsgradsteigerung			
2017	9%	8%	24%
2030	13%	12%	35%
2050	14%	13%	37%

6.3.2.1 Synthetisches Methan PtG (SNG oder eCH₄) (26, S. 54–57)

Auch wenn in dieser Arbeit der deutsche Strommix als Stromquelle verwendet wird, sollte eine Methanisierungsanlage idealerweise, zusammen mit dem Elektrolyseur und der DAC-Anlage, in der Nähe einer großen regenerativen Stromquelle aufgebaut werden. Parallel zum transienten Elektrolyseurbetrieb in Abhängigkeit des lokal verfügbaren regenerativen Stroms wird auch die gekoppelte DAC-Anlage betrieben, um CO₂ aus der Luft zu gewinnen. Um einen kontinuierlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten, müssen sowohl CO₂- als auch H₂-Pufferspeicher in Nähe der Anlage geplant werden. Die Methansynthese ist eine katalytisch unterstützte Reaktion bei 200 °C bis 500 °C und 3 bar bis 8 bar mit den Edukten CO₂ und Wasserstoff und den Produkten Wasser und Methan. Für die Herstellung von Synthetischem Gas (SNG) oder strombasiertem Methan (eCH₄) aus der Methanisierungsanlage werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Ausbau von Anlagen im industriellen Maß wird bei den hier getroffenen Annahmen vorausgesetzt. In der Studie „*System comparison of storable energy carriers from renewable energies*“ von Umweltbundesamt aus dem Jahr 2020 werden verschiedene Pfade zur CO₂-Abspaltung und anschließender Methansynthese aufgezeigt. In allen dargestellten Herstellungspfaden werden die Elektrolyse-, DAC- und Methanisierungsanlagen an große CO₂-Emitenten wie die Zementproduktion oder Biogasanlage gekoppelt. Zudem sind auch Wasserstoff- und CO₂-Speicher geplant, um die Verfügbarkeit der Anlagen zu erhöhen.

- Der Wirkungsgrad der Methansynthese liegt bei 83 % bezogen auf den verwendeten Wasserstoff bei jährlich 8000 Volllaststunden (26, S. 55, 149).
- Durch Wärmerückgewinnung im Methansyntheseprozess können $0,19 \text{ kWh}_{\text{Thermisch}}/\text{kWh}_{\text{CH}_4}$ dem vorgelagerten CO_2 -Abscheidungsprozess zugeführt werden.
- Aus dem molaren Gleichgewicht geht hervor, dass zur Herstellung von 1 kg Methan 2,74 kg CO_2 benötigt wird.

Die verwendeten Kraftstoffeigenschaften sind Tabelle 18 zu entnehmen. Bei der Berechnung der CO_2 -Austoßes der Verbrennung wird von einer vollständigen Verbrennung von reinem Methan ausgegangen.

Tabelle 18: Spezifikationen von synthetischem Methan (eCH_4/SNG) (121, S. 146)

Dichte in kg/m^3	780
Heizwert in kWh/kg (MJ/kg)	13,9 (50)
CO_2-Emissionen bei der Verbrennung g/kg (g/MJ)	2740 (55)

6.3.2.2 Fischer-Tropsch-Diesel (FT-Diesel) (26, S. 49–52)

Auch wenn in dieser Arbeit der deutsche Strommix als Stromquelle verwendet wird, sollte die Fischer-Tropsch-Syntheseanlage idealerweise zusammen mit dem Elektrolyseur und der DAC-Anlage in der Nähe einer großen regenerativen Stromquelle aufgebaut werden. Parallel zum transienten Elektrolyseurbetrieb in Abhängigkeit des lokal verfügbaren regenerativen Stroms wird auch die DAC-Anlage mittels erneuerbaren Stroms betrieben, um CO_2 aus der Luft zu gewinnen. Im Gegensatz zum Elektrolyse- und DAC-Prozess benötigt die Fischer-Tropsch-Synthese lange, energieintensive Hochfahrzeiten, sodass die Fischer-Tropsch-Syntheseanlage idealerweise kontinuierlich betrieben wird und aus einem CO_2 - und einem Wasserstoffspeicher gespeist wird (26, S. 50).

Die Fischer-Tropsch-Synthese läuft in zwei Schritten ab. Als erstes werden die Edukte Wasserstoff und CO_2 zu Syngas verarbeitet. Anschließend findet eine Verflüssigung der Kohlenwasserstoffe statt. Das überschüssige „Fluegas“ wird dem Reaktor wieder zurückgespeist und kann wiederverwendet werden. Ebenso wie die vorherig beschriebenen Reaktionen in der Methanisierungsanlage, ist die Fischer-Tropsch-Synthese stark exotherm, sodass mittels Wärmerückgewinnung der DAC-Prozess gespeist werden kann. Des Weiteren werden noch folgende Annahmen für die Verwendung von Fischer-Tropsch-Diesel getroffen:

- Der Ausbau von Anlagen im industriellen Maß wird bei den hier getroffenen Annahmen vorausgesetzt
- Die Fischer-Tropsch-Synthese ohne Wärmerückgewinnung wird mit einem Wirkungsgrad von 68 % angenommen. Mit Kopplung am DAC-Prozess und Wärmerückgewinnung ist bezogen auf den verwendeten Wasserstoff ein Wirkungsgrad von 73 % beim Technologiestand von 2020 bis 82 % in 2050 erreichbar.
- Die Fischer-Tropsch-Synthese ermöglicht die Wärmerückgewinnung von $0,52 \text{ kWh}_{\text{Thermisch}}/\text{kWh}_{\text{FT-Diesel}}$. Durch die Kopplung von Elektrolyse, CO_2 -Abscheidung und Fischer-Tropsch-Synthese, kann die verfügbare Wärme aus der Fischer-Tropsch-Synthese in der CO_2 -Abscheidung verwendet werden.
- Aus dem molaren Gleichgewicht geht hervor, dass zur Herstellung von 1 kg Fischer-Tropsch Diesel 3,12 kg CO_2 benötigt werden
- Es wird angenommen, dass kein Infrastrukturausbau für den Transport, die Speicherung und die Verteilung von Fischer-Tropsch-Diesel notwendig ist, da die hierfür relevanten Eigenschaften denen der aktuellen flüssigen Kraftstoffe entsprechen. Es werden somit die Werte aus 6.2.1: Diesel 3 g $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{FT-Diesel}}$ für den Transport zum Markt sowie die 4 g $\text{CO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{FT-Diesel}}$ für die Verteilung angenommen.

Die verwendeten Kraftstoffeigenschaften für Fischer-Tropsch-Diesel sind Tabelle 19 zu entnehmen

Tabelle 19: Spezifikationen Fischer-Tropsch-Diesel (121, S. 134) (5, S. 62)

Dichte in kg/m^3	780
Heizwert in kWh/kg (MJ/kg)	12,2 (44)
CO_2-Emissionen bei der Verbrennung g/kg (g/MJ)	3120 (70,8)

6.3.2.3 Beispiel der Umsetzung einer *Synthetic Natural Gas* (SNG) Herstellungsanlage in Island (151)

Im Rahmen einer Studie des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) wurde eine Lebenszyklusanalyse von in Island hergestelltem synthetischem Gas (Synthetic Natural Gas - SNG) durchgeführt. Im Rahmen der Studie wurde das Fallbeispiel aus Abbildung 59 analysiert. Dabei wird das CO₂ aus einem Geothermie-Kraftwerk mittels DAC der Methanisierungsanlage zusammen mit Wasserstoff zugeführt. Der Wasserstoff stammt aus einem Elektrolyseur, der mit dem dortigen Strommix betrieben wird. Zum Transport wird das SNG in LSNG (Liquefied Synthetic Natural Gas - LSNG) verflüssigt und mittels Tanker und Pipeline in die Schweiz transportiert, wo es zur Wärmeerzeugung oder im Fahrzeug verwendet wird.

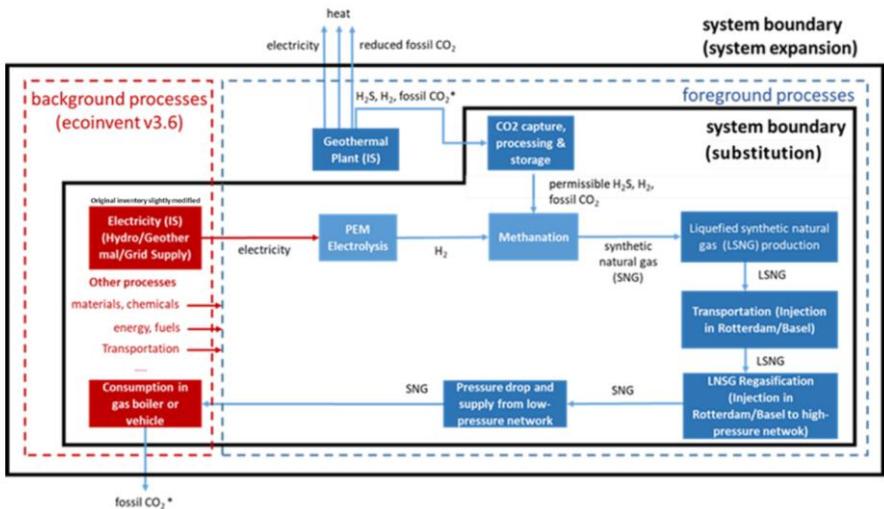


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Lebenszyklus des in Island hergestellten SNG bis zum Verbrauch in der Schweiz (151, S. 7)

Abbildung 59 zeigt die Systemgrenzen sowie die Energie- und Stoffflüsse über die Systemgrenzen des Systems hinaus. Die Energiebereitstellung für die PEM-Elektrolyse findet aus dem isländischen Stromnetz statt. Durch den hohen Anteil an Wasserkraft und Geothermie beträgt der Emissionsfaktor maximal 19 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom}. Unter Verwendung von ausschließlich Wasserkraft wird sogar ein Emissionsfaktor von 8 g CO_{2,eq}/kWh_{Strom} erreicht. Der Transport per Tanker von Island nach Rotterdam und anschließend per Pipeline in die Schweiz hat einen Emissionsfaktor von 7 g CO_{2,eq}/kWh_{SNG} (151). Unter Berücksichtigung der gleichen Randbedingungen und Prozesswirkungsgrade für den DAC- und den nachgeschalteten Syntheseprozess sind Emissionsfaktoren für Fischer-Tropsch-Diesel und

komprimiertem synthetischen gas (CSNG) von $85 \text{ gCO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{FT-Diesel-Island}}$ und respektiv $80 \text{ gCO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{CSNG-Island}}$ heute schon erreichbar. Unter Berücksichtigung der Verbesserung der Wirkungsgrade von Elektrolyse und DAC ist eine weitere Reduktion des Emissionsfaktors gemäß Abbildung 60 erreichbar.

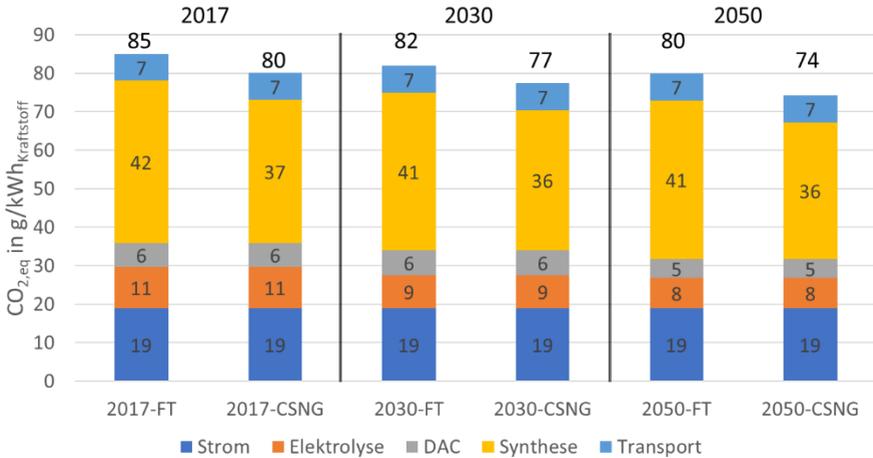


Abbildung 60: Fischer-Tropsch-Diesel- und CSNG-Emissionsfaktoren nach den Randbedingungen aus der Studie des Paul-Scherrer-Instituts

6.3.3 Zusammenfassung strombasierter Energieträger auf Wasserstoffbasis

Aus dem Prozessbild (Abbildung 55) wird deutlich, dass die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in flüssiger oder gasförmiger Form, ausgehend von Wasserstoff, weitere Verarbeitungsschritte benötigt. Durch Prozesskopplung zwischen den einzelnen Verarbeitungsschritten ist der energetische Aufwand zur Herstellung von PtX-Stoffen aus Wasserstoff zwar höher, jedoch in der gleichen Größenordnung wie der der strombasierten Wasserstoffproduktion mit anschließender Verdichtung. Abbildung 61 stellt die Well-to-Tank $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen berechnet aus den Stromproduktionsannahmen und den Energieaufwänden zur PtX-Herstellung dar. Aus den Daten geht hervor, dass der Emissionsfakturvorteil von komprimierten Wasserstoff gegenüber PtX-Stoffen mit dem steigenden Anteil an regenerativen Quellen im Strommix geringer wird. Berücksichtigt man die Verwendung lokaler „Sweet-spots“ wie in 6.3.2.3, wird ersichtlich, dass niedrige Emissionsfaktoren für PtX heute schon erreichbar sind. In diesem Zusammenhang wird in der TtW-Bilanz hat Strom aus dem deutschen Strommix erst nach 2045 eine bessere $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz als PtX aus beispielweise Island. Der dargestellte Fall soll ein Beispiel für ein Produktionspfad von PtX darstellen. Bei ähnlichen Transportwegen sind ähnliche Emissionsfaktoren für PtX aus

MENA-Ländern denkbar. Dabei würde die elektrische Energie aus Sonne (und Wind) statt aus Geothermie und Wasserkraft stammen.

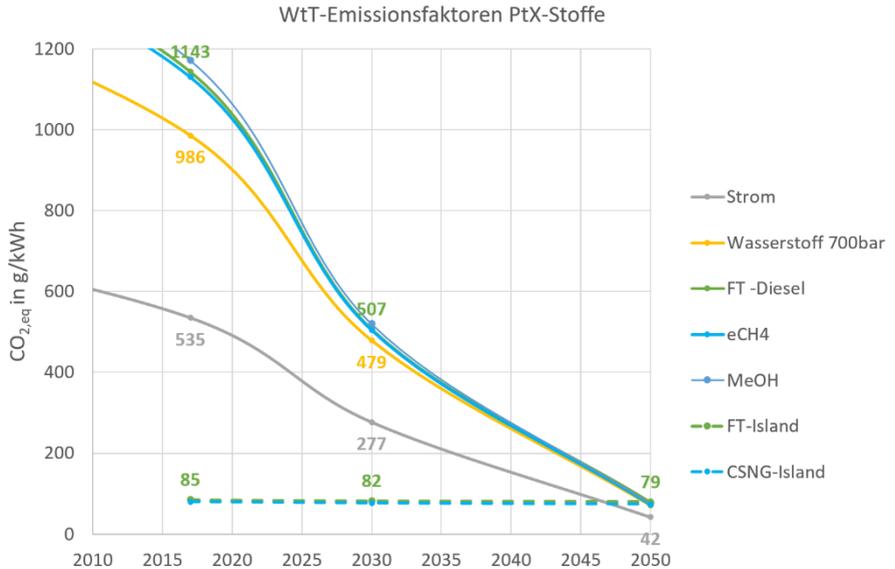


Abbildung 61: Well-to-Tank Emissionsfaktoren der PtX-Kraftstoffe in Abhängigkeit der Entwicklung des deutschen Strommix über der Zeit im Vergleich zu synthetisch hergestellten PtX aus Island

6.4 Fortschrittliche biogene Energieträger

Mit biogenen Energieträgern und Abfallstoffen wurden 2018 ca. 10,2 % des weltweiten Endenergieverbrauch gedeckt (152), allerdings wurde davon nur ein Bruchteil im Verkehrssektor verwendet (56, S. 149). In Deutschland wurden im Jahr 2021 gemäß Abbildung 62 unter 6 % des gesamten gravimetrischen Kraftstoffverbrauch aus biogenen Quellen bezogen (153). Davon werden ca. zwei Drittel als Zusatz zu fossilem Diesel zu einem Anteil von bis zu 7 % gemäß der Dieselmotorkraftstoffnorm EN 590 beigemischt. Der Rest, zum größten Teil bestehend aus Bioethanol, wird Ottokraftstoff als „E10“ beigemischt.

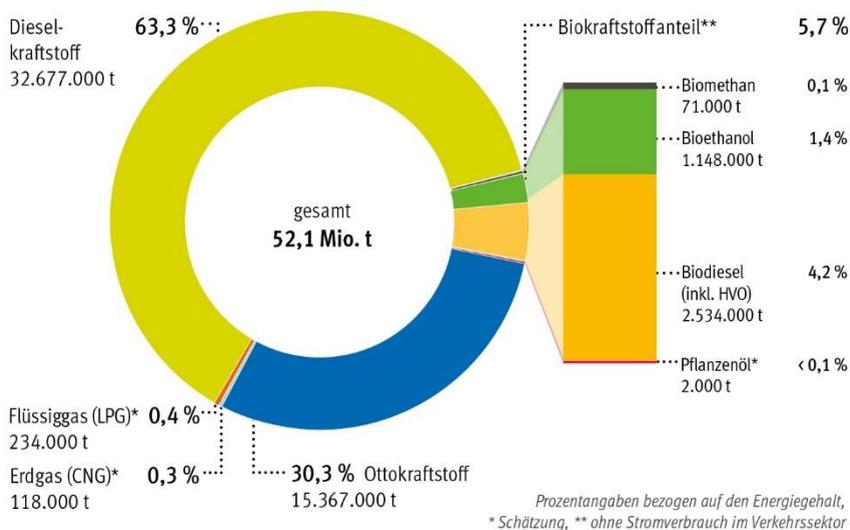


Abbildung 62: Biogener Kraftstoffverbrauch in Deutschland im Jahr 2021 bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch (153)

Bei den biogenen Kraftstoffen wird zwischen Biokraftstoffen der ersten und der zweiten Generation unterschieden. Biokraftstoffe der ersten Generation bestehen aus Zucker und Stärke (Bioethanol) oder aus Pflanzenölen (Biodiesel). Im Gegensatz dazu, verwenden Biokraftstoffe der zweiten Generation, auch fortschrittliche Biokraftstoffe genannt, ausschließlich Abfallprodukte der Ernte oder Siedlungsmüll und schließen die Verwendung von zur Nahrungsmittelherstellung konkurrierenden Pflanzenmaterial aus. Bei der Herstellung neuartiger biogener Kraftstoffe aus Rest- und Abfallfetten wird zwischen Hydrotreating und Veresterung unterschieden. Beide thermochemische Verfahren ermöglichen die Erstellung eines maßgeschneiderten Kraftstoffes. So sind im Gegensatz zu biogenen Kraftstoffen der ersten Generation fortschrittliche biogene Kraftstoffe von den allermeisten Motoren auch als Reinkraftstoff ohne Schäden nutzbar (154–156). In dieser Arbeit werden ausschließlich

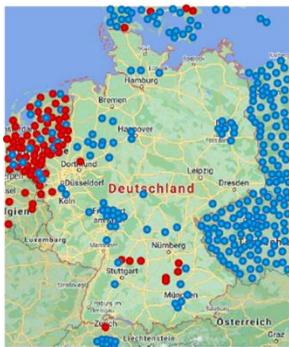
fortschrittliche Biogene Kraftstoffe berücksichtigt. Die Verfügbarkeit an Rest- und Abfallstoffen ist zwar limitiert, die Gewinnung der Rohstoffe sollte jedoch weder mit Flächen zur Nahrungsmittelherstellung konkurrieren, noch sollten (Regen-) Waldflächen zu diesem Zweck abgeholzt werden (155).

Aus Rest- und Abfallfette sowie aus Pflanzenölen können demnach sowohl Hydrierte Pflanzenöle (HVO) als auch Fettsäuremethylester (FAME) hergestellt werden. beide Edukte entsprechen der Definition von fortschrittlichen Biokraftstoffen. Nach den Angaben von Volvo Trucks (155) sind CO_{2,eq}-Emissionseinsparungen gegenüber fossilem Diesel beim Betrieb mit 100 % HVO von 32 % bis 88 % und mit 100 % FAME von 31 % bis 91 % möglich.

6.4.1 Hydriertes Pflanzenöl (HVO)

Hydriertes Pflanzenöl (Hydrated Vegetable Oils - HVO) erfüllt die Dieselmotorenkraftstoffnorm EN 590 in jeder Hinsicht bis auf die Dichte. Aufgrund seiner Kohlenstoffbeschaffenheit kann HVO in Europa , nach Dieselmotorenkraftstoffnorm EN 590, uneingeschränkt und ohne Kennzeichnung an Tankanlagen mit Dieselmotorenkraftstoff gemischt werden und entspricht nicht der Norm für Biodiesel EN 14214 sondern der EN 15940 Norm für paraffinische Dieselmotorenkraftstoffe (156).

Die Verfügbarkeit von HVO in Deutschland und den Nachbarländern schwankt stark: Während in Deutschland HVO wenig verbreitet ist, wird in den Niederlanden, Schweden und Finnland HVO als Reinstoff unter HVO100 vertrieben (siehe Abbildung 63). In Deutschland sind Gesetzlich neben den 7 % an Biodieselanteil bis zu weiteren 26 % an paraffinischem Diesel-Anteil zugelassen. In der 10. Verordnung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (10. BImSchV) wird darauf verwiesen, dass zur Nutzung im Verkehr ein Kraftstoff die entsprechende technische Norm erfüllen muss (zum Beispiel DIN EN 590) (157). Demnach ist im Jahr 2023 der Vertrieb von HVO100 in Deutschland nicht zugelassen.



- HVO100 (ca. 90% klimaneutral)
 - voll-synthetisch, Abfall-basierend
 - HVO-Beimischungen (10-50% klimaneutral)
 - teil-synthetisch, Abfall-basierend
 - Efuel-Diesel Beimischung (10-20% klimaneutral)
 - Teil-synthetisch, strom-basierend
 - vorr. ab Jahreswechsel 2022-23 erhältlich
- Insgesamt:**
- ca. 7000 Tankstellen mit HVO100 u HVO-Blends (10-45%)
 - Davon ca. 1100 Tankstellen mit vollsynth HVO100
- Länder:**
- | | |
|-------------|------------|
| Schweden | Schweiz |
| Finnland | Estland |
| Norwegen | Litauen |
| Dänemark | Slowakei |
| Island | Italien |
| Niederlande | Malta |
| Belgien | San Marino |
| Polen | Monaco |
| Tschechien | |
| Deutschland | |

Abbildung 63: Verbreitung von HVO in Europa (158)

Chemisch sind hydrierte Pflanzenöle (HVO) eine Mischung aus geradkettigen und verzweigten Paraffinen mit einer typischen Kohlenstoffzahl von 15 bis 18 Molekülen. Im Gegensatz zu fossilem Diesel enthält HVO keine Aromaten und verbrennt somit sauberer als Dieseldieselkraftstoff (156, S. 7). In diesem Zusammenhang ist bei der Verwendung von HVO100 anstatt Dieseldieselkraftstoff nach EN 590 eine Reduktion der Partikelemissionen um ca. 30 % und der NO_x-Emissionen um ca. 10 % zu erwarten (156, S. 36).

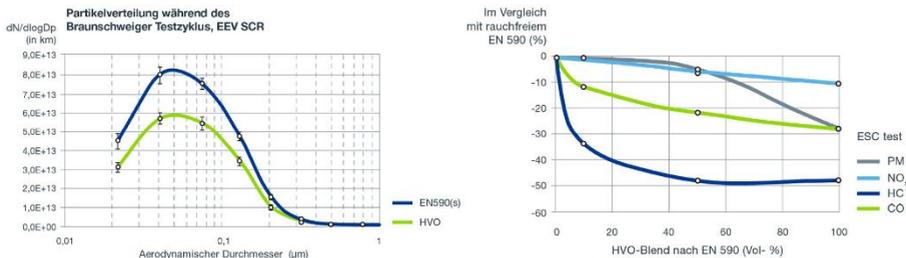


Abbildung 64: Auswirkung von HVO-Blends auf die motorischen Emissionen (156, S. 35–36)

Der WtT-Emissionsfaktor von HVO hängt von der Verarbeitung und dem Ausgangsstoff ab. Bei der Betrachtung von HVO ausschließlich aus Abfallprodukten werden entweder pflanzliche oder tierische Reste verwertet. In diesem Zusammenhang werden für die Untersuchungen dieser Arbeit die Werte des „JEC well-to-tank report V5“ der Europäischen Kommission von 2020 angenommen (121). Dabei wird ein Energieaufwand bei der Produktion von HVO aus Abfallölen aus der Nahrungsmittelindustrie von 0,16 MJ/MJ_{HVO} (121, S. 200) und ein Emissionsfaktor von 39,96 g CO_{2,eq}/kWh_{HVO} (11,1 g CO_{2,eq}/MJ_{HVO}) ermittelt (121, S. 201). Die

Beschaffenheiten von HVO wie Energiegehalt und Treibhausgaswerte sind in Tabelle 20 dargestellt.

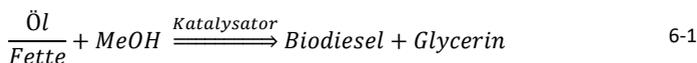
Tabelle 20: Well-to-Tank CO_{2,eq}-Emissionen für die Herstellung von HVO

Dichte in kg/m³	780 (64)
Heizwert in kWh/kg (MJ/kg)	12,2 (44) (64)
Well-to-Tank CO_{2,eq} in MJ/MJ_{HVO}	0,16 (121)
Well-to-Tank CO_{2,eq} in g CO_{2,eq}/kWh_{HVO} (g CO_{2,eq}/MJ_{HVO})	40 (11,1) (121)
CO₂-Emissionen bei der Verbrennung g/kg (g/kWh)	3120 (255) (64)

6.4.2 Fettsäuremethylester (FAME)

Fettsäuremethylester (FAME aus Fatty Acid Methyl Ester) ist ein flüssiges Gemisch aus einer Fettsäure und Methanol mit dem Handelsnamen „Biodiesel“ nach der Norm EN 14214. Seit 2009 ist ein Biodieselanteil von bis 7 % in herkömmlichen Tankstellen-Diesel gefordert. Bei der Erhöhung des Blendanteils muss der Motor vom Hersteller für Biodiesel freigegeben werden, da besonders Dichtungen im Kraftstoffpfad durch die Lösungsmittleigenschaft von Biodiesel beschädigt werden können (59, S. 81).

Bei biogenen Kraftstoffen der zweiten Generation stammen die Fettsäuren aus Abfallprodukten z.B. Altspeiseöle und werden vereinfacht dargestellt gemäß 6-1 zu Biodiesel und Glycerin verarbeitet.



Bei der Umesterung werden die Methanolphase mit dem basischen Katalysator und der Ölphase gemischt und mehrere Stunden bei 50 °C bis 70 °C gehalten. Die entstehende leichtere Phase beinhaltet Biodiesel mit Beimengung von Methanol, während die schwere Phase hauptsächlich aus Glycerin besteht. Mittels Wäsche und Destillation werden anschließend Lauge und Methanol aus der Biodiesel-Phase entfernt (159).

In den letzten zehn Jahren repräsentiert der FAME-Anteil des B7-Diesels in Tankstellen zwischen 89 und 100 PJ/Jahr. Im Jahr 2020 entspricht dieser ca. 53 % der im Straßenverkehr eingesetzten erneuerbaren Quellen, wobei HVO-Diesel eine zunehmende Relevanz erlangt (160).

■ FAME als B100
 ■ FAME in B7
 ■ HVO/HEFA in B7
 ■ Rapsöl als PÖ100
 ■ Bioethanol in E5 und E10
 ■ Biomethan in CNG und LNG

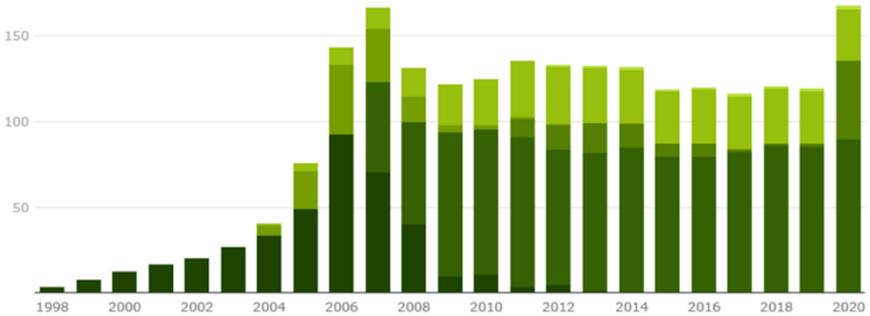


Abbildung 65: Biokraftstoffnutzung in Deutschland in PJ (160)

Bei FAME steigt die Verbrennungsspitzen­temperatur, sodass auch die Stickoxidemissionen um durchschnittlich 13 % steigen. Der im Kraftstoff enthaltene Sauerstoff hingegen führt zu einer Minderung der Partikelemissionen um ca. 30 %. Der kürzere Zündverzug und somit die Verschiebung des maximalen Zylinderdrucks in Richtung oberen Totpunkt führt zu einer Wirkungsradsteigerung und einer Reduktion der Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen (56, S. 157).

Analog zu HVO, wird in dieser Arbeit ausschließlich der Produktionspfad von Biodiesel (FAME) aus Abfall- und Reststoffe sowie Altöle berücksichtigt. In diesem Zusammenhang dienen die Werte des „JEC well-to-tank report V5“ der Europäischen Kommission von 2020 als Referenz für die weiteren Berechnungen dieser Arbeit. Die WtT-CO_{2,eq}-Emissionswerte sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Well-to-Tank CO_{2,eq}-Emissionen für die Herstellung von FAME

Dichte in kg/m³	890 (64)
Heizwert in kWh/kg (MJ/kg)	10,3 (37.2) (64)
Well-to-Tank CO_{2,eq} in MJ/MJ_{HVO}	0,19 (121)
Well-to-Tank CO_{2,eq} in g CO_{2,eq}/kWh_{HVO} (g CO_{2,eq}/MJ_{HVO})	30 () (121)
CO₂-Emissionen bei der Verbrennung g/kg (g/kWh)	2830 (275) (64)

6.4.3 Zusammenfassung von fortschrittlichen biogenen Energieträgern

Unter Annahme der Energieaufwände zur Herstellung der zwei fortschrittlichen Biokraftstoffen aus Abbildung 51 lassen sich die Emissionsfaktoren für HVO und FAME für

jedes Stromerzeugungsszenario in den Jahren 2030 und 2050 berechnen. Der Vergleich der Well-to-Tank CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren von fossilem Diesel und Strom aus dem deutschen Strommix mit den Emissionsfaktoren fortschrittlicher Biokraftstoffe ist in Abbildung 66 dargestellt. Dabei fällt auf, dass nach 2030 die biogenen Kraftstoffe zweiter Generation den Emissionsfaktor von fossilem Diesel unterschreiten.

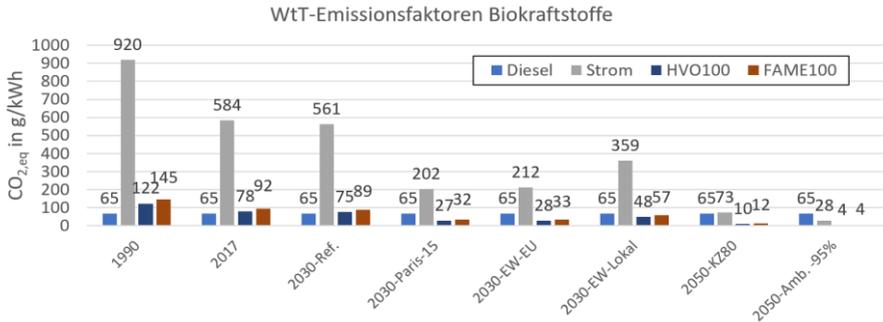


Abbildung 66: Well-to-Tank Emissionsfaktoren von HVO und FAME im Vergleich zu fossilem Diesel und dem deutschen Strommix

6.5 Wässrige Harnstofflösung

Je nach Verbrennungsprozess und Kraftstoff, ist es notwendig einen SCR-Katalysator zur Reduktion der Stickoxide im Abgasstrang einzusetzen. Demnach wird bei der Verwendung von Diesel und Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor wässrige Harnstofflösung (AdBlue®) zur Stickoxidreduktion in den Abgasstrang eingebacht. Die Herstellung von Harnstoff hat ein Emissionsfaktor von 0,6092 kg CO_{2,eq}/l_{AdBlue} (161, S. 22, 162, S. 103) und der durchschnittliche Harnstoffverbrauch eines modernen Dieselmotors beträgt 5 % des Dieselverbrauchs (162, S. 108). Aus dem Energieträger-Heizwert aus Tabelle 13 und der Annahme, dass der Harnstoffverbrauch proportional zum Heizwert ist, gehen die Harnstoff Well-to-Tank CO₂-Emissionen aus Tabelle 22 hervor.

Tabelle 22: Harnstoffbedingte WtT CO_{2,eq}-Emissionen

	Diesel B7	H ₂ - VKM	FT- Diesel	HVO 100	FAME 100
Heizwert in kWh/kg	11,9	33,33	12,2	12,2	10,3
WtT Harnstoff in g CO_{2,eq}/kWh_{Kraftstoff} (Produktion)	3,09	8,65	3,17	3,17	2,67

Die harnstoffbedingten CO₂-Emissionen aus der Produktion werden dem Well-to-Tank Emissionsfaktor des verwendeten Energieträgers dazugerechnet, falls eine Selektive-Katalytische-Reduktion (SCR) im Abgasstrang verwendet wird.

6.6 Zusammenfassung Well-to-Tank Bilanzierung

Die zeitliche Entwicklung der Well-to-Tank Emissionen der in dieser Arbeit betrachteten Energieträger sind in Abbildung 67 dargestellt. Alle Energieträger, die zur Verarbeitung einen elektrischen Energiebedarf haben, folgen dem Verlauf des Emissionsfaktors des deutschen Strommix. Die fossilen Energieträger (Diesel und CNG) hingegen, sind vom Strommix entkoppelt und bleiben auf einem konstanten Emissionsniveau da die Annahme getroffen wird, dass der Energiebedarf zur Verarbeitung direkt aus dem Energieträger gewonnen wird. Des Weiteren wird in Abbildung 67 deutlich, dass der energetische Mehraufwand zur Herstellung von PtX keinen starken Anstieg des klimatischen Einflusses gegenüber auf 700 bar verdichtetem Wasserstoff hat. Zudem zeigt Abbildung 67, dass in Zukunft der Energiebedarf zur Herstellung regenerativer Energieträger durch Verbesserung der Prozesswirkungsgrade der Elektrolyse und der weiteren Verarbeitungsschritte sinken wird. In der Well-to-Tank Bilanz erreichen in Deutschland hergestellte synthetische Energieträger erst in den 2050er-Jahren einen ähnlichen Emissionsfaktor wie die fossilen Quellen ($\sim 50 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}$). Der Emissionsfaktor der PtX aus Island hingegen, wird lediglich durch den dortigen Strommix, den Wirkungsgrad der Anlagen und den Transport beeinflusst.

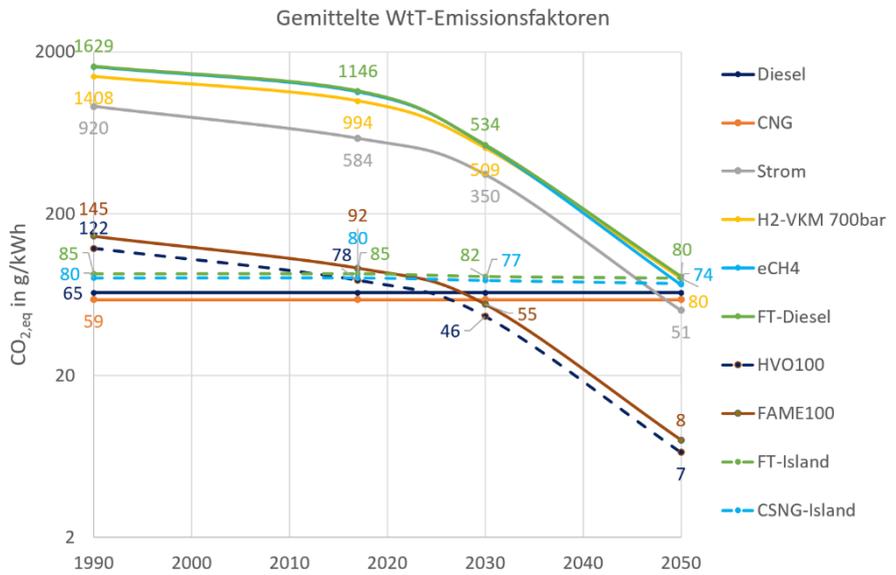
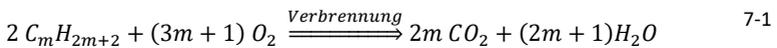


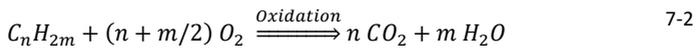
Abbildung 67: Zusammenfassung der äquivalenten Well-to-Tank CO₂-Emissionen der betrachteten Energieträger

7 Tank-to-Wheel: Berechnung der Emissionsfaktoren im Betrieb (TtW)

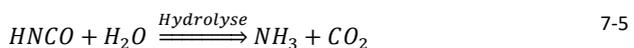
Im Fahrzeug ist Energie in flüssiger, gasförmiger oder elektrischer Form gespeichert und wird zum Vortrieb direkt oder in mehreren Schritten in mechanische Leistung gewandelt. Dabei entstehen je nach Energiewandler $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen (z.B. durch Verbrennung eines Kraftstoffs). Unter Annahme einer idealen vollständigen Verbrennung ist der gravimetrische $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsfaktor vom Kohlenstoffgehalt des Energieträgers nach Formel 7-1 abhängig. Die unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen und Kohlenstoff- zu Wasserstoffverhältnisse führen zu verschiedenen CO_2 -Emissionen bei der Verbrennung der betrachteten Energieträger. So ist zum Beispiel der spezifische Emissionsfaktor von Erdgas um ca. 22 % geringer als der von fossilem Diesel.



In diesem Zusammenhang haben batterieelektrische Fahrzeuge, Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzellenfahrzeuge in der Tank-to-Wheel Betrachtung 0 g $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kWh. Bei allen anderen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor entsteht unabhängig vom verwendeten Energieträger bei der Verbrennung $\text{CO}_{2,\text{eq}}$. Bei der realen Verbrennung gelangt unverbrannter Kraftstoff und Schadstoffemissionen in den Abgasstrang. Dort werden unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) im Diesel-Oxidationskatalysator oder im Drei-Wege-Katalysator zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) nach den Formeln 7-2 und 7-3 oxidiert.



Findet die Verbrennung nicht unter stöchiometrischem Luft-Kraftstoff-Gemisch bei $\lambda = 1$ statt, kann in der Abgasreinigung kein Drei-Wege-Katalysator zur Stickoxidreduktion verwendet werden. Bei selbstzündenden Motoren und Wasserstoffmotoren ist somit die Verwendung eines SCR-Katalysators zur Stickoxidreduktion notwendig. Im SCR-Katalysator wird Harnstoff als Reduktionsmittel, welches nach Formel 7-5 das gebundene CO_2 während der Hydrolyse wieder freisetzt, eingesetzt. Dabei reagiert der Harnstoff während der Thermolyse und der Hydrolyse, um das Reduktionsmittel Ammoniak für die Stickoxidreduktion zu bilden. Hierbei entsteht nach den Gleichungen 7-4 und 7-5 neben Isocyanäure (HNCO) als Zwischenprodukt und Ammoniak (NH_3) auch Kohlendioxid (CO_2).



Demzufolge werden die Tank-to-Wheel CO_{2,eq}-Emissionen aus der Summe der im Fahrzeug entstehende Treibhausgasemissionen errechnet. In der vorliegenden Arbeit werden die CO_{2,eq}-Emissionen aus Energieträger und Abgasreinigung berücksichtigt und fassen Tank-to-Wheel CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren für die betrachteten Energieträger in Tabelle 23 und Abbildung 68 zusammen. Gasmotoren werden als fremdgezündete Ottomotoren ausgeführt und werden in der Regel bei $\lambda = 1$ betrieben. In diesem Kontext kommt der Gasmotor als einziger Verbrennungsmotor in diesem Vergleich mit einem Drei-Wege-Katalysator an Stelle des SCR-Katalysators aus. Demnach sind die Harnstoffbedingten TtW-CO_{2,eq}-Emissionen gleich null.

Tabelle 23: Tank-to-Wheel CO_{2,eq} für die betrachteten Energieträger

		Diesel B7 (163, S. 8, 143, 5)	CNG (116, 81)	H2- VKM (116)	FT- Diesel (5)	HVO 100 (5)	FAME 100 (5)
Heizwert in kWh/kg		11,8	13,9	33,33	12,2	12,2	10,3
Kohlenwasserstoff Masseanteil in %		85,4	73,5	0	85	85	77,3
TtW Kraftstoff	g CO_{2,eq}/ kg	3,168	2,69	0	3,12	3,12	2,83
	g CO_{2,eq}/ kWh	264,2	202,3	0	254,9	254,9	274,3
TtW Harnstoff in g/kWh (Reaktion)		1,54	0	4,32	1,58	1,58	1,34
TtW in g/kWh		265,7	202,3	4,3	256,5	256,5	275,6

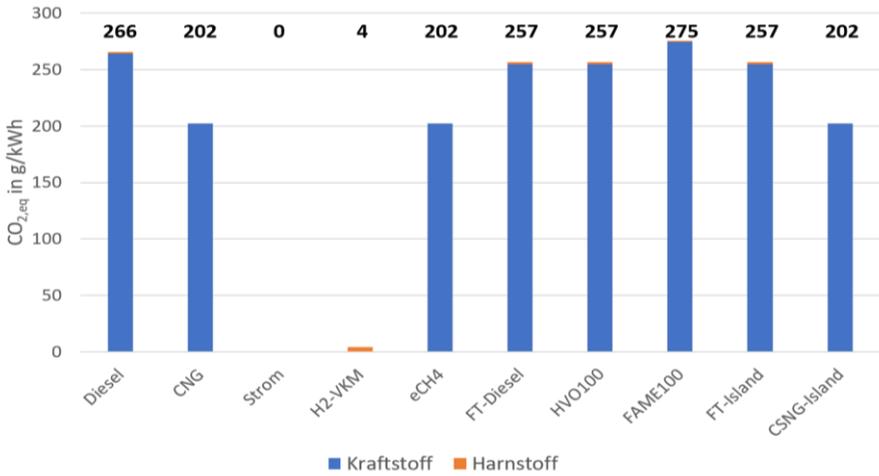


Abbildung 68: Tank-to-Wheel CO_{2,eq}-Emissionen

8 Well-to-Wheel: CO_{2,eq}-Emissionen von der Quelle bis zum Rad (WtW)

Zur Berechnung der Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren für die betrachteten Energieträger und Stromerzeugungs-Szenarien werden die Emissionsfaktoren aus den Well-to-Tank und Tank-to-Wheel Betrachtungen der Abschnitte 6 und 7 addiert. Die berechneten Emissionsfaktoren dieser Arbeit entsprechen der gleichen Größenordnung wie weitere Literaturwerte, wenn auch leicht abweichend aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen (164, 165).

8.1 Anrechnung von CO₂-Gutschriften

Wie bereits in Abschnitt 7 dargestellt, beinhalten Biogene und synthetische Kraftstoffe, wie deren fossiles Pendant, Kohlenstoffketten und emittieren somit bei der Verbrennung CO₂ nach Formel 7-1. Demzufolge ist bei der absoluten emittierten CO₂-Masse ist der Kohlenstoffgehalt des Kraftstoffs entscheidend und nicht dessen Ursprung. So entsteht bei der Verbrennung von PtX und biogenen Kraftstoffen nach Tabelle 23 auch CO₂. Jedoch werden nach RED II (5, S. 73) die TtW-Treibhausgasemissionen bei der Verwendung flüssiger biogener Kraftstoffe mit null angesetzt, da das emittierte CO₂ in der Wachstumsphase der Pflanze gebunden wurde. Daraus ergeben sich Well-to-Wheel Einsparpotentiale für fortschrittliche biogene Kraftstoffe von bis zu 90 %. Bei der Verwendung von synthetischen Kraftstoffen wird der Tank-to-Wheel Anteil mit der CO₂-Entnahmeeffizienz im Direct Air Capture-Prozess gewichtet (5, S. 73). Den strombasierten Energieträger wie Wasserstoff, synthetisches Gas (SNG) oder Fischer-Tropsch-Diesel kommt zu Gute, dass ein Teil der TtW CO₂-Emissionen ebenfalls bei der Produktion gebunden wurde. Nach Tabelle 16 wird die CO₂-Entnahmeeffizienz bei DAC-Anlagen zwischen 2020 und 2050 von 81 % bis 95 % steigen. Demzufolge wird auch der TtW-Emissionsfaktor bis 2050 sinken.

8.2 Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Emissionsfaktoren der betrachteten Energieträger

Abbildung 69 zeigt den zeitlichen Verlauf der WtW-Emissionsfaktoren der betrachteten Energieträger zwischen 1990 und 2050. In dieser Darstellung sind die Emissionsfaktoren der PtX für die Jahre 2030 und 2050 über alle Stromerzeugungsszenarien gemittelt. Dabei ist auffällig, dass sowohl der deutsche Strommix als auch regenerative Kraftstoffe aus Deutschland erst nach 2040 auf das Niveau von importierten PtX kommen (FT-Island und CSNG-Island). Die graue Kurve des Emissionsfaktors des deutschen Strommix kreuzt nach 2040 die gestrichelten Kurven der Emissionsfaktoren von FT-Island und CSNG-Island. Zur weiteren Minderung der Emissionsfaktoren von importierten PtX müssen in Zukunft auch im Transport der Energieträger ausschließlich Kraftstoffe mit niedrigem CO_{2,eq} eingesetzt werden. Zum Beispiel kommt in der Marineanwendung regenerativ erzeugter Ammoniak als Energieträger in Frage (166–168). Da der Energiebedarf für die Veresterung (FAME) und das Hydrotreating

(HVO) aus dem deutschen Strommix gestillt wird, sinkt der Emissionsfaktor von den fortschrittlichen Biokraftstoffen HVO100 und FAME100 ebenfalls mit der Abnahme des Emissionsfaktors des Strommix.

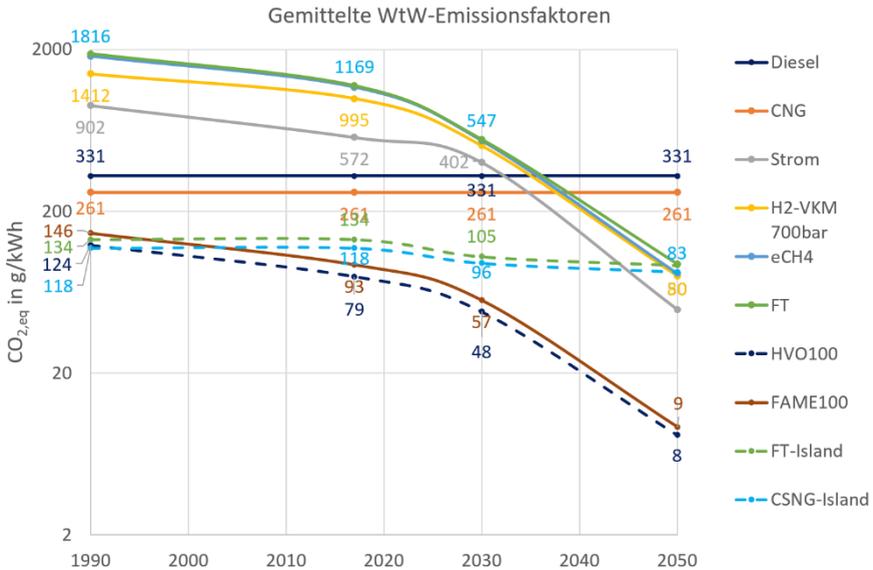


Abbildung 69: Well-to-Wheel Emissionsfaktoren

Eine detailliertere Darstellung der WtW- CO_2 -Emissionsfaktoren jedes Szenarios ist in Abbildung 70 zusammengefasst. Der steigende Anteil an regenerativen Quellen führt zu einer Senkung des Emissionsfaktors des Strommix. Je nach Szenario werden die Emissionsfaktoren des Diesels $331 \text{ g CO}_{2,\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{Diesel}}$ im deutschen Strommix zwischen 2030 und 2040 erreicht. Der höhere Fahrzeugwirkungsgrad gegenüber einem Verbrennungsmotor kann jedoch, je nach Anwendung, schon früher zu einem positiven Klimaeffekt führen.

In der Well-to-Wheel Betrachtung können PtX-Stoffe, in den Szenarien *2030-Paris 15* und *2030-Energiewende EU*, ab 2030 den Klimatischen Einfluss von fossilem Diesel oder Erdgas erreichen. Dabei ist auffällig, dass die strombasierten synthetischen Energieträger erst dann den WtW-Emissionen der fossilen Kraftstoffe unterschreiten, wenn der Strommix einen erheblichen Anteil an erneuerbaren Energiequellen beinhaltet. Öko-Institut e.V. (146) nennt 75 % erneuerbare Stromquellen als Schwellenwert für eine Nutzung von PtX-Stoffe mit positiver Klimabilanz. Darüber hinaus können sie, mit ansteigendem erneuerbaren Stromanteil, bis 2050 die Treibhausgasemissionen gegenüber den fossilen Kraftstoffen um 80 % senken. Wenn in naher Zukunft PtX-Anlagen in Regionen mit hohem oder gar reinem

regenerativem Stromanteil installiert werden, könnten synthetischen Kraftstoffe schon früher einen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor leisten. Das aufgeführte Beispiel in 6.3.2.3 zeigt, dass PtX schon heute Emissionsfaktoren erreichen können, die unter Verwendung des deutschen Strommix erst zwischen 2030 und 2040 erreicht werden.

WtW-Emissionsfaktoren

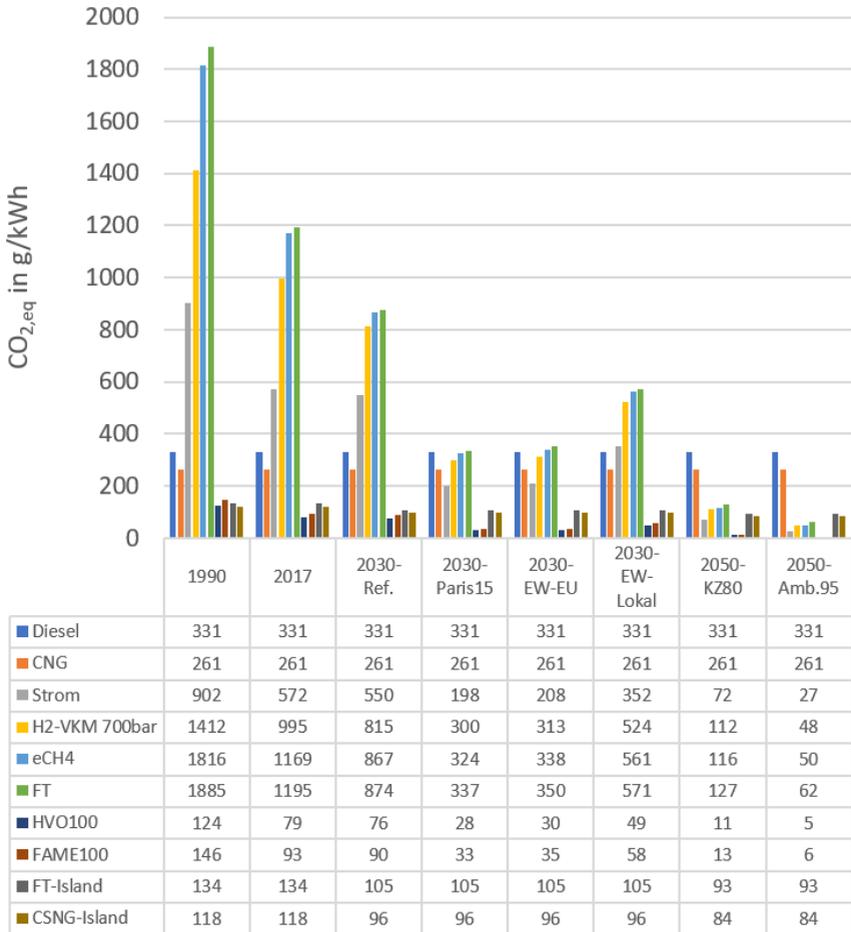


Abbildung 70: Well-to-Wheel CO₂-Emissionsfaktoren

Die Verwendung von biogenen Kraftstoffen wie HVO und FAME hat heute schon einen positiven Klimaeffekt gegenüber der Verwendung von fossilen Kraftstoffen. Je nach Rohstoff ist die CO_{2,eq}-Bilanz um den Faktor 0,1 bis 0,6 niedriger als fossiler Dieselmotorkraftstoff (169, S. 32). In diesem Kontext eignen sich biogene Kraftstoffe der zweiten Generation durch Beimischung als kurzfristige Lösung zur Senkung der Treibhausgasbilanz von fossilem Dieselmotorkraftstoff. Die Verwertung von einem möglichst großen Teil der verfügbaren Reststoffe wäre somit ein wichtiger Beitrag zur Senkung der CO_{2,eq}-Emissionen im Verkehrssektor. Die begrenzte Verfügbarkeit von Altfetten bietet in Deutschland allerdings nur begrenzte Ausbauperspektiven für biogene Kraftstoffe, allerdings könnten Algenöle oder weitere umweltschonend angebaute Energiepflanzen als weitere Rohstoffquellen dienen (169, S. 16). Somit macht die begrenzte Verfügbarkeit von fortschrittlichen Biokraftstoffen sie nur als ein Baustein der Energiewende und eher eine Brückentechnologie bis PtX-Kraftstoffe im industriellen Maß verfügbar werden.

9 Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Bilanz in den nutzfahrzeugspezifischen Anwendungen

Zum Vergleich unterschiedlicher Antriebssysteme werden nutzfahrzeugspezifische Anwendungen herangezogen. Das Fahrprofil eines Nutzfahrzeugs mit ähnlichen Leistungsdaten kann zwischen kontinuierlichem Stop-and-Go-Betrieb im städtischen Abfallsammelbetrieb bis zur quasi-stationären Fahrt auf der flachen Autobahn alle möglichen Variationen beinhalten. In dieser Arbeit werden vier Fahrscenarien untersucht und die unterschiedlichen Antriebs- und Energiesystemkombinationen hinsichtlich CO_{2,eq}-Emissionen bewertet. Als Vergleichsrouten dienen dabei eine Abfallsammelroute, eine Stadtbusroute, eine Verteilerverkehrsroutc und eine Fernverkehrsanwendung. Die verwendeten Fahrprofile stammen aus realen Anwendungen und bilden somit ein ideales Umfeld zum Vergleich unterschiedlicher Antriebssysteme unter wechselnden Umgebungsbedingungen. Des Weiteren werden noch die Vecto-Zyklen „Urban Delivery“ und „Long Haul“ in die Betrachtung des Busbetriebs, der Verteiler- und Fernverkehrsfahrzeuge einbezogen (22).

Die CO_{2,eq}-Emissionen der verschiedenen Antriebsstränge in den betrachteten Fahrprofilen werden über das Produkt des Well-to-Wheel Emissionsfaktor des Energieträgers EF_{WtW} aus dem Abschnitt 8 und des Verbrauchs des Fahrzeugs be auf der betrachteten Route nach Formel 9-1 berechnet. Die Umgebungstemperatur wird in den Untersuchungen als weitere Variationsgröße hinzugefügt. Im Jahr 2022 lag die Jahresmitteltemperatur in Deutschland bei 10,5 °C (170), so dass die Simulationen bei der Referenztemperatur 10 °C zur Berechnung der CO_{2,eq}-Emissionen der verschiedenen Anwendungen verwendet wird. In einem weiteren Schritt wird die Umgebungstemperatur variiert und der Einfluss auf den Verbrauch und somit auf die CO_{2,eq}-Emissionen der Nutzfahrzeuganwendungen ebenfalls bewertet. Hierfür werden die Umgebungstemperaturen zwischen -20 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C, 25 °C und 40 °C untersucht.

$$CO_{2,eq} [kg] = EF_{WtW} \left[\frac{kg}{kWh} \right] \cdot be_{10^{\circ}C} [kWh] \quad 9-1$$

Demnach werden die Verbrauchsergebnisse aus den Simulationen aus 4.5 mit den Emissionsfaktoren der Energiesystemszenarien aus Abbildung 70 verrechnet. Aus den vier Energiesystemszenarien für 2030 und den zwei Szenarien für 2050 ergibt sich für die CO_{2,eq}-Emissionen der Fahrzeuge ein Korridor, abgegrenzt durch den maximalen und den minimalen prognostizierten Emissionsfaktor für das jeweilige Jahr. Demnach werden die betrachteten Nutzfahrzeuganwendungen unter den gewählten Umgebungsbedingungen in diesem Abschnitt nach Abbildung 71 dargestellt. Die mittlere Linie repräsentiert dabei den Mittelwert aus den Stromerzeugungsszenarien für die Jahr 2030 und 2050. Die Schnittpunkte des Maximum- und Minimumszenario mit den Diesel-Referenz CO_{2,eq}-Emission bilden einen zeitlichen Korridor, in dem die betrachtete Kombination aus Energie- und Antriebssystem den CO_{2,eq}-Emissionswert des Referenzfahrzeugs (z.B. mit fossilem dieselmotorischem Antrieb) unterschreitet. Bei den dargestellten Ergebnissen wird für alle Energieträger bis auf die zwei

PtX aus Island (FT-Island und CSNG-Island) von einer durchgängigen Wertschöpfungskette in Deutschland ausgegangen.

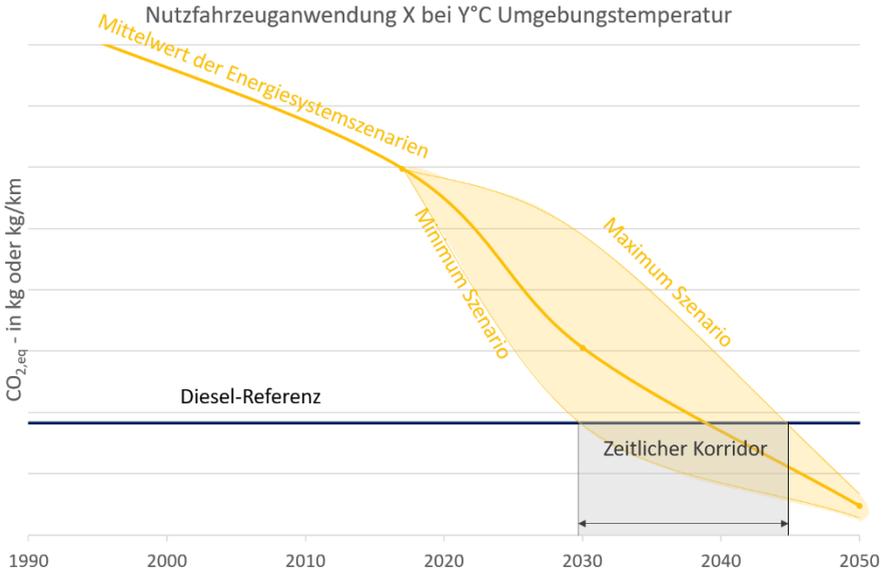


Abbildung 71: Darstellung der Auswertung der CO₂-Emissionen

Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Strecken und verschiedenen Nutzfahrzeuganwendungen werden die Ergebnisse wegspezifisch nach Formel 9-1 angegeben.

$$CO_{2,eq} \left[\frac{kg}{km} \right] = EF_{wtw} \left[\frac{kg}{kWh} \right] \cdot be_{Y^{\circ}C} \left[\frac{kWh}{km} \right] \quad 9-2$$

9.1 Abfallsammelbetrieb

Die in Abbildung 72 dargestellte Abfallsammelroute bildet den Streckenverlauf eines Abfallsammelfahrzeugs der Frankfurt Entsorgungs- und Service GmbH (FES). Die Daten stammen aus einem realen Fahrzeug und wurden im Rahmen einer Messkampagne, die im Winter 2020 durchgeführt wurde aufgezeichnet (171). Sie entspricht der Strecke eines Abfallsammelfahrzeugs an einem Arbeitstag im Zwei-Fahrschichtbetrieb. Dabei fährt morgens das Fahrzeug vom Müllheizkraftwerk im Norden Frankfurts zum Sammelgebiet im Süden der Stadt los. Mittags fährt das Fahrzeug wieder zum Abladen zum Müllheizkraftwerk zurück und startet nachmittags eine zweite Sammelrunde. In diesem Zusammenhang legt das Fahrzeug 73 km in 9:50 h zurück. Die niedrige mittlere Geschwindigkeit von 10 km/h ist auf die häufigen Sammelstopps und der daraus resultierende anteilig hohen Stillstandzeit von 50 % zurückzuführen.



Abbildung 72: Streckenverlauf der abgebildeten Müllsammelroute (171, S. 82)

Die simulierten Abfallsammelfahrzeuge basieren auf den Daten des verwendeten Mercedes Eonic (50) mit Dieselmotor, gepaart mit Müllpressen der Faun Umwelttechnik GmbH (53). Während bei der Parametrierung des batterieelektrischen Abfallsammelfahrzeugs auf die Daten des Mercedes eEonic (172) zurückgegriffen werden kann, werden für die Wasserstoff- und Gas-Verbrennungsmotoren die Kenndaten von Motoren mit ähnlichen Leistungsdaten verwendet (108, 116). Demnach besitzen die drei verwendeten Verbrennungsmotoren ein

Hubraum von 7698 cm³ bis 7800 cm³. Der Dieselerbrennungsmotor und der Gasmotor besitzen beide eine Nennleistung von 220 kW und 1200 Nm maximales Drehmoment (50). Als Grundlage für die Leistungsdaten des Wasserstoffverbrennungsmotors werden die Kennwerte des Deutz-Wasserstoffverbrennungsmotor (H₂-VKM) verwendet (108). Demnach erreicht der H₂-VKM eine Nennleistung von 210 kW und ein maximales Drehmoment von 1100 Nm (108). Die Dimensionierung und die Technologieauswahl des Energiespeichers orientiert sich an existierenden Beispielen und berücksichtigt das Platzangebot im Fahrzeug. Der geringe Reichweitenbedarf der Abfallsammelanwendung ermöglicht es, für die Gas- und Wasserstofffahrzeuge die kostengünstigere Drucktankvariante zu wählen. In diesem Kontext werden die Tanks für den Wasserstoff-Verbrenner und das Brennstoffzellen Abfallsammelfahrzeug sowie für das Gasfahrzeug als Gasdrucktanks mit 700 bar für Wasserstoff und 200 bar Speicherdruck für Gas ausgeführt. Mit einer Speicherkapazität von 32 kg Wasserstoff, wird die Reichweite des Abfallsammelfahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor in etwa halbiert gegenüber der des Diesel-Referenzfahrzeugs (1065 kWh_{H₂} entgegen 1987 kWh_{Diesel}). Das Gasfahrzeug ist mit einem 200 bar-Drucktank mit einer Kapazität von 105 kg (1458 kWh_{CNG}) ausgestattet. Das batterieelektrische Abfallsammelfahrzeug weist aufgrund der 396 kWh Batterie 2263 kg Mehrgewicht gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug auf. Die weiteren Daten der simulierten Fahrzeuge sind im Anhang A in Tabelle 29 zusammengefasst.

Nach der ca. 44 km langen Morgenrunde lädt das Müllfahrzeug die etwa 10 t Abfall ab, die es während der 213 Stoppes zuvor eingesammelt hat. So wurde eine Mittlere Zuladung von 47 kg pro Stopp errechnet und in der Simulation implementiert (173, S. 46). Abbildung 73 zeigt den Verlauf der Fahrzeugmasse für die betrachteten Abfallsammelfahrzeuge bis zum Abladen nach 44 km

- Batterieelektrisch (BEV),
- Gas-Verbrennungsmotor (CNG),
- Diesel-Verbrennungsmotor (Diesel),
- Wasserstoff-Verbrennungsmotor (H₂-VKM).

Dabei ist zu erkennen, dass die einzelnen Abfallsammelfahrzeuge entsprechend der Parametrierung der Antriebstränge unterschiedliche Leergewichte aufweisen. Der Anstieg der Gesamtmasse hingegen, ist bei allen Fahrzeugen gleich und erreicht zum Ende der Sammelroute 10 t.

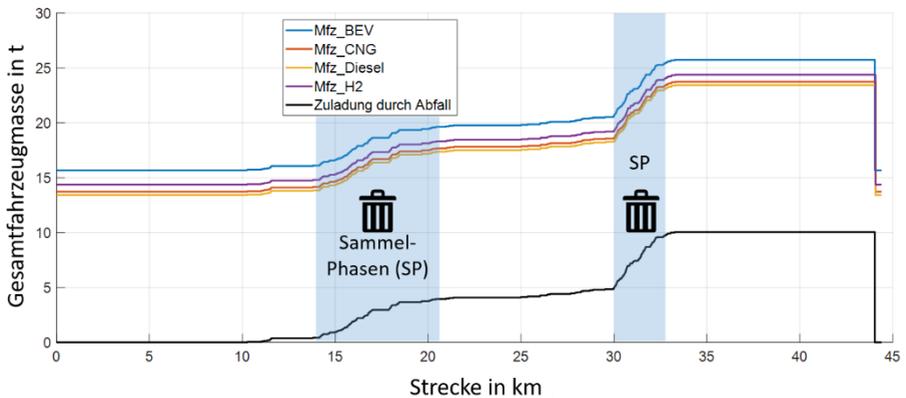


Abbildung 73: Verlauf der Zuladung und der Gesamtmasse bei der Abfallsammelrunde

Der Betrieb der Müllpresse während der Sammelphasen wird als Nebenverbraucher mitberücksichtigt. Dabei geht aus der Analyse des Kraftstoffverbrauchs im Stillstand abzüglich dem Leerlaufverbrauch hervor, dass beim Diesel-Referenzfahrzeug eine Motorleistung von 7 kW über den Nebenantrieb zum Betrieb der Müllpresse benötigt wird (173).

Als erstes wird der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz einer Antriebs- und Energiesystemkombination in der Abfallsammelanwendung untersucht. Anschließend werden die Systeme bei der jahresmittleren Temperatur in Deutschland (10 °C) genauer verglichen.

9.1.1 Einfluss der Umgebungstemperatur auf die spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen

Zur Berücksichtigung der Klimatisierung der Fahrgastzelle wird aus den Annahmen aus Abschnitt 4.3 der notwendige Energiebedarf berechnet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 24 angegebenen Energiemengen zur Klimatisierung der Abfallsammelfahrzeuge je nach Umgebungstemperatur. Dabei stellen die negativen Leistungen eine Kühlung und die positiven Leistungsangaben ein Heizen des Fahrgastraums dar. Der Aufbau des Heizungssystems eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor ermöglicht es, einen Teil des Heizbedarfs aus der Verlustwärme des Verbrennungsmotors zu gewinnen. Die mittlere Motorleistung im Müllsammelbetrieb beträgt ca. 25 kW, sodass nach Abbildung 24, mit 6,25 kW ca. ein Viertel der Motorleistung zur Heizung der Fahrgastzelle zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang muss ab -10 °C Außentemperatur das Heizungssystem elektrisch unterstützt werden. Bei -10 °C werden hierfür 0,35 kW und bei -20 °C 2,45 kW elektrische Zusatzleistung benötigt. Das batterieelektrische Fahrzeug hingegen muss die gesamte Heizenergie elektrisch zur Verfügung stellen und bezieht zusätzlich zur Antriebsenergie noch

die Heizenergie aus der Batterie. Das Kühlen wird sowohl beim Verbrenner als auch beim batterieelektrischen Fahrzeug als elektrischer Nebenverbraucher ausgeführt.

Tabelle 24: Energiebedarf zur Klimatisierung der Fahrgastzelle des Abfallsammelfahrzeugs nach Szenario

Temperatur in °C	-20	-10	0	10	25	40
Sonneneinstrahlung in W/m ²	30	30	30	200	350	900
Leistungsbedarf zur Konditionierung in kW	8,7	6,6	4,5	2,2	-1,2	-5,3

Dementsprechend sind in Abbildung 74 die Verbräuche der unterschiedlichen Antriebsstrangkonzeppte in Abhängigkeit der Außentemperatur dargestellt. Unter der angenommenen Umgebungsbedingungen aus Tabelle 24, liegt bei allen Abfallsammelfahrzeugen bis auf den batterieelektrischen Antrieb der minimale Verbrauch bei Außentemperaturen zwischen 0 °C und 10 °C. Da der batterieelektrische Antrieb keine nutzbare Abwärme für die Heizung der Fahrgastzelle erzeugt, müssen elektrische Heizungen eingesetzt werden. Hierdurch befindet sich der geringste Fahrzeugverbrauch in dem Bereich, indem weder geheizt noch gekühlt werden muss (ca. 20 °C). Der Anstieg der Verbräuche aller Antriebssysteme bei Außentemperaturen über 20 °C ist auf die Nutzung der Klimaanlage zur Kühlung der Kabine zurückzuführen. Die unterschiedlichen Gradienten der Verbrauchskurven reflektieren den Wirkungsgrad zwischen Energieträger und elektrischem Verbrauch in den Komponenten der Klimaanlage.

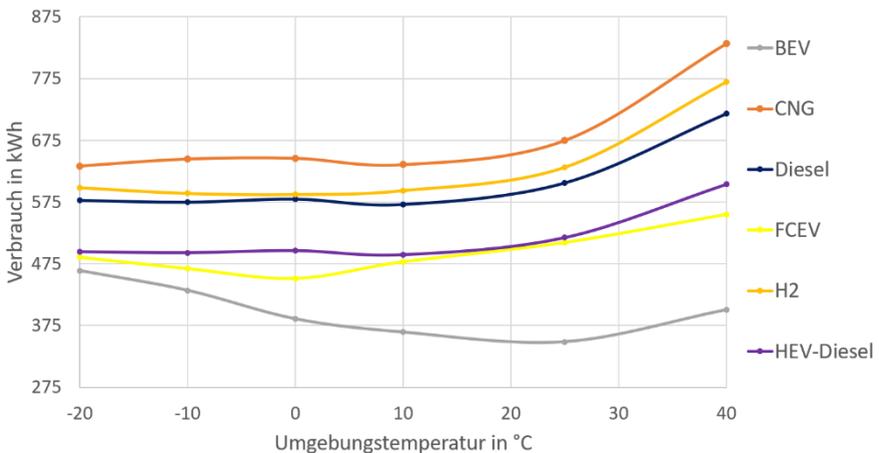


Abbildung 74: Verbräuche der Müllsammelfahrzeuge mit den betrachteten Antriebsstrangkzepten

Die Verläufe der Verbräuche aus Abbildung 74 lassen darauf schließen, dass die Temperatur in dieser Anwendung eine untergeordnete Rolle spielt: die Verbrauchskurven laufen oberhalb von 0 °C annähernd parallel. Erst bei Umgebungstemperaturen unter 0°C steigt der Verbrauch des batterieelektrischen Abfallsammelfahrzeug im Vergleich zu den anderen Antriebssträngen. Der Energiebedarf des BEVs steigt aufgrund der benötigten Heizenergie für die Kabine und des sinkenden Batteriewirkungsgrades. Die anderen Antriebsstrangsysteme können hingegen die Abwärme des chemischen Energiewandlers zur Heizung der Fahrgastzelle nutzen.

In Abbildung 75 sind die gefahrene Strecke in Abhängigkeit der nutzbaren Batteriekapazität und der Umgebungstemperatur dargestellt. Dabei fällt auf, dass bei der idealisierten gesamten Nutzung der Batteriekapazität (SOC-Hub von 100 %) bei 10 °C und 20 °C das Abfallsammelfahrzeug die 74 km Route schafft, bei -20 °C, -10 °C, 0 °C und 40 °C aufgrund des zusätzlichen Heiz- und Kühlbedarfs sowie des niedrigeren Batteriewirkungsgrads bei Umgebungstemperaturen unter 0 °C jedoch nicht. Unter Berücksichtigung eines realen Batterie SOC-Hubs von maximal 80 % absolviert das Abfallsammelfahrzeug eine Sammelroute von maximal 59 km ohne Zwischenladen. In diesem Zusammenhang ist das simulierte batterieelektrische Abfallsammelfahrzeug in der vorliegenden Konfiguration nicht für diese Sammelroute geeignet.

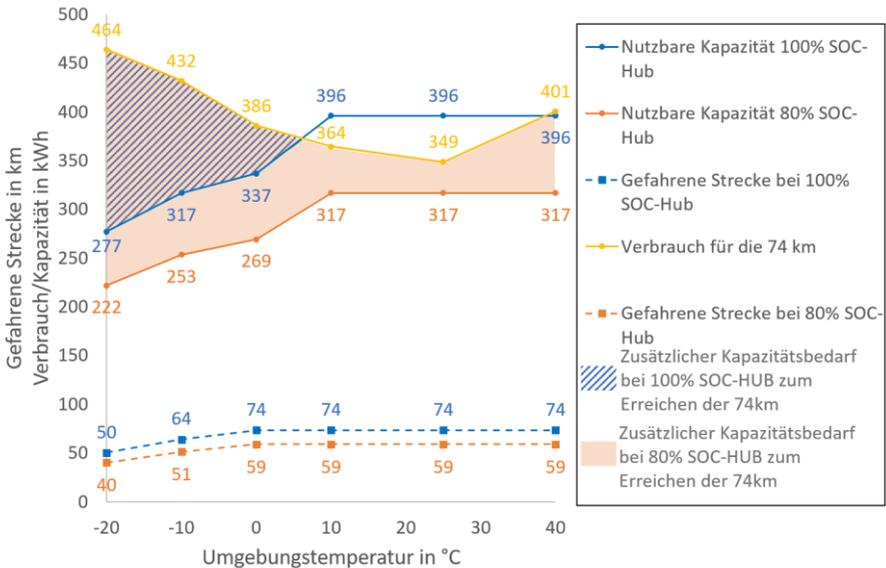


Abbildung 75: Fahrstrecke des batterieelektrischen Abfallsammelfahrzeug in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und des SOC-Hubs

9.1.2 Vergleich der spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen bei 10°C Umgebungstemperatur

Aus den simulierten Verbräuchen aus Abbildung 74 werden zur Berechnung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen gemäß der Jahresmitteltemperatur in Deutschland in 2022 (170) die Verbräuche bei 10 °C verwendet und mit den Emissionsfaktoren der Energieträger verrechnet. Abbildung 76 stellt die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der Abfallsammelfahrzeuge auf der abgebildeten Frankfurter Route in Abhängigkeit des Antriebs- und Energiesystems und der Zeit dar. Zur besseren Übersicht wird auf die Darstellung von komprimiertem synthetischem Gas aus Island (CSNG-Island) und Fettsäuremethylester (FAME100) verzichtet. Da die Verläufe nahezu deckungsgleich mit den Verläufen von Fischer-Tropsch-Diesel aus Island (FT-Island) und reinem hydrierten Pflanzenöl (HVO100) sind, können die Aussagen übertragen werden.

Abfallsammelbetrieb bei 10°C

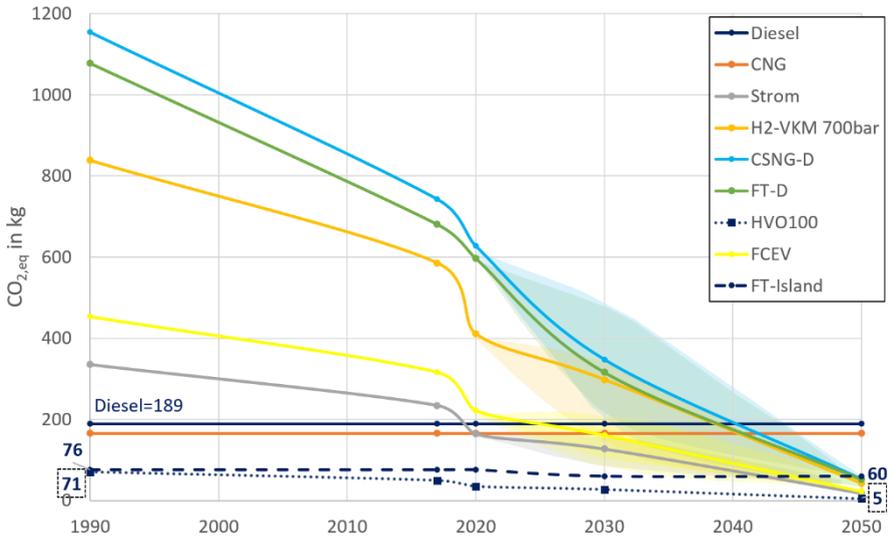


Abbildung 76: CO₂-Emissionen eines Müllsammelfahrzeugs in unterschiedlichen Energie- und Antriebssystemen

Gemäß der Annahmen, besitzt das Diesel-Referenzfahrzeug zwischen 1990 und 2050 einen konstanten Ausstoß von 189 kg CO_{2,eq} auf der Abfallsammelroute. In dieser Anwendung ermöglichen die 3 % Wirkungsgradsteigerung durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs (72) eine Verbrauchsreduktion um ca. 13 %, sodass der Ausstoß mit 160 kg CO_{2,eq} dem des erdgasbetriebenen Gasfahrzeugs gleich kommt.

Im Mittel über alle Stromproduktionsszenarien besitzt ab dem Jahr 2019 ein batterieelektrisches Abfallsammelfahrzeug eine bessere CO_{2,eq}-Bilanz als das fossile Diesel-Referenzfahrzeug. Durch die niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit und die vielen Anfahrvorgänge ermöglicht erreicht der Dieselmotor keinen hohen Wirkungsgrad. So liegt der mittlere Wirkungsgrad des Diesel-Referenzfahrzeugs bei ca. 20 %. Der batterieelektrische Antrieb hat bei 10 °C Außentemperatur hingegen eine mittlere Effizienz von 47 %. Im Stop-and-Go Betrieb profitiert das batterieelektrische Abfallsammelfahrzeug vom Rekuperationspotential. Auf dieser Route können trotz der niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeit ca. 20 kWh oder einen Anteil von 5,5 % des Gesamtverbrauchs rekuperiert werden.

In Deutschland hergestellte PtX (CSNG-D und FT-D) stellen erst ab frühestens 2030 eine Verbesserung gegenüber dem fossilen Dieselmotor in der CO_{2,eq}-Bilanz dar. Im Mittel ist bei

dieselmotorischen Abfallsammelfahrzeuge betrieben mit FT-Diesel aus Deutschland (FT-D) keine Reduktion der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen gegenüber dem fossilen Dieselbetrieb vor 2040 zu erwarten. Im Mittel über alle Stromerzeugungsszenarien unterschreiten das Abfallsammelfahrzeug mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor ab 2039 das $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsniveau des fossilen Diesel-Referenzfahrzeugs. Der Betrieb mit Fischer-Tropsch-Diesel hergestellt aus deutschem Strommix (FT-D) erreicht ebenfalls das Emissionsniveau von fossilem Diesel im Jahr 2039. Obwohl FT-D, aufgrund der zusätzlichen CO_2 -Abscheidung und dem Syntheseprozess, einen höheren WtW-Emissionsfaktor als Wasserstoff besitzt, ermöglicht der höhere Wirkungsgrad des Dieselmotors die gleiche WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz.

Der bessere Antriebsstrangwirkungsgrad der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor bei 10 °C Umgebungstemperatur auf der Abfallsammelroute ($\eta_{\text{FCEV}} = 33\%$, $\eta_{\text{Diesel}} = 20\%$) führt zu einer besseren WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz für das Brennstoffzellenfahrzeug gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug ab dem Jahr 2025.

In Abbildung 76 stellvertretend für Biodiesel der zweiten Generation (FAME) dargestellt, stellt HVO als Reinstoff eine effektive Methode dar, um die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen des Dieselmotorischer Antriebsstrangs zu senken. Die WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von HVO als Reinkraftstoff erreichen über der Abfallsammelroute in 1990 71 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ und in 2050 5 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$. So wird eine $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsreduktion gegenüber dem Betrieb mit fossilem Diesel um 63,5 % in 1990 und 97 % in 2050 erreicht. Im Rahmen der realen Fahrversuchen mit FAME-Blends von 25 % bis 100 % wurde eine Reduktion der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen im Abfallsammelbetrieb von bis zu 64,4 % gemessen. Bezogen auf die Abfallsammelfahrzeugflotte der FES Frankfurt GmbH stellt dies eine potentielle jährliche Reduktion der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Flottenemissionen um rund 6000 t dar (siehe Abbildung 77).

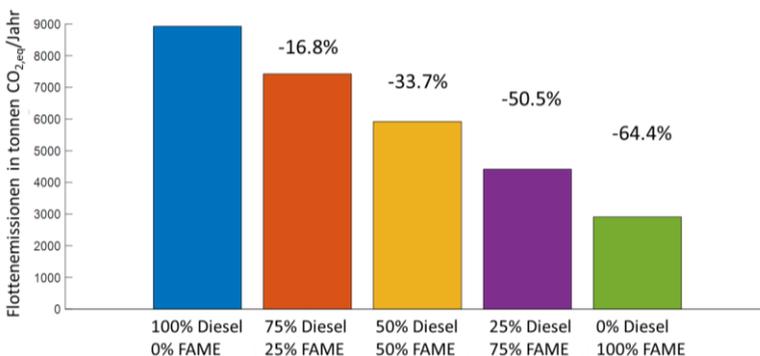


Abbildung 77: Berechnete Flottenemission nach FAME-Diesel Blend-Anteil

Die Verwendung von importierten synthetischen Kraftstoffen wie Fischer-Tropsch-Diesel aus Island (FT-Island) oder komprimierten synthetischen Gas aus Island (CSNG-Island) ermöglicht

eine Reduktion der WtW-CO_{2,eq}-Emissionen um 60 %. Bis 2050 ist eine weitere Reduktion um 10 % möglich.

9.1.3 Zusammenfassung Abfallsammelbetrieb

Die niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit und das häufige Anfahren bei hoher Fahrzeuggesamtmasse sind eine Herausforderung für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, sodass Verbrennungsmotoren in dieser Nutzfahrzeuanwendung Wirkungsgrade von maximal 20 % erreichen. Im Gegensatz dazu profitiert der batterieelektrische Antriebsstrang aus dem Stand heraus vom hohen Moment und besitzt in transienten Fahrprofilen einen höheren Wirkungsgrad als die Verbrennungsmotoren. In diesem Zusammenhang hat das batterieelektrische Abfallsammelfahrzeug bei 10 °C Umgebungstemperatur ab dem Jahr 20219 bei einem deutschen Strommix von ca. 375 g CO_{2,eq}/kWh (124) eine niedrigere Well-to-Wheel CO_{2,eq}-Bilanz als das Diesel-Referenzfahrzeug. Die eingeschränkte Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen ist jedoch eine Herausforderung für diese Anwendung. Die Umgebungstemperatur spielt in dieser Anwendung eine untergeordnete Rolle. Im Kontext des hohen spezifischen Verbrauchs des dieselmotorischen Antriebstrangs (7,7 kWh_{Diesel}/km bei 10 °C) und des anteilig geringen Heizbedarfs verschiebt sich der Zeitpunkt an dem die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischem Fahrzeug die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet um zwei Jahre von 2020 bei 10 °C auf 2022 bei -20 °C Umgebungstemperatur. Die niedrige Temperatur hat jedoch einen Einfluss auf die Batteriekapazität und somit die Reichweite des Abfallsammelfahrzeugs.

9.2 Stadtbusbetrieb

Die in dieser Arbeit betrachtete Stadtbuslinie aus Abbildung 78 entspricht der Buslinie-L in Darmstadt (174). Die dargestellte Route beinhaltet fünf Runden à ca. 11 km und stellt eine Fahrerschicht von 4,5 h Fahrzeit dar. Bei den 14 Haltestellen entlang der Strecke wird der Zu- und Ausstieg von Passagieren gemäß realen Daten in die Simulation implementiert (37). Die maximale Zusatzmasse an Passagieren pro Runde entspricht 1680 kg. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 11,9 km/h bei 33 % Stillstandanteil. Über die 55 km lange Route beträgt der kumulierte positive Anstieg 304 m.

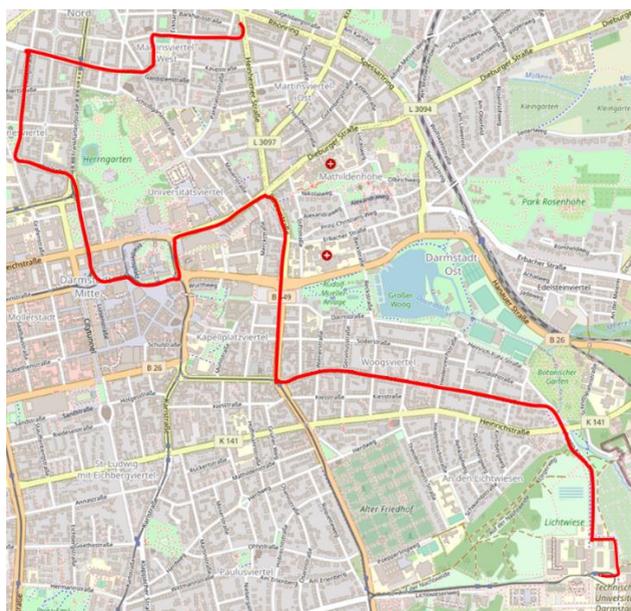


Abbildung 78: Streckenverlauf der Stadtbuslinie L in Darmstadt

Der Diesel-Referenzbus, basierend auf dem Mercedes-Benz Citaro (47), ist mit einem 220 kW Dieselmotor ausgestattet und weist das geringste Gesamtgewicht der fünf betrachteten Busse auf. Das Gasfahrzeug besitzt die gleichen Motorleistungsdaten und weist aufgrund der gewählten Tanktechnologie 209 kg Mehrgewicht als das Diesel-Referenzfahrzeug auf. Die Platzverfügbarkeit auf dem Dach des Busses erlaubt es, die günstigere Drucktanktechnologie für Gas und Wasserstoff zu wählen. Aufgrund des Tankgewichts wiegt das Wasserstoffverbrennerfahrzeug ca. eine Tonne mehr als das Diesel-Referenzfahrzeug. Der Brennstoffzellenbus verfügt über einen 120 kW Stapel ergänzt um einen 26 kWh Batterie und besitzt ein Mehrgewicht von 247 kg gegenüber dem Dieselmotorischen Antrieb. Die 441 kWh

Batterie des batterieelektrischen Stadtbusses trägt zum 1615 kg höheren Gesamtgewicht gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug maßgeblich bei.

Bei allen Antriebssträngen ist eine maximale Nebenverbraucherleistung von 22 kW vorgesehen. Diese reicht jedoch bei -20 °C Außentemperatur bei keinem der Antriebe zur Beheizung des 66 m³ Fahrgastraumes aus. Bei diesen Simulationsumgebungen wird die maximale Nebenverbraucherleistung verdoppelt. Die weiteren Parameter der verwendeten Antriebsstränge sind im Anhang B in Tabelle 30 aufgeführt.

Im Stadtbusbetrieb beträgt die mittlere Motorleistung beim Diesel-Verbrennungsmotor über der dargestellten Route 15 kW. Nach Abbildung 24 stehen allerdings in etwa ein Viertel der Motorleistung dem Heizungssystem zur Verfügung, sodass im Busbetrieb maximal 3,75 kW Abwärme für die Heizung der Fahrgaszelle genutzt werden können. Aufgrund des 66 m³ großen Fahrgastraumvolumen (ca. zehnfaches Volumen einer Lastkraftwagenkabine) sind jedoch deutlich größere Wärmeströme zur Konditionierung des Innenraumes notwendig. In diesem Zusammenhang sind in Abbildung 79 die notwendigen Heiz- und Kühlleistungen zur Konditionierung der Fahrgastzelle eines Stadtbusses sowie die resultierende elektrische Zusatzleistung für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit der Außentemperatur dargestellt. Unter 0 °C und über +25 °C werden zusätzlich zu der Mittleren Antriebsleistung von 15 kW über 10 kW Leistung für die Konditionierung des Fahrzeugs benötigt. Bei 10 °C hingegen werden bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nach Abbildung 79 lediglich 2 kW und beim batterieelektrischem Stadtbus 6 kW elektrische Zusatzleistung zur Heizung der Fahrgastraumes benötigt.

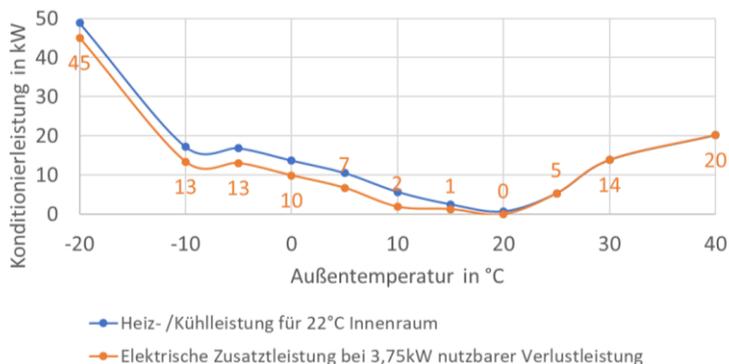


Abbildung 79: Leistungsbedarf zur Konditionierung des Fahrgastraumes eines Stadtbusses

9.2.1 Vergleich der spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen auf der Darmstädter Stadtbuslinie-L bei 10°C Umgebungstemperatur

Die CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen bei 10 °C entsprechend der deutschen Jahresmitteltemperatur in 2022 (170) sind in Abbildung 80 dargestellt. Zur besseren Übersicht sind Biodiesel (FAME) und komprimiertes synthetisches Gas aus Island (CSNG-Island) nicht in der Abbildung dargestellt. Deren Verläufe sind nahezu gleich den entsprechenden Verläufen von HVO und FT-Island.

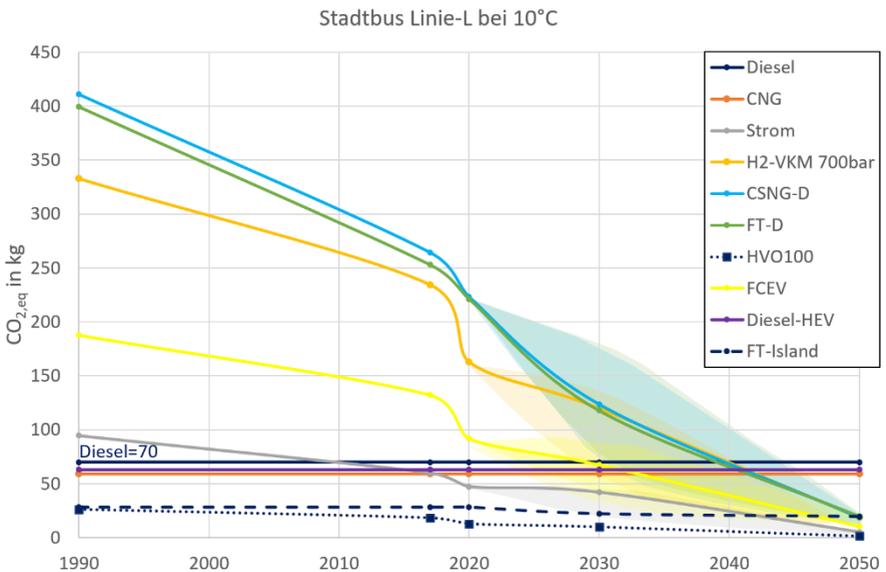


Abbildung 80: Über alle Temperaturen gemittelte CO_{2,eq}-Emissionen von verschiedene Energie- und Antriebssystemen

Der Stadtbusbetrieb auf der Linie-L in Darmstadt mit fossilem Diesel hat eine WtW-CO_{2,eq}-Bilanz von 70 kg. Unter diesen Randbedingungen, unterschreiten die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischem Fahrzeug die des Diesel-Referenzfahrzeugs im Jahr 2010.

Die Hybridisierung des Dieselmotorischen Antriebsstrangs ermöglicht eine Steigerung des Antriebsstrangwirkungsgrad von 3 % gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug (72). Auf der betrachteten Route von 55 km stellt dies eine Kraftstoffeinsparung von 8 % dar, sodass ein Wert von 63 kg CO_{2,eq} erreicht wird und der Zeitpunkt an dem die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischem Fahrzeug die des hybridisierten Dieselfahrzeugs unterschreitet um fünf Jahre auf das Jahr 2015 verschoben wird.

Die Nutzung von fossilem Erdgas statt fossilem Diesel als Treibstoff ermöglicht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um ca. 15 % trotz schlechterem Wirkungsgrad des fremdgezündeten Gas-Verbrennungsmotors und erreicht eine Bilanz von 59 kg CO_{2,eq}. Die Minderung der CO_{2,eq}-Bilanz von Erdgasbussen ist auf die um ca. 21 % niedrigere WtW-CO_{2,eq}-Intensität von Erdgas gegenüber Diesel zurückzuführen. Der elektrische Antrieb erreicht im Mittel der Stromproduktionsszenarien nach dem Jahr 2017 das CO_{2,eq}-Emissionsniveau des Erdgasbuses (59 kg CO_{2,eq}).

Das CO_{2,eq}-Emissionsniveau des Brennstoffzellenantriebs mit Wasserstoff aus deutscher Produktion sinkt zwischen 2025 und 2040 auf das Niveau des Diesel-Referenzstadtbusses. Im Mittel über die Stromerzeugungsszenarien erreicht der Brennstoffzellenantrieb mit deutschem Wasserstoff im Jahr 2029 das Emissionsniveau des fossilen Dieselmotors.

Das CO_{2,eq}-Emissionsniveau des Wasserstoffverbrennungsmotors erreicht die 70 kg CO_{2,eq}-Emissionen des Diesel-Referenzfahrzeugs, aufgrund des schlechteren Antriebsstrangwirkungsgrad (18 % bei 10 °C) gegenüber dem Brennstoffzellenantrieb (27 % bei 10 °C), frühestens 2031 und im Mittel über alle Stromerzeugungsszenarien im Jahr 2040. Die weitere Verarbeitung von Wasserstoff zur Herstellung von PtX (CSNG-D und FT-D) hat keinen merklichen Einfluss auf die CO_{2,eq}-Bilanz der Antriebs- und Energiesystemkombinationen. In diesem Kontext erreichen CSNG-D und FT-D ebenfalls, im Mittel über alle Stromerzeugungsszenarien, im Jahr 2040 das Diesel-Referenzniveau.

Die Nutzung von importiertem PtX (CSNG-Island und FT-Island) ermöglicht ab 1990 eine Halbierung der CO_{2,eq}-Emissionen gegenüber dem Betrieb fossilen Diesels und ist bis 2042 in der WtW-Bilanz besser als ein batterieelektrischer Bus mit Strom aus dem deutschen Strommix.

Dass die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeuges des Diesel-Referenzfahrzeugs ab dem Jahr 2010 unterschreitet hat mehrere Gründe. Zum einen lassen der niedrige mittlere Antriebsleistungsbedarf mit 15 kW und der Stillstandanteil von 35 % darauf schließen, dass der betrachtete Stadtbuszyklus viele Anfahrvorgänge und niedrige Geschwindigkeiten beinhaltet und somit einen ungünstigen verbrennungsmotorischen Betrieb induziert. Zum anderen stellt die Größe des Innenraumes hohe Leistungsanforderungen an die Konditionierung der Fahrgastzelle. Aufgrund der niedrigen mittleren Antriebsleistung stehen bei allen verbrennungsmotorischen Antriebssträngen nicht ausreichend Verlustwärme zur Beheizung der Fahrgastzelle zur Verfügung, sodass auch dem Dieselfahrzeug (und den anderen Verbrenner-Fahrzeugen) über nahezu die gesamten Betriebstemperaturen des Fahrzeuges eine elektrische Zusatzheizung zugeschaltet werden muss. In diesem Zusammenhang stellen der Betrieb des batterieelektrischen Stadtbusses mit einem Wirkungsgrad von 60 % gegenüber dem Betrieb des Diesel-Verbrenners in ineffizienten Kennfeldbereichen bei gleichzeitig hohem Energiebedarf für die Klimatisierung der

Fahrgastzelle eine Kombination dar, in der die Nachteile des Dieselmotorischer Antriebs und die Vorteile des Elektrofahrzeugs maximiert werden.

9.2.2 Vergleich der spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen auf der Darmstädter Stadtbuslinie-L bei -20°C Umgebungstemperatur

In Abbildung 81 findet der Vergleich der Kombinationen aus Energie- und Antriebssystem bei -20 °C statt. Zur Verbesserung der Leserlichkeit wird in dieser Abbildung auf die Darstellung der maximum und minimum-Stromerzeugungsszenarien abgesehen und auf die zeitliche Darstellung zwischen 2017 und 2050 fokussiert.

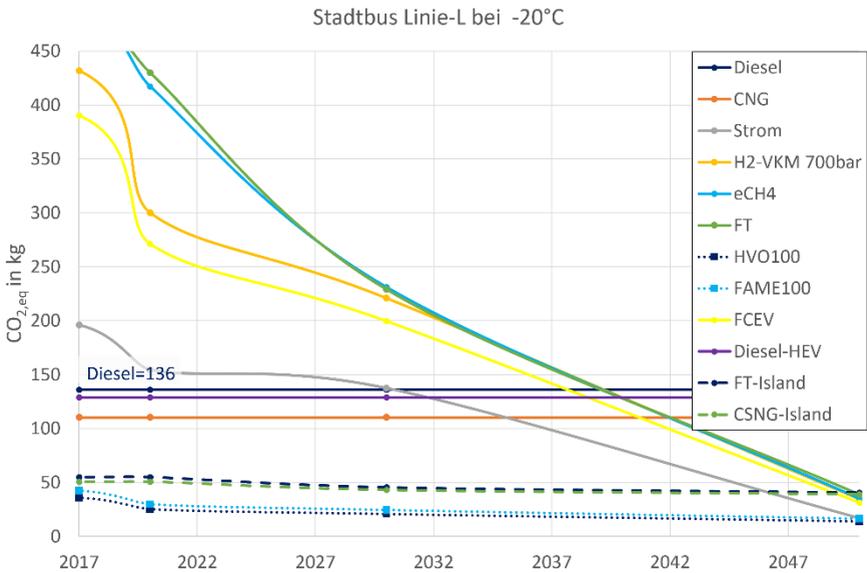


Abbildung 81: CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Energie- und Antriebssystemkombinationen bei -20 °C Umgebungstemperatur

Bei einer Absenkung der Temperaturen unterhalb von 0 °C verschiebt sich der Zeitpunkt an dem die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet auf der Zeitachse nach hinten. Demnach erreicht der batterieelektrische Stadtbus im mittleren Stromerzeugungsszenario erst ab dem Jahr 2030 das CO_{2,eq}-Emissionsniveau des fossilen Diesel-Referenzbusses. Die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischen Stadtbusses bei -20 °C ist erst nach 2035 besser als die des Erdgasbus. Das WtW-CO_{2,eq}-Emissionsniveau von importierten PtX (CSNG-Island und FT-Island) erreicht der batterieelektrische Stadtbus erst 2045. Wie in 4.5.3 gezeigt, nimmt der Batteriewirkungsgrad

unter 0 °C drastisch ab, sodass der Verbrauch des Elektrobusse bei gleicher Antriebsleistung steigt. Der Einfluss der Außentemperatur auf den Wirkungsgrad der Dieselverbrennung ist hingegen vergleichsweise gering. Des Weiteren ist beim Verbrennungsmotor ein - in dieser Anwendung zwar geringer - Teil der Verlustwärme nutzbar, sodass der Leistungsbedarf an die elektrische Heizung beim Bus mit Verbrennungsmotor gegenüber dem batterieelektrischen Stadtbus um 3,75 kW sinkt oder über der betrachteten 4,5 h Stadtbusroute um ca. 17 kWh geringer ausfällt.

9.2.3 Einfluss der Stadtbusroute auf die spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen

Die im Rahmen von VECTO (20) von der Europäischen Kommission definierte Verteilerverkehr-Route VECTO Urban-Delivery trifft gemäß der Definition von Verteilerverkehr (175) auch für den innerstädtischen Personentransport zu. In diesem Zusammenhang werden die erstellten Stadtbusse auch im VECTO Urban-Delivery Zyklus mit einer Länge von 27,82 km und einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 30,67 km/h (siehe Tabelle 25) untersucht. Die CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombination bei 10 °C Außentemperatur sind für den VECTO Urban-Delivery und der Linie-L in Abbildung 82 dargestellt. Zur besseren Leserlichkeit wird auf die Darstellung von den Maximum- und Minimum-Stromerzeugungsszenarien für jeden Energieträger verzichtet und der Fokus wird auf den Zeitbereich 2010 bis 2050 gelegt.

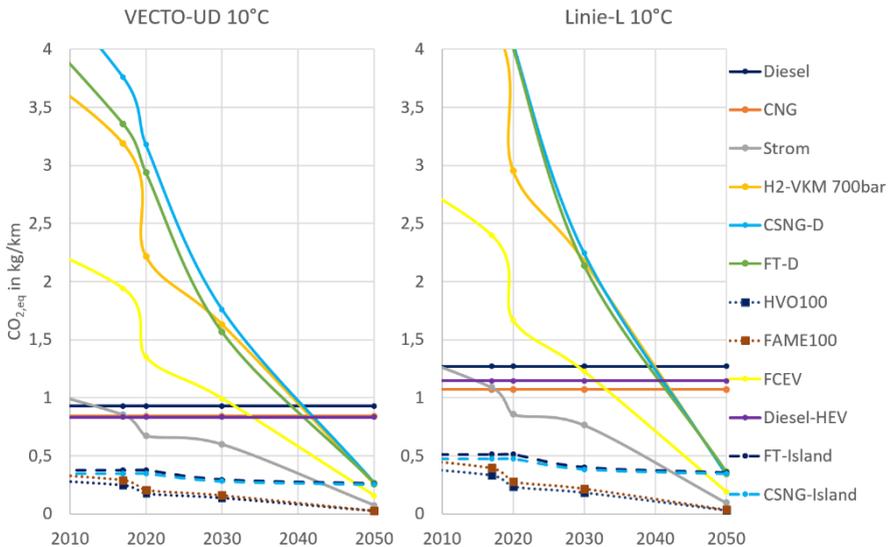


Abbildung 82: Spezifische CO_{2,eq}-Emissionen der simulierten Stadtbusantriebs-Energiesystemkombinationen bei 10°C Außentemperatur

Der deutlich höhere Stillstandanteil der Linie-L gegenüber dem VECTO Urban-Delivery-Zyklus (33 % und respektive 19 %) und die niedrigere mittlere Geschwindigkeit spiegeln sich im durchschnittlich 20 % höheren spezifischen Verbrauch der Verbrennerfahrzeuge im Linie-L-Zyklus wider. Der Antriebsstrangwirkungsgrad der Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb (BEV und FCEV) reagiert weniger sensitiv auf das transientere Fahrprofil im Linie-L-Zyklus, sodass bei den Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb im Fahrprofil Linie-L lediglich ein Anstieg der spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen um 7 % gegenüber den VECTO Urban-Delivery-Zyklus zu erkennen ist. Demnach verschiebt sich der Zeitpunkt an dem die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet um 4 Jahre auf das Jahr 2014 (2010 im Linie-L Zyklus) im weniger transienten VECTO Urban-Delivery-Zyklus. In diesem Zusammenhang ist ein Einfluss des gefahrenen Zyklus auf den Zeitpunkt an dem die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanzen des batterieelektrischen und des Diesel-Referenzfahrzeugs sich angleichen zu erkennen. Anhand der betrachteten Zyklen ist erkennbar, dass ein steigender Stillstandanteil und eine sinkende Durchschnittsgeschwindigkeit zu einem vorzeitigen Schnittpunkt Kurven von Diesel-Referenzfahrzeug und batterieelektrischem Fahrzeug.

Der gefahrene Zyklus beeinflusst ebenfalls den Zeitpunkt an dem die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des brennstoffzellen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet. Der geringere Wirkungsgradunterschied zwischen Diesel und FCEV im Vergleich zu Diesel und BEV verschiebt den Schnittpunkt der Kurven um zwei statt vier Jahre. Während im Linie-L-Zyklus ab 2029 der Brennstoffzellenantrieb mit deutschen Wasserstoff eine besser WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besitzt als der Dieselbus, geschieht dies im VECTO Urban-Delivery-Zyklus erst im Jahr 2031.

Der Vergleich zwischen einem batterieelektrischen Stadtbus beladen mit Strom aus dem deutschen Strommix und einem Dieselmotorischer Antrieb mit fortschrittlichen Biokraftstoffen (HVO und FAME) ist bis 2050 kein Schnittpunkt der Kurven zu erkennen. In beiden Zyklen sind hingegen, importierte PtX (CSNG-Island und FT-Island) bis 2042 in der WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besser als das batterieelektrische Fahrzeug. Bei den PtX aus Deutschland gibt es ebenfalls keinen Unterschied zwischen den gefahrenen Zyklen.

9.2.4 Zusammenfassung Stadtbusbetrieb

Vergleichbar mit dem Abfallsammelbetrieb, stellt der Stadtbusbetrieb mit hohen Standzeiten, häufigen Anfahrmanövern und niedrigen Antriebsleistungen eine Herausforderung für verbrennungsmotorische Antriebe dar. Aufgrund des hohen Energiebedarfs zur Heizung der Fahrgastzelle, muss in jedem Antrieb, bei nahezu jeder Temperatur elektrisch unterstützt werden. Aufgrund der niedrigen mittleren Antriebsleistung verliert der Verbrennungsmotor den Vorteil der nutzbaren Verlustwärme zur Beheizung des Innenraumes. Erst bei Temperaturen unterhalb von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, wenn der Batteriewirkungsgrad stark abnimmt oder durch die Verwendung weniger $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -intensiver Energieträger, bleibt der verbrennungsmotorische Antrieb eine Alternative. Unter Berücksichtigung der lokalen

Schadstoffemissionen und der geringen Konvertierungseffizienz der Abgasreinigungsanlage bei niedrigen Betriebstemperaturen, scheint der batterieelektrische Antrieb in der Stadtbusanwendung alternativlos zu sein. Allein der Brennstoffzellenantrieb stellt, unter dem Aspekt der lokalen Schadstofffreiheit, eine Alternative dar. Wobei bei der Verwendung von grünem Wasserstoff mit niedrigem $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsfaktor die Klimawirksamkeit erreicht wird. Dabei ist mit Wasserstoff aus dem deutschen Strommix erst ab ca. 2030 eine positive $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz gegenüber fossilem Diesel zu vermerken.

Betrachtet man nur die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz, ist die Verwendung von biogenen Kraftstoffen der zweiten Generation als Rein- oder Blend-Kraftstoff eine einfache und schnelle Möglichkeit, die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen des Dieselmotorischer Antriebs zu senken.

Die Verwendung von importierten PtX ermöglicht eine sofortige Reduktion der WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen vom Stadtbus mit dieselmotorischem Antriebsstrang um 60 % (stand 2020) und bis 70 % in 2050. Diese Antriebs- und Energiesystemkombination besitzt bis 2042 eine bessere $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz als batterieelektrischen Stadtbusse.

9.3 Verteilerverkehr

Unter Verteilerverkehr wird die Lieferung von Waren aus multimodalem- oder intermodalem Verkehr zum finalen Bestimmungsort verstanden. Dabei wird umgangssprachlich oft von „der letzten Meile“ gesprochen. Typische Beispiele für den Verteilerverkehr sind Paketlieferdienste oder Nahrungsmittels-Lastkraftwagen für die Güterverteilung oder Stadtbusse für die Personenbeförderung. Dabei bezieht sich die Verteilung im urbanen Umfeld sowohl auf Güter als auch auf Personen (175). In diesem Zusammenhang werden in diesem Abschnitt zwei Routen untersucht: die im Rahmen von VECTO genutzte VECTO Urban-Delivery und eine real aufgenommene Regional-Verteilerverkehrsrouten im Darmstädter Umland im Folgenden als „Odenwald“ bezeichnet. Tabelle 25 gibt einen Überblick der Beschaffenheiten der betrachteten Routen.

Tabelle 25: Betrachtete Routen für den Verteilerverkehr

Route	Länge in km	Kumulierter positiver Anstieg in m	Durchschnitts-Geschwindigkeit in km/h	Stillstands-Anteil in %
VECTO Urban-Delivery	27,82	412	30,67	19
Odenwald	94,10	1519	43,32	4

Die typischen Verteilerverkehrsfahrzeuge sind als Kofferaufbau mit einer Gesamtlänge von ca. 6,2 m und einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 t ausgeführt. Als Beispiele sind an dieser Stelle für die Diesel-Verbrennerfahrzeuge der Mercedes-Benz Atego oder der MAN TGL als verfügbare dieselmotorische Antriebe und der Iveco Stralis NP als Gasfahrzeug genannt. Der Hyundai Xcient wird als Basis für den Brennstoffzellen-Verteiler-Lastkraftwagen herangezogen und der Mercedes-Benz eActros als batterieelektrische Variante.

Das Diesel-Referenzfahrzeug ist mit 9218 kg das leichteste der simulierten Verteilerverfahrzeuge und besitzt eine Energiespeicherkapazität von 1242 kWh. Der verwendete Dieselmotor mit 7698 cm³ Hubraum liefert 220 kW maximale Leistung und 1200 Nm maximales Moment (52). Das Diesel-Referenzfahrzeug besitzt dementsprechend eine Nutzlast von ca. 8700 kg, so dass die betrachteten Zuladungen von einer und sieben Tonnen einen Nutzlastanteil von 11 % bzw. 80 % entsprechen. Bei dem Brennstoffzellenfahrzeug und dem Wasserstoffverbrenner werden 700 bar Wasserstoff-Gasdrucktanks mit 814 Liter Gesamtvolumen verwendet (176, 177). Mit einem Gewicht von 640 kg tragen die Tanks zum höheren Gesamtgewicht beider Wasserstofffahrzeuge bei. Beim Brennstoffzellenfahrzeug kommen noch die knapp 400 kg Zusatzgewicht durch die 73 kWh Batterie und das Gewicht der 190 kW Brennstoffzelle hinzu, so dass das vollgetankte Brennstoffzellenfahrzeug 10396 kg wiegt. Der Wasserstoffverbrenner

wird als 13 Liter statt 8 Liter Hubraum Motor ausgeführt, um die Leistungseinbuße bei Vollast zu kompensieren. Er erreicht eine Spitzenleistung von 270 kW besitzt ein maximales Drehmoment von 2200 Nm (55, 116). Der Verbrennungsmotor mit größerem Hubraum trägt ebenfalls zum Mehrgewicht bei, sodass der Wasserstoffverbrenner ein Gesamtgewicht von 11144 kg erreicht. Dies entspricht einem Mehrgewicht gegenüber den Diesel-Referenzfahrzeug von 1926 kg. Das Tanksystem des Gasfahrzeugs wird analog zu den Wasserstofffahrzeugen als Gasdrucktank mit 200 bar Betriebsdruck ausgeführt. Die 920 Liter Typ-4 Speicher erhöhen das Gewicht um 350 kg. Der Gas-Verbrennungsmotor mit 9700 ccm³ Hubraum hat eine maximale Leistung von 243 kW und ein maximales Moment von 1700 Nm (84, 83). Das Gasfahrzeug weist somit mit 9998 kg ein Mehrgewicht von 780 kg gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug auf. Mit 10912 kg ist das batterieelektrische Verteilerverkehrsfahrzeug um 1693 kg schwerer als das Diesel-Referenzfahrzeug. Die 448 kWh Antriebsbatterie ist mit 2421 kg die Hauptursache dafür. Das Fahrzeug ist mit einem 400 kW Elektromotor mit 2200 Nm maximales Motormoment ausgestattet (178, 179). Die detaillierten Fahrzeugeigenschaften sind im Anhang C in Tabelle 31 zusammengefasst.

Die Konditionierung der 8 m³ großen Fahrgastzelle erfordert bei den sechs Umgebungstemperaturszenarien die in Tabelle 26 aufgeführten Leistungen. Während beim batterieelektrischen Fahrzeug die Heizleistung in elektrischer Form aus der Traktionsbatterie bereitgestellt wird, kann beim Verbrenner- und beim Brennstoffzellenantriebsstrang die Verlustwärme des chemischen Energiewandlers zum Heizen genutzt werden. Der Leistungsbedarf zur Kühlung wird bei allen Antriebsstrangkonfigurationen als elektrischer Nebenverbraucher ausgeführt und ist somit gleich.

Tabelle 26: Energiebedarf zur Klimatisierung der Fahrgastzelle des Verteilerverkehrsfahrzeug nach Szenario

Temperatur in °C	-20	-10	0	10	25	40
Sonneneinstrahlung in W/m²	30	30	30	200	350	900
Leistungsbedarf zur Konditionierung in kW	9,1	6,8	5,0	2,4	-1,3	-5,7

Als erstes werden die spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen der Antriebs- und Energiesystemkombination auf der Odenwald-Route bei 10 °C und sieben Tonnen Zuladung verglichen. Danach wird der Einfluss der Route beleuchtet, indem die Emissionen im VECTO Urban-Delivery-Zyklus in die Betrachtung eingebunden werden. Im Anschluss wird die Umgebungstemperatur variiert und abschließend wird der Einfluss der Zuladung auf der Odenwald-Route analysiert.

9.3.1 Vergleich der spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen auf der Odenwald-Route bei 10°C Umgebungstemperatur und 7 t Zuladung

Die spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Antriebsstränge mit sieben Tonnen Zuladung bei 10 °C Umgebungstemperatur auf der Odenwald-Route sind in Abbildung 83 dargestellt. Die Korridore, gebildet aus den Stromerzeugungsszenarien aus Kapitel 5, sind für alle betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen in Abbildung 83 dargestellt.

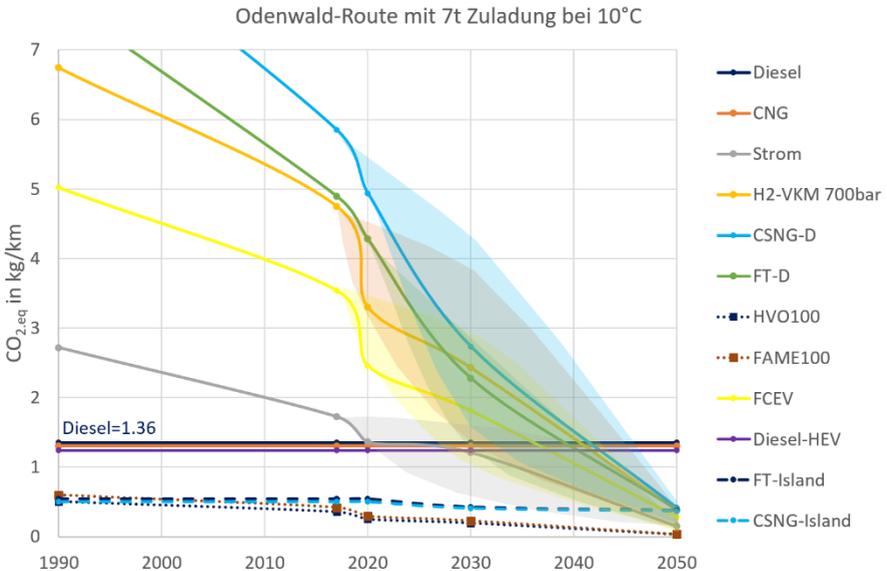


Abbildung 83: Spezifische CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen auf der Odenwald-Route bei 10°C Umgebungstemperatur und 7t Zuladung

Die Zuladung von sieben Tonnen entspricht für das das Diesel-Verteilerverkehrsfahrzeug 80 % des 18 t zulässigen Gesamtgewichts. Auf der Odenwald-Route hat der fossile Diesel Lastkraftwagen einen spezifischen WtW-CO_{2,eq}-Ausstoß von 1,36 kg CO_{2,eq}/km. Die Verwendung von eines fossilen Diesel-Hybriden (Diesel-HEV) ermöglicht eine Reduktion der CO_{2,eq}-Emissionen um 8,5 % gegenüber dem fossilen Diesel-Referenzfahrzeug. Die Verwendung eines mit fossilem Gas betriebenen Verteilerfahrzeugs ermöglicht eine Reduktion der CO_{2,eq}-Emissionen um 3,5 % gegenüber dem fossilen dieselmotorischer Antrieb. Der Erdgasantrieb profitiert vom 22 % geringeren WtW-Emissionsfaktor von Erdgas gegenüber fossilem Diesel.

Im Jahr 2020 unterschreitet die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs. In dieser Anwendung unterschreitet im Jahr 2045 die CO_{2,eq}-Bilanz

des batterieelektrischen Fahrzeugs die der importierten PtX aus Island (FT-Island und CSNG-Island) im dieselmotorischer Antriebsstrang. Das Emissionsniveau von fortschrittlichen Biokraftstoffen (z.B. HVO100 und FAME100) im dieselmotorischen Antrieb erreicht das batterieelektrische Verteilerverkehr-Fahrzeug hingegen erst im Jahr 2050.

Mit deutschem Strommix hergestellte PtX erreichen zwischen dem Jahr 2030 und dem Jahr 2045 das Emissionsniveau des Diesel-Referenzfahrzeugs. Im Mittel aller Stromerzeugungsszenarien sind CSNG-D, FT-D und Wasserstoff im Verbrennungsmotor (H₂-VKM) ab dem Jahr 2040 in der WtW-CO_{2,eq}-Bilanz besser als fossiler Diesel im dieselmotorischen Antriebsstrang. In dieser Anwendung erreicht der dieselmotorische Antriebsstrang mit FT-D als erster der deutschen PtX das Referenz-Emissionsniveau: der Wirkungsgradvorteil gegenüber dem Wasserstoffverbrennungsmotor überkompensiert den WtW-Emissionsfaktornachteil von FT-D gegenüber Wasserstoff aus deutschem Strommix bei 700 bar.

Der Brennstoffzellenantrieb erreicht im Mittel aller Stromerzeugungsszenarien 2036 das WtW-CO_{2,eq}-Emissionsniveau von fossilem Diesel.

9.3.2 Einfluss der Route auf die spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen

In Abbildung 84 sind die spezifischen WtW-CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen auf den Routen, VECTO Urban-Delivery und Odenwald, bei 10 °C Umgebungstemperatur und sieben Tonnen Zuladung dargestellt. Zur besseren Leserlichkeit wird auf die Darstellung der Minimum- und Maximum-Stromerzeugungsszenarien verzichtet und die Zeitachse auf den Bereich 2010 bis 2050 limitiert.

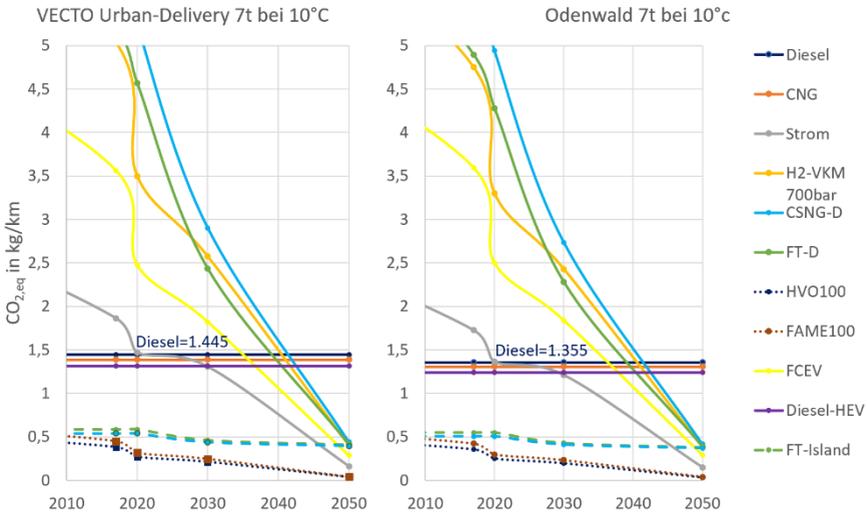


Abbildung 84: Spezifische $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen auf der Odenwald-Route und im VECTO Urban-Delivery-Zyklus bei 10°C Umgebungstemperatur und 7t Zuladung

Trotz der unterschiedlichen Stillstandanteile und Durchschnittsgeschwindigkeiten beider Zyklen (siehe Tabelle 25) ist kein qualitativer Unterschied in den spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Verläufen über der Zeit zu erkennen. Demnach verschieben sich die Zeitpunkte an denen die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz der Vergleichsfahrzeuge die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreiten nicht. Einzig ist im VECTO Urban-Delivery-Zyklus ein Anstieg der spezifischen Emissionen um ca. 7 % zu erkennen. Dies ist auf den höheren Stillstandanteil des VECTO Urban-Delivery Zyklus zurückzuführen und ist bei allen Antriebssträngen gleichermaßen zu beobachten, sodass es keine zeitliche Verschiebung der Schnittpunkte gegenüber dem Betrieb in der Odenwald-Route gibt.

9.3.3 Einfluss der Änderung der Umgebungsbedingungen auf die spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen

In Abbildung 85 links sind die spezifischen $\text{WtW-CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen auf der Odenwald-Route bei -20°C Umgebungstemperatur und sieben Tonnen Zuladung dargestellt. Die Zeitkorridore werden in dieser Abbildung zur besseren Leserlichkeit nicht dargestellt und die Zeitachse auf den Bereich 2015 bis 2050 limitiert.

Die Zeitpunkte an denen die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanzen der PtX aus Deutschland in verbrennungsmotorischen Antriebssträngen (FT-D, CSNG-D und H2-VKM) die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreiten ändern sich nicht gegenüber den vorherigen Untersuchungen bei 10 °C. Allerdings verschiebt sich der Zeitpunkt an dem die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet vom Jahr 2020 bei 10 °C auf das Jahr 2030 bei -20 °C. Während in Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antriebsstrang der Heizbedarf über die Verlustwärme des Motors gestillt werden kann, bezieht das batterieelektrische Fahrzeug die Energie aus der Antriebsbatterie. Demnach werden bei -20 °C über den gesamten Verlauf der 94,1 km langen Odenwald-Route 21 kWh an Heizenergie zur Konditionierung der Fahrgastzelle auf 22°C benötigt. In Abbildung 85 rechts ist dies am Anstieg des Verbrauchs des BEVs bei Umgebungstemperaturen unter 20 °C zu erkennen. Des Weiteren sinkt der Wirkungsgrad der Batterie unterhalb von 0 °C drastisch ab, so dass dieser Effekt noch verstärkt wird. In Abbildung 85 rechts ist dieser Effekt am kontinuierlich steigenden Gradienten der Verbrauchskurve des batterieelektrischen Verteiler-Lastkraftwagen mit sinkender Temperatur zu erkennen. Die Fahrzeuge mit verbrennungsmotorischem Antrieb hingegen, besitzen einen nahezu konstanten Verbrauch über den Temperaturbereich -20° C bis 20° C.

Das Verhalten des Brennstoffzellenfahrzeugs ähnelt dem des batterieelektrischen Fahrzeugs. Bei steigendem Leistungsbedarf sinkt der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstapels, so dass bei -20 °C eine zeitliche Verspätung des Zeitpunkts an dem die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des Brennstoffzellenfahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet um ein Jahr.

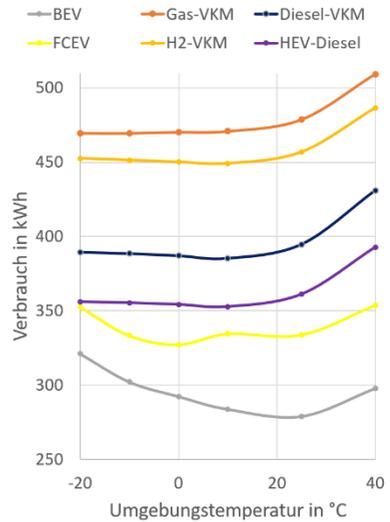
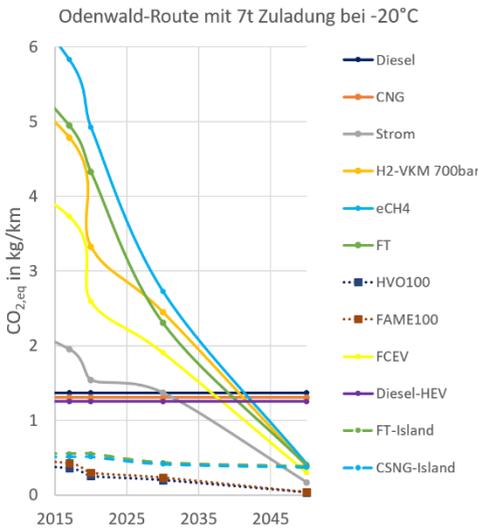


Abbildung 85: links: Spezifische CO_{2,eq}-Emissionsverläufe der Antriebs- und Energiesystemkombinationen im Verteilerverkehr auf der odenwald-Route bei -20°C und 7t Zuladung. Rechts: Temperaturabhängiger Verbrauch der Antriebskonzepte auf der Odenwald-Route

9.3.4 Einfluss der Änderung der Zuladung auf die spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen

In Abbildung 86 sind die spezifischen CO_{2,eq}-Emissionen der Antriebs- und Energiesystemkombinationen über der Zeit bei einer und sieben Tonnen Zuladung auf der Odenwald-Route bei 10 °C Umgebungstemperatur dargestellt. Zur besseren Leserlichkeit werden nur das batterieelektrische Fahrzeug sowie ein fossiler und ein synthetischer dieselmotorischer Antriebsstrang im Zeitbereich 2010 bis 2050 abgebildet.

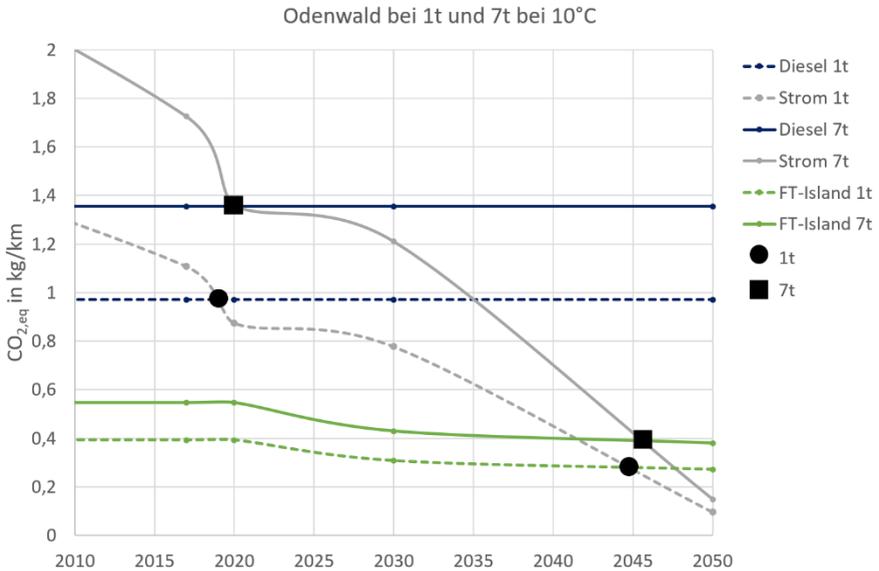


Abbildung 86: Einfluss der Zuladung auf die CO_{2,eq}-Emissionen der betrachteten Fahrzeuge bei 10°C Außentemperatur auf der Odenwald-Route

Durch Reduzierung der Zuladung von sieben auf eine Tonne steigt auf der Odenwald-Route der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs während der des Dieselmotors von 33 % auf 31 % sinkt. Dies deutet darauf hin, dass in dieser Nutzfahrzeuganwendung der Anstieg des Steigungs- und Beschleunigungswiderstands durch die Zuladungserhöhung, beim Diesel-Verbrennungsmotor eine Lastpunktanhebung und somit eine Steigerung des Antriebsstrangwirkungsgrades bewirkt. Beim batterieelektrischen Antrieb führen die kurzen, steilen Anstiege der Odenwald-Route zu hohen Batterieentladeraten und somit sinkenden Batteriewirkungsgraden mit steigendem Fahrzeuggewicht. Der Zusammenhang der Batterieentladerate (C-Rate) und des Batteriewirkungsgrads sind in Abbildung 35 links dargestellt. In diesem Zusammenhang verspäten sich die Zeitpunkte an denen die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs mit fossilem Diesel und Fischer-Tropsch-Diesel aus Island unterschreiten um jeweils ein Jahr bei Erhöhung der Zuladung von einer auf sieben Tonnen.

9.3.5 Zusammenfassung Verteilerverkehr

Mit Durchschnittlich 1,61 % Steigung favorisiert die Odenwald-Route leichtere Fahrzeuge. Bei hohen Zuladungen werden in den Anstiegen hohe Antriebsleistungen gefordert. Dabei werden die Verbrennungsmotoren in Kennfeldbereichen mit höherem Wirkungsgrad

betrieben, während der Brennstoffzellenantrieb und der batterieelektrische Antrieb dabei Wirkungsgradeinbußen aufgrund von hohen C-Raten und hohen Brennstoffzellenleistungen erleiden. In diesem Zusammenhang ist eine Verschiebung der Zeitpunkte an denen die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet vom Jahr 2019 bei einer Tonne Zuladung auf das Jahr 2020 bei sieben Tonnen Zuladung zu verzeichnen. Den größten Einfluss auf den Schnittpunkt der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz-Kurven von fossilem Diesel und batterieelektrischem Fahrzeug hat die Umgebungstemperatur. Je niedriger die Außentemperatur, desto mehr profitiert der verbrennungsmotorische Antriebsstrang von der nutzbaren Abwärme zur Konditionierung der Fahrgastzelle während der Wirkungsgrad der Batterie mit sinkender Umgebungstemperatur abnimmt. Die Verwendung von PtX können die WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der verbrennungsmotorischen Antriebssträngen auf ein mit dem batterieelektrischen Antriebs vergleichbar niedriges Niveau senken. Dabei erreichen importiert PtX (z.B. aus Island) eine sofortige Minderung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen auf das batterieelektrische Emissionsniveau von 2045.

9.4 Fernverkehr

Die Fernverkehr-Fahrzeuge werden auf zwei unterschiedlichen Routen untersucht. Zum einen auf dem von der Europäischen Kommission im Rahmen von VECTO genutzten Profil für Langstrecken-Nutzfahrzeuge: VECTO Long-Haul. Zum anderen wird eine Speditions-Route verwendet, die im Rahmen von Untersuchungen zum Emissionsverhalten eines Fernverkehrsnutzfahrzeug aufgezeichnet wurde. Aus den Merkmalen aus Tabelle 27 ist ersichtlich, dass der Höhengewinn bei der real aufgezeichneten Speditionsroute Darmstadt-Pforzheim-Darmstadt (im folgenden *Pforzheim-Route* genannt) mit 5,61 m/km größer ist als bei der VECTO Long-Haul Route (4,37 m/km). Des Weiteren unterscheidet der Stillstandsanteil und die Durchschnittsgeschwindigkeit den VECTO Long-Haul Zyklus und die reale Pforzheim-Route.

Tabelle 27: Betrachtete Routen für die Fernverkehr-Untersuchungen

Route	Länge in km	Kumulierter positiver Anstieg in m	Durchschnitts-Geschwindigkeit in km/h	Stillstands-Anteil in %
VECTO Long-Haul	100	437	67	<1
Darmstadt - Pforzheim	271	1520	36	3

Der Vergleich der Geschwindigkeitsprofile beider betrachteter Routen ist in Abbildung 87 aufgeführt. Dabei ist der Geschwindigkeitsverlauf der VECTO-Route annähernd konstant während die Pforzheim-Route aufgrund des Verkehrs einen transienteren Geschwindigkeitsverlauf aufweist. Zudem kommt das Fahrzeug auf der Pforzheim-Route in fünf Phasen im Stop-and-Go-Verkehr bis zum Stillstand während der VECTO Long-Haul Zyklus zwei Stopps ohne weitere Verkehrsaufkommen aufweist. Die mittlere Geschwindigkeit der Pforzheim-Route ist aufgrund der vielen Stauphasen geringer als der in VECTO genutzter Regional-Verteiler-Zyklus *Regional-Delivery* (58,6 km/h) (12, S. 120), sodass von einem überdurchschnittlich dichten Verkehr ausgegangen werden kann.

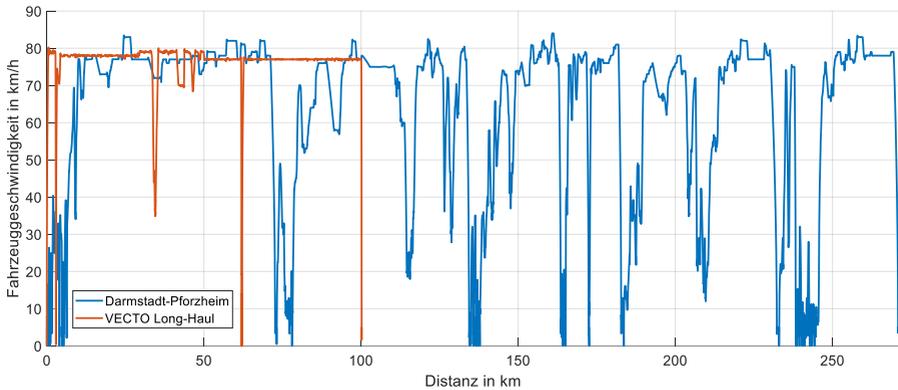


Abbildung 87: Geschwindigkeitsprofil der betrachteten Fernverkehrsrouten

In Deutschland liegt die Auslastung der Lastkraftwagen bei 50 % bis 80 %. Dies entspricht 12,5 t und respektive 20 t bei einem Sattelzug mit 25 t Nutzlast (180, 181, S. 8). Um den Einfluss der Zuladung auf den Verbrauch der betrachteten Fahrzeuge zu ermöglichen, wird die Zuladung in dieser Arbeit zwischen fünf Tonnen und 20 Tonnen variiert. Dies entspricht Auslastungen von 20 % und respektive 80 %. Die Fernverkehr-Lastkraftwagen (engl. Long Haul Trucks) werden als Sattelzugmaschine mit Auflieger ausgeführt. Das Leergewicht des Diesel-Referenzfahrzeugs liegt vollgetankt mit Auflieger (7365 kg) bei 15775 kg, sodass 24,225 t Nutzlast zur Verfügung stehen. Durch die erforderlichen Reichweiten im schweren Langstreckennutzfahrzeugverkehr, nutzen sowohl die Sattelzugmaschine mit Brennstoffzelle als auch das Fahrzeug mit Wasserstoffverbrennungsmotor, aufgrund der höheren volumetrischen Energiedichte, verflüssigten an Stelle von gasförmigen Wasserstoff als Energieträger. Im Gegensatz zum Dieselfahrzeug ist bei den Wasserstofffahrzeugen der Tank und nicht der Energieträger hauptverantwortlich für das Gewicht des Kraftstoffsystems. Bei 880 kg Gesamtgewicht für das volle Tanksystem trägt der verflüssigte Wasserstoff mit 80 kg zu 9 % des Gewichts bei, während beim vollen Dieseltank 90 % des Gewichts auf den Dieselmotorkraftstoff zurückzuführen ist. Zur Erhöhung der Reichweite bei gleichem Platzbedarf nutzt auch die Sattelzugmaschine mit Gasmotor das Methan in flüssiger Form (LNG). Dabei sind die Tankgewichte ähnlich der Wasserstofftechnologie, jedoch trägt das verflüssigte Methan bei vollem Tank zu einem Drittel des gesamten Kraftstoffsystemgewichts bei. Demnach wiegt das Gasfahrzeug vollgetankt 868 kg mehr als das Diesel-Referenzfahrzeug, während der Wasserstoffverbrenner nur 110 kg Mehrgewicht aufweist. Die Brennstoffzellen-Sattelzugmaschine unterschreitet um 493 kg das Diesel-Referenzfahrzeuggewicht. Die batterieelektrische Sattelzugmaschine ist mit einer Batterie mit 620 kWh ausgestattet. Bei einem spezifischen Gewicht von 5,41 kg/kWh trägt die Batterie zu 3351 kg und somit ca. 38 % des Gesamtgewichts der Sattelzugmaschine bei, sodass ein Mehrgewicht des

Gesamtfahrzeugs gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug von 420 kg entsteht. Die Verbrennungsmotoren der Diesel-, Gas- und Wasserstofffahrzeuge liefern 300 bis 353 kW Spitzenleistung und ein maximales Drehmoment von etwa 2300 Nm. Der elektrische Antrieb ist beim batterieelektrischen und beim Brennstoffzellenfahrzeug identisch ausgeführt und liefert 460 kW maximale Dauerleistung und 3154 Nm maximales Drehmoment. Die vollständigen Daten der simulierten Sattelzugmaschinen sind in Tabelle 32 des Anhangs D zusammengefasst.

Als erstes werden die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen auf der VECTO Long-Haul und der Pforzheim-Route verglichen. Anschließend wird auf beiden Routen die Zuladung variiert und die WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanzen der untersuchten Sattelzugmaschine verglichen. Abschließend wird noch der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen und die Reichweite der batterieelektrischen Sattelzugmaschine bewertet.

9.4.1 Einfluss der Route auf die spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen

Der temperaturabhängige Energiebedarf zur Konditionierung der Fahrgastzelle entspricht dem des Verteilerfahrzeugs und ist in Tabelle 26 aufgeführt. Der Vergleich des mittleren spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Verbrauchs über alle Temperaturen eines 40 Tonnen Sattelzugs mit unterschiedlichen Antriebs- und Energiesystemkombinationen auf den zwei betrachteten Fernverkehrsprofilen ist in Abbildung 88 dargestellt. Zur Erhöhung der Leserlichkeit sind die Korridore der Stromerzeugungsszenarien nicht dargestellt. Die Sattelzüge mit den betrachteten Antriebs- und Energiesystemkombinationen werden auf der VECTO Long-Haul und der Pforzheim-Route mit 20 t Zuladung verglichen.

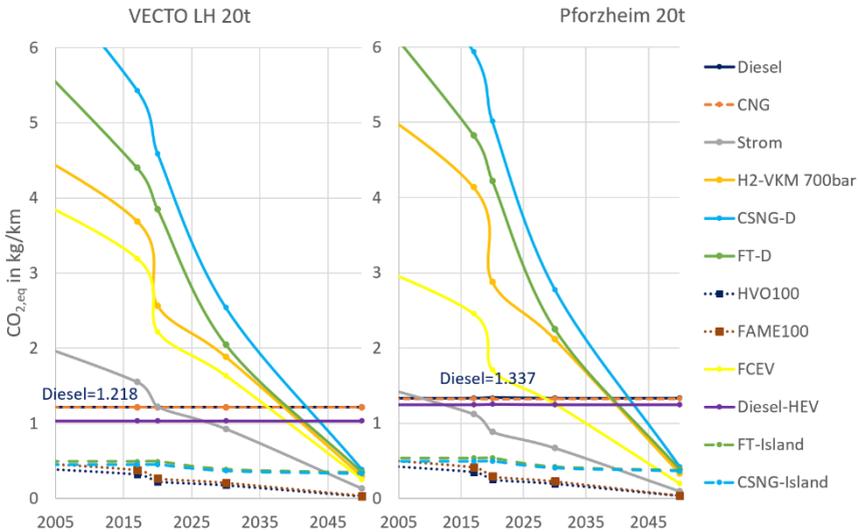


Abbildung 88: Spezifische $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen eines 20t Sattelzugs im VECTO Long-Haul und auf der Darmstadt-Pforzheim-Route

Der deutlich höhere Stillstandanteil und die niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit in der Pforzheim-Route gegenüber dem VECTO Long-Haul-Zyklus haben einen 10 % höheren spezifischen Verbrauch des Diesel-Referenzfahrzeugs in der Pforzheim-Route zur Folge (1,337 $\text{kg CO}_{2,\text{eq}}/\text{km}$ gegenüber 1,218 $\text{kg CO}_{2,\text{eq}}/\text{km}$). Die Gasmotor-Sattelzugmaschine mit Erdgas betrieben folgt demselben Trend. Des Weiteren heben sich in beiden Zyklen der WtW-Emissionsfaktorvorteil des Erdgases gegenüber dem fossilen Diesel und der höhere Wirkungsgrad des selbstzündenden Diesels gegenüber dem fremdgezündeten Gasmotor auf, so dass beide Antriebs- und Energiesystemkombinationen die gleiche WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz erreichen.

Die unterschiedlichen Profilvermerkmale führen dazu, dass die elektrischen Antriebe (BEV und FCEV) im VECTO Long-Haul Zyklus höhere spezifische $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen haben als in der Pforzheim-Route. Während bei den Antriebssystemen mit Verbrennungsmotor das gegenteilige Verhalten eintritt. In der Pforzheim-Route profitieren die elektrischen Antriebssysteme vom hohen Rekuperationsanteil durch das transiente Geschwindigkeitsprofil und den langen Bergabfahrten. Das quasi-stationäre Fahrverhalten im VECTO Long-Haul-Zyklus kommt den Verbrennungsmotoren zugute, in dem anteilig wenig Zeit in wirkungsgradungünstigen Bereichen des Kennfelds wie beispielsweise beim Anfahren gefahren wird. Die Überlagerung dieser Effekte führt dazu, dass beim VECTO Long-Haul der Zeitpunkt an dem die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeug die des Diesel-

Referenzfahrzeugs unterschreitet im Mittel über alle Stromerzeugungsszenarien im Jahr 2020 liegt, während auf der Pforzheim-Route dieser schon im Jahr 2010 aufkommt.

Dementsprechend verschieben sich auch die Schnittpunkte spezifischer $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionskurven der in Deutschland produzierten strombasierten Energieträger und des fossilen Diesels. In der Pforzheim-Route ist die Verwendung von in Deutschland hergestellten Wasserstoff in der Brennstoffzelle ab dem Jahr 2029 in der $\text{WtW-CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besser als der fossile dieselmotorische Antrieb. Im VECTO Long-Haul schneiden sich die Kurven erst im Jahr 2036.

Die verbrennungsmotorischen Antriebssysteme mit Wasserstoff oder PtX unterschreiten in beiden Zyklen zum gleichen Zeitpunkt die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen des Diesel-Referenzfahrzeugs. Ab 2039 ist der Betrieb mit deutschem Wasserstoff oder deutschem Fischer-Tropsch-Diesel in der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besser als der Betrieb mit fossilem Diesel. Die Verwendung von CSNG-D in etwa zwei bis drei Jahre später.

Die schnellsten und effektivsten Möglichkeiten die $\text{WtW-CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz zu senken stellen der Import von synthetischen Kraftstoffen wie FT-Island oder CSNG-Island und die Verwendung von fortschrittlichen Biokraftstoffen wie HVO100 und FAME100. Die importierten PtX-Kraftstoffe haben in der WtW -Bilanz bis 2040 in der Pforzheim-Route bzw. 2045 im VECTO Long-Haul eine bessere $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz als der batterieelektrische Sattelzug. Die Biokraftstoffe haben im Fernverkehr über 2050 hinaus die beste $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz aller untersuchten Antriebs- und Energiesystemkombinationen.

9.4.2 Einfluss der Variation der Zuladung auf die spezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen auf unterschiedlichen Routen

Die Variation der Zuladung führt in beiden betrachteten Zyklen zu unterschiedlichen Ergebnissen. In Abbildung 89 ist im linken Diagramm der Einfluss der Zuladung auf den Verbrauch des batterieelektrischen Sattelzugs bezogen auf den Verbrauch des Diesel-Referenzfahrzeugs dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Zuladung von 5 t auf 20 t im VECTO Long-Haul beim batterieelektrischen Sattelzug die gleiche Verbrauchseinsparung gegenüber dem Dieselpendant ermöglicht. Im Gegensatz dazu führt die Erhöhung der Zuladung in der Pforzheim-Route zu einem Zuwachs der Differenz zwischen den Verbräuchen von Diesel- und batterieelektrischem Fahrzeug von 31 % bei fünf auf 39 % bei 20 Tonnen Zuladung. Wie bereits erläutert, favorisieren die häufigen Anfahrmanöver und die langen Bergabfahrten des Pforzheim-Zyklus den Wirkungsgradvorteil des elektrischen Antriebs gegenüber einem konventionellen Verbrenner. Bei Erhöhung der Zuladung steigt der Beschleunigungswiderstand und die Rekuperationsleistung, sodass dieser Unterschied weiter verstärkt wird.

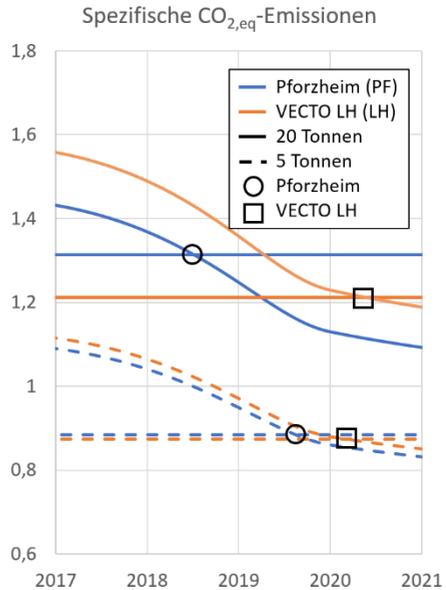
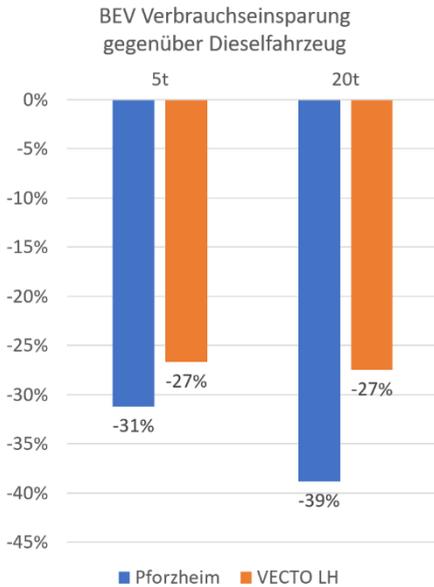


Abbildung 89: Auswirkung der Variation der Zuladung auf die CO_{2,eq}-Emissionen

Die aus den Verbräuchen und den Energiefaktoren der Energieträger nach Formel 9-1 berechneten spezifischen CO_{2,eq}-Emissionsverläufe verdeutlichen den beschriebenen Sachverhalt. Beim VECTO Long-Haul ändert die Zuladung den Zeitpunkt an dem die CO_{2,eq}-Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs die des Diesel-Referenzfahrzeugs unterschreitet so gut wie nicht. Das schwerere batterieelektrische Fahrzeug kreuzt im VECTO Long-Haul weniger als ein Jahr später als in der Pforzheim-Route die CO_{2,eq}-Emissionslinie des fossilen Diesel-Pendants. In der Pforzheim-Route hingegen, führt die Zuladungserhöhung zu einer Verschiebung um etwas mehr als ein Jahr nach links auf der Zeitachse. Der hohe Anteil an Stop-and-Go Verkehr verstärkt den Effizienzvorteil des batterieelektrischen Sattelzugs gegenüber dem Diesel-Referenzfahrzeug mit steigender Zuladung. Demnach wird durch den Verbrauchsvorteil die CO_{2,eq}-Bilanz positiv beeinflusst.

9.4.3 Einfluss der Variation der Umgebungsbedingungen auf die CO_{2,eq}-Emissionen einer Sattelzugmaschine

Bei Variation der Außentemperatur zwischen den betrachteten Temperaturen (-20 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C, 25 °C und 40 °C) verändert sich das Bild aus Abbildung 88 kaum. Der Anteil am Energieverbrauch durch Heizen mit maximal 8 % (beim BEV bei -20 °C) und durch Kühlen mit 6 % am Gesamtverbrauch fällt im Vergleich zu anderen Anwendungen, wie zum Beispiel der

Stadtbusbetrieb, gering aus. In diesem Zusammenhang ist der Vorteil des Verbrennungsmotors in Heizphasen, die Verlustwärme nutzen zu können, untergeordneter Bedeutung. Einzig die Reichweite des batterieelektrischen Sattelzugs sinkt bei niedrigen Temperaturen durch die verringerte Batteriekapazität und den niedrigeren Batteriewirkungsgrad nach Abbildung 90. Demnach reicht die Batteriekapazität bei 20 t Zuladung, auch bei idealisierter voller Ausnutzung der Batteriekapazität (100 % SOC-Hub), nicht aus, um die 270 km lange Strecke ohne zusätzlichen Ladevorgang zu absolvieren. Bei einem in der Praxis üblichen Batteriehub von 80 % (92, 11), muss der mit 20 t beladene elektrische Sattelzug unter allen Umgebungsbedingungen zwischendurch laden. Bei 25 °C Außentemperatur wird die größte Reichweite mit 207 km erreicht. Bei 375 kW bis 400 kW Ladeleistung mit 500 A werden 60 bis 90 Minuten für den Ladevorgang benötigt (92, 178).

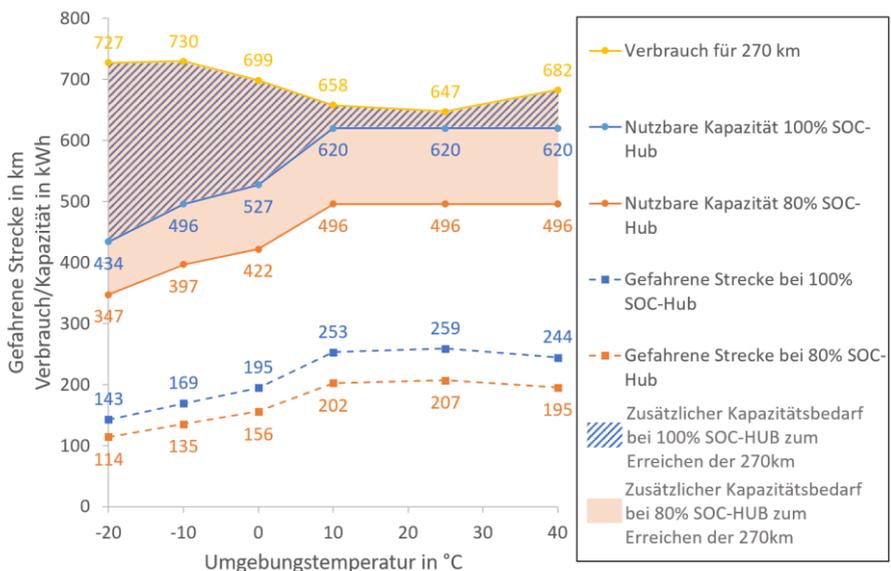


Abbildung 90: Fahrstrecke der batterieelektrischen Sattelzugmaschine in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und des SOC-Hubs bei 20t Zuladung

9.4.4 Zusammenfassung Fernverkehrsanwendung

In der Fernverkehrsanwendung haben die Strecke und das Fahrprofil den größten Einfluss auf die WtW-CO_{2,eq}-Bilanz einer Sattelzugmaschine. In den zwei betrachteten Strecken liegen die Zeitpunkte, an denen die fossile Diesel- und die batterieelektrische CO_{2,eq}-Bilanz gleich sind, zehn Jahre auseinander. Die Verwendung von importierte PtX ermöglicht es die CO_{2,eq}-Bilanz des dieselmotorischen Antriebsstrangs um bis zu 70 % gegenüber der fossilen Referenz zu

senken und die CO_{2,eq}-Bilanz des dieselmotorischen Antriebs 25 Jahre länger unter dem Niveau des batterieelektrischen Sattelzugs zu halten. Der Einfluss der Zuladung auf den Verbrauch und somit der CO_{2,eq}-Emissionen ist abhängig von Einsatzprofil: Je transienter, desto höher der Vorteil des elektrischen Antriebs gegenüber den verbrennungsmotorischen Antriebssträngen. Aufgrund des anteilig geringen Energiebedarfs zur Konditionierung der Fahrgastzelle beim Fernverkehrsfahrzeug, spielt die Umgebungstemperatur in der WtW-CO_{2,eq}-Bilanz eine untergeordnete Rolle. Beim hohen Energiebedarf dieser Nutzfahrzeuganwendung erreicht der batterieelektrische Antrieb seine Reichweitengrenzen. In diesem Zusammenhang ist dies eine Randbedingung, die bei Routenplanung des Fahrers mitberücksichtigt werden muss und erfordert hohe Investitionen seitens der Ladeinfrastruktur.

10 Einfluss der Fahrzeugherstellung auf die Lebenszyklusanalyse

Bezug nehmend auf Abbildung 1 dieser Arbeit fallen neben der Nutzung des Fahrzeugs auch bei der Herstellung und der Entsorgung $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen an. In diesem Abschnitt soll eine Abschätzung über den Anteil der Emissionen bei der Herstellung an den Lebenszyklusemissionen (*Life-Cycle-Analysis* – LCA) von Nutzfahrzeugen gegeben werden. Die Verwertung der Fahrzeuge spielt in den Untersuchungen der *Volkswagen AG* (15) und von *Kawamoto, Mochizuki et al.* (182) eine untergeordnete Rolle, sodass sie in dieser Bewertung nicht weiter betrachtet wird. Die Volkswagen AG vergleicht die Lebenszyklus $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von zwei vergleichbaren C-Segment Personenkraftwagen (Golf Diesel und e-Golf). Dabei ist auffällig, dass die Nutzung im aktuellen deutschen Energiesystem in der Lebenszyklusanalyse anteilig den größten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Ausstoß verursacht. Dies gilt unabhängig vom Antriebssystem und obwohl die Laufleistungen von Personenkraftwägen im Vergleich zu Nutzfahrzeugen um 80 % geringer sind. Die mittlere Laufleistung eines Fernverkehrsfahrzeug ist ein Million Kilometer, während 120 000 km im Personenkraftwagen-Segment üblich sind. Die Nutzung des Fahrzeugs trägt beim Diesel-Fahrzeug zu 79%, beim batterieelektrischen Fahrzeug ca. 52 % bis 60 % der kumulierten Treibhausgasemissionen bei (15). Wobei im vorliegenden Beispiel von der Volkswagen AG die Batterieproduktion für 43,25 % der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen in der Produktion verantwortlich ist (15).

Bei der Berechnung der Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus einer Sattelzugmaschine wird analog zum aufgeführten Personenkraftwagenbeispiel zwischen Produktion, Nutzung und Verwertung unterschieden. Bei der Produktion der Sattelzugmaschine werden für das Chassis 3 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kg Gewicht berechnet (183). Die Energiewandler Verbrennungsmotor und Elektromotor besitzen einen leistungsbezogenen Emissionsfaktor von 11,2 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kW und respektiv 6,4 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kW (182). Bei der Berechnung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen bei der Herstellung der Energiespeicher werden 82,5 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kWh für die Batterien und 255 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kg H_2 für die Wasserstoffspeicher angenommen (183). Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen im Betrieb, werden für jeden Antriebsstrang die wegspezifischen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen aus Abbildung 88 mit der erwarteten Laufleistung von einer Million Kilometer multipliziert. In diesem und im nächsten Abschnitt wird statt HVO100, HVO33 als biogener Vergleichskraftstoff verwendet. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der gesetzlich begrenzten Beimischung von HVO ist ein Anteil an fortschrittlichen Biokraftstoffen höher als 33 % nicht zu erwarten (157). HVO33 setzt sich somit aus fossilem Diesel in einem 2:1 Mischungsverhältnis mit HVO zusammen.

In Abbildung 91 sind die berechneten kumulierten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen aus den vorgestellten Randbedingungen dargestellt. Es sind die Verläufe für drei Diesel-Antriebsstränge mit fossilem Diesel, HVO33 und Fischer-Tropsch-Diesel aus Island nach *Xiaojin, Bauer* (151) abgebildet. Zum Vergleich sind die Verläufe einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine dargestellt, die mit unterschiedlichem Strommix betrieben wird. Mit dem deutschen Strommix 2017 sowie

dem mittleren aus den Stromerzeugungsszenarien erwartete Strommix der Jahre 2030 und 2050. Zudem sind auch die Verläufe der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Lebenszyklusemissionen des Brennstoffzellenantriebs und des Sattelzugs mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor in den drei Stromerzeugungsszenarien abgebildet.

Gemäß der aufgeführten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emission der einzelnen Fahrzeugkomponenten hat die Produktion der Sattelzugmaschine mit Dieselmotor einen $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Ausstoß von 26 t. Die Herstellung der 620 kWh Batterie emittiert bereits 51 t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ unter Berücksichtigung der aufgeführten 82,5 kg $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ /kWh. Demnach emittiert die Produktion einer batterieelektrischen Sattelzugmaschine insgesamt 76 t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$. Die Wasserstofftanks des Brennstoffzellen- und des Wasserstoffverbrennerfahrzeugs erhöhen die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der Fahrzeugproduktion, so dass die Herstellung der FCEV 54 t und der H_2 -VKM 47 t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ emittieren. Die höheren produktionsbedingten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der batterieelektrischen Sattelzugmaschine gegenüber dem Diesel-Referenz- und den anderen Vergleichsfahrzeugen gibt den letzteren einen Vorteil im Hinblick auf Treibhausgasemissionen, den das batterieelektrische Fahrzeug durch geringere Emissionen während der Nutzung kompensieren muss. Der auf die Laufleistung bezogene Zeitpunkt an dem die Lebenszyklus- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz von zwei Antriebs- und Energiesystemkombinationen sich angleichen zeigt sich demnach durch den Schnittpunkt der Kurven aus Abbildung 91.

Lebenszyklusemissionen einer Sattelzugmaschine nach Antrieb-
Energiesystemkombination

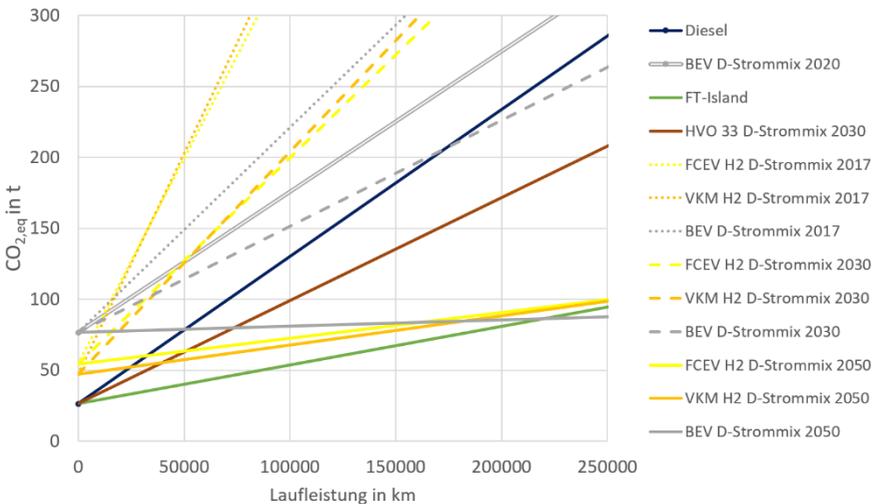


Abbildung 91: Lebenszyklus $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen einer Sattelzugmaschine mit unterschiedlichen Antriebs- und Energiesystemkombinationen

In diesem Zusammenhang ist eine batterieelektrische Sattelzugmaschine mit dem deutschen Strommix von 2017 nach weniger als 20 000 km in der Lebenszyklus $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besser als die mit Wasserstoff aus dem deutschen Strommix 2017 betriebenen Fahrzeuge (FCEV und H_2 -VKM). Es bleibt jedoch immer über der Kurve des fossilen Diesels. Unter der Verwendung des deutschen Strommix 2030 unterschreitet die batterieelektrische Sattelzugmaschine nach ca. 35 000 km das LCA- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsniveau der Wasserstofffahrzeuge und nach 170 000 km das $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsniveau des fossilen Diesel-Referenzfahrzeugs. Der Betrieb der batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit dem deutschen Strommix 2050 ermöglicht eine bessere LCA- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz als das fossile Diesel-Referenzfahrzeug nach 50.000 km und als das Dieselfahrzeug mit HVO33 nach ca. 70 000 km. PtX aus deutschem Strommix 2050 sind bis einer Laufleistung von über 175 000 km in der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besser als die batterieelektrische Sattelzugmaschine. Durch die bessere LCA- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz von importierten PtX (zum Beispiel Fischer-Tropsch aus Island), besitzt das batterieelektrische Fahrzeug erst nach 200 000 km eine besser $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz in der Lebenszyklusbetrachtung.

Die kumulierten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von der Herstellung des Fahrzeugs bis zum Ende der Nutzung nach 1 000 000 km sind in Abbildung 92 dargestellt.

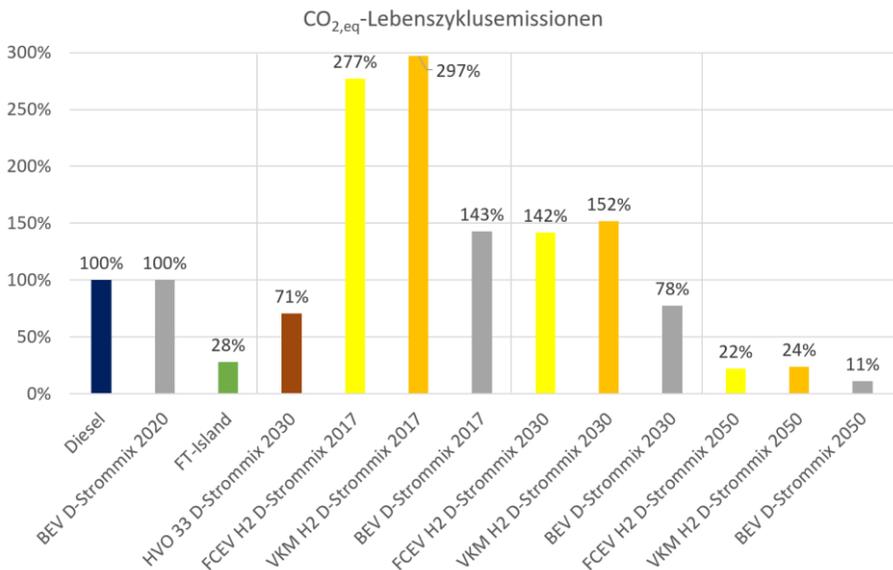


Abbildung 92: Lebenszyklusemissionen einer Sattelzugmaschine mit verschiedenen Antriebs- und Energiesystemkombinationen bezogen auf die fossile Dieselreferenz

Die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von fossilem Diesel und BEV mit deutschem Strommix 2020 sind mit ca. 1100 t über den Lebenszyklus von einer Million Kilometer vergleichbar. Ausgehend von dieser Referenz ist zu erkennen, dass erst ab 2020 der Strommix eine bessere $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz des batterieelektrischen Fahrzeugs gegenüber der fossilen Diesel-Referenz ermöglicht. 2017 liegt die batterieelektrische Sattelzugmaschine in der LCA-Bilanz noch 43 % über der fossilen Dieselreferenz. Wird der regenerative Anteil im Dieselmotorkraftstoff durch Substitution mit HVO oder FT-Diesel mit niedrigem Emissionsfaktor erhöht, ist erst mit der Verwendung vom Strommix von 2050 eine bessere Bilanz über den Lebenszyklus möglich. Eine $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsreduktion um ca. 30 % ist mit der Substitution von 33 % fossilem Diesel durch HVO möglich. Die Verwendung von Fischer-Tropsch-Diesel, hergestellt aus Strom mit geringem $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsfaktor, ermöglicht eine Senkung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen in der Nutzungsphase um bis zu 72 %.

Die gelben und orangenen Balken aus Abbildung 92 zeigen die kumulierten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von einer Brennstoffzellen- und einer Wasserstoffverbrenner-Sattelzugmaschine unter der Verwendung von Wasserstoff hergestellt mit dem deutschen Strommix von 2017, 2030 und 2050 auf. Dabei wird deutlich, dass der höhere Energiebedarf der Wasserstoff-Herstellung und der Fahrzeugherstellung im Vergleich zur direkten Nutzung von Strom im batterieelektrischen Fahrzeug unter allen „Deutschland“-Szenarien eine höhere $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz verursachen.

In Abbildung 93 sind die jeweiligen Anteile von der Fahrzeugherstellung und der Nutzung über eine Million Kilometer an den kumulierten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Lebenszyklusemissionen dargestellt.

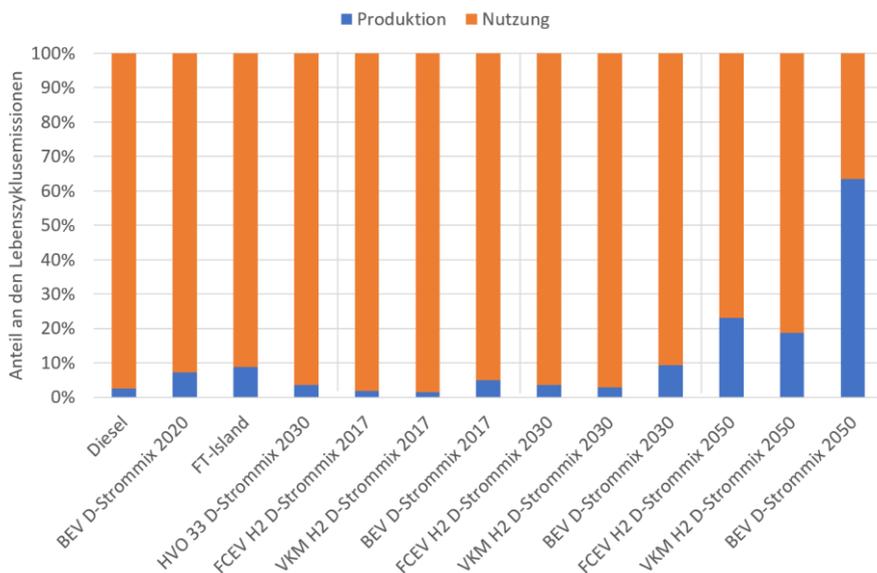


Abbildung 93: Anteile der Produktion und der Nutzung an den kumulierten Lebenszyklusemissionen

Bis zum Jahr 2030, hat die Fahrzeugherstellung einen Anteil von unter 10 % an den Lebenszyklusemissionen. Bei der fossilen Dieselreferenz sind es 2 %, bei der batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit deutschen Strommix 2030 9 % der gesamten $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Lebenszyklusemissionen. Ab dem Jahr 2050 steigt der Anteil drastisch an, so dass die Nutzung der batterieelektrischen Sattelzugmaschine mit 23 t $\text{CO}_{2,\text{eq}}$, nur noch ein Drittel der kumulierten Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen verursacht. Demnach fallen 2050 64 % der Lebenszyklusemissionen auf die Fahrzeugherstellung zurück.

Der exemplarisch aufgeführte Vergleich untermauert erneut die Feststellung, dass der Wirkungsgrad eines Antriebssystems und dessen Klimawirksamkeit in keinem Zusammenhang stehen. Vielmehr legt das Energiesystem, in dem der verwendete Energieträger erzeugt wird, die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Intensität eines Antriebssystems fest. Zudem wird deutlich, dass sogenannte PtX einen realen Beitrag in Richtung klimaneutralen Nutzfahrzeugverkehr leisten können. Im Kontext der Defossilisierung der Bestandsflotte werden sie besonders interessant und unabdingbar. In der „Kraftstoffstudie IV“ der FVV e.V. (26) wird der Bestandsflotte ein Anteil von 66 % bis 74 % der kumulierten Treibhausgasemissionen bis 2050 zugeschrieben (26, S. 163). Somit können alleine sogenannte „Drop-in“-Kraftstoffe den $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Beitrag des Fahrzeugbestands senken.

11 Zusammenfassung

Die Vielfalt an Varianten und Anwendungen im Nutzfahrzeugsektor macht eine allgemeingültige Aussage zum Klimaeinfluss unterschiedlicher Antriebstränge unmöglich. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik dient als Werkzeug für eine individuelle Analyse der Treibhausgasbilanz für jede Nutzfahrzeuanwendung. Die Referenz auf reale Strecken- und Fahrzeugdaten ermöglicht eine realitätsgetreue Abbildung der Energieflüsse in der Simulationsumgebung. Des Weiteren lässt die Implementierung einer antriebsneutralen Geschwindigkeitsvorgabe einen energetischen Vergleich des Referenz-Antriebsstrangs mit Alternativen, bei voller Nutzung der jeweiligen Potenziale, zu.

Die Energieträgerverbräuche der Antriebstränge aus der Simulationsumgebung und die Well-to-Wheel $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen der Energieträger stellen die Emissionsfaktoren der betrachteten Antrieb- und Energiesystemkombinationen in den unterschiedlichen Nutzfahrzeuanwendungen dar. In allen untersuchten Beispielen findet, je nach verwendeter Antriebs- und Energiesystemkombination, ein mittlerer Zeitpunkt der Unterschreitung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen des fossilen dieselmotorischen Antriebstrangs zwischen 2026 und 2042 statt (siehe Tabelle 28). Der Zeitpunkt wird durch den Verbrauch des Antriebssystems in der jeweiligen Anwendung und durch den Emissionsfaktor des verwendeten Energieträgers nach Formel 9-2 bestimmt. Während der Emissionsfaktor eines Energieträgers für alle Anwendungen gleich ist, verändert sich der spezifische Verbrauch je nach Einsatzprofil. Im Vergleich von fossilen Energieträgern wie Diesel und Erdgas kann es somit Anwendungen geben, in denen der bessere Wirkungsgrad des dieselmotorischen Antriebstrangs den $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsvorteil von 22 % durch den Emissionsfaktor von Erdgas gegenüber Diesel kompensiert. Im Mittel über alle Umgebungstemperaturen und Anwendungen ist dabei der Erdgasantrieb in 53,7 % der Fälle in der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz besser als der fossile dieselmotorische Antrieb. Am Beispiel fossiler Diesel/fossiles Erdgas wird klar deutlich, dass der Wirkungsgrad eines Antriebssystems keinerlei Zusammenhang mit dessen Klimawirksamkeit hat.

Bei allen betrachteten Energieträgern aus Tabelle 28 wird vorausgesetzt, dass die Herstellung zu 100 % aus dem deutschen Strommix erfolgt. Es wird der Verlauf der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen aus einem Energiewandler und Energieträger-Paar mit den zeitlichen Verläufen der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen von fossilem Diesel, HVO33 und regenerativ hergestelltem Fischer-Tropsch-Diesel aus Island verglichen. In der Tabelle sind die Zeitpunkte (Jahr) angegeben, an denen das betrachtete Paar aus Energiewandler und Energieträger den Vergleichswert (Diesel/HVO33/FT-Island) unterschreitet aufgeführt. Die Jahresangaben entsprechen dem Mittelwert aller betrachteten Anwendungen unter allen klimatischen Bedingungen und Zuladungen. Demnach stellen die Werte aus Tabelle 28 eine Zusammenfassung aller betrachteter Szenarien und Variationen dieser Arbeit dar. Als Referenz dienen drei dieselmotorische Antriebe mit molekular annähernd gleichem Energieträger, allerdings mit

unterschiedlichen Emissionsfaktoren von fossilem Diesel, HVO33 und Fischer-Tropsch-Diesel aus Island (FT-Island).

Tabelle 28: Zusammenfassung der Unterschreitungszeitpunkte unterschiedlicher Antriebs- und Energiesystemkombinationen im Vergleich zu dieselmotorischen Referenzen

		Jahr der Unterschreitung der WtW-Emissionen		
		Diesel 331 g/kWh	HVO33 234 g/kWh	FT-Island 96 g/kWh
Energiewandler	Energieträger (D-mix)			
Diesel-VKM	Fischer-Tropsch	2040	2045	2051
Gas-VKM	SCNG	2042	2046	2051
H ₂ -VKM	Wasserstoff	2040	2046	2050
H ₂ -FCEV	Wasserstoff	2034	2040	2048
BEV	Strom	2026	2035	2046

Bei der Simulation der batterieelektrischen Antriebe wurde ein Batterie-SOC-Hub von 100 % angenommen. In realen Anwendungen liegt dieser bei 75 % bis 80 %, sodass die verfügbare Energie um 20 % bis 25 % gegenüber der angegebenen Batteriekapazität reduziert ist. Trotz der idealisierten Annahme der vollen Verfügbarkeit der Batteriekapazität, schränkt die Energiedichte die Reichweite mancher Anwendungen ein, sodass ein Zwischenstopp zum Laden notwendig wird. Zum Beispiel bewältigt das batterieelektrische Abfallsammelfahrzeug und die batterieelektrische Sattelzugmaschine unter keinen Umgebungsbedingungen die jeweiligen real aufgenommenen Routen ohne zusätzlichem Ladevorgang.

11.1 Vergleich der Antriebs- und Energiesystemkombinationen mit fossilem Diesel

An Jahren der Unterschreitung der WtW-Emissionen von fossilem Diesel von Wasserstoff, Fischer-Tropsch-Diesel und komprimiertem synthetischem Methan aus Deutschland in den Jahren 2040, 2040 und 2042 ist vor allem der energetische Herstellungsaufwand zu erkennen. Zum hergestellten Wasserstoff wird über Direct-Air-Capture-Anlagen das notwendige CO₂ gewonnen und in weiteren Prozessschritten zu PtX verarbeitet (u.a. FT-Island). Im direkten Vergleich führt der höhere Wirkungsgrad des Dieselmotors mit Qualitätsregelung gegenüber dem quantitativ geregelten Gasmotor zu einer niedrigeren CO_{2,eq}-Bilanz von Fischer-Tropsch Diesel gegenüber synthetischem Methan.

Der zeitliche Vorteil des Brennstoffzellenantriebs von sechs Jahren gegenüber dem Wasserstoffverbrennungsmotor hingegen ist auf den besseren Tank-to-Wheel Wirkungsgrad (im Bestpunkt 54 % gegenüber 39 %) zurückzuführen.

Der batterieelektrische Antrieb hat im Mittel über alle Anwendungen und Umgebungsbedingungen ab 2026 eine bessere $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz als das vergleichbare Diesel-Referenzfahrzeug.

11.2 Vergleich der Antriebs- und Energiesystemkombinationen mit HVO33

Die Herstellung von HVO33 durch Substitution von 33 % des fossilen Diesels durch biogenes HVO reduziert den Referenz-Emissionsfaktor um ca. 30 %, ob bei die Kraftstoffe chemisch nahezu identisch sind. Beim Vergleich der simulierten Energiewandler-Energiesystemkombinationen mit HVO33 verspäten sich alle Umkehr-Zeitpunkte auf der Zeitachse um vier bis sechs Jahre. Die $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen unterschreitet erst 2035 das $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsniveau eines konventionellen Diesel-Antriebsstranges, betrieben mit HVO33. Die Brennstoffzelle, betrieben mit Wasserstoff aus deutschem Strommix, unterschreitet das Niveau erst 2040, die PtX erst in der zweiten Hälfte der vierziger Jahre.

11.3 Vergleich der Antriebs- und Energiesystemkombinationen mit Fischer-Tropsch-Diesel aus Island (FT-Island)

Basierend auf den Ergebnissen der Studie von Xiaojin & Bauer „*Synthetic Natural Gas produced with carbon dioxide from geothermal energy generation in Iceland and used in Switzerland*„ (151) wird der Emissionsfaktor eines Fischer-Tropsch-Diesel mit den gleichen Produktions- und Logistikkette berechnet. Im Jahr 2030 besitzt FT-Island einen um 71 % geringeren als fossiler Diesel und 60 % niedrigeren als HVO33 WtW-Emissionsfaktor. Demnach finden die zuvor beschriebenen Zeitpunkte der Unterschreitung der Emissionen später statt, sodass der batterieelektrische Lastkraftwagen im Mittel über alle Anwendungen erst 2046 das $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionsniveau des dieselmotorischen Antriebsstrangs betrieben mit Fischer-Tropsch-Diesel aus Island erreicht.

11.4 Wichtigste Erkenntnisse aus den Untersuchungen dieser Arbeit

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit zum $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Ausstoß verschiedener Antriebs- und Energiesystemkombinationen in unterschiedlichen Nutzfahrzeuganwendungen wird deutlich, dass vielmehr das Energiesystem, indem der Energieträger erzeugt wird die WtW- $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Bilanz einer Antriebs- und Energiesystemkombination beeinflusst als der verwendete Energiewandler.

Dennoch zeigen batterieelektrische Antriebe ihr Potential zur Senkung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen, besonders wenn die Systemgrenzen lediglich innerdeutsche Energieflüsse berücksichtigen.

Biogene Energieträger der zweiten Generation können einen wichtigen, wenn auch begrenzten, Beitrag zur Senkung der CO_{2,eq}-Emissionen des Verkehrssektors leisten. Jedoch können sie im Jahr 2023 durch die begrenzte Verfügbarkeit nur eine begrenzte Reduktion in Richtung Klimaneutralität darstellen. Im Jahr 2021 beträgt die weltweite HVO-Produktion ca. 7.5 bis 8 Mio. Tonnen, davon ca. 3 Mio. Tonnen in Europa (184, 154) während allein in Deutschland 2021 ca. 33 Mio. Tonnen Diesel verbraucht wurden (153).

Über den Standort Deutschland hinaus können innerhalb Europas Energiequellen mit niedriger CO_{2,eq}-Intensität genutzt werden, um Wasserstoff und PtX heute schon mit sehr niedrigem Well-to-Wheel Emissionsfaktor zu produzieren (auf deutschem Strommix-Niveau von Jahr 2050). Die Verwendung solcher erneuerbaren Energieträger scheint ein wichtiger Schlüssel in Richtung klimaneutralen Deutschlands zu sein und ist die einzige Möglichkeit, die Bestandsflotte CO_{2,eq}-neutral zu gestalten.

Die Varianz der Ergebnisse der unterschiedlichen Fahrscenarien zeigt, wie wichtig eine anwendungsspezifische Untersuchung ist. In diesem Zusammenhang kann, besonders im Nutzfahrzeugsektor, keine allgemeingültige Antwort auf die Frage „*welcher Antriebsstrang die klimaoptimale Lösung bietet?*“ gefunden werden. In diesem Kontext bieten sich zur Bewertung der CO_{2,eq}-Bilanz verschiedener Antriebsstränge methodologische Ansätze an, die Energiesystem und Antriebsstrang ganzheitlich betrachten.

12 Ausblick

Das von der Europäischen Kommission gesetzte Ziel, Europa bis 2050 klimaneutral zu gestalten, ist nur mit einem Wandel des Energiesystems möglich: Die fossilen Energieträger müssen durch regenerative Quellen ersetzt werden. In diesem Zusammenhang gilt es in Deutschland, den jährlichen Energiebedarf von etwa 3200 TWh rein regenerativ zu decken. Selbst unter der Annahme einer Reduktion des allgemeinen Verbrauchs um 25 % und der Verbesserung aller Prozess-Wirkungsgrade klafft eine Lücke von ca. 1800 TWh zwischen dem heute verfügbaren erneuerbaren Strom (ca. 500 TWh) und dem vorausgesagten Primärenergiebedarf von 2300 TWh in 2040. In Deutschland kann die Steigerung der erneuerbaren Stromquellen allein diese Lücke nicht schließen: Die Flächen für Solar- und Windenergie reichen bei vorhandenem Erntefaktor von erneuerbarem Stromquellen nicht aus (137, 13). Europaweit ist die Situation ähnlich: Um den Energiebedarf des europäischen Transportsektors regenerativ decken zu können, müsste bis zu zwei Mal die Landfläche Belgiens zur Verfügung stehen (26). Auch unter der Annahme, dass die installierte erneuerbare Leistung den mittleren Jahresenergiebedarf decken könnte, stellt die Volatilität von Wind und Sonne eine weitere Herausforderung für die Neugestaltung des Energiesystems dar: Zur Abdeckung des erhöhten Energiebedarfs im Winter oder einer zweiwöchigen „Dunkelflaute“, müssen für Deutschland ~30 TWh Energie über drei bis vier Monate gespeichert werden (14, 137). Dies ist allerdings in elektrischer Form nicht machbar: Unter der Annahme, dass 40. Mio. Elektrofahrzeuge mittels bidirektionalem Laden im Mittel 12 kWh ihrer Batteriekapazität zur Verfügung stellen würden, stünden gerade mal 0,48TWh Speicher zur Verfügung (185). **In diesem Kontext sind erneuerbare chemische Energieträger als Langzeitspeicher im zukünftigen Energiesystem alternativlos.**

In diesem Zusammenhang scheint die Verwendung der vorhandenen Logistikketten und Infrastruktur für flüssige und gasförmige Energieträger ein sinnvoller Schritt zu sein. Zum einen sind die Prozesse etabliert und bewährt, zum anderen gilt es, vorhandene Infrastruktur effizient zu nutzen, um die notwendigen Investitionen zur Umgestaltung des Energiesystems in allen Sektoren tätigen zu können. Besonders im Zusammenhang mit den Ergebnissen dieser Arbeit, scheint die Nutzung jeder Alternative zu fossilen Energieträgern der einzige Weg zu sein, die Klimaziele der Europäischen Kommission und der Bundesregierung Deutschland zu erreichen. In den untersuchten Nutzfahrzeugenanwendungsszenarien erreichen alle Antriebssysteme niedrige äquivalente CO₂-Emissionen unter Voraussetzung eines klimaneutralen Energieträgerherstellungspfads. Das Beispiel von synthetischem Gas aus Island zeigt, wie bereits heute ein nahezu CO_{2,eq}-neutraler Kraftstoff hergestellt und verteilt werden kann und dabei einen Beitrag in Richtung klimaneutraler Mobilität leisten kann. Die Adressierung der Bestandsflotte spielt in diesem Zusammenhang eine große Rolle und darf nicht außer Acht gelassen werden. Da die Bestandsflotte bis 2050 mindestens zwei Drittel der

kumulierten Treibhausgasemissionen verursacht, ist die Versorgung mit CO_{2,eq}-armen Energieträgern essentiell zur Erreichung der CO_{2,eq}-Emissionsziele. (26).

Diese Arbeit hat außerdem gezeigt, dass besonders in stark transienten Anwendungen, zum Beispiel im Abfallsammelbetrieb oder in der Stadtbusanwendung, der Wirkungsgradvorteil des batterieelektrischen Antriebs gegenüber dem Verbrennungsmotor zu einem sehr frühen Umkehr-Zeitpunkt zwischen BEVs und fossilem Diesel-Nutzfahrzeug führt. Für städtische Nutzfahrzeuganwendungen mit Stop-and-Go-Verkehr stellt der batterieelektrische Antrieb aufgrund des dreifach niedrigeren Energieverbrauchs gegenüber dem Verbrennungsmotor und der lokalen Schadstofffreiheit das Mittel der Wahl dar. Im Regional- und im Fernverkehr ergibt sich durch den täglichen Energiebedarf eine weitere Randbedingung für die Wahl des klimaoptimalen Antriebsstrangs. Dabei muss die Energie zum einen im Fahrzeug, aber auch in Form von Infrastruktur und lokaler Kapazität entlang der Strecke zur Verfügung stehen. In diesem Kontext ist vermutlich weniger die geringere Reichweite von elektrischen Sattelzugmaschinen gegenüber dem Flüssig-Kraftstoff-Pendant als vielmehr die Möglichkeit schnell nachzuladen die größte Herausforderung für den batterieelektrischen Antrieb.

Besonders im Nutzfahrzeugsegment spielen die Betriebskosten eine große Rolle. So ist es sinnvoll, die einzelnen technischen Lösungen auch im Hinblick auf deren TCO (*Total Cost of Ownership*) zu vergleichen. In diesem Zusammenhang spielen politische Entscheidungen durch die Vergabe von Subventionsgeldern eine wichtige Rolle. Dabei wäre eine technologieoffene Diskussion im Sinne des Klimas wünschenswert.

Als fester Bestandteil der Energiewende in Deutschland, Europa und schließlich weltweit kann der Verkehrssektor nicht separat betrachtet werden. Vielmehr stellen sich Energiesystem und Mobilität gegenseitige Randbedingungen und Anforderungen. Das Gesamtsystem darf somit nicht missachtet werden, wenn Entscheidungen für Teilsysteme getroffen werden. Die Klimawirksamkeit einer technischen Lösung muss ganzheitlich bewertet werden: vom Abbau der notwendigen Rohstoffe oder dem Aufbau der notwendigen Infrastruktur über die Nutzung bis zur Wiederverwertung. In diesem Kontext ist es unwahrscheinlich, dass eine Lösung alle Bedürfnisse decken wird. Allein für die Wahrung der politischen Unabhängigkeit und der Rohstoffverfügbarkeit ist eine diversifizierte Mobilität unabdingbar.

Literatur

1. IPCC. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. Synthesis Report, 2007.
2. ELL, R. und H. WESTRAM. *Der Klimawandel ist schon lange bekannt* [online]. *Die Geschichte der Klimaforschung*, 2022. 05.10.22 [Zugriff am: 14.12.22]. Verfügbar unter: <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/klimawandel-klimaforschung-geschichte-historisch-100.html>
3. EUROPEAN COMMISSION. *Paris Agreement*, 2016.
4. BJÖRN FINKE, B. und M. KOLB. EU verschärft Klimaziel [online]. Der Ausstoß von Treibhausgasen soll bis 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 55 Prozent sinken. Umweltschützer zeigen sich enttäuscht, die Wirtschaft warnt vor Überlastung. *Sueddeutsche Zeitung*, 21. April 2021. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/politik/umweltschutz-eu-verschaerft-klimaziel-1.5272059>
5. EUROPEAN COMMISSION. *RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Neufassung*, 21. Dezember 2018.
6. ADAC. *Kfz-Neuzulassungen 2022: Elektroautos legen deutlich zu* [online]. 6 Februar 2023, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/news/neuzulassungen-kba/>
7. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT und WWW.BMU.DE. *Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*, Ausgabe 2021.
8. HUMMEL, N., T. HEROLD und C. BEIDL. Well-to-Wheel CO₂-Analysis of different powertrain systems on representative Heavy-duty mission profiles. In: *ATZ LIVE*, Hg. *Stand der Energiewende im Heavy-Duty-Bereich. 17. Internationale MTZ-Fachtagung Großmotoren | Hybrid-Event*: Springer Professional, 16. November 2022 – 17. November 2022.
9. BUNDESTAG, D. *Antwort der Bundesregierung. auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Cem Özdemir, Stefan Gelbhaar, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/31247 –*. Berlin, 13. August 2021.
10. BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALES UND VERKEHR. *Verkehrsverflechtungsprognose 2030* [online], 2022 [Zugriff am: 29. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030.html>
11. IFEU - INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG GGMBH, PTV TRANSPORT CONSULT und FRAUNHOFER ARBEITSGRUPPE FÜR SUPPLY CHAIN SERVICES. *Potentialanalyse für Batterie-Lkw. Teilbericht im Rahmen des Vorhabens*

„Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“. Heidelberg, Juli 2021.

12. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (BMU), WWW.BMU.BUND.DE. Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen, April 2018.
13. HUMMEL, N. *Energiesysteme und Mobilität. Ein Impuls aus dem wissenschaftlichen Beirat dieses Kongresses*. Hanau, 9. November 2022.
14. HELMOLT, R. von und AVL LIST GMBH. *Future Mobility: Affordable and Simple?*, 2021.
15. VOLKSWAGEN AG. *Von der Wiege bis zur Bahre. Konsequenz von Anfang bis zum Ende denken: In der Ökobilanz eines Fahrzeugs erkennt man, wo Belastungen für die Umwelt entstehen. So hilft die Analyse, auf dem Weg zur CO₂-neutralen Mobilität schnell voranzukommen.*, 2022.
16. FRAUNHOFER ISI und TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG. Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw, 2019.
17. HELMS, H., H. FEHRENBACH, K. DR.-ING. BIEMANN, U. LAMBRECHT, J. JÜHRENS und K. MEYER. *Agora Verkehrswende. Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen*, 2019.
18. HELMS, H., C. KÄMPER, K.I. BIEMANN, U. LAMBRECHT, J. JÖHRENS und K. MEYER. *Agora Verkehrswende (2019). Klimabilanz von Elektroautos*. 2. Auflage. Heidelberg, April 2019.
19. FRAUNHOFER ISE. Greenhouse Gas Emissions for Battery Electric and Fuel Cell Electric Vehicles with Ranges over 300 Km [online]. Study commissioned by H2 Mobility, 2019. Verfügbar unter:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiuovjx--v6AhUS7aQKHZbYAdgQFnoECD8QQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.isi.fraunhofer.de%2Fcontent%2Fdam%2Fisi%2Fdokumente%2Ffce%2F2019%2Fklimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf&usg=AOvVaw0Wr_cbUuUiMAM43TV2oJox
20. EUROPEAN COMMISSION. *The European Commission's science and knowledge service. VECTO-Overview*.
21. EUROPEAN COMMISSION. *The European Commission's science and knowledge service. VECTO Air Drag*.
22. EUROPEAN COMMISSION. *The European Commission's science and knowledge service. VECTO Simulation Tool*.
23. EUROPEAN COMMISSION. *The European Commission's science and knowledge service. VECTO Engine*.

-
24. EUROPEAN COMMISSION. *The European Commission's science and knowledge service. VECTO Data Integrity Measures.*
 25. ÖKO-INSTITUT E.V. E-Fuels im Verkehrssektor. Kurzstudie über den Stand des Wissens und die mögliche Bedeutung von E-Fuels für den Klimaschutz im Verkehrssektor, 2020.
 26. FORSCHUNGSVEREINIGUNG VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINEN E.V. Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV [online]. Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter. FINAL REPORT 1269 | 2021 - Frankfurt am Main, 2021, **2021**. Verfügbar unter: www.fvv-net.de
 27. BIER, M., D. BUCH, M. KLUIN und BEIDL, UNIV.-PROF. DR. TECHN. CHRISTIAN BEIDL. Entwicklung und Optimierung von Hybridantrieben am X-in-the-Loop-Motorenprüfstand. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, 2012, **73**(03), 240-247.
 28. IPETRONIK GMBH & CO. KG. IPEmeasure Datenlogger.
 29. THE MATHWORKS, I. Matlab [Software]. Version R2021a, 2021.
 30. IPG AUTOMOTIVE GMBH. CarMaker Reference Manual.
 31. IPETRONIK GMBH & CO. KG. *PI_FLEETlog2*.
 32. UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Standard - 5th Edition, April 2020, 2020.
 33. Openroute Service [Software] [Zugriff am: 2. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://maps.openrouteservice.org/>
 34. MAN BUS & TRUCK AG und KIRSCHBAUM VERLAG GMBH. *Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik. LKW und Bus - Lehrbuch der MAN Academy*. 4. vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. München: MAN Truck & Bus AG; Kirschbaum, 2016. ISBN 978-3-7812-1959-5.
 35. BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE. Digitales Geländemodell Gitterweite 5 m [online]. DGM5, 2015. Verfügbar unter: www.bkg.bund.de
 36. STADT FRANKFURT AM MAIN. *Digitales Geländemodell (DGM)*. Frankfurt, 2020.
 37. REUß, S.M. *Erstellung unterschiedlicher Nutzfahrzeug- spezifischer Fahrprofile zum Vergleich verschiedener Antriebskonzepte in IPG-Truckmaker. Creation of Heavy-duty typical driving profiles in order to compare different powertrain configurations in IPG-Truckmaker*. Bachelor Arbeit. Darmstadt, 2022.
 38. SCHIEFER, H. und F. SCHIEFER. *Statistik für Ingenieure. Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. SpringerLink Bücher. ISBN 978-3-658-20640-6.
 39. KÜÇÜKAY, F. *Grundlagen der Fahrzeugtechnik. Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, 2022. Springer eBook Collection. ISBN 9783658367275.

-
40. HOEPKE, E., S. BREUER, W. APPEL, H. BRÄHLER, U. DAHLHAUS, T. ESCH, S. KOPP und B. RHEIN. *Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten*. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008. SpringerLink Bücher. ISBN 978-3-8348-0374-0.
 41. HUCHO, W.-H., Hg. *Aerodynamik des Automobils. Eine Brücke von der Strömungsmechanik zur Fahrzeugtechnik*. 3., grundlegend neu bearb. und erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1994. ISBN 318400970X.
 42. MITSCHKE, M. *Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band A: Antrieb und Bremsung*. 3. Auflage. Berlin: Springer, 1995. ISBN 978-3-642-77913-8.
 43. DAF. *Lkw-Reifendruck* [online] [Zugriff am: 30. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.daf.at/de-at/knowledge-base/maintenance-and-inspection/truck-tyre-pressure>
 44. OMNIBUS-NEWS. *VDL verbessert den cW-Wert*, 21. September 2022.
 45. TRUCKER. Daimler-Aerodynamics in Papenburg [online], 29. November 2012. Verfügbar unter: <https://www.trucker.de/test-technik/daimler-aerodynamics-in-papenburg-2429379>
 46. IVECO. new Stralis Hi-Way.
 47. MERCEDES-BENZ. Die Citaro Stadtbusse. [online], 2021. Verfügbar unter: www.mercedes-benz.de/omnibus
 48. MERCEDES BENZ. *Atego BlueTec Hybrid: Hybrid-Lkw beweisen im Praxiseinsatz Alltagstauglichkeit und CO₂-/Kraftstoffeinsparpotenzial*, 30. Juni 2010.
 49. VERKEHRSRUNDSCHAU. *MAN testet Hybrid-LKW im Alltag*, 8. August 2011.
 50. MERCEDES BENZ. *Der Econic* [online]. *Technische Daten*, 2022 [Zugriff am: 29. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://special.mercedes-benz-trucks.com/de/der-econic/technische-daten.html>
 51. E-MOBILBW. Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte. *e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue*, 2021.
 52. MERCEDES-BENZ. *Atego* [online], 2022 [Zugriff am: 15. Januar 2023]. Verfügbar unter: https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/models/atego-distribution.html
 53. FAUN UMWELTECHNIK GMBH & CO. KG. *VARIOPRESS*. Osterholz-Scharmbeck.
 54. WOLFF, S., S. KALT, M. BSTIELER und M. LIENKAMP. Influence of Powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks—A Simulative Case-Study [online]. *Energies*, 2021, **14**(2), 328. Verfügbar unter: doi:10.3390/en14020328
 55. AVL LIST GMBH. *AVL Hydrogen Engine*, 2022.

-
56. MOLLENHAUER, K. und H. TSCHÖKE. *Handbuch Dieselmotoren*. 3., neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-72164-2.
 57. BOSCH. *Bosch und Weichai Power steigern Wirkungsgrad von Weichai Lkw-Dieselmotor auf 50 Prozent*. Stuttgart, 16. September 2020.
 58. VAN BASSHUYSEN, R. und F. SCHÄFER. *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. 7., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-04678-1.
 59. MERKER, G.P. und R. TEICHMANN. *Grundlagen Verbrennungsmotoren. Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*. 7., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ATZ / MTZ-Fachbuch. ISBN 9783658031947.
 60. DIESELNET. *Heavy-Duty Diesel Engines with Aftertreatment* [online]. August 2022 [Zugriff am: 30. Januar 2023]. Verfügbar unter: https://dieselnet.com/tech/engine_heavy-duty_aftertreatment.php#at
 61. TRANSPORT OPERATOR. *Cummins AdBlue dual-dosing system now on offer to OEMs*, 25. März 2021.
 62. CHRISTIAN VON PYSCHOW. *Potentialanalyse eines neuartigen NFZ-Abgasnachbehandlungssystems zur Einhaltung zukünftig strengerer Abgasvorschriften*. Dissertation. Darmstadt, 2017.
 63. VAN BASSHUYSEN, R. *Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-07158-5.
 64. EUROPEAN COMMISSION (EC), JOINT RESEARCH CENTRE. *JEC Tank-To-Wheels report v5: Heavy duty vehicles. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*.
 65. TLK ENERGY. *Heizlast-berechnung einer Fahrzeugkabine. Elektroauto: Heizleistung und Reichweitenverlust im Winter*, 8. Juli 2020.
 66. STEPHAN, P., S. KABELAC, M. KIND, D. MEWES, K. SCHABER und T. WETZEL, Hg. *VDI-Wärmeatlas. Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. 12. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. VDI Springer Reference. ISBN 9783662529898.
 67. GROßMANN, H. *Pkw-Klimatisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-39840-7.
 68. ECHTSOLAR. *Globalstrahlung – Werte, Tabelle & Erklärung* [online]. *Globalstrahlung in Deutschland*. 26 Juni 2022 [Zugriff am: 14. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://echtsolar.de/globalstrahlung/>
 69. VIZAAR INDUSTRIAL IMAGING AG. *Emissionsgrad-Tabelle* [online] [Zugriff am: 25. Dezember 2022]. Verfügbar unter: <https://vizaar-xtra.de/emissionsgrad-tabelle/>

-
70. INFRAS – FORSCHUNG UND BERATUNG: ÖKO-INSTITUT E.V. *Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV.*
 71. DVGW. *DVGW-Busstudie. Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personenkraftverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten.* Karlsruhe, 26. August 2019.
 72. MILLO, F., L. ROLANDO, A. PIANO, B. PARADISI und A. VINOGRADOV. Hydrogen Powertrains: A Comparison Between Different Solutions for an Urban Bus. In: M. BARGENDE, H.-C. REUSS und A. WAGNER, Hg. 22. *Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, 2022, S. 259-271. ISBN 978-3-658-37008-4.
 73. NOONE, P., N. HUMMEL und KUZNIK, ALEXANDER, PROF. BEIDL, CHRISTIAN. Holistic Approach for the Design and Dimensioning of a Hybridized Heavy-Duty Truck. In: M. BARGENDE, H.-C. REUSS und A. WAGNER, Hg. 21. *Internationales Stuttgarter Symposium.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 504-517.
 74. VERKSRUNDSCHAU. *MAN testet Hybrid-LKW im Alltag* [online], 8. August 2011 [Zugriff am: 14. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/transport-logistik/man-testet-hybrid-lkw-im-alltag-3009656>
 75. *evTrailer Autarkes elektrisches Antriebskooperationssystem für LKW-Trailer und Fahrzeuganhänger* [online], 2019 [Zugriff am: 1. Februar 2019]. Verfügbar unter: <http://evtrailer.de/>
 76. MIKULA THIEM. Impacts of powertrain hybridization on engine exhaust behaviour of heavy duty vehicles with electrified trailers. In: 6. *Internationaler Motorenkongress Baden-Baden.*
 77. MIKULA THIEM und NICOLAS HUMMEL, PROF. DR. TECHN. CHRISTIAN BEIDL. Betriebsbedingungen für Systeme zur Abgasnachbehandlung im hybridisierten Nutzfahrzeug. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift > Ausgabe 7-8/2019*: Springer, 2019, S. 94-101.
 78. INITIATIVE ERDGASMOBILITÄT. *Nachhaltige Mobilität mit Erdgas und Biomethan. Marktentwicklung 2015/2016. Vierter Fortschrittsbericht.* Berlin, August 2016.
 79. SCHWADERLAPP, M. *Solutions for CO2-free Powertrains for Mobile Machinery*, 10. März 2022.
 80. FIGER, G., F. SEITZ, G. GRAF und H. SCHREIER. Nutzfahrzeug - Gasmotoren mit Dieseleffizienz. *MTZ-Motortechnische Zeitschrift*, 2014, **75**(10), 24-30.
 81. PREHN, S. *Untersuchung von Brennverfahren für Erdgas und Biomethan am Beispiel von Industriemotoren für den landwirtschaftlichen Einsatz.* Dissertation. Rostock, 27. November 2018.
 82. VOLVO TRUCKS. *VOLVO FH. TECHNISCHE DATEN*, 2022.

-
83. IVECO. *NATURAL POWER GEBEN SIE GAS MIT IVECO*.
 84. IVECO. *S-Way. AS440S46T/FP 2LNG*, 06/2022.
 85. EWERT, S., H. WIETHOFF, M. WAGNER, U. HELLER und J. SCHMIDT. Future electric filling station – 20x 750kW power with intelligent load and tariff management. In: ATZ LIVE, Hg. *Antriebe und Energiesysteme von morgen 2022. Zukunft technologieoffen gestalten*: Springer Professional, 2022.
 86. CUNANAN, C., M.-K. TRAN, Y. LEE, S. KWOK, V. LEUNG und M. FOWLER. A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles [online]. *Clean Technologies*, 2021, 3(2), 474-489. Verfügbar unter: doi:10.3390/cleantechnol3020028
 87. HUANG, W.-D. und Y.-H.P. ZHANG. Energy efficiency analysis: biomass-to-wheel efficiency related with biofuels production, fuel distribution, and powertrain systems [online]. *PLoS one*, 2011, 6(7), e22113. Verfügbar unter: doi:10.1371/journal.pone.0022113
 88. DOPPELBAUER, M. *Grundlagen der Elektromobilität. Technik, Praxis, Energie und Umwelt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, 2020. Springer eBook Collection. ISBN 978-3-658-29730-5.
 89. VERBRUGGEN, F.J.R., V. RANGARAJAN und T. HOFMAN. Powertrain design optimization for a battery electric heavy-duty truck. In: *IEEE (Hg.) 2019 – In Proceedings of the 2019 American Control Conference (ACC)*, S. 1488-1493.
 90. KURZWEIL, P. und O.K. DIETLMEIER. *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. SpringerLink Bücher. ISBN 9783658218294.
 91. DEUTSCHER BUNDESTAG. *Energiespeicher der Elektromobilität. Entwicklung der Energiedichten*. Sachstand. Berlin, 17. Dezember 2020.
 92. SCANIA. *Elektro-Lkw* [online], 2022 [Zugriff am: 12. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.scania.com/de/de/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>
 93. ENERGIE LÖSUNG. *Ladeverlust beim Elektroauto – wirklich ein Thema?* [online]. *Hintergründe, Fakten, Prävention.*, 2022. 15 Dezember 2022 [Zugriff am: 12. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.energieloesung.de/magazin/ladeverlust-beim-elektroauto-wirklich-ein-thema-hintergrunde-fakten-praevention/>
 94. LG CHEM. PRODUCT SPECIFICATION. Rechargeable Lithium Ion Battery Model : INR21700 M50 18.2Wh, 22. September 2017.
 95. E-MOBIL BW GMBH. Wertschöpfungspotenziale von E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg.

-
96. EPSKAMP, T. *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine*: Karlsruhe, 2020.
 97. FUCHS, J. *Optimal Energy Management for Hybrid Electric Vehicles*. Dissertation. Graz, 2016.
 98. MOHRDIECK, C. Fuel Cells in Heavy-Duty Transportation: New Technology – Familiar Business Processes. Brennstoffzellen für den Schwerlast-Fernverkehr: Neue Technologie – vertraute Geschäftsprozesse. In: B. GERINGER und H.P. LENZ, Hg. *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium. 27-29 April 2022 : in three volumes*. Vienna, Austria: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK)/Austrian Society of Automotive Engineers, 2022. ISBN 3950496912.
 99. AFSHAR, S. und F. FRANK. Batterie versus Brennstoffzelle – Antriebstechnik im Vergleich. *ATZ*, 2020, (6), 32-37.
 100. KURZWEIL, P. *Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 2., überarb. u. akt. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. SpringerLink Bücher. ISBN 978-3-658-00085-1.
 101. KAST, J., G. MORRISON, J.J. GANGLOFF, R. VIJAYAGOPAL und J. MARCINKOSKI. Designing hydrogen fuel cell electric trucks in a diverse medium and heavy duty market [online]. *Research in Transportation Economics*, 2018, **70**(2), 139-147. ISSN 07398859. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.retrec.2017.07.006
 102. KLELL, M., H. EICHLSEDER und A. TRATTNER. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. *ATZ/MTZ-Fachbuch*. ISBN 978-3-658-20447-1.
 103. KLELL, M. *Thermodynamik des Wasserstoffs*. Habilitationsschrift. Graz, 2010.
 104. SAG. *COMPATIBILITY OF CRYOGENIC LIQUID HYDROGEN STORAGE, FUEL CELLS AND HYDROGEN INTERNAL COMBUSTION ENGINES. KOMPATIBILITÄT VON KRYOGENEN FLÜSSIGWASSERSTOFFSPEICHERN MIT BRENNSTOFFZELLEN UND WASSERSTOFFVERBRENNUNGSMOTOREN*.
 105. WRIGHT. *StreetDeck Hydroliner FCEV*, 2022.
 106. SOLARIS. *Urbino Hydrogen. Noch mehr saubere Kilometer*, 2019.
 107. EUROPEAN COMMISSION. *VERORDNUNG (EU) 2019/ 318 DER KOMMISSION - vom 19. Februar 2019 - zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/ 2400 sowie der Richtlinie 2007/ 46/ EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen*, 19. Februar 2019.
 108. DEUTZ. *Der Wasserstoffmotor von DEUTZ ist reif für den Markt*. Köln, 12. August 2021.
 109. KEYOU. *Smart. Simple. Sustainable. We decarbonize your fleet*. München.

-
110. LIEBHERR. *Liebherr stellt H2-Direkteinblasung für Heavy-Duty-Verbrennungsmotoren vor*, 7. September 2022.
 111. MAN BUS & TRUCKS SE. H2 ICE - A CO2-free solution for customer-oriented off-road applications. In: AVL DEUTSCHLAND GMBH, Hg. *12th Int. AVL Emissions and Energy Forum*. Mainz-Kastel: AVL Deutschland GmbH, 2022. ISBN 978-3-9816971-8-6.
 112. GERBIG, F., K. HELLER, J. RINGLER, H. EICHLSEDER und P. GRABNER. Innovative Brennverfahrenskonzepte für Wasserstoffmotoren. In: INSTITUT FÜR VERBRENNUNGSKRAFTMASCHINEN UND THERMODYNAMIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ, Hg. *11. Tagung – Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. VKM-THD Mitteilungen*, 2007.
 113. BUSCH, H., T. DURAND, L. VIRNICH und T. KÖRFER. Efficiency-Optimized Design of an H2 Internal Combustion Engine for Commercial Vehicle Applications. In: *1st Conference Powertrains for Renewable Fuels. POWERTRAINS FOR RENEWABLE FUELS - ON THE PATH TO CO2-NEUTRAL MOBILITY*, 2022.
 114. NOW GMBH. *WASSERSTOFF- VERBRENNUNGSMOTOR ALS ALTERNATIVER ANTRIEB. Metastudie*. Berlin, 2. März 2021.
 115. MILLO, F., A. PIANO, L. ROLANDO, F. ACCURSO, F. GULLINO, S. ROGGIO, A. BIANCO, F. PESCE, A. VASSALLO und R. ROSSI. Synergetic Application of Zero-, One-, and Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Approaches for Hydrogen-Fuelled Spark Ignition Engine Simulation [online]. *SAE International Journal of Engines*, 2022, **15**(4), 561-580. ISSN 1946-3944. Verfügbar unter: doi:10.4271/03-15-04-0030
 116. KAPUS, P., B. RASE, A. ARNBERGER, R. HEINDL, N. EGERT, G. FRAIDL, M. WEIßBÄCK und P. GRABNER. High Efficiency Hydrogen Internal Combustion Engine – Carbon Free Powertrain for Passenger Car Hybrids and Commercial Vehicles. Wasserstoffverbrennungsmotor mit höchstem Wirkungsgrad – CO2-freier Antrieb für PKW-Hybride und Nutzfahrzeuge. In: B. GERINGER und H.P. LENZ, Hg. *Proceedings of the 43rd International Vienna Motor Symposium. 27-29 April 2022 : in three volumes*. Vienna, Austria: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK)/Austrian Society of Automotive Engineers, 2022. ISBN 3950496912.
 117. EICHLSEDER, H., T. WALLNER, F. GERBIG und H. FICKEL. Gemischbildungs- und Brennkonzepte für den Wasserstoff-Verbrennungsmotor. In: MTZ, Hg. **66**. Auflage, 2004.
 118. ATZ LIVE, Hg. *Antriebe und Energiesysteme von morgen 2022. Zukunft technologieoffen gestalten*: Springer Professional, 2022.
 119. UMWELTBUNDESAMT. *Verteilung der CO2-Emissionen in Deutschland nach Quellgruppe im Jahr 2020*, 1. April 2022.
 120. IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2008. ISBN 9291691224.

-
121. EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. *JEC well-to-tank report V5: JEC well to wheels analysis : well to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*: Publications Office, 2020.
 122. UMWELTBUNDESAMT. *Primärenergiegewinnung und -importe*, 10. Mai 2021.
 123. UMWELTBUNDESAMT. *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Treibhausgas-Emissionen seit 1990 nach Gasen*, 15. März 2022.
 124. UMWELTBUNDESAMT. *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021*.
 125. WELTENERGIERAT DEUTSCHLAND E.V. *Energie in der Europäischen Union: Zahlen und Fakten*, 2021.
 126. EUROPEAN UNION. <https://europainfo.at/eu/symbole-der-eu/die-flagge-der-europaeischen-union/> [online] [Zugriff am: 20. Oktober 2022]. Verfügbar unter: <https://europainfo.at/eu/symbole-der-eu/die-flagge-der-europaeischen-union/>
 127. WIKIPEDIA. *Flagge Deutschlands*.
 128. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. In: *COM(2021) 550 final*, 14. Juli 2021.
 129. PROGNOSE AG und ÖKO-INSTITUT E.V., WUPPERTHAL-INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE GMBH. Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals, 2020.
 130. PROGNOSE AG, FRAUNHOFER ISI, GWS und IINAS. Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgenabschätzung 2030/2050, 10. März 2020.
 131. STATISTA. *Nettostromverbrauch in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2020*, 2022.
 132. KOPERNIKUS PROJEKTE. ENTWICKLUNGSPFADE AUS DEM ENSURE-PROJEKT. TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS BIS ZUM JAHR 2030, **2020**.
 133. ÖKO-INSTITUT E.V. und FRAUNHOFER ISI. Klimaschutzszenario 2050 - Zusammenfassung des 2. Endberichts, 2015, (2. Endbericht).
 134. BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND. *CO2-Emission*, 2023.
 135. EUROPEAN COMMISSION. *European Green Deal. Europäischer Grüner Deal*, 2022.
 136. BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND. *Klimaschutzgesetz 2021. Generationenvertrag für das Klima*, 2021.
 137. BÖGER, MATTHIAS, FUOSS, KLAUS. The Energy Transition in Germany. Carbon Neutrality in the Balancing Act Between Energy Demand and Energy Supply. In: ATZ LIVE, Hg. *Antriebe und Energiesysteme von morgen 2022. Zukunft technologieoffen gestalten*: Springer Professional, 2022.

-
138. REBHAN, E., Hg. *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie ; mit 202 Tabellen*. Berlin: Springer, 2002. Engineering online library. ISBN 9783540412595.
 139. ENERGY TECHNOLOGY SYSTEMS ANALYSIS PROGRAMME. *Electricity Transmission and Distribution*.
 140. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Electric power transmission and distribution losses (% of output)*.
 141. PRUSSI MATTEO, YUGO MARTA, DE PRADA LUIS, PADELLA MONICA, EDWARDS ROBERT und LONZA LAURA. *JEC Well-to-Tank report v5. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Luxemburg, 2020.
 142. WIKIPEDIA. *EN 590* [online]. 11 März 2022 [Zugriff am: 1. Februar 2023]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/EN_590
 143. UMWELTBUNDESAMT. *CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*.
 144. STATISTA. *Verteilung der Anteile ausgewählter Länder am Erdgasimport von Deutschland im Jahr 2020, 2023*.
 145. UMWELTBUNDESAMT. *Wie klimafreundlich ist LNG? Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG)*. Dessau-Roßlau, Mai 2019.
 146. ÖKO-INSTITUT E.V. *Strombasierte Kraftstoffe: die Zukunft von PtX*.
 147. FACHHOCHSCHULE ERFURT, ERIK SCHLICHTMANN, EUGEN BUWIDOWITSCH, ANDRE THOMAS, RICHARD LEYDOLPH, STEFFEN STRAßBURG, MARIE-SOPHIE ROMANO und KONSTANTIN LENZ. *Wasserstoffnachfragepotentiale bis zum Jahr 2050 in Deutschland und der Europäischen Union*. Erfurt: Unpublished, 2022.
 148. AGORA VERKEHRSWENDE | AGORA ENERGIEWENDE. *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels*, 2018, **2018**.
 149. UMWELTBUNDESAMT. *System comparison of storable energy carriers from renewable energies. Final report*.
 150. WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA UMWELT ENERGIE GGMBH. *Auslegung, Analyse und Bewertung von Direct Air Capture (DAC)-Anlagen zur Nutzung für Power-to-X-Prozesse und zur Erzielung "negativer Emissionen" in Deutschland*. Wuppertal, März 2022. Wuppertaler Studienarbeiten zur nachhaltigen Entwicklung. 25 (März 2022). ISBN 9783946356271.
 151. XIAOJIN, Z. und C. BAUER. *Synthetic Natural Gas produced with carbon dioxide from geothermal energy generation in Iceland and used in Switzerland* [online]. *A Life Cycle Assessment*, 21. Januar 2021.
 152. IEA. *Final consumption. World total final consumption (TFC) by source, 2020*.

-
153. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. *Kraftstoffverbrauch in Deutschland*, 2022.
 154. ZIEGLMEIER. *HVO-Diesel Tanken*.
 155. VOLVO TRUCKS. *HVO*.
 156. NESTE. *Neste Renewable Diesel Handbuch*, 2016.
 157. UMWELTBUNDESAMT. *Diesel aus biogenen Rest- und Abfallstoffen: Fragen und Antworten* [online]. *Kann man Diesel aus biogenen Rest- und Abfallstoffen in Deutschland tanken?*, 23. Januar 2020 [Zugriff am: 14. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/diesel-aus-biogenen-rest-abfallstoffen-fragen#kann-man-diesel-aus-biogenen-rest-und-abfallstoffen-in-deutschland-tanken>
 158. DR.-ING. WILLNER, T. *Wer falsch rechnet, den bestraft das Klima*. Hamburg, 3. Juni 2022.
 159. WIKIPEDIA. *Fettsäuremethylester*.
 160. DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM GEMEINNÜTZIGE GMBH. *Marktübersicht erneuerbarer Energieträger*.
 161. UMWELTBUNDESAMT ÖSTERREICH. *DIE ÖKOBILANZ VON PERSONENKRAFTWAGEN. Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO2-Reduktionspotential und Energieeinsparung*: Umweltbundesamt GmbH.
 162. HAUCK, C. *Analyse und technisch-ökologische Evaluierung des SCR-Verfahrens zur Stickstoffoxidminderung*, 2010.
 163. EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context. Report Version 3c*, July 2011, 2011.
 164. ROTHBART, M., C. SAMS, T. SCHMID und R. von HELMOLT. *Design to CO2 for a sustainable product lifecycle*. In: ATZ LIVE, Hg. *Antriebe und Energiesysteme von morgen 2022. Zukunft technologieoffen gestalten*: Springer Professional, 2022.
 165. SPÄTHE, J., M. ANDRESH und A. PATYK. *Sustainability Assessment of an Integrated Value Chain for the Production of eFuels*. In: ATZ LIVE, Hg. *Antriebe und Energiesysteme von morgen 2022. Zukunft technologieoffen gestalten*: Springer Professional, 2022.
 166. MANTE, T., S. PREHN, M. THEILE, I. SEIDEL, L. MESTRE, B. BUCHHOLZ und F. MAUSS. *Investigation of an ammonia diesel dual-fuel combustion process on a heavy-duty single cylinder research engine for the development of suitable simulation tools for maritime applications*. In: ATZ LIVE, Hg. *Stand der Energiewende im Heavy-Duty-Bereich. 17. Internationale MTZ-Fachtagung Großmotoren | Hybrid-Event*: Springer Professional, 16. November 2022 – 17. November 2022.

-
167. FRAUNHOFER ISE. *Ammoniak als Wasserstoff-Vektor: Neue integrierte Reaktortechnologie für die Energiewende*, 21. September 2022.
 168. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND. *AmmoniaMot - Ammoniak als Schiffskraftstoff der Zukunft* [online] [Zugriff am: 3. Februar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/MAFO/projekte/03SX534-AmmoniaMot/projekt-detail.html>
 169. DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. *Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr. Potenziale und Handlungsempfehlungen*. Stuttgart, Dezember 2018.
 170. STATISTA. *Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Deutschland in ausgewählten Jahren von 1960 bis 2022*, 4. Januar 2023.
 171. GÖCKEL, T. *Aufbau und Inbetriebnahme von Messtechnik zur Überwachung der Emissionen eines Nutzfahrzeuges im realen Fahrbetrieb. Installation and commissioning of measurement devices in order to monitor the emission behaviour of a heavy-duty truck under real driving conditions*. Bachelor-Thesis. Darmstadt, 6. Mai 2021.
 172. MERCEDES-BENZ. Der neue eEconic [online]. Verfügbar unter: www.mercedes-benz-trucks.com/e-econic
 173. KIRSCHNER, N. *Modellierung unterschiedlicher Antriebs-strangkonfiguration für ein Kommunal-fahrzeug in IPG-Truckmaker mit anschie-ßender Well-to-Wheel Bewertung der CO2-Emissionen. Modelization of different powertrain systems for a municipal truck in IPG-Truckmaker in order to evaluate the Well-to-Wheel CO2-emission*. Master Arbeit. Darmstadt, 2021.
 174. HEAG MOBILO. *Liniennetzplan. Stadt Darmstadt*, 2022.
 175. MERCEDES-BENZ. *Verteilerverkehr heute - Verteilerverkehr in der Zukunft*, 30. Juni 2010.
 176. HYUNDAI MOTOR. *Erste Brennstoffzellen-Lkw Hyundai Xcient Fuel Cell kommen nach Europa*. Seoul, 8. Juli 2020.
 177. ENGINIUS und FAUN UMWELTTECHNIK GMBH & CO. KG. *Innovation ist unser Antrieb*. [online]. *Fahrzeuge für einen klimaneutralen Lastverkehr.*, 2022 [Zugriff am: 1. Januar 2023]. Verfügbar unter: https://www.faun.com/produkte/alternative_antriebe/bluepower/
 178. MERCEDES-BENZ. *eActros Longhaul*, 2022.
 179. MERCEDES BENZ. *Lithium Cell or Battery Test Summary. Testzertifikat für Lithium-Zellen oder -Batterien*, 2021.
 180. KRAMER, S. Ein Viertel aller Lkw fährt leer durch die Gegend [online]. Der Chef der Berliner Logistikberatung 4Flow Stefan Wolff spricht im Interview über die

-
- Digitalisierung seiner Branche, IT-Sicherheit und Flüchtlinge. *Tagesspiegel*, 28. Oktober 2015. Verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/ein-viertel-aller-lkw-fahrt-leer-durch-die-gegend-4436476.html>
181. VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE. Das Nutzfahrzeug. umweltfreundlich und effizient, 2008.
 182. KAWAMOTO, R., H. MOCHIZUKI, Y. MORIGUCHI, T. NAKANO, M. MOTOHASHI, Y. SAKAI und A. INABA. Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA [online]. *Sustainability*, 2019, **11**(9), 2690. Verfügbar unter: doi:10.3390/su11092690
 183. FRITZ, D., H. HEINFELLNER und S. LAMBERT. *Die Ökobilanz von schweren Nutzfahrzeugen und Bussen. Bewertung ausgesuchter Anwendungsfälle alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich Reduktionspotenzial von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch*. Wien: Umweltbundesamt, 2022. Report / Umweltbundesamt. [Neue Folge], 801. ISBN 978-3-99004-625-8.
 184. STATISTA. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1179499/umfrage/produktion-von-biodiesel-und-erneuerbarem-diesel-eu/>. (in Millionen Liter), 13. September 2022.
 185. HELMOLT, R. *Energy for Mobility*, 6. September 2022.
 186. REGIONALVERKEHR. *Neuer Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid vor Großversuch*, 20. August 2009.
 187. DAIMLER TRUCKS AG. *Mercedes-Benz Citaro mit vollelektrischem Antrieb* [online]. Verfügbar unter: <https://www.evobus.com/de-at/layer/menschen-und-geschichten/mercedes-benz-citaro-mit-vollelektrischem-antrieb/>
 188. MERCEDES-BENZ. *Der eCitaro. Technische Informationen*, 2021.
 189. BUSBLICKPUNKT. Im Bus Blickpunkt-Test: Mercedes-Benz eCitaro. Mit dem Stromer auf die Straße, 03.2019.
 190. DNV GL. *Type Approval Certificate*. AKASOL AG. AKASystem 15 OEM 37Ah PRC. Augsburg, 24. März 2020.
 191. SPRINGER PROFESSIONAL. *Daimler zeigt Brennstoffzellen-Lkw Mercedes-Benz GenH2 Truck* [online], 18. August 2020 [Zugriff am: 2. Januar 2023]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/brennstoffzelle/schwere-lkw/daimler-zeigt-brennstoffzellen-lkw-mercedes-benz-genh2-truck/18388162>

Anhang

In den betrachteten Nutzfahrzeuganwendungen wurden die simulierten Fahrzeuge entsprechend der Merkmale aus Anhang A bis D parametrisiert.

A Abfallsammelbetrieb

Tabelle 29: Eigenschaften der simulierten Müllsammelfahrzeuge

Müllsammelbetrieb							
		Diesel (50)	FCEV (186)	H2-VKM (108)	Gas (50)	BEV (172)	
Massen in kg	Delta zu Diesel	0	+70	+950	+310	+2263	
	Gewicht vollgetankt	13420	13490	14370	13730	15683	
	Zugmaschine	7400	7142	7875	7555	9860	
	Müllpresse	5823 (53)					
	Zulässiges Gesamtgewicht	25700					
Chemischer Speicher	System	Flüssig	CGH2 @700 bar			CNG@200 bar Typ4	\
	Volumen in m ³	0.2	0.65	0.814	0.65	\	
	Gewicht in kg	30	511	640	247	0	
	Kapazität in kg	167	14	32	105	0	
	Kapazität in kWh	1987.3	466.2	1065.6	1458	\	

Elektrischer Speicher	Spezifisches Gewicht in kg/kWh	\	5.41	\		5.41
	Batteriegewicht in kg		141			2140
	Batteriekapazität in kWh		26			396
	Batterieleistung in kW		120			400
	Kapazität in Ah		65			990
	Nennspannung in V		400			400
Chemischer Wandler	Hubraum in ccm ³	7698	\	7800	7700	\
	Gewicht in kg	1100	120	1100	1100	
	Leistung in kW	220	120	210	222	\
	Drehmoment in Nm	1200@ 1200-1400 upm	\	1100@1220-1920 upm	1200@1200-1600 upm	\

Elektrischer Wandler	Leistung in kW	\	330	\		330
	Spezifisches Gewicht in kg/kW		0.48			0.48
	eMotorgewicht in kg		157			157
	Drehmoment in Nm		2237			2200
Sonstiges	Getriebeabstufung	6	2	6	6	2
	Nebenaggregate in kW	22(34)	22(34)	22(34)	22(34)	22(34)

B Stadtbusbetrieb

Tabelle 30: Parameter der Antriebssysteme der Stadtbusse

Stadtbus (47)						
		Diesel (47)	FCEV (186)	H2-VKM (176)	Gas (47)	BEV (187–189)
Masse in kg	Delta zu Diesel	0	247	1032	209	1615
	Gewicht vollgetankt	10284	10532	11316	10493	11899
	Zugmaschine	10037	9770	10553	10142	11899
	Zulässiges Gesamtgewicht	18000	18000	18000	18000	18000
Chemischer Speicher	Tanksystem	Flüssigkraftstoff	CGH2@350 bar	CGH2 @350 bar	CNG@200 bar Typ4	\
	Tankvolumen in m ³	0.26	1.56 (106)	1.56(106)	0.65	
	Tankgewicht in kg	30	727	727	247	
	Kapazität in kg	217.1	35	36	105	
	Kapazität in kWh	2583.49	1165.5	1198.8	1458	

Elektrischer Speicher	Spezifisches Gewicht in kg/kWh	5.41				7.14 (Festkörper)
	Batteriegewicht in kg	\	141	\		3150
	Batteriekapazität in kWh		26			441
	Batterieleistung in kW		120			400
	Nennspannung in V		400			400
Chemischer Wandler	Hubraum in ccm ³	7698	\	7800	7700	\
	Gewicht in kg	1100	120	1100	1100	
	Leistung in kW	220	120	210	222	
	Drehmoment in Nm	1200@ 1200-1400 upm	\	1100@1220-1920 upm	1200@1200-1600 upm	
Elektrischer Wandler	Leistung in kW	\	240	\		250
	Spezifisches Gewicht in kg/kW		0.48			0.48
	Elektromotorgewicht in kg		115,2			120
	Drehmoment in Nm		970			970

	Nennspannung in V		400		400
Sonstiges	Getriebeabstufung	6	2	6	2
	Nebenaggregate in kW	22 (34)			

C Verteilerverkehr

Tabelle 31: Eigenschaften der Verteilerverkehr-Fahrzeuge

Verteilerverkehr						
		Diesel (52)	FCEV (176)	H2-ICE(177, 116, 55)	Gas (84, 83)	BEV(179, 178)
Masse in kg	Delta zu Diesel	0	1178	1925	780	1693
	Gewicht vollgetankt	9218	10396	11144	9998	10912
	Zugmaschine	7700	7362	8110	7537	8549
	Kofferaufbau	2035 (64, S. 13)				
	Zulässiges Gesamtgewicht	18000				
Chemischer Speicher	Tanksystem	Flüssigkraftstoff	CGH2 @700 bar	CGH2 @700 bar	CNG@200 bar Typ4	\
	Tankvolumen in m ³	0.125	0.814	0.814(177)	0.92	
	Tankgewicht in kg	30	640	640	350	
	Kapazität in kg	104	32	32	149	
	Kapazität in kWh	1242	1065.6	1065.6	2070	
Elektrischer	Spezifisches Gewicht in kg/kWh	5.41				

	Batteriegewicht in kg	\	396	\	2421	
	Batteriekapazität in kWh		73.2		448	
	Batterieleistung in kW		108/330 (190)		400	
	Nennspannung in V		661		800	
Chemischer Wandler	Hubraum in ccm ³	7698	\	12800	8700	\
	Gewicht in kg	650	190	1500	1100	
	Leistung in kW	220	190	277	243	
	Drehmoment in Nm	1200@ 1200- 1400 upm	\	2200@1000 upm	1700@1200- 1600 upm	
Elektrischer Wandler	Leistung in kW	\	350	\	400	
	Spezifisches Gewicht in kg/kW		0.48		0.48	
	eMotorgewicht in kg		167		190	
	Drehmoment in Nm		3400		2200 (32, S. 26)	
	Nennspannung in V					
Sonstiges	Getriebeabstufung	12	6	12	2	

	AdBluetank in l	50	\	27	\	\
	Nebenaggregate in kW	2.52				

D Fernverkehr

Tabelle 32: Spezifikationen der Simulierten Sattelzugmaschinen zur Fernverkehrsanwendung

Fernverkehr						
		Diesel (46)	FCEV (191)	H2-ICE (55)	Gas (84, 83)	BEV(178)
Masse in kg	Delta zu Diesel	0	-493	110	868	420
	Gewicht vollgetankt	15775	15282	15885	16643	16195
	Zugmaschine	7485	7037	7640	8019	8830
	Anhänger	7365 (64, S. 13)				
	Zulässiges Gesamtgewicht	40000	40000	40000	40000	40000
	Antriebstrang	6x2				
Chemischer Speicher	Tanksystem	Flüssigkraftstoff	LH2	LH2@12bar	LNG@ -162°C	\
	Tankvolumen in m ³	1	1.13	1.520 (104)	1.02	
	Tankgewicht in kg	90	800	800	800	
	Kapazität in kg	835	80	80	459	
	Kapazität in kWh	9800	2664	2664	6376	

Elektrischer Speicher	Spezifisches Gewicht in kg/kWh	\	5.41	\		5.41
	Batteriegewicht in kg		378			3351
	Batteriekapazität in kWh		70			620(92)
	Batterieleistung in kW		400			400
	Nennspannung in V		800			800
Chemischer Wandler	Hubraum in ccm ³	11100	\	13000	13000	\
	Gewicht in kg	1300	300	1500	1500	
	Leistung in kW	353	300	350	394	
	Drehmoment in Nm	2250@ 925-1500 upm	\	2375@ 1000-1400 upm	2200@11000-1400 upm	
Elektrischer Wandler	Leistung in kW	\	460	\		460
	Spezifisches Gewicht in kg/kW		0.48			0.48
	eMotorgewicht in kg		219			219
	Drehmoment in Nm		3154/4142			3154/4142
	Nennspannung in V		800			800

Sonstiges	Getriebeabstufung	12-Gang	6	12	12	6
	Hinterachsübersetzung	i=4.1				
	AdBluetank in l	100	\	50	\	\
	Nebenaggregate in kW	2.52				

Curriculum Vitae Nicolas Hummel

Persönliche Angaben

Geburtsdatum 11.10.1990
Geburtsort Paris (Frankreich)

Bildung

2017 **Master of Science**
Titel der Masterthesis:
„Weiterentwicklung einer Methodik zur dynamischen Identifikation kritischer Betriebszustände hinsichtlich Emissionen und Verbrauch unter RDE-Randbedingungen am Motorenprüfstand“

2015 - 2016 **Masterstudium Mechanical and Process Engineering**
Universität • Politecnico di Torino
Im Rahmen des ERASMUS Austauschprogramms

2014 - 2017 **Masterstudium Mechanical and Process Engineering**
Technische Universität Darmstadt

2014 **Bachelor of Science**
Titel der Bachelorthesis:
„Entwicklung einer Auswerteroutine für die Rutschsimulationsmaschine und Analyse kontinuierlicher Messschriebe“

2009 - 2014 **Bachelorstudium Mechanical and Process Engineering**
Technische Universität Darmstadt

2008 - 2009 **Classe préparatoire aux grandes écoles**
Lycée Blaise Pascal Clermont-Ferrand (Frankreich)

2000 - 2008 **Baccalauréat Scientifique (Allgemeine Hochschulreife)**
Lycée Massillon Clermont-Ferrand (Frankreich)

Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit

1. Hummel, Nicolas; Herold, Tim; Prof. Dr. Beidl, Christian, Well-to-Wheel CO₂-Analysis of different powertrain systems on representative Heavy-duty mission profiles, Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren 2022, Donaueschingen, 16.- 17.11.2022
2. Hummel, Nicolas, Impulsvortrag aus dem wissenschaftlichen Beirat: Energiesysteme und Mobilität, Experten-Forum Powertrain, Hanau, 9. -10.11.2022
3. Hummel, Nicolas; Noone, Patrick; Kirschner, Niklas; Prof. Dr. Beidl, Christian, Well-to-Wheel Evaluation of Conventional and Alternative Powertrains for Municipal Refuse Collection Vehicles, 22. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 15. - 16.03.2022
4. Noone, Patrick; Hummel, Nicolas; Kuznik, Alexander; Prof. Dr. Beidl, Christian, Holistic Approach for the Design and Dimensioning of a Hybridized Heavy-Duty Truck, 21. Internationales Stuttgarter Symposium, Stuttgart, 2021
5. Hummel, Nicolas; Thiem, Mikula; Prof. Dr. Beidl, Christian, Emission reduction of a hybridized heavy-duty truck through SCR-temperature management, 11th International AVL Exhaust Gas and Particulate Emissions Forum, Ludwigsburg, 3. -4.03.2020
6. Thiem, Mikula; Hummel, Nicolas; Prof. Dr. Beidl, Christian, Betriebsbedingungen für Systeme zur Abgasnachbehandlung im hybridisierten Nutzfahrzeug, MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 80 (7-8), S. 94-101, Springer, ISSN 2192-8843, 2019
7. Thiem, Mikula; Hummel, Nicolas; Prof. Dr. Beidl, Christian, Betriebsbedingungen für Systeme zur Abgasnachbehandlung im hybridisierten Nutzfahrzeug, ATZheavy duty, 12 (2), S. 62-70, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISSN 2524-8782, 2019
8. Thiem, Mikula; Hummel, Nicolas; Prof. Dr. Beidl, Christian, Impacts of powertrain hybridization on engine exhaust behavior of heavy-duty vehicles with electrified trailers, 6th International Engine Congress, Baden-Baden, 2019
9. Hummel, Nicolas; Thiem, Mikula; Steinhaus, Tim; Prof. Dr. Beidl, Christian, Emissionsoptimierung am hybriden Sattelzug mittels Most Relevant Testing, Experten-Forum Powertrain, Hanau, 23. -24.10.2019

Verzeichnis studentischer Arbeiten im thematischen Rahmen dieser Arbeit

1. Reuß, Simon Max, Erstellung unterschiedlicher Nutzfahrzeug- spezifischer Fahrprofile zum Vergleich verschiedener Antriebskonzepte in IPG-Truckmaker, Bachelorthesis, 2022
2. Knap, Lars, Erstellung eines brennstoffzellenbetriebenen Nutzfahrzeugmodells und Optimierung der regelbasierten Betriebsstrategie, Masterthesis, 2022
3. Kirschner, Niklas, Modellierung unterschiedlicher Antriebsstrangkonfiguration für ein Kommunalfahrzeug in IPG-Truckmaker mit anschließender Well-to-Wheel Bewertung der CO₂-Emissionen, Masterthesis, 2021
4. Goeckel, Timo, Aufbau und Inbetriebnahme von Messtechnik zur Überwachung der Emissionen eines Nutzfahrzeuges im realen Fahrbetrieb, Bachelorthesis, 2021
5. Schmeckthal, Christian, Erstellung eines Hybridmodells für Nutzfahrzeuganwendungen und Übertrag auf den Motorenprüfstand, Masterthesis, 2020
6. Schneidler, Lars, Planung und Durchführung einer PEMS-Messkampagne zur Identifikation kritischer Betriebszustände bezüglich Partikelemissionen beim Nutzfahrzeugbetrieb, Bachelorthesis, 2020
7. Russart, Julian, Analyse streckenbezogener Fahrzeugdaten zur Bewertung des Alterungszustands des verbauten Abgasnachbehandlungssystems, Bachelorthesis, 2020
8. Hofmann, Philipp, Implementierung und Bewertung einer onlinefähigen Energiemanagementstrategie für die Applikation einer Brennstoffzelle in einem Omnibus, Masterthesis, 2019
9. Slawek, Marco, Erweiterung eines Hybrid-Fahrzeugmodells um eine geregelte Zugkraftunterstützung, Bachelorthesis, 2019
10. Sekundo, Max Daniel, Erstellung eines Nutzfahrzeugmodells in IPG TruckMaker und Übertrag von Realfahrten auf den Engine-in-the-Loop Motorenprüfstand, Bachelorthesis, 2019



