



Markus Grössing, BSc

Lebenszyklusanalyse von PKW-Antrieben

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Vorstand

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Martin Johannes Röck, BSc
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Oktober 2018



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Vorwort und Danksagung

Aus großem persönlichen Interesse an der zukünftigen Mobilität und an der Vermeidung des durch anthropogene Prozesse entstehenden Klimawandels habe ich mich für das Thema Life Cycle Analysis von PKW-Antrieben entschieden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik konnte ich die Forschungsfrage, ob die Zukunft in der Elektromobilität liegt, beantworten.

Großen Dank möchte ich an das gesamte Institut richten, das mir die Möglichkeit verschaffte meinen Interessen wissenschaftlich nachzugehen. Besonders möchte ich Prof. Hausberger hervorheben, der mir mit Logik, Weisheit und Überblick immer zur Seite stand. Ebenso Gérard Silberholz, der durch bedingungslosen Einsatz oft „Licht ins Dunkel“ gebracht hat. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen: Martin Röck, der mir in der Rolle als „schärfster Kritiker“ oft verborgene Sichtweisen ermöglichte, den immer hilfsbereiten Konstatin Weller und Florian Spieler in der Rolle des „Leidensgenossen“. Danke auch an Michael Schwingshackl, der mit geschultem Auge, jede Unstimmigkeit in den Daten erkannt hat. Danke auch an Silke Lipp, die durch ihre organisatorischen Fähigkeiten es ermöglicht hat jedes gewünschte Versuchsfahrzeug zu vermessen.

Besonders hervorheben möchte ich auch meine Familie, die immer mit Verständnis und ohne jeglichen Zweifel im Laufe meines Studiums hinter mir stand. Für die jahrelange Rückenstärkung und die Möglichkeit studieren zu dürfen, bin ich sehr dankbar.

Abschließend möchte ich einer ganz besonderen Person danken. Sie ist es, die meine Welt im Innersten zusammenhält. Wenn man so will, ist sie mein persönliches Higgs-Boson. Gefunden habe ich dich durch mein Studium in Graz. Die Rolle die du in meinem Leben spielst bezeichne ich heute als „elementar“. Ein Dank alleine ist nicht genug dafür, dass du mich mit deiner liebevollen Art über jeden noch so steinigen Weg geführt hast. Deine empathischen Fähigkeiten vermögen es, mich aus jeder Verdrossenheit zu befreien. Du gehörst zu der Sorte Mensch, die allein durch Anwesenheit die Welt zu einem besonderen Ort macht. Danke an den Zufall, der uns zusammengeführt hat.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT UND DANKSAGUNG	III
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	X
ZUSAMMENFASSUNG	XI
ABSTRACT	XII
1 EINLEITUNG	1
2 WELL-TO-WHEEL	3
2.1 WELL-TO-TANK	3
2.2 TANK-TO-WHEEL	4
2.3 WELL-TO-TANK BEWERTUNG VON KRAFTSTOFFEN	5
2.4 WELL-TO-TANK-PFADE.....	5
2.5 EINFLUSS VON NEBENPRODUKTEN	6
3 TREIBHAUSGASEMISSIONEN KONVENTIONELLER KRAFTSTOFFE	7
3.1 OTTOKRAFTSTOFFE	7
3.1.1 <i>Benzin E0, E5, E10</i>	9
3.1.2 <i>Ethanol</i>	11
3.1.3 <i>Methanol</i>	13
3.1.4 <i>CNG</i>	14
3.1.5 <i>CBG</i>	15
3.2 DIESELKRAFTSTOFFE.....	17
3.2.1 <i>Diesel B0, B7</i>	18
3.2.2 <i>Bio-Diesel</i>	19
3.2.3 <i>FT-Diesel</i>	20
3.2.4 <i>HVO</i>	21
3.2.5 <i>DME</i>	22
3.3 WASSERSTOFF	23
3.3.1 <i>H₂ aus NG</i>	24
3.3.2 <i>H₂ aus Elektrolyse</i>	25
3.4 STROMBEREITSTELLUNG IN EUROPA	26
3.5 STROMBEREITSTELLUNG IN ÖSTERREICH	27
4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	28
4.1 GRUNDLAGEN BEV	28
4.2 VW E-GOLF.....	31
4.2.1 <i>Messungen am Rollenprüfstand</i>	31
4.2.2 <i>Ergebnisse der Messungen und Simulation in PHEM</i>	37
4.3 TESLA MODEL S	38
4.3.1 <i>Ermittlung der Fahrwiderstände</i>	38
4.3.2 <i>Ergebnisse der Ausrollversuche und Simulation in PHEM</i>	40
5 SIMULATIONEN VON DURCHSCHNITTSFAHRZEUGEN	43
5.1 PHEM	43
5.2 RWC-FAHRZYKLUS	45
5.3 SIMULATION VON KONVENTIONELLEN KONZEPTEN	46
5.4 SIMULATION VON HEV	48
5.5 SIMULATION VON PHEV	52
5.6 SIMULATION VON BEV	54
5.6.1 <i>Kennfeldjustierung mittels Messdaten</i>	56
5.7 SIMULATION VON FCEV	59
5.8 ERGEBNISSE DER SIMULATIONEN	61

6	LEBENSZYKLUSANALYSE	62
6.1	FAHRZEUGHERSTELLUNG, WARTUNG UND ENTSORGUNG.....	63
6.2	BATTERIEHERSTELLUNG	64
6.3	BRENNSTOFFZELLENHERSTELLUNG.....	65
6.4	INFRASTRUKTURBEREITSTELLUNG.....	65
7	ERGEBNISSE DER LEBENSZYKLUSANALYSE	66
7.1	ERGEBNISSE FÜR OTTOFAHRZEUGKONZEPTE	66
7.2	ERGEBNISSE FÜR DIESELFahrzeugkonzepte.....	67
7.3	ERGEBNISSE FÜR ELEKTROFAHRZEUGE.....	69
7.4	ERGEBNIS BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUG.....	70
8	SCHLUSSFOLGERUNG	71
9	LITERATURVERZEICHNIS	73
10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	76
11	TABELLENVERZEICHNIS	79
12	ANHANG	81
12.1	WTT-ERGEBNISSE KRAFTSTOFFE	81
12.2	LCA-ERGEBNISSE FÜR PHEV MIT „GRÜNEM STROM“	87
12.3	LCA-ERGEBNISSE ALTERNATIVER OTTO-KRAFTSTOFFE	88
12.4	LCA-ERGEBNISSE ALTERNATIVER DIESEL-KRAFTSTOFFE	89
12.5	LCA-ERGEBNISSE ELEKTROFAHRZEUGE IN ÖSTERREICH UND MIT DIVERSER STROMBEREITSTELLUNG 91	
12.6	VERBRAUCHSERGEBNISSE	93
12.7	DATENBLÄTTER.....	94

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A_0	N	Rollwiderstandsbeiwert „Loss Run“
A_1	Ns/m	Rollwiderstandsbeiwert „Loss Run“
A_2	Ns ² /m ²	Rollwiderstandsbeiwert „Loss Run“
$A_{\text{Quer.}}$	m ²	Querschnittsfläche
C_w	–	Luftwiderstandsbeiwert
$C_{\text{Batt.}}$	Ah	Batteriekapazität
$CO_{2\text{spez}}$	kg/MJ	spezifische Kohlenstoffdioxidemission
$E_{\text{Batt.}}$	kWh	Energieinhalt Batterie
F_{R0}	–	Rollwiderstandskoeffizient
F_{R1}	s/m	Rollwiderstandskoeffizient
F_{R4}	(s/m) ⁴	Rollwiderstandskoeffizient
F_{Brems}	N	erforderliche Bremskraft des Rollenprüfstandes
F_{FWS}	N	gesamte Fahrwiderstandskraft
$F_{\text{Luftw.}}$	N	Luftwiderstandskraft
F_{Soll}	N	Sollwiderstandskraft
F_{Verluste}	N	Verluste KFZ und Rollenprüfstand
H_U	MJ/kg	unterer Heizwert
H_u	MJ/kg	unterer Heizwert
K_{eA}	kWh/kg	Effizienzfaktor Assistieren
K_{eG}	kWh/kg	Effizienzfaktor Generieren
M_{CO_2}	kg/kmol	molare Masse von Kohlenstoffdioxid
M_C	kg/kmol	molare Masse von Kohlenstoff
M_e	Nm	Drehmoment Elektromotor
P_{eEM}	W	effektive Elektromotorleistung
P_{iEM}	W	aufgenommene elektrische Elektromotorleistung
$P_{iKorr.}$	kW	korrigierte elektrische Leistung
$P_{\text{Agg.}}$	kW	Nebenaggregatsleistung
$P_{\text{Beschl.}}$	kW	Beschleunigungsleistung
$P_{\text{Getr.}}$	kW	Getriebeleistung
P_{norm}	–	normierte Leistung
$P_{\text{Schlupf.}}$	kW	Schlupfleistung
$P_{\text{Luft.}}$	kW	Luftwiderstandsleistung
$P_{\text{Roll.}}$	kW	Rollwiderstandsleistung
$P_{\text{Steig.}}$	kW	Steigleistung
P_e	kW	effektive Motorleistung
$R_{iBatt.}$	Ω	Batterieinnenwiderstand

R_0	N	Rollwiderstandsbeiwert
R_1	Ns/m	Rollwiderstandsbeiwert
R_2	Ns ² /m ²	Rollwiderstandsbeiwert
R_{Cell}	Ω	Zellwiderstand
R_{Luft}	J/kgK	Gaskonstante Luft
$R_{korr.}$	N	korrigierter Rollwiderstandsbeiwert
$SOC_{WG_{oben}}$	–	obere SOC-Warngrenze
$SOC_{WG_{unten}}$	–	untere SOC-Warngrenze
SOC_i	–	SOC an der Stelle i
SOC_{max}	–	maximaler SOC
SOC_{min}	–	minimaler SOC
T_{Luft}	°C	aktuelle Lufttemperatur
T_{Norm}	°C	Normtemperatur
U_{SOC_i}	V	Batteriespannung bei SOC _i
$U_{Batt.}$	V	Batterienennspannung
U_{Cell}	V	Zellspannung
$W_{E_{ab}}$	kWh	abgegebene elektrische Arbeit
$W_{E_{ab}}$	kWh	zugeführte elektrische Arbeit
$W_{Brems.}$	kWh	Bremsarbeit
Z_{Cell}	–	Anzahl der Zellen
$a_0 - a_6$	V	Batteriekoeffizienten
$a_{Brems.}$	m/s ²	Bremsverzögerung
d_{Mess}	kW	Offset Messung
d_{Sim}	kW	Offset Simulation
k_{Mess}		Steigung der Ausgleichsgerade Messung
k_{Sim}		Steigung der Ausgleichsgerade Simulation
$m_{Beladung}$	kg	Zuladungsmasse
m_{FZG}	kg	Fahrzeugmasse
n_{idle}	U/min	Leerlaufdrehzahl
n_{norm}	–	normierte Drehzahl
n_{rated}	U/min	Nenn Drehzahl
p_{Luft}	mbar	aktueller Luftdruck
$s_{Brems.}$	m	Bremsweg
$v_{relativ}$	m/s	Relativgeschwindigkeit
$y_{Korr.}$	kW	Korrekturausgleichsgerade
y_{Mess}	kW	Ausgleichsgerade aus Messung
y_{Sim}	kW	Ausgleichsgerade aus Simulation
η_{EM}	–	Wirkungsgrad Elektromotor

ρ_{Luft}	kg/m ³	aktuelle Luftdichte
$\Delta m_{Kraftstoff}$	kg	Kraftstoffeinsparung
C	–	Kohlenstoffanteil im Kraftstoff
F	N	Kraft
I	A	Stromstärke
K	1/°C	Temperaturabhängigkeit Rollwiderstand (ISO 18164)
P	kW	Motorantriebsleistung
a	m/s ²	Beschleunigung/Verzögerung
g	m/s ²	örtliche Fallbeschleunigung
i	–	Schrittweite
l	m	Länge
m	kg	Masse
n	U/min	aktuelle Motordrehzahl
v	m/s	Geschwindigkeit

Konstanten

$g_n = 9,8067$	m/s ²	Normfallbeschleunigung
----------------	------------------	------------------------

Griechische Formelzeichen

α	° ; rad	Winkel
η	–	Wirkungsgrad
ρ	kg/m ³	Dichte
$\eta_{Getr.}$	–	Getriebewirkungsgrad

Weitere Indices und Abkürzungen

AC	Alternating Current
BEV	Battery Electric Vehicle
CBG	Compressed Bio Gas
CH ₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DC	Direct Current
DIN	Deutsches Institut für Normung
DME	Dimethylether
EM	Elektromotor
EN	Europäische Norm
ERMES	European Research for Mobile Emission Sources
EU	Europäische Union
FAME	Fatty Acid Methyl Esther
FC	Fuel Cell
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FT	Fischer Tropsch
GTL	Gas-to-Liquid

GWh	Gigawattstunde
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils
ICE	Internal Combustion Engine
KFZ	Kraftfahrzeug
kWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Analysis
LNG	Liquefied Natural Gas
MJ	Megajoule
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NG	Natural Gas
NO _x	Stickoxide
ÖNORM	Österreichische Norm
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell,
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PHEV	Plug-in Electric Vehicle
PSM	permanenterregte Synchronmaschine
RDE	Real Driving Emissions
RWC	Real World Cycle
SOC	State Of Charge
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-Wheel
VKM	Verbrennungskraftmotor
WLTC	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Markus Grössing

Graz, Datum

Zusammenfassung

Diese Arbeit soll einen Überblick über verschiedene PKW-Antriebskonzepte, in Bezug auf die Vermeidung von Treibhausgasen, geben. Durch die durchgeführte Lebenszyklusanalyse werden Potentiale durch Einsatz alternativer Kraftstoffe und verschiedener Antriebskonzepte aufgezeigt. Durch den direkten Vergleich kann somit das effizienteste Konzept leicht ermittelt werden.

Zur Durchführung einer LCA werden bestimmte Informationen benötigt. Der erste Schritt in dieser Arbeit ist die Bewertung von unterschiedlichen Kraftstoffen. In dieser sogenannten Well-to-Tank-Betrachtung werden alle vorgelagerten Treibhausgasemissionen, die durch die Bereitstellung des Kraftstoffes entstehen, berücksichtigt. Auch die CO₂-Emissionen der Strombereitstellung und Ladeverluste vom Batteriesystem werden berücksichtigt.

Der nächste Schritt ist eine Tank-to-Wheel-Analyse. Durch diese Bewertung wird der benötigte Kraftstoffverbrauch bzw. Energieverbrauch ermittelt. In dieser Arbeit werden hierfür Durchschnittsfahrzeuge, die jedes Fahrzeugkonzept entsprechend abbilden, mittels einer Längsdynamik-Simulationssoftware simuliert. Um die Simulationsergebnisse des Elektrofahrzeugs zu validieren, wurden außerdem Messungen an einem, dem Durchschnittselektrofahrzeug sehr ähnlichen PKW, durchgeführt. Bei den Messungen wurde der benötigte Energieaufwand zur Bewältigung verschiedener Fahrzyklen ermittelt und Verluste die beim Aufladen des Elektrofahrzeugs entstehen.

Um alle entstehenden CO₂-Emissionen über einen definierten Lebenszyklus des entsprechenden Fahrzeugkonzepts schlussendlich zu bewerten, werden im abschließenden Schritt Fahrzeugherstellung, Wartung, Entsorgung und Infrastrukturbereitstellung auf Basis verschiedener Datenquellen berücksichtigt. Bei elektrifizierten Antrieben sowie FCEV-Konzepten entstehen durch die Herstellung der Batterie und Brennstoffzellen weitere Treibhausgasemissionen.

Abschließend werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse präsentiert. Durch Darstellung der äquivalenten CO₂-Gesamtemissionen in Blockdiagrammen lässt sich der Ausstoß an Treibhausgasen der verschiedenen Antriebskonzepte über einen Lebenszyklus erkennen.

Abstract

This thesis aims to give an overview of different passenger car concepts regarding the reduction of greenhouse gas emissions. A life cycle analysis illustrates the potentials of alternative drivetrains and different drive concepts. The direct comparison provides the possibility to identify the most efficient concept.

To perform an LCA, certain information is needed. The first step in this work is the evaluation of different fuels. In this so-called "well-to-tank" analysis, all greenhouse gas emissions resulting from the provision of the fuel are taken into account. The CO₂ emissions of electricity supply and charging losses of the battery system are also taken into account.

The next step is a "tank-to-wheel analysis". This evaluation determines the required fuel consumption or energy consumption. In this thesis, average vehicles, which reflect various available vehicle concepts, are simulated using a longitudinal-dynamics-simulation-software. In order to validate the simulation results of the electric vehicle, measurements were also carried out on a car that was very similar to the average electric vehicle. In the measurements, the energy required to cope with various driving cycles was determined and losses incurred when charging the electric vehicle.

To evaluate all CO₂ emissions over a defined lifecycle of the car concepts, vehicle production, maintenance, disposal and infrastructure provisioning based on various data sources are taken into account in the final step. In the case of electrified vehicles and FCEV concepts, the production of the battery and fuel cells will generate further greenhouse gas emissions. These additional emissions are also taken into account.

Finally, the results of the life cycle analysis are presented, by showing the total CO₂ emissions in block diagrams. In these Graphics, the effects and ratios of the different GHG-amounts can be easily recognized.

1 Einleitung

„Fast nie kommt der Mensch aus Vernunft zur Vernunft“.

Charles de Montesquieu

Durch den Ausstoß von Treibhausgasen und Schadstoffen ist der Verkehr mitverantwortlich an der laufenden Klimaveränderung. Das sukzessiv steigende Verkehrsaufkommen, steht der Forderung nach Emissionsminderung, die durch den technischen Fortschritt gefordert wird, gegenüber. Seit 1990 stieg die Emission an Treibhausgasen in Österreich um ca. 67 % an. Jährlich steigt der Ausstoß an Klimagasen im Verkehrssektor um etwa 4 %. In der Abbildung 1-1 ist der Anstieg von 1990 bis 2016 dargestellt. [18][41]

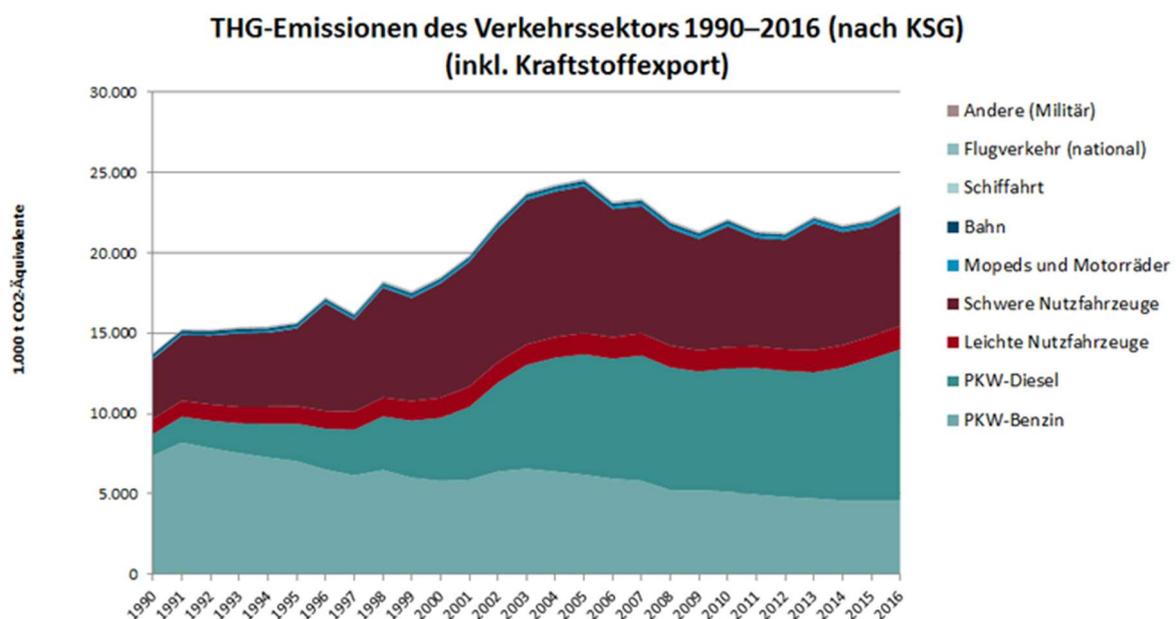


Abbildung 1-1: Treibhausgaszunahme von 1990 bis 2016 [41]

Es muss sich demnach etwas tun, wenn geforderte Klimaziele zur Reduktion von Treibhausgasen eingehalten werden sollen. Dem Trend zu sparsameren und klimafreundlichen Fahrzeugen, steht aber ein gegensätzlicher Trend gegenüber. Neben den oft überdimensionierten Premium-Klassefahrzeugen, erfreuen sich Kunden an geländegängigen, allradbetriebenen SUV-Fahrzeugen, die teilweise in der Realität 15 Liter Benzin auf 100 km verbrauchen. Im Vergleich dazu lässt sich mit einem Kompaktklasse-Fahrzeug mit 100 kW Leistung eine Strecke mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 4 Liter auf 100 km bewältigen. Alternativ dazu, gibt es weitere Bestrebungen den Verkehr durch Elektrifizierung des Antriebsstranges umweltfreundlicher zu gestalten. Hier stellt sich allerdings die Frage, woher die elektrische Energie zum Fahren kommt und wie sehr diese mit Emissionen vorbelastet ist. Auch Entwicklungen in Bezug auf Brennstoffzellenfahrzeuge, die als Energieträger Wasserstoff verwenden, stellen eine hoffnungsvolle Alternative dar. Allerdings muss auch hier hinterfragt werden, woher der Wasserstoff stammt und wieviel vorgelagerte Emissionen bei der Erzeugung entstehen. [39] [40]

Wenn Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgase im Verkehrssektor angestrebt werden sollen, entstehen dadurch auch erhebliche Kosten. Darum ist es umso wichtiger, die Problematik hinter jeder Maßnahme zu verstehen. Die Erfolge einer eingeführten Maßnahme sollten über ihre Wirksamkeit ständig überprüft werden, um in Zweifelsfall gegensteuern zu können. Das würde den Idealfall darstellen. [18]

In dieser Arbeit werden Ergebnisse präsentiert, die eine Entscheidungshilfe darstellen, ob und inwiefern sich die Einführung neuer Antriebskonzepte und der Einsatz von alternativen Kraftstoffen lohnen würden. Dies geschieht über eine Lebenszyklusanalyse, die ein durchschnittliches Fahrzeugleben in Österreich, in Bezug auf Treibhausgase, bewertet. Berücksichtigung finden klassische Antriebskonzepte auf Benzin- und Dieselmotorbasis, welche zusätzlich mit alternativen Kraftstoffen simuliert wurden.

Durch die immer fortschreitende Elektrifizierung des Antriebsstranges ist es verbindlich, Hybridkonzepte als Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen durch die selbe Analyse zu bewerten. Um mögliche Potentiale durch Verwendung unterschiedlicher Kraftstoffe im Hybridfahrzeug aufzuzeigen, kommen auch hier alle berücksichtigten Alternativen zur Anwendung.

Natürlich darf in dieser Bewertung das oftmals kontrovers diskutierte Elektroauto nicht fehlen. Die erhaltenen Ergebnisse eines durchschnittlichen E-Fahrzeuges wurden durch Messungen validiert. Aufgezeigt wird hier auch der Einfluss der Strombereitstellung, der einen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb solcher Konzepte hat. Die Bewertung des Lebenszyklus eines Elektroautos ist wesentlich, wenn zukünftige Maßnahmen zur nachhaltigen Treibhausgasvermeidung verfolgt werden sollen.

Zu guter Letzt wird auch das in Österreich weniger gängige Brennstoffzellenfahrzeug über einen Lebenszyklus bewertet. Den vielen Vorteilen dieses Konzeptes, wie etwa die Tatsache, dass durch Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie kein CO₂ entsteht, stehen Nachteile wie fehlende Infrastruktur und Kosten gegenüber. Auch hier ist es notwendig die Gesamtemission des Fahrzeugs über einen Lebenszyklus zu ermitteln, um mögliche Potentiale zu erkennen.

2 Well-to-Wheel

Um konventionelle und alternative Antriebskonzepte sinnvoll bewerten zu können, bedarf es einer allumfassenden Analyse von der Gewinnung, Herstellung, Umwandlung und Verteilung eines bestimmten Kraftstoffes bis hin zur Verwendung im Fahrzeug als Energieträger. [1]

Im Fokus stehen dabei indirekte und direkte Emissionen über den Pfad der Bereitstellung eines Kraftstoffes bis zur Verwendung als Energieträger im Fahrzeug. Aus aktueller Sicht sind folgende Emissionen von besonderer Bedeutung:

- CO₂
- CH₄
- N₂O

Für diese Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf die entstanden äquivalenten CO₂-Emissionen gelegt. In der nachfolgenden Abbildung 2-1 sind die wichtigsten Stationen eines WTW-Prozesses, welcher sich in die zwei Teilprozesse Well-to-Tank sowie Tank-to-Wheel gliedert, dargestellt. [1]

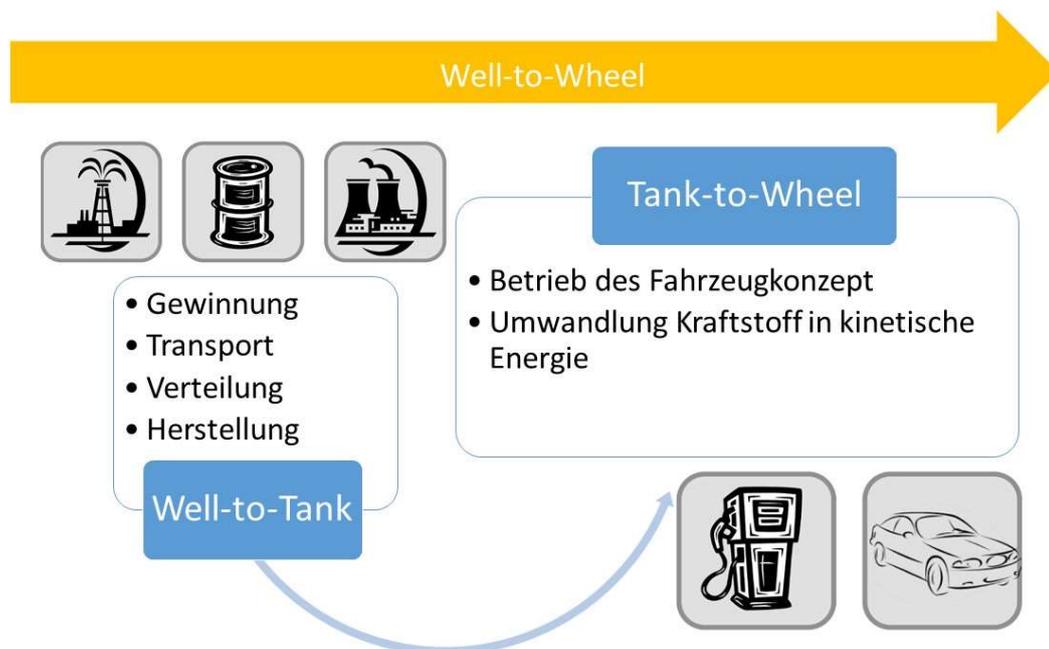


Abbildung 2-1: Prinzip der Well-to-Wheel-Betrachtung [2]

2.1 Well-to-Tank

Der WTT-Teilprozess berücksichtigt alle Emissionen, beginnend von der Gewinnung, über die Weiterverarbeitung, Aufbereitung, Herstellung, Verteilung, bis hin zum Transport zum Absatzmarkt. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Kraftstoffen, Herstellungsvarianten und Transportmöglichkeiten gestaltet sich eine Erhebung des exakten Ausstoßes an Treibhausgasen und Schadstoffen außerordentlich schwierig. Von essentieller Bedeutung ist daher, die genaue Erfassung der einzelnen Abschnitte, welche beim WTT Prozess durchlaufen werden. In Abbildung 2-2 ist ein beispielhafter Pfad, der bei der Bereitstellung eines Kraftstoffes durchlaufen wird, dargestellt. [1]

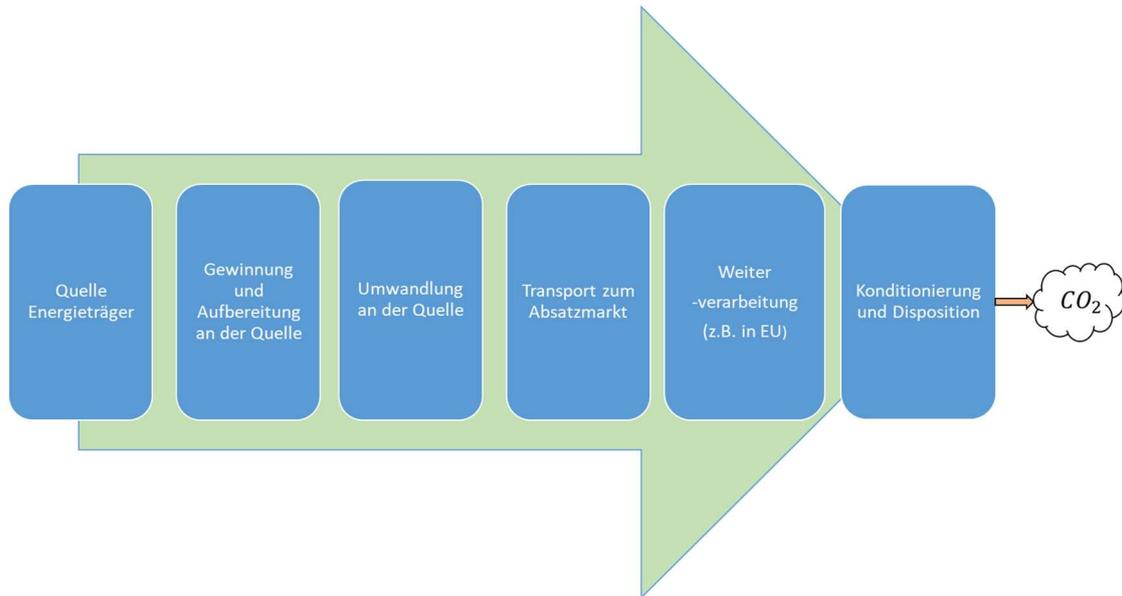


Abbildung 2-2: Beispielhafter Well-to-Tank-Pfad [3]

2.2 Tank-to-Wheel

Die Emissionen, welche bei der Umwandlung der chemischen gebundenen Energie des Kraftstoffes in Bewegungsenergie des Fahrzeugs entstehen, werden durch den TTW-Teilprozess beschrieben. Für die Bewertung dieses Abschnittes werden Informationen über den Kraftstoffverbrauch des jeweiligen Fahrzeugkonzepts benötigt. Es ergeben sich, bedingt durch die zahlreichen Antriebstechnologien und deren Wirkungsgrade bei der Umwandlung des Energieträgers, unterschiedlichste Ergebnisse. Abbildung 2-3 zeigt schemenhaft den Prozess, der bei TTW durchlaufen wird. [1]

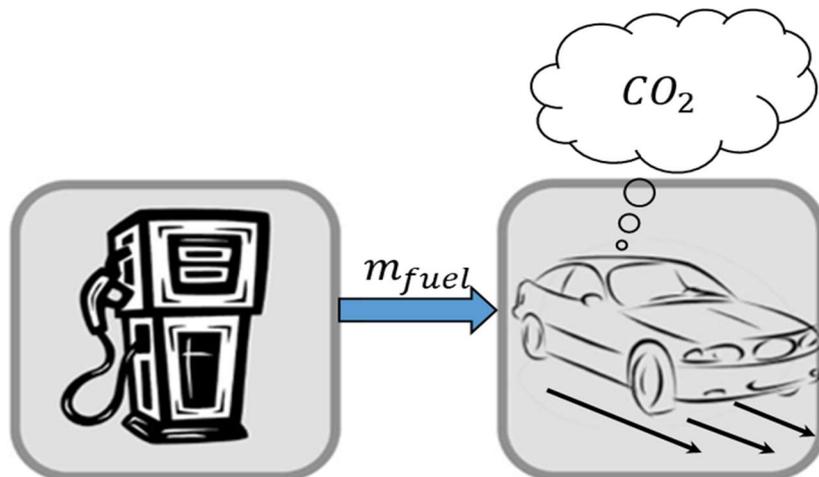


Abbildung 2-3: Prinzip des Tank-to-Wheel-Teilprozess [2]

2.3 Well-to-Tank Bewertung von Kraftstoffen

Kraftstoffe dienen als Energieträger und stammen aus einer Art Primärenergie. Generell können Kraftstoffe durch unterschiedliche Primärenergiequellen entstehen.

Eine der bekanntesten Formen sind Kohlenwasserstoffe, welche aus fossiler Natur stammen, wie es z.B. bei Benzin und Diesel der Fall ist. Solarenergie fungiert bei der Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse als primäre Energiequelle.

Zur Bewertung konventioneller und alternativer Treibstoffe werden in den folgenden Abschnitten der Energieaufwand bei der Herstellung des jeweiligen Kraftstoffes und die dabei entstehenden Treibhausgasemissionen bilanziert. Es werden verschiedene Pfade berücksichtigt, die bei der Herstellung, Weiterverarbeitung und Verteilung durchlaufen werden.

Nicht berücksichtigt werden der Energieaufwand und Emissionen, welche bei der Herstellung von Produktionsanlagen und Transporteinrichtungen entstehen. Gründe dafür sind, dass einerseits die verfügbaren Daten mit großen Unsicherheiten belastet sind und andererseits der Einfluss auf den gesamten WTT-Pfad gering ist. [3]

2.4 Well-to-Tank-Pfade

Es werden existierende und potentielle Transportwege herangezogen, welche mit herkömmlichen und zukünftigen Transportmitteln zurückgelegt werden. Jeder Kraftstoff kann aus einer oder aus mehreren Ressourcen hergestellt werden. Über den gesamten Prozess wird auch der Einfluss von Zwischenprodukten und Nebenerzeugnissen berücksichtigt. Die Kombination der sukzessiven Schritte, die nötig sind um Kraftstoffe aus einer Ressource herzustellen und für Fahrzeuge bereitzustellen, ist als WTT-Pfad definiert. [3]

Die Teilschritte, mit denen die unterschiedlichen WTT-Pfade beschrieben werden, hängen von den Herstellungsarten ab. Um die verschiedenen Schritte bei der Produktion der Kraftstoffe miteinander vergleichen zu können, werden diese in 5 Phasen gegliedert. [3]

Produktion und Konditionierung an der Quelle: Beschreibt alle Schritte, die nötig sind, um den Energieträger zu extrahieren, aufzufangen oder zu kultivieren. Die gewonnenen Rohkraftstoffe benötigen außerdem weitere Aufbereitungsschritte, um für den konventionellen Transport geeignet zu sein. [3]

Umwandlung an der Quelle: Wird für jene Treibstoffe berücksichtigt, bei denen an oder nahe der Rohstoffquelle industrielle Aufbereitungsprozesse stattfinden. Ein Beispiel dafür sind GTL-Anlagen. [3]

Transport nach Europa: Bei Energieträgern, die außerhalb der EU hergestellt und importiert werden. [3]

Umwandlung in Europa: Kommt bei Rohkraftstoffen zu tragen, die für die Verwendung weiter aufbereitet werden, um geforderte Treibstoffeigenschaften zu erreichen. Dazu zählen u.a. Raffination von Erdöl oder Reformationsprozesse zu Herstellung von Wasserstoff. [3]

Konditionierung und Vertrieb: Beinhaltet jene Schritte, die für eine konventionelle Nutzung nötig sind. In diese Kategorie fallen u.a. der Transport zum Absatzmarkt, sowie die Aufbereitung wie z.B. Komprimierung bei gasförmigen Kraftstoffen (CNG). [3]

2.5 Einfluss von Nebenprodukten

Bei der Herstellung der gewünschten Kraftstoffe entsteht nicht immer ausschließlich das gewünschte Produkt, sondern auch Nebenprodukte. Es gibt verschiedene Ansätze, wie solche zusätzlichen Produkte gewertet werden sollen.

Die Methode, die hier Berücksichtigung findet, setzt sich wie folgt zusammen:

- Der gesamte Energieaufwand und Emissionsausstoß wird dem gewünschten Produkt zugeteilt.
- Durch das entstandene Nebenprodukt werden Energieaufwand und Emissionen, die bei der Herstellung eines entsprechenden Stoffes anfallen würden, eingespart und stellen somit ein „Guthaben“ in Bezug auf Aufwand und Emissionen dar.

Ein Beispiel für die oben genannte Methode ist die Herstellung von Bio-Diesel aus Ölsaaten. Hierbei entstehen als Nebenprodukt proteinreiche Rückstände, welche beim Pressvorgang übrigbleiben. Die Rückstände finden als Tierfutter Verwendung und verringern somit den Import von z.B. Soja in die EU. [3]

3 Treibhausgasemissionen konventioneller Kraftstoffe

In den folgenden Abschnitten werden die $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Emissionen, welche beim Gesamtprozess der Kraftstoffherstellung anfallen, mit den im vorigen Kapitel beschriebenen Randbedingungen dargestellt. Die Ergebnisse sind mit der Einheit $\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}_{\text{fuel}}$ dargestellt. Die $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Emissionen beziehen sich auf den Energiegehalt (MJ_{fuel}), der durch den Heizwert H_U des fertigen Kraftstoffes gegeben ist. Dabei inkludieren die äquivalenten CO_2 -Emissionen die Treibhausgase CH_4 sowie N_2O mit den jeweiligen Treibhauskoeffizienten, die in der Tabelle 3-1 dargestellt sind.

Der Ausstoß an CO_2 durch die Verbrennung des Kraftstoffes wird mit vollständiger Verbrennung berücksichtigt. Anzumerken ist, dass bei biogenen Kraftstoffen die CO_2 -Emissionen, welche durch die Verbrennung entstehen, durch die Aufnahme von CO_2 während des Wachstums der Pflanzen ausgeglichen sind. Im Gesamtprozess schlägt sich somit bei biogenen Kraftstoffen der WTT-Anteil der CO_2 -Emissionen, die CH_4 - und N_2O -Emissionen durch Verbrennung, nieder.[3]

Tabelle 3-1: Treibhausgasfaktoren für CO_2 , CH_4 und N_2O [3]

Treibhausgas:	$\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{gGHG}$
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

3.1 Ottokraftstoffe

Die am Markt üblichen Kraftstoffe und deren Alternativen für Fahrzeuge mit Ottomotoren werden im nachfolgenden in Abbildung 3-1 dargestellt. Berücksichtigt werden verschiedene WTT-Pfade der jeweiligen Energieträger, welche in den oben genannten 5 Phasen zusammengefasst werden, um die Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten.

Die Abweichungen, die in Abbildung 3-1 mit Fehlerindikatoren dargestellt sind, beziehen sich auf den maximalen und minimalen Ausstoß an $\text{CO}_2\text{-eq}$ bei dem entsprechenden WTT-Pfad. Die farbigen Balken repräsentieren den durchschnittlichen Kraftstoff, der über die berücksichtigten Varianten arithmetisch gemittelt wird. Die Herleitung der Werte für die gezeigten Ottokraftstoffe werden in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.5 beschrieben.

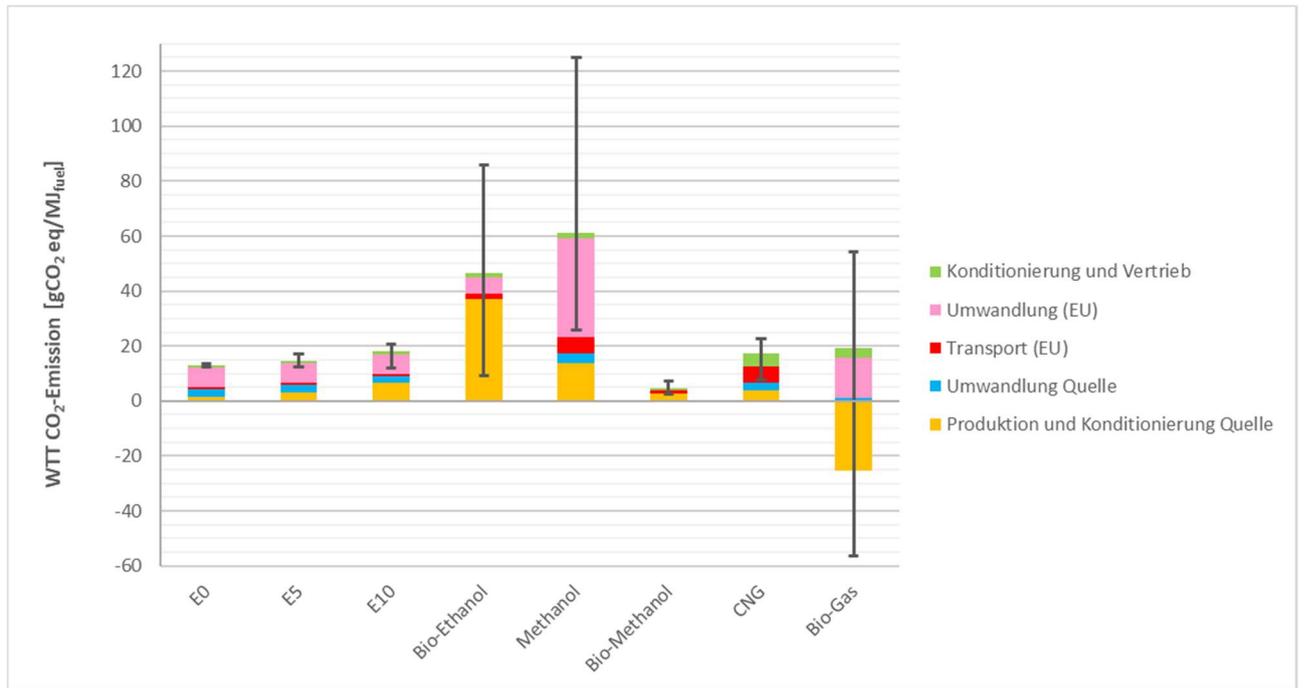


Abbildung 3-1: WTT-Treibhausgasemissionen von Ottokraftstoffen [3]

Bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Substanzen entsteht unweigerlich CO₂. Die CO₂-Emissionen die bei vollständiger Verbrennung von 1 MJ Kraftstoff entstehen, sind in Abbildung 3-2 dargestellt. Die Berechnung erfolgt anhand der Formel (3-1). Die molaren Massen sowie die Heizwerte sind im Anhang beigefügt.

$$CO_{2\text{spez}} = \frac{C}{100} * \frac{M_{CO_2}}{M_C} * \frac{1}{H_u} \quad (3-1)$$

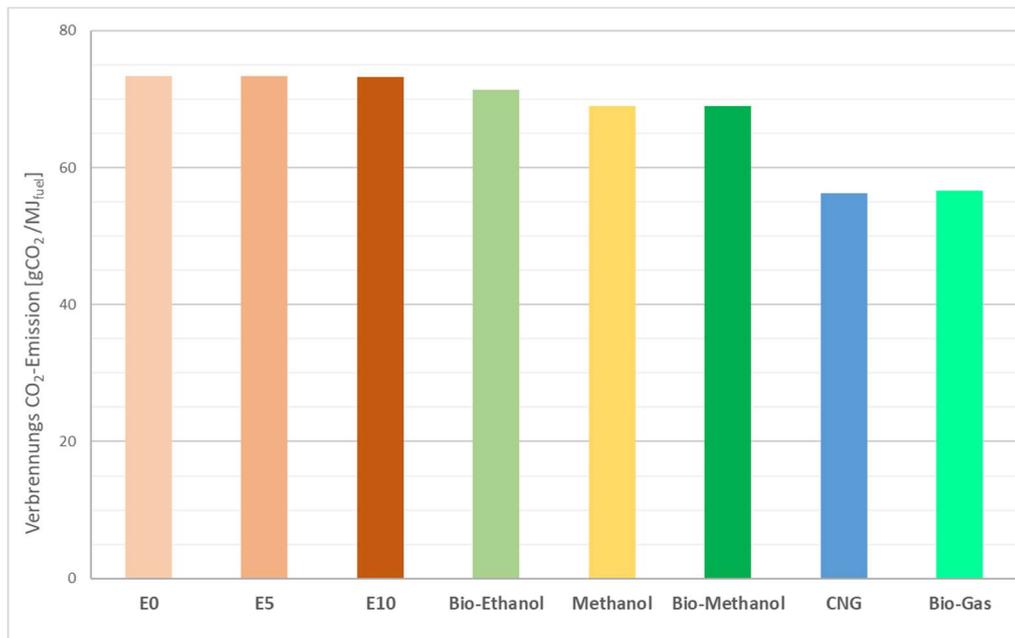


Abbildung 3-2: CO₂-Emission bei vollständiger Verbrennung von Ottokraftstoffen [3]

In der Gesamtbetrachtung sind die $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Emissionen aus WTT und vollständiger Verbrennung zusammengefasst. Bei biogenen Kraftstoffen heben sich die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen mit jenen CO_2 -Emissionen auf, welche beim Wachstum der Nutzpflanzen absorbiert werden. Abbildung 3-3 zeigt die gesamten Treibhausgasemissionen aus WTT und Verbrennung von Ottokraftstoffen. Die Fehlerindikatoren beziehen sich auf die unterschiedlichen Herstellungsvarianten und Pfade im WTT-Prozess.

Bei Bio-Gas, welches beispielsweise aus Gülle produziert wird, kann der Ausstoß negativ werden. Begründet ist dies durch eine Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Bei der Lagerung von Gülle in Gruben für landwirtschaftliche Zwecke entstehen durch enthaltene Bakterien Methan, Kohlenstoffdioxid, Ammoniak und Schwefelwasserstoffe. Durch Umwandlung der Gülle in Kraftstoff wird deren Freisetzung vermieden, was sich in einem „ CO_2 -Bonus“ niederschlägt. [5]

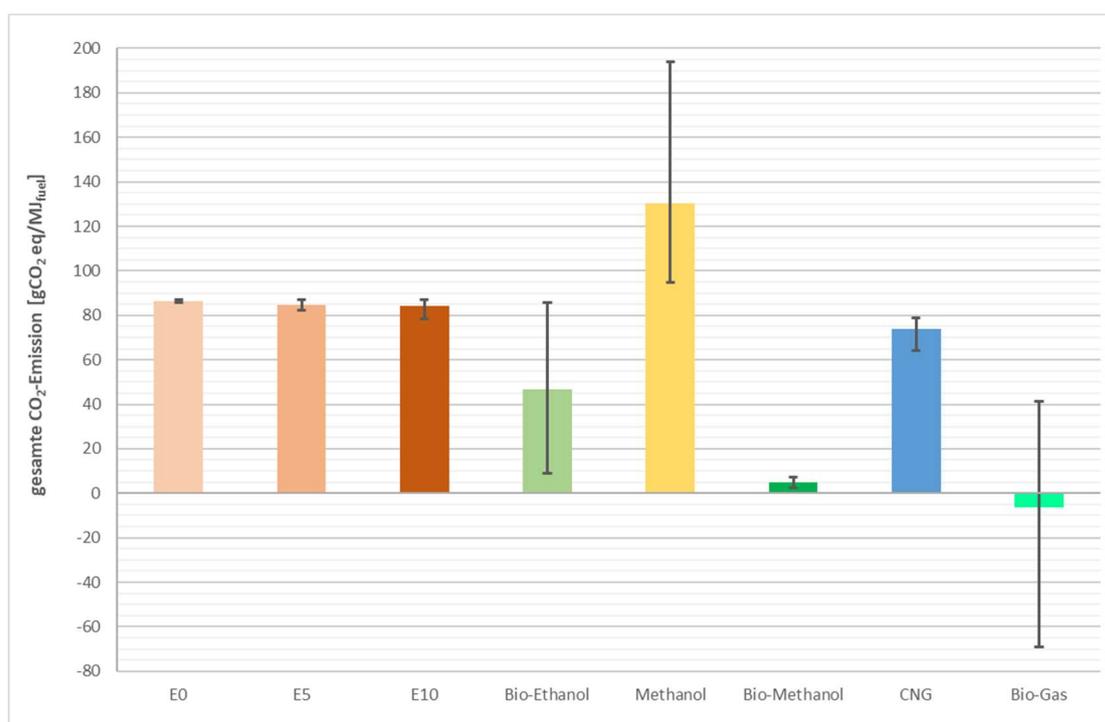


Abbildung 3-3: gesamte $\text{CO}_2\text{-eq}$ Emission von Ottokraftstoffen aus WTT und Verbrennung [3]

3.1.1 Benzin E0, E5, E10

Die konventionell auf Benzin basierenden Treibstoffe unterscheiden sich durch die Beimischung von Ethanol. Erhältlich an handelsüblichen Tankstellen sind E0 mit 0 %, E5 mit 5 % und E10 mit 10 % Ethanolanteil. In der WTT-Betrachtung werden die Prozentanteile des beigetzten Ethanols mit dem entsprechenden Anteil berücksichtigt. Für die Herstellung von Ethanol existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten, die im nächsten Unterpunkt genauer erläutert werden. Die Herstellung von Benzin erfolgt in Raffinerien durch Destillation, Konversion und Nachbehandlungen aus Rohöl. [4].

Der Fokus für die Bereitstellung von Rohöl liegt im europäischen Raum. Abbildung 3-4 zeigt die Anteile der Rohölproduktion von 2000 bis 2025 aus den Gebieten, die für Europa berücksichtigt werden. [3]

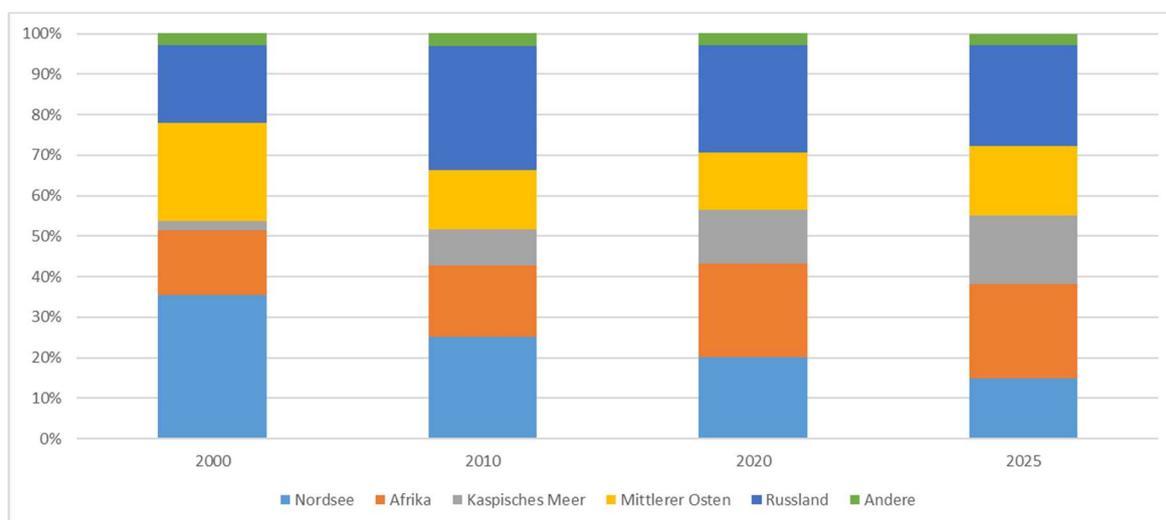


Abbildung 3-4: Anteile der Rohölproduktion in Europa [3]

Für die Rohölproduktion, unter Einbeziehung von Flüchtigkeitsverlusten und Abfackeln von Restgasen, welche bei der Förderung entstehen, beläuft sich der $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Ausstoß auf rund $4,3 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}_{\text{fuel}}$. Der Transport im europäischen Raum schlägt sich mit $0,8 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}_{\text{fuel}}$ zu Buche. Mit $7 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}_{\text{fuel}}$ beinhaltet der Raffinationsprozess mit Abstand den größten Treibhausgasausstoß. Schlussendlich kommen noch $1 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}_{\text{fuel}}$ durch die Konditionierung und Verteilung des fertigen Kraftstoffes hinzu.

In den folgenden Tabellen wird die Summe der WTT- $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Emission aus den 5 beschriebenen Pfaden gebildet. Anschließend wird der Anteil an CO_2 durch vollständige Verbrennung des jeweiligen Kraftstoffes berücksichtigt. Die Gesamtemission ergibt sich durch Addition von WTT- und Verbrennungsanteil.

In der Tabelle 3-2 sind die gesamte $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Bilanzen und die Teilergebnisse für Benzin E0 nach den WTT-Phasen aufgelistet. [3]

Tabelle 3-2: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von $\text{CO}_2\text{-eq}$ bei E0 [3]

	$\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}_{\text{fuel}}$
Produktion und Konditionierung an der Quelle	1,5
Umwandlung an der Quelle	2,8
Transport in Europa	0,8
Umwandlung in Europa	7,0
Konditionierung und Vertrieb	1,0
Σ WTT-Benzin E0	13,1
+ Verbrennung Benzin E0	73,4
= Gesamt Benzin E0	86,5

Für Benzin E5 und E10 werden 5 % bzw. 10 % Ethanolanteil berücksichtigt. Anzumerken ist, dass für die Gewichtung der Beimischung die durchschnittlichen WTT-Emissionen von den Ethanolherstellungsarten herangezogen werden. Die genaue Aufschlüsselung der WTT-Treibhausgasemissionen von Ethanol folgt im Kapitel 3.1.2. Die Tabelle 3-3 zeigt die Ergebnisse für Benzin E5.

Tabelle 3-3: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} bei E5 [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	3,3
Umwandlung an der Quelle	2,6
Transport in Europa	0,9
Umwandlung in Europa	6,9
Konditionierung und Vertrieb	1,0
Σ WTT-Benzin E5	14,7
+ Verbrennung Benzin E5	73,3
-Verbrennungsanteil des Bio-Ethanols	3,6
= Gesamt Benzin E5	84,4

Der Verbrennungsanteil des Bio-Ethanols wird in der Bilanz vom Verbrennungsanteil des Kraftstoffes subtrahiert. Die Ergebnisse in Bezug auf WTT-CO_{2-eq}-Ausstoß für Benzin E10 sind in Tabelle 3-4 dargestellt. Die im oberen Abschnitt genannten Spezifikationen bezüglich der Berücksichtigung des Ethanolanteils gelten auch hier.

Tabelle 3-4: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} bei E10 [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	6,7
Umwandlung an der Quelle	2,3
Transport in Europa	0,9
Umwandlung in Europa	6,9
Konditionierung und Vertrieb	1,1
Σ WTT Benzin-E10	17,9
+ Verbrennung Benzin E10	73,2
- Verbrennungsanteil des Bio-Ethanols	7,1
Gesamt Benzin E10	84,0

3.1.2 Ethanol

Die Herstellung von Ethanol beruht auf der Vergärung von Nutzpflanzen. Für den europäischen Markt werden hauptsächlich Zuckerrüben sowie Weizen zur Herstellung verwendet. Es existieren für die erwähnten Nutzpflanzen eine Reihe von WTT-Pfaden, welche in Bezug auf die Energiebereitstellung zur Herstellung und den Einsatz von Nebenprodukten unterschiedlich sind. Zusätzlich zu den häufigsten verwendeten Pflanzen werden Gerste, Roggen und Mais aus Europa zur Gewinnung berücksichtigt. Um Vergleiche mit Ethanol aus anderer Herstellung ziehen zu können, wird darüber hinaus die Herstellung aus brasilianischem Zuckerrohr und amerikanischem Mais sowie deren Export nach Europa herangezogen. [3]

Zukünftige Herstellungsprozesse, welche auf Hydrolyse und Fermentation von Zellulose basieren, werden durch Ethanol, gewonnen aus Weizenstroh und Holzabfällen, berücksichtigt. In der folgenden Tabelle 3-5 sind die Variationen der WTT-Emissionen für Ethanol dargestellt. Für weitere Informationen zur genauen Aufschlüsselung der WTT-Pfade sei auf die Studie [3] verwiesen.

Tabelle 3-5: WTT-CO_{2-eq} Emissionen von Ethanolherstellungsarten [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
Ethanol 1	Zuckerrüben EU	40,2
Ethanol 2	Zuckerrüben EU	26,9
Ethanol 3	Zuckerrüben EU	17,6
Ethanol 4	Weizen EU	69,3
Ethanol 5	Weizen EU	58,5
Ethanol 6	Weizen EU	64,6
Ethanol 7	Weizen EU	54,1
Ethanol 8	Weizen EU	85,9
Ethanol 9	Weizen EU	75,4
Ethanol 10	Weizen EU	32,9
Ethanol 11	Weizen EU	22,4
Ethanol 12	Weizen EU	34,9
Ethanol 13	Gerste und Roggen EU	76,0
Ethanol 14	Mais EU	80,3
Ethanol 15	Mais USA	68,8
Ethanol 16	Zuckerrohr Brasilien	24,8
Ethanol 17	Holz gezüchtet	22,9
Ethanol 18	Holzabfälle	19,5
Ethanol 19	Weizenstroh	9,1

Ethanol, hergestellt aus gleichen Ausgangsprodukten (Weizen EU, Zuckerrüben EU), berücksichtigen unterschiedliche Herkunftsarten der benötigten Prozessenergien (Elektrizität, Prozesswärme) zur Herstellung. Für genauere Informationen über die Herstellung wird hier auf Studie [3] verwiesen.

Die CO_{2-eq}-Emissionen die sich durch den arithmetischen Mittelwert über die verschiedenen Herstellungsvarianten in Tabelle 3-5 von Ethanol ergeben, sind in Tabelle 3-6 dargestellt. Die Summe aus Herstellungspfaden ergibt die gesamten WTT-Emissionen. Der CO₂-Ausstoß durch Verbrennung und die Aufnahme von CO₂ beim Wachstum der Pflanzen wird anschließend berücksichtigt.

Tabelle 3-6: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Ethanol [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	37,1
Umwandlung an der Quelle	0,0
Transport in Europa	1,8
Umwandlung in Europa	6,0
Konditionierung und Vertrieb	1,7
∑ WTT-Ethanol	46,6
+Verbrennung Ethanol	71,4
- CO ₂ -Aufnahme der Pflanzen bei Herstellung	71,4
= Gesamt Ethanol	46,6

3.1.3 Methanol

Für die Herstellung von Methanol werden Synthesegase verwendet, die aus Dampfreformierung oder partieller Oxidation von Kohlenwasserstoffen entstehen. Eine weitere Möglichkeit zur Synthesegaserzeugung ist die Vergasung von Kohle. Bei der üblichen Erzeugung wird Methan durch Dampfreformierung in Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff umgewandelt. Methanol wird anschließend im Katalyseprozess aus Synthesegas CO und Wasserstoff H₂ gebildet. [6] [3]

Der Vollständigkeit halber wird hier auch die Herstellung von Methanol aus Holz angeführt. Die Ausbeute beim sogenannten Bio-Methanol ist im Vergleich zu großtechnischen Anwendungen, wie der Dampfreformierung, bescheiden. Tabelle 3-7 beinhaltet die WTT-CO_{2-eq}-Emissionen von Methanol. Bei den Herstellungsarten aus NG, werden unterschiedliche Quellen von NG berücksichtigt. [6] [3]

Tabelle 3-7: WTT-CO_{2-eq} Emissionen von Methanolherstellungsarten [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
Methanol 1	NG	33,1
Methanol 2	NG	25,8
Methanol 3	Kohle	124,8
Bio-Methanol 1	Holz gezüchtet	7,2
Bio-Methanol 2	Abfallholz	2,5

Der CO_{2-eq}-Ausstoß, der sich durch den arithmetischen Mittelwert bei den Herstellungsvarianten von Methanol aus fossilen Primärenergieträgern wie z.B. Methan und Kohle ergibt, ist in Tabelle 3-8 zusammengefasst. Der WTT-Anteil ergibt sich aus der Summe der betrachteten Pfade. Die gesamte CO_{2-eq}-Emission ergibt sich durch Addition von WTT und der CO₂-Emissionen durch Verbrennung.

Tabelle 3-8: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Methanol [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	13,1
Umwandlung an der Quelle	3,9
Transport in Europa	6,0
Umwandlung in Europa	36,0
Konditionierung und Vertrieb	2,0
∑ WTT-Methanol	60,7
+ Verbrennung Methanol	69,0
= Gesamt Methanol	129,7

Bei der Herstellung von Bio-Ethanol aus Holz wird folgende $\text{CO}_2\text{-eq}$ über die Teilschritte, bei der Verbrennung und über den gesamten Ausstoß in der Tabelle 3-9 angeführt. Die gesamte $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Emission ergibt sich aus der Berücksichtigung der CO_2 -Emissionen durch vollständige Verbrennung und die Aufnahme von CO_2 durch das Wachstum der Pflanzen.

Tabelle 3-9: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von $\text{CO}_2\text{-eq}$ für Bio-Methanol [3]

	$\text{gCO}_2\text{-eq/MJ}_{\text{fuel}}$
Produktion und Konditionierung an der Quelle	2,8
Umwandlung an der Quelle	0,0
Transport in Europa	1,0
Umwandlung in Europa	0,0
Konditionierung und Vertrieb	1,0
Σ WTT-Bio-Methanol	4,8
+ Verbrennung Bio-Methanol	69,0
- CO_2 -Aufnahme der Pflanzen bei Herstellung	69,0
= Gesamt Bio-Methanol	4,8

3.1.4 CNG

Weltweit ist Erdgas oder NG der am häufigsten vorkommende fossile Kraftstoff. Global betrachtet, ist NG fast überall vorhanden, jedoch stammen große Teile aus Russland und dem Mittleren Osten.

Um NG von der Gewinnung aus Gasfeldern bis hin zum Absatzmarkt zu transportieren ist eine beachtliche Infrastruktur nötig. Erdgas kann gasförmig über Pipelines oder flüssig (LNG) in Tanks verteilt werden. Zur Verflüssigung stehen Anlagen oder spezielle LNG-Schiffe zur Verfügung. [3]

Da der Transport und die Kompression von NG großen Einfluss auf die vorgelagerten Emissionen haben, werden für die WTT-Betrachtung unterschiedliche Szenarien berücksichtigt. CNG, welches aus europäischen Erdgasproduktionen stammt, wird als EU-Mix berücksichtigt. Importiertes CNG wird durch Transport über Pipelines, mit 7000 km für Russland und 4000 km aus dem Mittleren Osten, berücksichtigt. Die Energie zur Kompression wird je nach Druck aus der bereitstellenden Pipeline herangezogen. Bei LNG wird zum Einem die Energie zur Verflüssigung, die Großteils aus Elektrizität stammt, und zum Anderem der Transport über Schiffe sowie LKW berücksichtigt. Unterschiede entstehen durch die Bereitstellung der Energie zur Verflüssigung sowie durch die Transportart. [3]

Die Schiefergasproduktion in Europa befindet sich noch in der Anfangsphase, wird aber aus Gründen der Vollständigkeit berücksichtigt. Der Vorteil liegt in der lokalen Produktion in Europa, wobei der Anteil des Transportweges wegfällt. [3]

Die vorgelagerten CO_2 -Emissionen aus den berücksichtigten CNG-Variationen sind in der Tabelle 3-1 aufgelistet.

Tabelle 3-10: WTT-CO_{2-eq}-Emissionen von CNG Variationen [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
CNG-EU-Mix	NG	13,0
CNG-Russland	NG	22,5
CNG-Mittlerer Osten	NG	16,0
LNG 1	NG	21,1
LNG 2	NG	17,7
LNG 4	NG	21,3
Schiefergas EU	Schiefergas	19,3

CO_{2-eq} Emissionen aus den WTT-Pfaden sowie Verbrennung und Gesamtausstoß sind in der unten angeführte Tabelle 3-11 enthalten.

Tabelle 3-11: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für CNG [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	4,0
Umwandlung an der Quelle	0,0
Transport in Europa	5,9
Umwandlung in Europa	2,7
Konditionierung und Vertrieb	4,7
∑ WTT-CNG	17,3
+ Verbrennung CNG	56,2
= Gesamt CNG	73,5

3.1.5 CBG

Biogas wird hauptsächlich aus organischen Abfällen gewonnen. Die Bestandteile des Gases sind zu großen Teilen Methan und Kohlenstoffdioxid. Je nach Herstellung sind auch geringe Spuren von Schwefelwasserstoffen, Wasserdampf, Wasserstoff und Ammoniak enthalten. Der energetische Nutzen des Biogases beruht auf den Anteil an Methan. [7]

Als Ausgangsmaterial zur Herstellung wird Biomasse herangezogen, darin enthalten sind Kohlenwasserstoffe, Fettsäuren und Proteine. Durch Fermentation der Biomasse entsteht schlussendlich Biogas mit den oben genannten Bestandteilen. [6]

Die hier berücksichtigten Herstellungsarten umfassen die für Fahrzeugantriebe relevanten Biogase. Zum einen wird hier die Gewinnung aus Abfällen sowie anfallende Biomasse aus landwirtschaftlicher Produktion berücksichtigt, und zum anderen die Erzeugung aus Biomasse die direkt zur Biogasproduktion gezüchtet wird. Letzteres Beispiel umfasst z.B. Biogas aus Mais und Gerste. [6]

In der folgenden Tabelle 3-12 werden die vorgelagerten CO_{2-eq}-Emissionen der Biogaserzeugung dargestellt. Anzumerken ist der negative Wert bei der Herstellung aus Gülle. Dieser ist dadurch erklärt, dass durch die Verwendung von Gülle als Ausgangsprodukt Treibhausgase, die durch die offene Lagerung entstehen würden, vermieden werden. Durch die Vermeidung von Treibhausgasen, entsteht somit eine „Gutschrift“ in Bezug auf WTT-CO₂-Emissionen.

Tabelle 3-12: WTT CO_{2-eq}-Emissionen von CBG Varianten [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
CBG	Abfälle	15,1
CBG	Gülle	-69,2
CBG	Gülle	-45,3
CBG	Mais	41,3
CBG	Mais/Gerste	26,8

Der arithmetische Durchschnitt über die berücksichtigten Biogasvarianten ist in Tabelle 3-13 angeführt. Der negative Wert bei der Gesamtemission begründet sich durch die oben genannten Effekte der Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Der Unterschied bei Biogas aus Gülle, resultiert durch den Einsatz von offenen bzw. geschlossenen Gärspeichersystemen.

Tabelle 3-13: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO₂ für CBG [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	-25,6
Umwandlung an der Quelle	1,1
Transport in Europa	0,0
Umwandlung in Europa	14,7
Konditionierung und Vertrieb	3,4
∑WTT-CBG	-6,4
+Verbrennung CBG	56,6
- CO ₂ -Aufnahme bei Herstellung	-56,6
= Gesamt-CBG	-6,4

3.2 Dieselkraftstoffe

Im folgenden Kapitel werden die vorgelagerten CO₂-eq-Emissionen von Dieselkraftstoffen in Bezug auf die WTT-Betrachtung angeführt. Berücksichtigt werden hier konventionelle Treibstoffe wie B0- und B7-Diesel, wie auch biogene Alternativen wie z.B. Bio-Diesel. In der Abbildung 3-5 sind die WTT-Emissionen graphisch dargestellt. Die Fehlerindikatoren beschreiben die Abweichung vom Durchschnittskraftstoff und geben den maximalen und minimalen Ausstoß an CO₂-eq der unterschiedlichen Varianten wieder. Die Herleitung der Werte ist wiederum in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

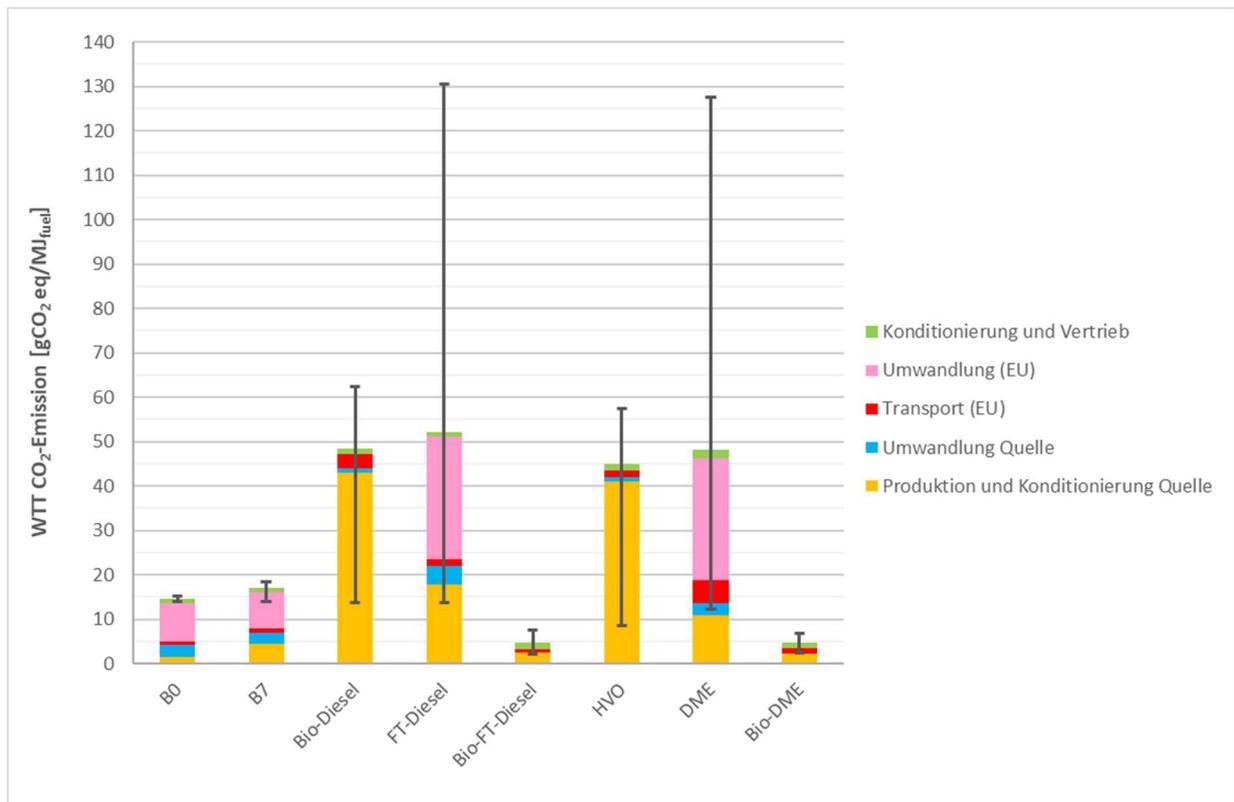


Abbildung 3-5: WTT-Treibhausgasemissionen von Dieselkraftstoffen [3]

3.2.1 Diesel B0, B7

Die Dieselherstellung beruht auf der Raffination von Rohöl. Im Kapitel 3.1.1 werden die Ausstöße von CO_{2-eq} bei der Rohölproduktion, die auch für die vorgelagerten Emissionen bei Diesel herangezogen werden können, angeführt. Bei den weiteren Pfaden ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Benzin. Unterschiede bestehen bei der Umwandlung, die hier bei Diesel im Vergleich zu Benzin höher ausfallen. Begründet ist dies durch die hohe Nachfrage an Diesel im europäischen Raum. Die Raffinerien in Europa müssen durch den hohen Dieselteil an der Fahrzeugflotte einen größeren Anteil an Diesel im Vergleich zu Benzin herstellen. Die Folgen sind im erhöhten Energieaufwand und schlussendlich durch höhere CO_{2-eq}-Emissionen bei der Umwandlung ersichtlich.

In der Tabelle 3-14 sind die CO₂-Äquivalente der WTT-Pfade für Diesel B0 aufgelistet. In den Tabellen wird der äquivalente CO₂-Ausstoß aus den WTT-Pfaden summiert. Anschließend wird das CO₂ aus der Verbrennung des Kraftstoffes berücksichtigt.[3] [8]

Als Alternative zu Diesel B0 gibt es Diesel mit einem Anteil von 7 % Bio-Diesel. Bio-Diesel wird aus Biomasse hergestellt und verringert dadurch die Gesamtemissionen an THG sowie den Aufwand fossilen an Ressourcen.

Tabelle 3-15 zeigt die WTT-Emissionen von Diesel B7. [9]

Tabelle 3-14: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Diesel B0 [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	1,5
Umwandlung an der Quelle	2,8
Transport in Europa	0,8
Umwandlung in Europa	8,6
Konditionierung und Vertrieb	1,0
∑ WTT-Diesel B0	14,7
+ Verbrennung Diesel B0	73,2
= Gesamt Diesel B0	87,9

Tabelle 3-15: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Diesel B7 [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	4,4
Umwandlung an der Quelle	2,6
Transport in Europa	1,0
Umwandlung in Europa	8,0
Konditionierung und Vertrieb	1,0
∑ WTT-Diesel B7	17,0
+ Verbrennung Diesel B7	73,4
- Verbrennungsanteil des Bio-Diesels	5,3
= Gesamt Diesel B7	85,1

3.2.2 Bio-Diesel

Bio-Diesel wird im europäischen Raum überwiegend aus Rapsöl hergestellt. Es gibt auch andere Primärenergieträger wie z.B. Sonnenblumenöl, Sojaöl und Palmöl. Berücksichtigung finden auch Bio-Dieselpunkte, die aus Speiseölabfällen und Talg hergestellt werden. Ein wesentlicher Vorteil von Bio-Dieselpunkten ist die Aufnahme von CO₂ beim Wachstum der Pflanzen. In der Gesamtbilanz schlagen sich somit nur die vorgelagerten WTT-Emissionen nieder. In der Tabelle 3-16 sind die WTT-CO_{2-eq}-Emissionen der Bio-Diesel-Varianten und deren WTT-Pfade angeführt. Die Unterschiede bei Bio-Diesel aus Raps, Soja und Palmöl ergeben sich durch die unterschiedliche Nutzung von Nebenprodukten die bei der Herstellung anfallen. Die Tabelle 3-17 gibt den arithmetischen Mittelwert der berücksichtigten Bio-Diesel-Varianten in Bezug auf die WTT-CO_{2-eq}-Emission und Verbrennung an.[3]

Tabelle 3-16: WTT-CO_{2-eq}-Emissionen von Bio-Diesel-Varianten [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
FAME 1	Raps	54,4
FAME 2	Raps	58,9
FAME 3	Raps	57,1
FAME 4	Raps	37,9
FAME 5	Raps	56,6
FAME 6	Raps	56,6
FAME 7	Sonnenblumen	45,8
FAME 8	Soja	55,2
FAME 9	Soja	59,3
FAME 10	Soja	61,0
FAME 11	Palmöl	51,1
FAME 12	Palmöl	31,1
FAME 13	Palmöl	62,3
FAME 14	Speiseöl	13,8
FAME 15	Talg	26,4

Tabelle 3-17: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Bio-Diesel [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	43,0
Umwandlung an der Quelle	1,0
Transport in Europa	3,2
Umwandlung in Europa	0,0
Konditionierung und Vertrieb	1,4
∑ WTT-Bio-Diesel	48,5
+Verbrennung Bio-Diesel	76,1
- CO ₂ -Aufnahme der Pflanzen bei Herstellung	76,1
= Gesamt Diesel Bio-Diesel	48,5

3.2.3 FT-Diesel

Die Herstellung von synthetischem Diesel umfasst einige energieaufwendige Schritte. Dazu zählen Dampfreformierung sowie partielle Oxidation mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese.

Es werden verschiedene Ausgangsprodukte zur Herstellung berücksichtigt. Die Tabelle 3-18 zeigt deutlich, welches Ausgangsprodukt zur Herstellung von sogenanntem Syndiesel von Vorteil ist. Die Gewinnung aus Kohle schneidet im Vergleich zu Erdgas und Holzprodukten am schlechtesten ab. Die Unterschiede bei den WTT-CO_{2-eq}-Emissionen bei NG und Kohle ergeben sich durch den Einsatz von CO₂-Abscheidung und –Speicherung. [3]

FT-Diesel aus Holzangangsprodukten, welche nicht aus fossilem Ursprung sind, werden hier als biogener Kraftstoff ausgezeichnet.

Tabelle 3-18: WTT-CO_{2-eq} Emissionen von FT-Diesel-Variationen [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
FT-Diesel 1	NG	23,9
FT-Diesel 2	NG	13,6
FT-Diesel 3	Kohle	130,6
FT-Diesel 4	Kohle	40,3
Bio-FT-Diesel 1	Holz gezüchtet	7,6
Bio-FT-Diesel 2	Abfallholz	2,1

In der nachfolgenden Tabelle 3-19 und Tabelle 3-20 sind die CO₂-Äquivalente der WTT-Pfade von FT-Diesel aus fossilen Primärenergieträgern und Bio-FT-Diesel aus biogenen Energieträgern dargestellt. Die Werte ergeben sich aus den arithmetischen Mittelwert der FT-Diesel-Varianten.

Tabelle 3-19: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für FT-Diesel [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	17,7
Umwandlung an der Quelle	4,4
Transport in Europa	1,4
Umwandlung in Europa	27,6
Konditionierung und Vertrieb	1,1
Σ WTT-FT-Diesel	52,1
+ Verbrennung FT-Diesel	70,8
= Gesamt Diesel FT-Diesel	122,9

Tabelle 3-20: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für FT-Bio-Diesel [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	2,6
Umwandlung an der Quelle	0,0
Transport in Europa	0,6
Umwandlung in Europa	0,0
Konditionierung und Vertrieb	1,7
∑ WTT-Bio-FT-Diesel	4,9
+ Verbrennung FT-Bio-Diesel	70,0
- CO ₂ -Aufnahme der Pflanzen bei Herstellung	70,0
= Gesamt FT-Bio-Diesel	4,9

3.2.4 HVO

Kraftstoffe aus hydrierten Pflanzenölen, oder kurz HVO, werden durch katalytische Reaktionen durch Zugabe von Wasserstoff gewonnen. Ein Vorteil liegt bei den Kraftstoffigenschaften, welche durch diese Herstellungsart gezielt eingestellt werden können.

Ein weiterer Vorteil ist die Verwendung von Biomasse zur Herstellung von HVO, die einen CO₂-Vorteil im Vergleich zu Kraftstoffen auf fossiler Basis hat. Nachfolgend sind in der Tabelle 3-21 die Unterschiede der WTT-THG-Emissionen, die durch Verwendung von unterschiedlichen Ausgangsprodukten entstehen, angeführt. Bei der Herstellung aus gleichen Ausgangsstoffen wie Raps, Sonnenblumen, Soja und Palmöl resultieren die Unterschiede in den WTT-CO_{2-eq}-Emissionen durch den unterschiedlichen Einsatz von Nebenprodukten. [3] [10]

Tabelle 3-21: WTT-CO_{2-eq} Emissionen von HVO-Variationen [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
HVO 1	Raps	56,6
HVO 2	Raps	56,9
HVO 3	Raps	56,6
HVO 4	Raps	36,7
HVO 5	Raps	37,5
HVO 6	Sonnenblumen	44,3
HVO 7	Sonnenblumen	46,1
HVO 8	Soja	55,1
HVO 9	Soja	55,1
HVO 10	Palmöl	48,4
HVO 11	Palmöl	50,9
HVO 12	Speiseöl	7,9
HVO 13	Talg	24,3

Der negative Wert bei der „Umwandlung in Europa“ in Tabelle 3-22 erklärt sich damit, dass bei der Herstellung von Pflanzenölen Nebenprodukte anfallen, die weiterverwendet werden. Ein Beispiel dafür ist, dass Rückstände der Pflanzensamen als Tierfutter oder Heizmittel verwendet werden. Durch diese Berücksichtigung ergibt sich ein energetischer Vorteil, der sich positiv auf die CO_{2-eq}-Bilanz niederschlägt. In der Tabelle 3-22 ist das arithmetische Mittel der HVO-Varianten und Verbrennung angeführt. [3]

Tabelle 3-22: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für HVO [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	41,1
Umwandlung an der Quelle	1,6
Transport in Europa	0,8
Umwandlung in Europa	-0,6
Konditionierung und Vertrieb	1,4
Σ WTT-HVO	44,3
+Verbrennung HVO	70,8
Gesamt HVO	44,3

3.2.5 DME

Zur Herstellung von DME können wiederum unterschiedliche Ausgangsstoffe herangezogen werden. Meistens wird DME aus Methanol gewonnen, welches aus synthetischen Gasen hergestellt wird. Das Synthesegas für die Methanolherstellung fällt durch Dampfreformierung von NG an. Grundsätzlich lassen sich Synthesegase aus fossilen und biogenen Kohlenstoffträgern herstellen. [3] [11]

Die Gewinnung von DME lässt sich grob in 2 Schritte unterteilen. Der erste Schritt ist die Herstellung von Synthesegas aus einem beliebigen Kohlenstoffträger mittels Dampfreformierung oder partieller Oxidation. Im zweiten Schritt wird bei der Dehydratisierung durch Wasserabspaltung Methanol zu Dimethylether umgewandelt. [3] [11]

In der Tabelle 3-23 sind die berücksichtigten Ausgangsprodukte sowie dadurch entstehende CO_{2-eq}-Emissionen angeführt. DME aus biogenen Produkten wie etwa Holz werden als Bio-DME ausgezeichnet. Die Unterschiede bei gleichen Ausgangsprodukt NG ergeben sich durch den Einsatz von CO₂-Abscheidung und –Speicherung. [3]

Tabelle 3-23: WTT-CO_{2-eq} Emissionen von DME-Varianten [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
DME 1	NG	30,8
DME 2	NG	22,0
DME 3	NG	12,2
DME 4	Kohle	127,6
Bio-DME	Holz gezüchtet	6,8
Bio-DME	Abfallholz	2,5

THG durch Bereitstellung von DME und Bio-DME, sind in den folgenden Tabellen Tabelle 3-24 und Tabelle 3-25 dargestellt. Die Werte für die WTT-Pfade ergeben sich aus den arithmetischen Mittelwert der Berücksichtigten DME-Varianten.

Tabelle 3-24: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für DME [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	11,0
Umwandlung an der Quelle	2,6
Transport in Europa	5,2
Umwandlung in Europa	27,3
Konditionierung und Vertrieb	2,0
Σ WTT-DME	48,2
+ Verbrennung DME	67,3
= Gesamt DME	115,5

Tabelle 3-25: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Bio-DME [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	2,3
Umwandlung an der Quelle	0,0
Transport in Europa	1,2
Umwandlung in Europa	0,0
Konditionierung und Vertrieb	1,1
Σ WTT-Bio-DME	4,6
+ Verbrennung Bio-DME	67,3
- CO ₂ -Aufnahme der Pflanzen bei Herstellung	-67,3
= Gesamt Bio-DME	4,6

3.3 Wasserstoff

Ein großer Vorteil von Wasserstoff ist, dass dieser aus nahezu jedem Primärenergieträger hergestellt werden kann. Die Gewinnung erfolgt über chemische Transformation, basierend auf der Abspaltung des Kohlenstoffs von Kohlenwasserstoffen oder mittels Elektrolyse durch Aufspaltung chemischer Verbindungen. [12]

Im großen Stil wird Wasserstoff aus Erdgas durch Dampfreformierung hergestellt. In der Abbildung 3-6 sind die vorgelagerten CO₂-Emissionen durch verschiedene Herstellungsverfahren ersichtlich. Die folgenden Kapitel fassen die berücksichtigten Varianten zusammen. [3] [12]

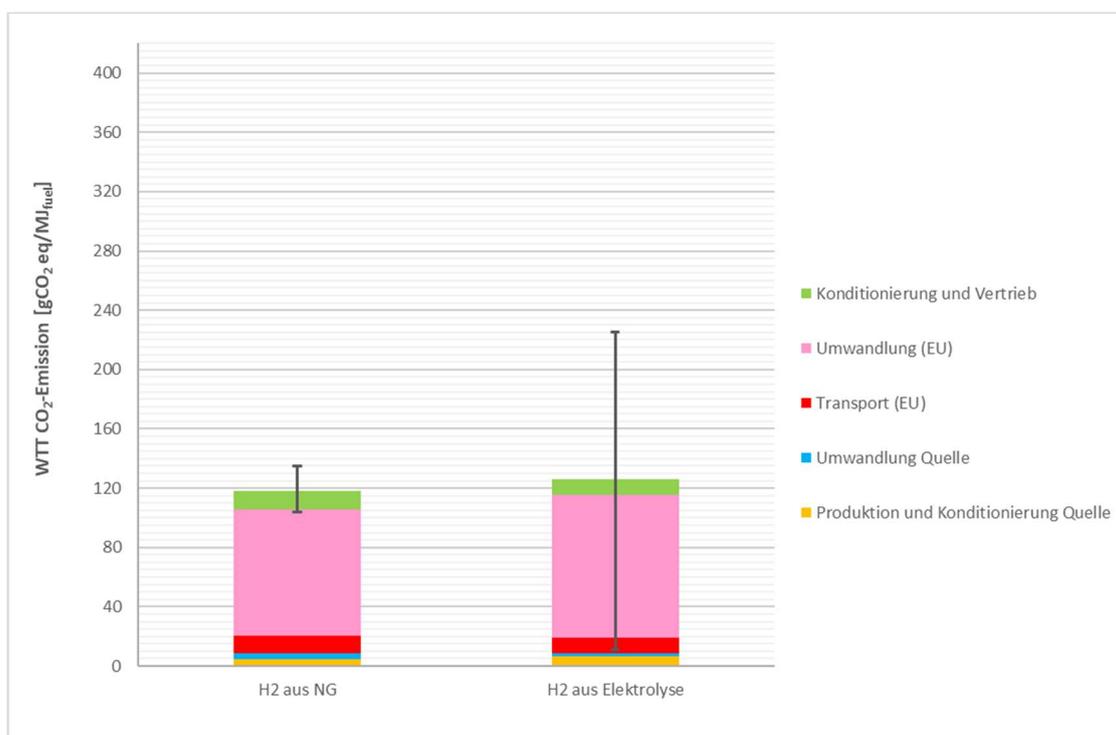


Abbildung 3-6: WTT-Treibhausgasemissionen von Wasserstoff [3]

3.3.1 H₂ aus NG

Dieses Kapitel bilanziert WTT-Emissionen für die Wasserstoffherstellung aus Erdgas. Berücksichtigt werden hier der Transport des Erdgases über Pipelines von 4000km und 7000km sowie Reformation und Kompression zur Verwendung in Hochdrucktanks. Der Pfad „6. H₂“ berücksichtigt die Verflüssigung zur Verwendung des Kraftstoffes als flüssigen Wasserstoff. Angeführt wird auch die Herstellung aus fossil hergestellten Methanol. Tabelle 3-1 zeigt zusammengefasst alle Varianten der H₂-Herstellung und die dabei entstehenden CO₂-eq-Emissionen. [3]

Tabelle 3-26: WTT-CO₂-eq-Emissionen von H₂ aus NG Variationen [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO ₂ -eq [gCO ₂ -eq/MJ _{fuel}]
1. H ₂	NG	127,1
2. H ₂	NG	117,6
3. H ₂	NG	104,2
4. H ₂	NG	108,1
5. H ₂	NG	135,1
6. H ₂	LNG	124,8
7. H ₂	LNG	110,9
8. H ₂	Methanol	116,8

Die WTT-Ergebnisse des arithmetisch durchschnittlichen Wasserstoffes aus Erdgas und Methanol sind in der Tabelle 3-27 angeführt. Ersichtlich ist hier, dass durch die Verbrennung kein CO₂ entsteht. Diese Tatsache stellt den größten Vorteil bei der Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff dar.

Tabelle 3-27: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Wasserstoff aus NG [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	4,9
Umwandlung an der Quelle	3,7
Transport in Europa	12,2
Umwandlung in Europa	85,0
Konditionierung und Vertrieb	12,3
Σ WTT-H ₂	118,1
+ Verbrennung H ₂	0,0
= Gesamt H₂	118,1

3.3.2 H₂ aus Elektrolyse

Bei Elektrolyse entsteht durch Aufspaltung einer wasserstoffhaltigen Verbindung Wasserstoff. Wasserstoffhaltige Ausgangsprodukte sind unter anderen Erdgas, Holz und Wasser. Bei Erdgas werden Transportwege von 4000 km und 7000 km berücksichtigt.

Der Pfad „8. H₂“ zeigt den niedrigsten Ausstoß an CO₂. Diese Herstellungsvariante nutzt erneuerbare, elektrische Energie aus Windkraft und ist somit mit weniger vorgelagerten THG Emissionen belastet. Bei den anderen Pfaden beruht die Berechnung auf dem EU-Strommix. Die Tabelle 3-28 fasst die Ergebnisse der Wasserstoffherstellung in Bezug auf WTT-CO_{2-eq}-Emissionen zusammen. [3]

Tabelle 3-28: WTT-CO_{2-eq}-Emissionen von H₂ aus Elektrolyse Varianten [3]

Kraftstoff	Ausgangsprodukt	WTT-CO _{2-eq} [gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}]
1. H ₂	NG	104,1
2. H ₂	NG	204,9
3. H ₂	NG	200,6
4. H ₂	LNG	219,0
5. H ₂	Holz gezüchtet	23,9
6. H ₂	Holz gezüchtet	20,6
7. H ₂	H ₂ O	225,5
8. H ₂	H ₂ O	10,8

Der arithmetische Durchschnitt der vorgelagerten Emissionen über die betrachteten Bereitstellungspfade von H₂ aus Elektrolyse ist in Tabelle 3-29 zusammengefasst.

Tabelle 3-29: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO_{2-eq} für Wasserstoff aus Elektrolyse [3]

	gCO _{2-eq} /MJ _{fuel}
Produktion und Konditionierung an der Quelle	6,6
Umwandlung an der Quelle	2,2
Transport in Europa	10,3
Umwandlung in Europa	96,2
Konditionierung und Vertrieb	10,8
∑ WTT-H ₂	126,1
+ Verbrennung H ₂	0,0
= Gesamt H₂	126,1

3.4 Strombereitstellung in Europa

Die Berücksichtigung der vorgelagerten CO_{2-eq}-Emissionen bei der Bereitstellung von elektrischer Energie ist von essentieller Bedeutung, wenn beispielsweise Elektrofahrzeuge zum Einsatz kommen. Die Bewertung der Stromerzeugung zur Herstellung der Kraftstoffe in Kapitel 3 erfolgt über den EU-Strommix. Dieser beinhaltet unter anderem Strom aus Kohle, Gas, Kernkraft und Wasserkraft. Der nach Anteilen der Stromerzeugung gemittelte Wert aus allen europaweiten berücksichtigten Stromerzeugungsvarianten ist mit 540 gCO_{2-eq}/kWh angegeben. [3]

Für die kommenden Jahre wird im europäischen Raum ein steigender Strombedarf von etwa 13% prognostiziert. Durch umfassende Umbauten der Stromerzeugungskapazitäten wird zukünftig großer Wert auf erneuerbare Energien, insbesondere Windkraft, gelegt. Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien im Allgemeinen und Windkraft im Speziellen soll der CO₂-Ausstoß bis 2030 um etwa 20% gesenkt werden. In Abbildung 3-7 sind die Anteile der Stromproduktion in Europa von 2007 bis 2030 dargestellt. Ersichtlich ist der in [13] erwartete, deutliche Zuwachs an erneuerbarer Energie bis 2030.

Stromproduktion 2007 – 2030¹

Kraftwerkstyp	2007		2020		2030	
	TWh	Anteil	TWh	Anteil	TWh	Anteil
Nuklear	929	28 %	754	21 %	715	19 %
Braunkohle	365	11 %	372	10 %	285	8 %
Steinkohle	642	19 %	405	11 %	248	6,5 %
Gas	652	20 %	710	19 %	465	12 %
Gas dezentral	105	3 %	102	3 %	151	4 %
Öl	31	1 %	64	2 %	32	1 %
Diesel dezentral	63	2 %	59	1,5 %	54	1,5 %
Summe fossiler Kraftwerke	1.858	56 %	1.712	46,5 %	1.235	33 %
Wasser	296	9 %	375	10 %	432	12 %
Wind	119	3,5 %	536	15 %	872	23 %
Solar	4	< 0,5 %	78	2 %	182	5 %
Flüssige Biokraftstoffe	7	< 0,5 %	26	1 %	51	1,5 %
Biogas dezentral	12	0,5 %	59	1,5 %	90	2,5 %
Andere Erneuerbare	74	2 %	108	3 %	151	4 %
Summe erneuerbarer Kraftwerke	512	16 %	1.181	32,5 %	1.778	48 %
Import-/Exportsaldo	8	0,2 %	8	0,2 %	8	0,2 %
Gesamt	3.306		3.655		3736	

¹ Einzelwerte gerundet

Abbildung 3-7: Strombereitstellung in Europa von 2007 bis 2030 [13]

3.5 Strombereitstellung in Österreich

Im Vergleich zum EU-Strommix ist die Strombereitstellung in Österreich dadurch gekennzeichnet, dass der Anteil an erneuerbaren Energien mit etwa 76% vergleichsweise hoch ist. Dadurch liegt Österreich in Sachen erneuerbarer Energie bei der Strombereitstellung im europäischen Spitzenfeld. [14]

Laut dem österreichischen Umweltbundesamt können drei Stromaufbringungen unterschieden werden. Die „Stromaufbringung Österreich“ berücksichtigt alle Stromimporte sowie die inländische Stromerzeugung. Die Emissionsfaktoren für diesen Mix werden aus dem österreichischen Kraftwerkspark ermittelt. Für Stromimporte werden Emissionsfaktoren der Importländer herangezogen. [15]

Der „Kraftwerkspark Österreich“ beinhaltet ausschließlich Stromerzeugungsanlagen auf österreichischem Staatsgebiet. [15]

Das Umweltzeichen „Grüner Strom“ berücksichtigt nur Strom, der zur Gänze aus erneuerbaren Energien stammt und bestimmte Kriterien nach der Richtlinie "UZ 46 - Grüner Strom" erfüllt. In der nachfolgenden Tabelle 3-30 sind die Werte der Emissionsfaktoren von den beschriebenen Stromaufbringungen aufgelistet. Diese Werte werden für die weitere Betrachtung im Lebenszyklus für BEV- und PHEV-Antriebskonzepte, bezüglich elektrischen Energiebedarf, herangezogen. [15]

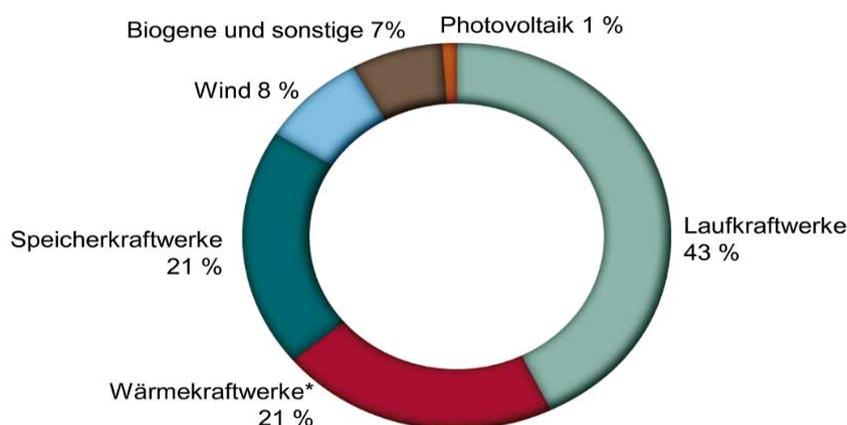
Tabelle 3-30: Emissionsfaktoren des österreichischen Strommix [15]

Strommix	Emissionsfaktor in gCO ₂ -eq/kWh
Stromaufbringung Österreich	306
Kraftwerkspark Österreich	151
Umweltzeichen „Grüner Strom“	18

In Abbildung 3-8 ist der Stromerzeugungsmix in Österreich im Jahr 2016 dargestellt. Weiters ist die gesamte inländische Erzeugung in GWh dargestellt. Ersichtlich wird hier der große Anteil an Wasserkraft am österreichischen Strommix. Der Wasserkraftanteil besteht zu 33% aus Wasserspeicherkraftwerken und 67% aus Wasserlaufkraftwerken.

Stromerzeugungsmix in Österreich 2016

Inländische Erzeugung: 67.881 GWh



Quelle: Oesterreichs Energie, E-Control 2017
*Wärmekraftwerke ohne biogene Brennstoffe

Abbildung 3-8: Anteile der Stromerzeugung in Österreich 2016 [14]

4 Experimentelle Untersuchungen

Für die TTW Emissionen wurden die Antriebsvarianten in identischen Fahrzeugkarosserien simuliert (siehe Kap. 5). Dabei zeigte sich, dass die Datenlage zu Elektroantrieben noch unsicher war, so dass im Rahmen dieser Arbeit Messungen zur Absicherung der Simulationsdaten durchgeführt wurden.

Der nachfolgende Teil der vorliegenden Arbeit widmet sich den durchgeführten Messungen. Es wurden verschiedene Fahrzyklen am Rollenprüfstand mit einem Elektroauto nachgestellt. Dabei wurde über eine Strom- und Spannungsmessung der elektrische Energiebedarf des Fahrzeugs ermittelt. Zusätzlich wurden Ausrollversuche zur Ermittlung der Fahrwiderstände mit einem Tesla Model S durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse dienen einerseits als Grundlage für die später durchgeführten Simulationen und andererseits zur Validierung der Simulationsergebnisse des durchschnittlichen Elektrofahrzeugs. Die Funktionsweise von BEV-Konzepten wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

4.1 Grundlagen BEV

Ein Fahrzeug, welches ausschließlich elektrisch betrieben wird, besteht aus den in Abbildung 4-1 gezeigten Komponenten. Die wichtigste Komponente ist der zum Antrieb verwendete Elektromotor. Typischerweise werden Drehstrommaschinen als Ausführung einer permanent erregten Synchronmaschine verwendet. Grund dafür ist der deutlich bessere Wirkungsgrad gegenüber Gleichstrommaschinen. [18]

Durch die Verwendung von Drehstrom wird ein Inverter zwischen Batterie und Elektromotor benötigt, der den von der Batterie kommenden Gleichstrom in Drehstrom umwandelt. Die Regelung von Spannungshöhe, Amplitude und Phasenlage zur Drehzahlregelung geschieht ebenfalls durch den Inverter. [18]

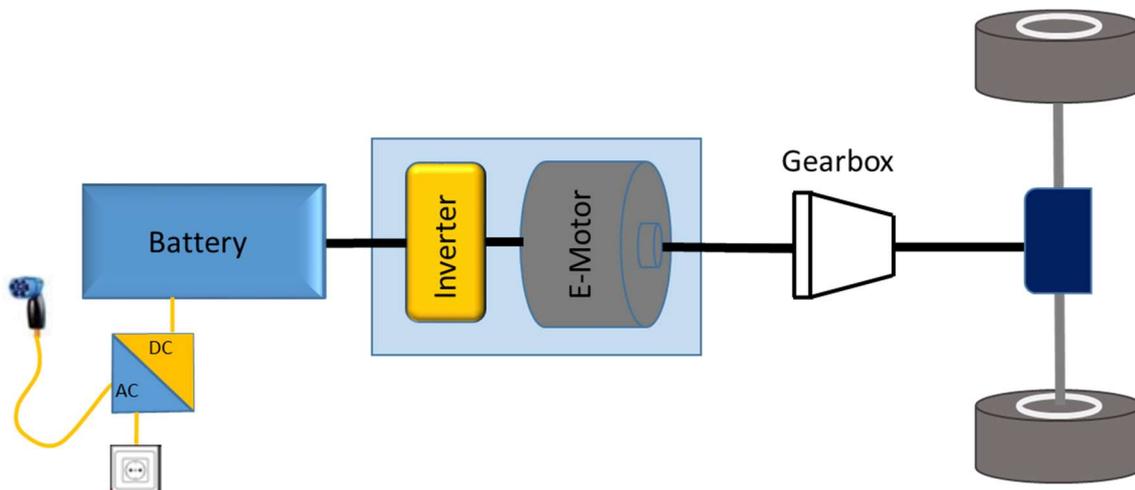


Abbildung 4-1: Topologie des BEV-Fahrzeugs [27]

Ein großer Vorteil der E-Maschine ist die Tatsache, dass das Nenndrehmoment bereits bei Stillstand zur Verfügung steht und ein Überlasten der Maschine kurzfristig möglich ist. Die maximal mögliche Überlastung beträgt etwa den Faktor 2,5, ausgehend vom Nenndrehmoment der E-Maschine. Die Überlasthöhe bzw. Dauer ist durch die Auslegung im Nennbereich, einerseits mechanisch und andererseits thermisch, begrenzt. Die Abbildung 4-2 zeigt das Nenndrehmoment und die Nennleistung jeweils für den Bereich des Antreibens und Generierens. In Abbildung 4-2 wird durch die pinke Linie der kurzfristig mögliche Überlastbereich dargestellt. Die Überlastdauer beträgt je nach Konzept etwa 20 Sekunden. Durch ein gutes Kühlsystem kann die Dauer der Überlastung erhöht werden.[18]

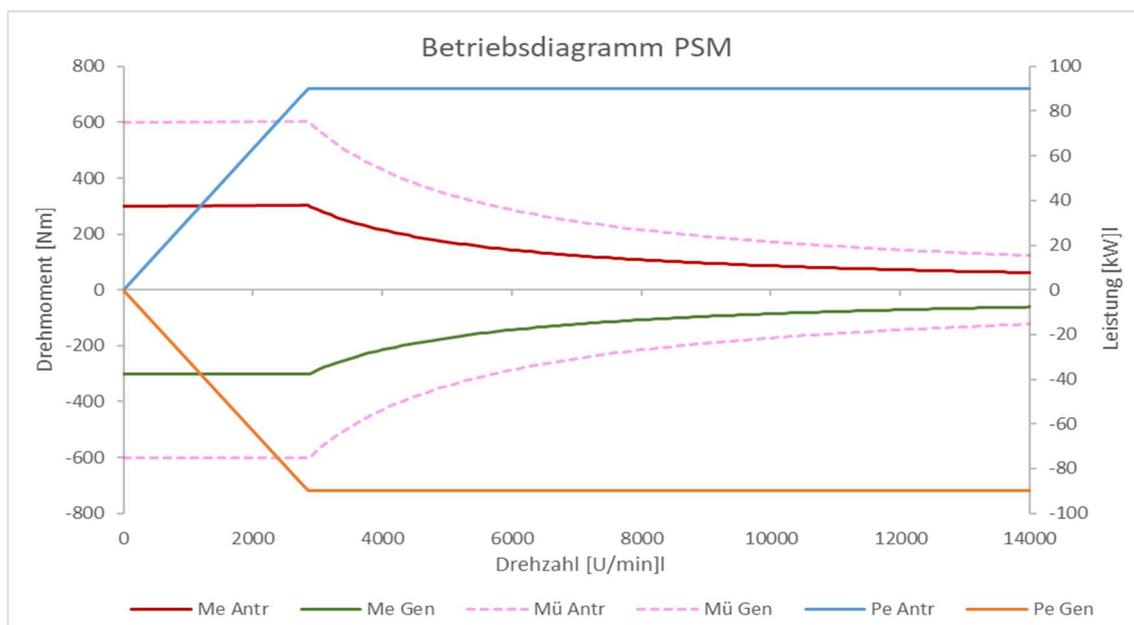


Abbildung 4-2: Volllastkurven einer Synchronmaschine

Eine weitere wichtige Komponente ist der Energiespeicher. In modernen Elektrofahrzeugen werden meist Batterien auf Lithium-Ionen-Basis verwendet, die einerseits eine hohe Energiedichte (Wh/kg) und andererseits eine hohe Leistungsdichte (W/kg) besitzen. In Abbildung 4-3 ist der Einsatzbereich von Li-Ionen-Akkus in Rot dargestellt. Man kann erkennen, dass bei hoher Energiedichte die Leistungsdichte abnimmt und umgekehrt.

Soll das Fahrzeug eine möglichst hohe Reichweite besitzen, ist die Energiedichte der Batterie der ausschlaggebende Faktor. Bei schnellem Laden und Entladen des Energiespeichers spielt die Leistungsdichte der Batterie eine tragende Rolle. Für HEV-Konzepte kommen, aufgrund ständiger Ladung/Entladung, Batterien mit hoher Leistungsdichte zum Einsatz. Für reine Elektrofahrzeuge werden Batterien mit hoher Energiedichte genutzt. [18]

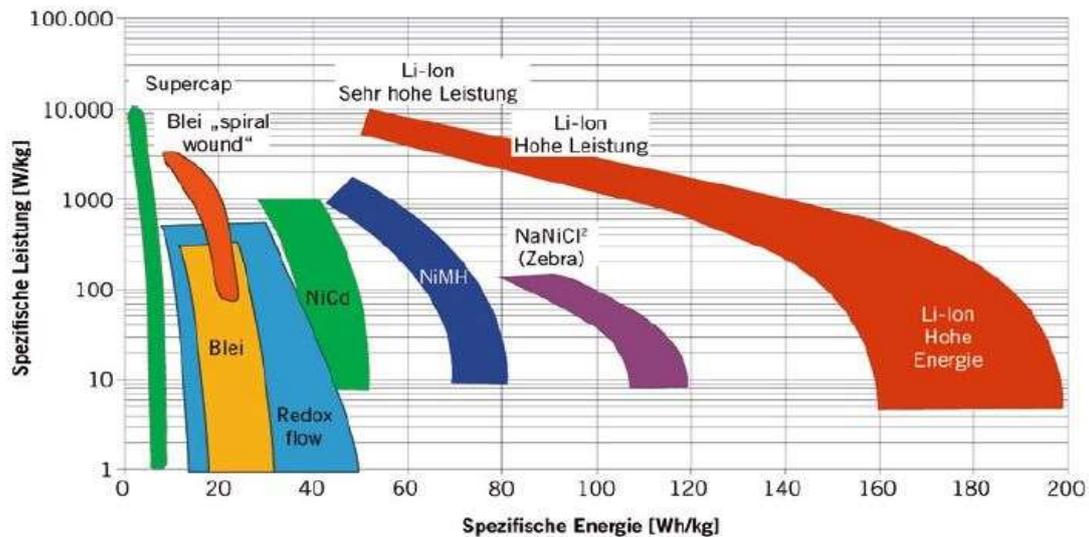


Abbildung 4-3: Leistung und Energiedichte von Batterietypen [20]

Weitere Komponenten sind AC/DC und DC/DC-Konverter. Der AC/DC-Konverter wandelt den vom handelsüblichen Stromnetz verfügbaren Wechselstrom in benötigten Gleichstrom, der zum Laden der Batterie benötigt wird, um. Der DC/DC-Konverter wird verwendet um Nebenaggregate wie z.B. das Fahrlicht aus der Traktionsbatterie zu speisen. Dafür wird das höhere Spannungsniveau über den Gleichspannungswandler auf das benötigte Level geregelt.

Die Wirkungsgrade des Synchronmotors können ähnlich wie bei Verbrennungsmotoren in einem Kennfeld abgebildet werden. Meistens sind die Wirkungsgrade der Leistungselektronik im Kennfeld mitberücksichtigt. Auffällig sind die im Vergleich zu Verbrennungsmotoren höheren Wirkungsgrade über weite Bereiche.

In der Abbildung 4-4 ist ein beispielhaftes Wirkungsgradkennfeld mit Berücksichtigung der Leistungselektronik dargestellt. Gut erkennbar ist auch der generatorische Betrieb im negativen Bereich des Kennfeldes. [18]

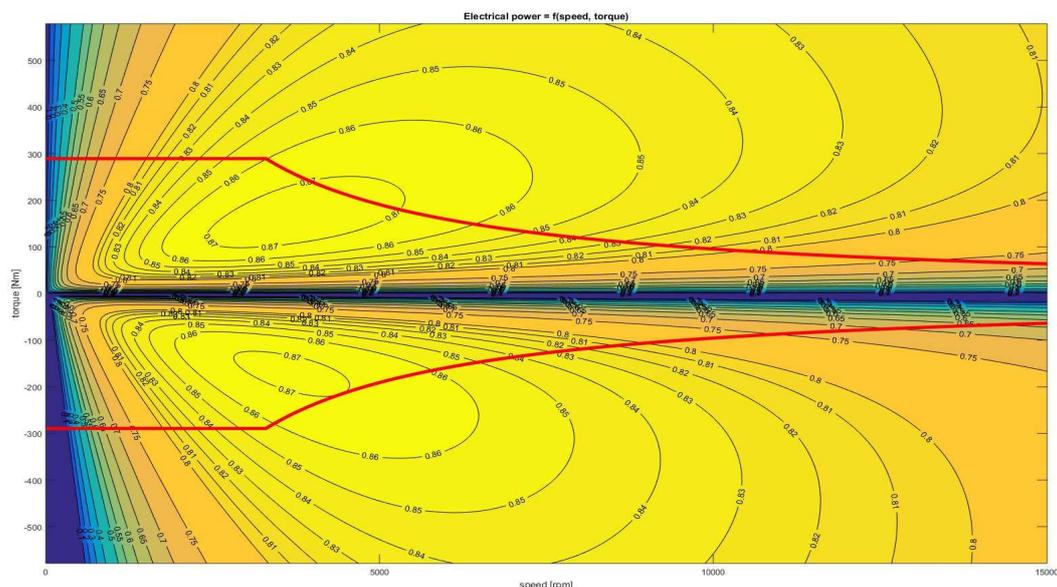


Abbildung 4-4: Wirkungsgradkennfeld einer Synchronmaschine

4.2 VW e-Golf

Als erstes elektrisches Versuchsfahrzeug wurde ein VW e-Golf verwendet. Dieses Fahrzeug ist ideal, um einen Vergleich zu konventionellen Kompaktklassefahrzeugen zu ziehen. Mit einer Batteriegröße von 35,8 kWh und einer Reichweite von etwa 200 km repräsentiert der e-Golf annähernd das durchschnittliche Elektrofahrzeug, welches für die folgenden Simulationen definiert wurde. In der unten angeführten Tabelle 4-1 sind die technischen Daten laut ADAC angegeben.

Tabelle 4-1: Technische Daten VW-Golf [25]

Leistung [kW]	100
Drehmoment [Nm]	290
Getriebe	1 Gang Automatikgetriebe
Leergewicht (EU) [kg]	1615
Batteriegröße [kWh]	35,8
Batterieart	Lithium-Ionen
Reichweite (lt. Hersteller) [km]	231
Verbrauch NEDC (lt. Hersteller) [kWh/km]	0,132
Verbrauch WLTP (lt. Hersteller) [kWh/km]	0,158

Der Golf besitzt ein 1-Gang-Getriebe mit einstellbarer Rekuperationsstärke. Es können nach Belieben 4 Stufen über den Ganghebel eingestellt werden. Die stärkste Stufe B verzögert das Auto durch die Rekuperation sehr deutlich, wohingegen die Stufe D1 eher sanft verzögert. Durch die Wahl des Modus „D“ wird die Rekuperation abgestellt. Des Weiteren kann durch die Wahl von „N“ das Fahrzeug in den Leerlauf geschaltet werden.

4.2.1 Messungen am Rollenprüfstand

Es wurden verschiedene Fahrzyklen mit dem Versuchsfahrzeug am Rollenprüfstand abgefahren. Um den elektrischen Verbrauch zu ermitteln wurde Strom und Spannung über eine Strommesszange bzw. ein Spannungsmessgerät gemessen. Die Messung des Stromes passierte nach der Batterie und vor dem Inverter, der den Gleichstrom in Drehstrom umwandelt. Die Abnahme der Spannung erfolgte direkt an der Traktionsbatterie. Es wird somit indirekt die aufgenommene Leistung des Elektromotors gemessen. Die Zusammenhänge von Leistung, Strom und Spannung sind in den Formeln (5-20) bis (5-22) angeführt.

Um das Fahrzeug auf der Rolle betreiben zu können mussten ESP und ASR ausgeschaltet werden, was zur Folge hatte, dass die Rekuperation nicht funktionierte. Aus diesem Grund werden für den Vergleich mit der später durchgeführten PHEM-Simulation des e-Golfs nur die „positiven“ Leistungen des Elektromotors bewertet.

Folgende Fahrzyklen wurden am Rollenprüfstand gemessen:

- NEDC
- ERMES
- WLTC
- RWC

Die unterschiedlichen Geschwindigkeitsverläufe der gemessenen Zyklen sind in den nachfolgenden Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9 dargestellt. Auffällig sind die Unterschiede in der „Dynamik“ der Zyklen. Während der NEDC-Zyklus mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von etwa 33 km/h einen kleinen transienten Teil abdeckt, ist der ERMES-Zyklus im Vergleich mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 67 km/h ein transienter, der Realität besser entsprechender Zyklus. Der WLTC liegt in Bezug auf Dynamik mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von etwa 47 km/h zwischen NEDC und ERMES. Grundsätzlich deckt jeder dieser Zyklen verschiedene Fahrbereiche ab. Die Fahrbereiche teilen sich in einen Stadtteil, einen Überlandteil und einen Autobahnanteil auf. Die Dauer der Fahrprofile variieren von 1180 Sekunden beim NEDC bis 1800 Sekunden beim WLTC.

Der RWC-Zyklus basiert auf einer Route die am Institut für RDE-Messungen verwendet wird. Es werden, basierend auf der RDE-Route, der Stadtanteil, Überlandanteil und Autobahnanteil jeweils in einem Drittelmix zusammengefasst und als neuer Zyklus, mit dem Einfluss der realen Route, erstellt.

Die Zyklen wurden nach einer Vorkonditionierung der Reifen mit ausgeschalteten Nebenaggregaten gemessen. Bei der Messung des RWC-Zyklus wurde, wie auch bei einer realen RDE-Fahrt, die Klimaanlage auf mittlere Stufe mit 21 °C eingestellt.

Die Ladeverluste, die durch die Wandlung des hausüblichen Wechselstromes in Gleichstrom über den AC/DC-Wandler beim Laden entstehen, wurden über ein Energiekosten-Messgerät ermittelt. Dieses ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Die technischen Daten sind in der Tabelle 4-2 ersichtlich.

Dafür wurde mit dem voll aufgeladenen Messfahrzeug ein definierter Zyklus gefahren und der elektrische Verbrauch des Fahrzeugs über den Zyklus ermittelt. Anschließend wurde das Fahrzeug wieder voll aufgeladen und über das Energiekosten-Messgerät die benötigte Energie aus dem Stromnetz gemessen. Das Verhältnis von Energie, die im Zyklus benötigt wird, zu Energie, die aus dem Stromnetz genommen wird, ergibt schlussendlich die Ladeverluste.



Abbildung 4-5: Voltcraft Energy Logger 4000 zur Messung der Ladeverluste

Tabelle 4-2: Technische Daten Voltcraft Energy Logger 4000

Betriebsspannung [V] (AC 50/60 Hz)	230
Max. Leistung [kW]	3,5
Max. Strom [A]	15
Messbereich [W]	0,1-3500
Genauigkeit (3500 W)	+/- 1% vom Messwert
Genauigkeit (2-5 W)	+/- 5% vom Messwert
Genauigkeit (< 2 W)	+/- 15% vom Messwert

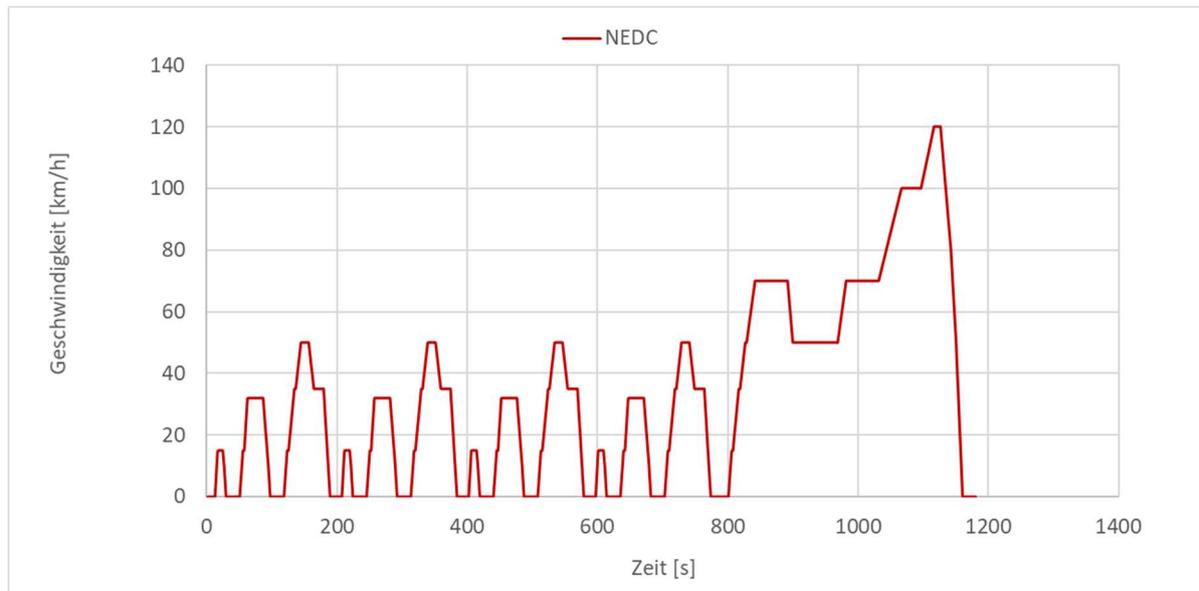


Abbildung 4-6: Geschwindigkeitsverlauf NEDC

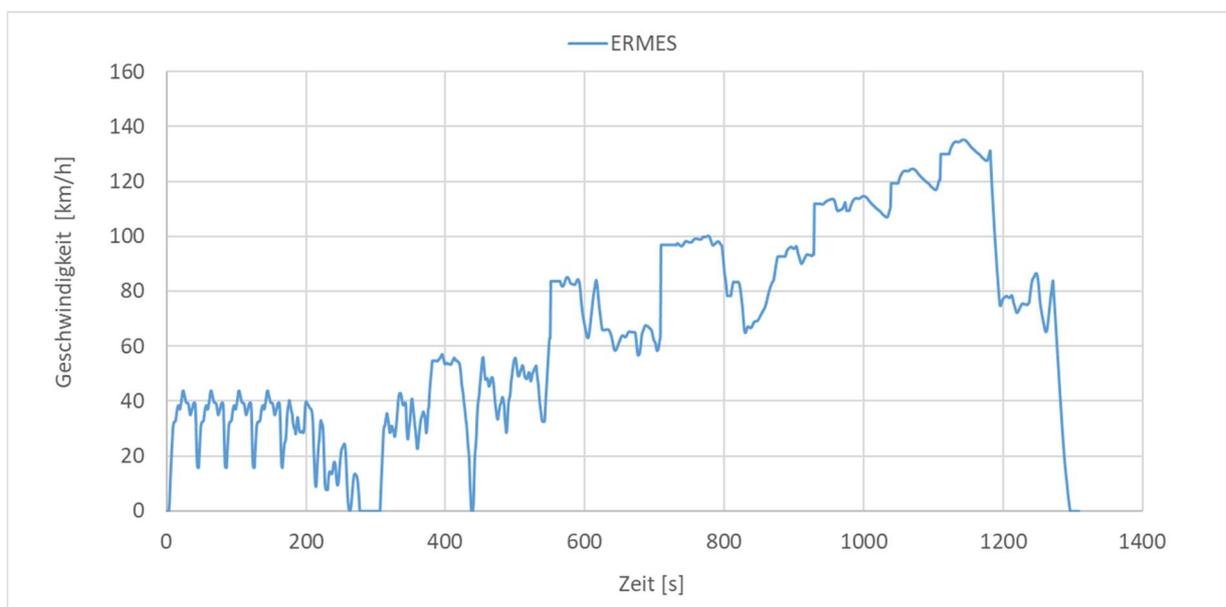


Abbildung 4-7: Geschwindigkeitsverlauf ERMES

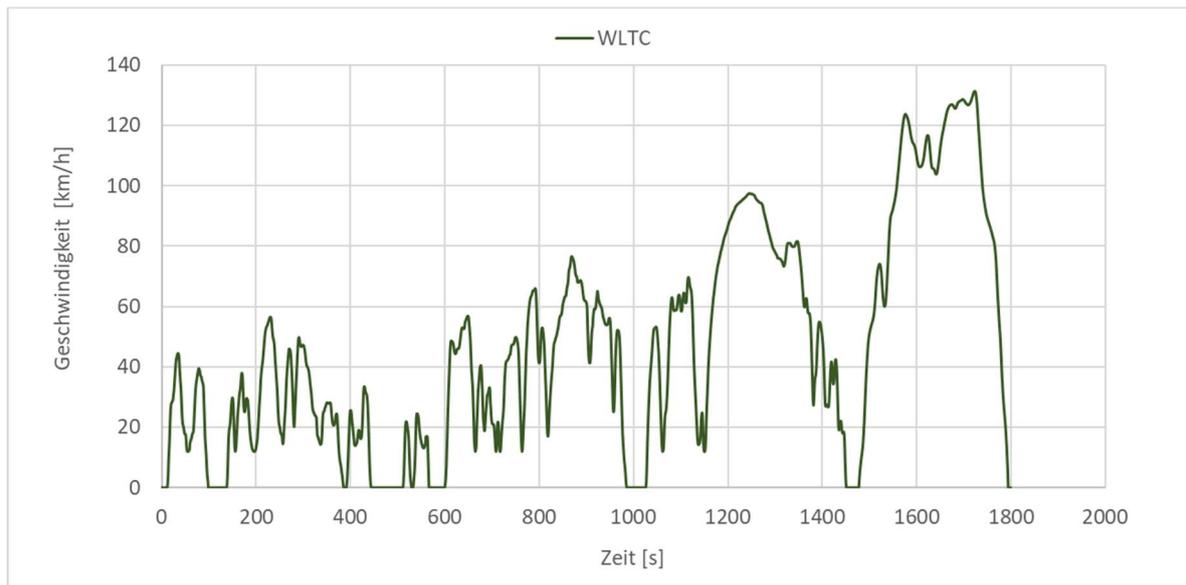


Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsverlauf WLTC

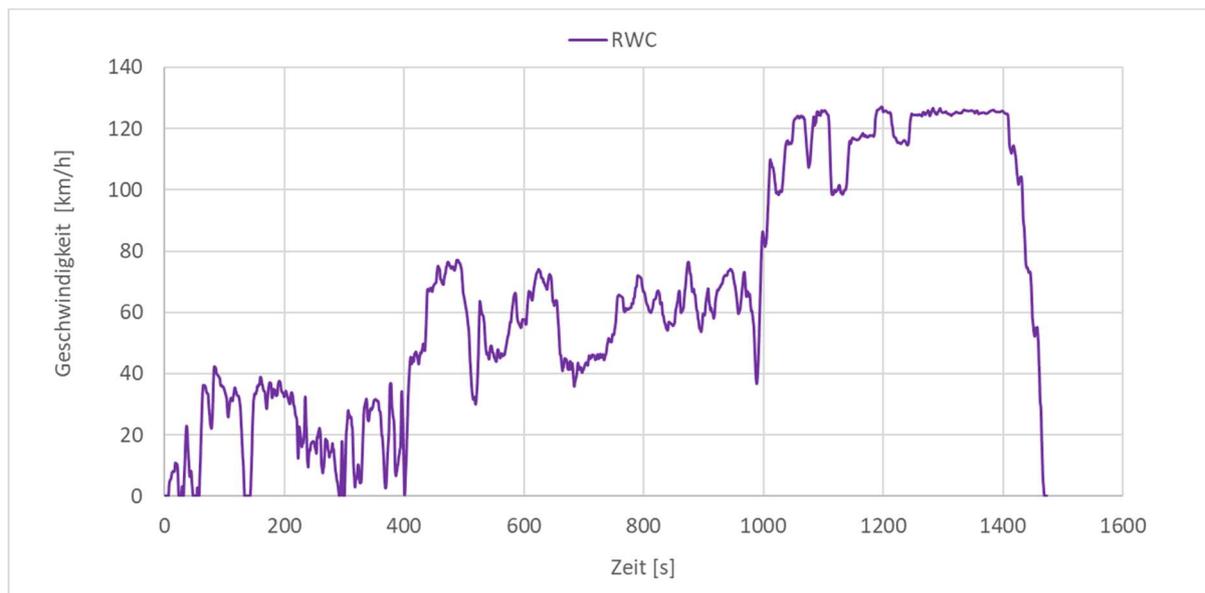


Abbildung 4-9: Geschwindigkeitsverlauf RWC

In Abbildung 4-10 ist das Versuchsfahrzeug am Rollenprüfstand dargestellt. Vor den Messungen müssen die Fahrwiderstände am Prüfstand eingestellt werden. Das Fahrwiderstandspolynom, welches durch Ausrollversuche ermittelt wurde, muss durch die Eigenverluste der Rolle und Rollreibung des Reifens auf der Rolle korrigiert werden. Die Eigenverluste der Rolle und des Fahrzeugs werden über einen „Loss-Run“ bestimmt. Hierfür wird das Messfahrzeug über die Rolle auf 120 km/h beschleunigt und anschließend im Leerlauf und ohne Bremskraft ausgerollt.

Durch die Aufzeichnung des Geschwindigkeitsverlaufs, während des Ausrollens, kann die sekundliche Verzögerung ermittelt werden. Aus den Trägheiten des KFZ sowie Prüfstands und der Verzögerung kann die Widerstandskraft ermittelt werden. Die erforderliche Bremskraft, die vom Rollenprüfstand nach der Ermittlung der Eigenverluste aufgebracht wird, errechnet sich durch folgende Zusammenhänge, die in den Gleichungen (4-1) bis (4-3) angegeben sind. [18]

Vor dem „Loss-Run“ wurde das Fahrzeug durch eine Konstantfahrt vorkonditioniert, um die Reifen sowie die Rollenlagerung auf Betriebstemperatur zu bringen. Grund für die Konditionierung ist die Temperaturabhängigkeit des Rollwiderstandes und der Reibung in den Lagern. In Abbildung 4-10 sieht man das Versuchsfahrzeug am Rollenprüfstand. [18]

$$F_{Soll} = R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 \quad (4-1)$$

$$F_{Verluste} = A_0 + A_1 * v + A_2 * v^2 \quad (4-2)$$

$$F_{Bremsen} = R_0 - A_0 + (R_1 - A_1) * v + (R_2 - A_2) * v^2 \quad (4-3)$$



Abbildung 4-10: VW e-Golf am Rollenprüfstand

Für die Strommessung wurde eine Strommesszange von Fluke verwendet, die bis zu 400 Ampere messen kann. Die Messung erfolgt berührungslos über einen Hallsensor, der in der Zange verbaut ist. Ein Überblick über die genauen Spezifikationen findet sich in der nachfolgenden Tabelle 4-3.

Tabelle 4-3: Technische Daten der Strommesszange Fluke i410 [23]

Sensor	Hallsensor
Messbereich [A]	400 (AC/DC)
kleinster messbarer Strom [A]	0,5
Genauigkeit	+/- 3,5 % vom Messwert
Empfindlichkeit [mV/A]	1
Frequenzbereich [kHz]	3

Die Spannung wurde über einen Testec SI-9001 Differential-Tastkopf abgenommen. Die technischen Daten, des verwendeten Tastkopf, finden sich in Tabelle 4-4.

Tabelle 4-4: Technische Daten Testec SI-9001 Differential-Tastkopf [24]

Sensor	SI-9001
Messbereich [V]	± 700 (AC/DC), 700 (AC)
Genauigkeit	+/- 2 % vom Messwert
Anstiegszeit [ns]	14
Frequenzbereich [MHz]	25

Abbildung 4-11 zeigt den Strom- und Spannungsmessaufbau am Versuchsfahrzeug. Die Strommesszange wurde so angebracht, dass der Messwert negativ ist, wenn Strom aus der Batterie entnommen wird. Die Spannungsmessung ermittelt die Batterieklemmenspannung, die während der Belastung durch den Elektromotor auftritt. Die beiden Messgrößen Strom und Spannung wurden sekundlich gemessen und vom Prüfstandsmessprogramm aufgezeichnet.

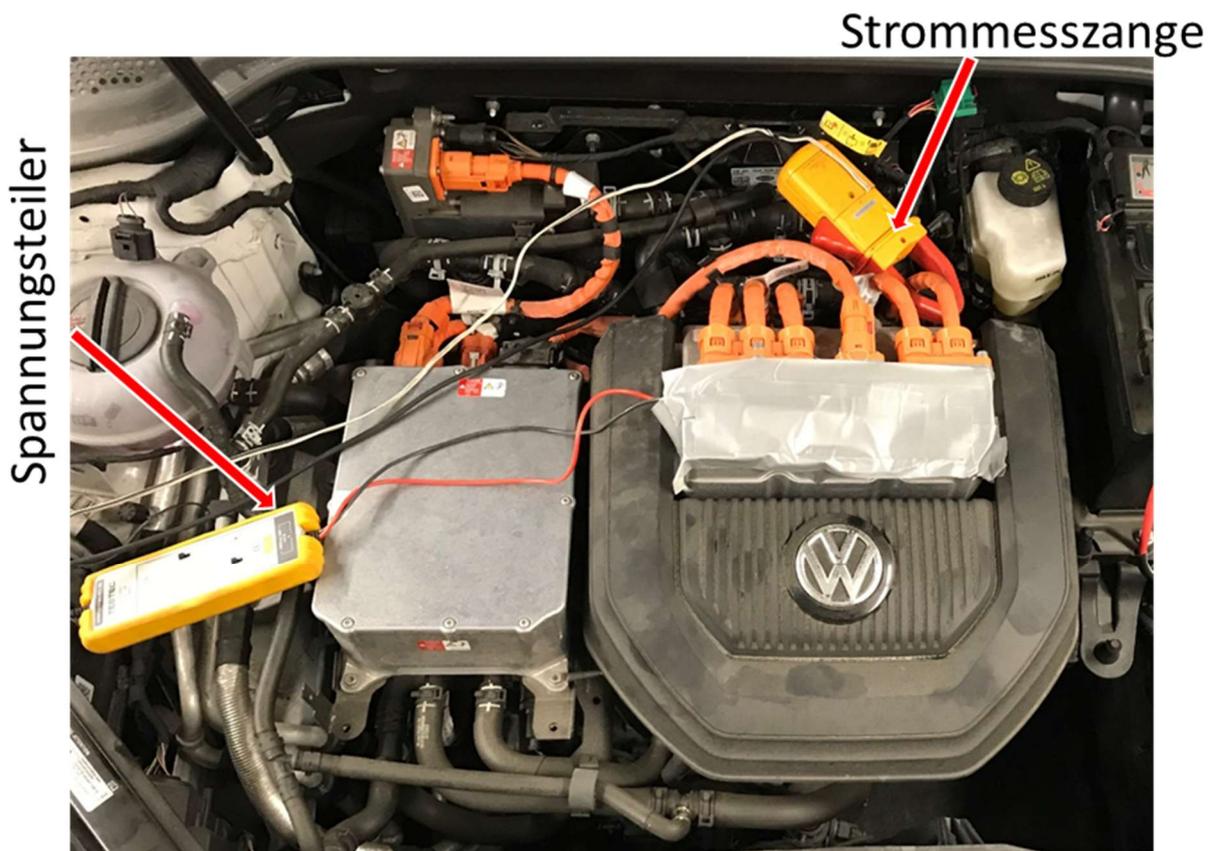


Abbildung 4-11: Strom- und Spannungsmessung am Messfahrzeug

4.2.2 Ergebnisse der Messungen und Simulation in PHEM

Der Energieverbrauch ergibt sich als Summe der positiven Leistungen, die der Elektromotor über den Zyklus von der Batterie entnimmt. Da durch Messung auf der Rolle das Rekuperieren nicht möglich war, werden hier nur die positiven Werte beurteilt. Beim Vergleich mit der Simulation werden auch nur die simulierten positiven Leistungswerte der aufgenommenen Elektromotorleistung berücksichtigt.

Wie in Tabelle 4-5 ersichtlich, gibt es bei den Zyklen mit weniger transientem Fahrprofil, wie z.B. NEDC, größere Abweichungen im Bereich von etwa 9 %. Bei dynamischeren Zyklen, wie z.B. RWC und ERMES, ergeben sich geringere Abweichungen. Begründet sind die Abweichungen einerseits durch Messungenauigkeiten und andererseits durch das bei den Simulationen verwendete Wirkungsgradkennfeld, das nicht von dem im VW-e-Golf verbauten Elektromotor stammt.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Messungen im Vergleich zur Simulation

Zyklus	Energieverbrauch (Rolle) [kWh/km]	Energieverbrauch (PHEM) [kWh/km]	Abweichung Messung zu Simulation [%]
NEDC	0,126	0,138	8,7
ERMES	0,155	0,163	4,9
WLTC	0,147	0,161	8,7
RWC (Rolle)	0,176	0,183	3,9

Der Unterschied zwischen den Messwerten und den in Tabelle 4-1 angeführten Verbräuchen laut ADAC, beträgt beim NEDC 4,5% und beim WLTC 6,9 %. Mit den Simulationswerten belaufen sich die Abweichungen auf 4,3% (NEDC) und 1,9 % (WLTC). [25]

Neben den Rollentests wurden auch Real World Fahrten auf der Standard-RDE Runde des Institutes im Raum Graz durchgeführt (Ries-Route).

Die Ladeverluste, welche dabei über das Energieverbrauchsmessgerät ermittelt wurden, stehen in der unten angeführten Tabelle 4-6. Der Energieverbrauch des Fahrzeuges wurde über die Daten, die mittels OBD ausgelesen wurden, ermittelt. Bei mehreren RWC-Routen mit unterschiedlicher Beladung wurden Batteriespannung, zum Elektromotor fließender Strom, Elektromotordrehmoment, Leistung der Nebenaggregate, und E-Motor-Drehzahl sekundlich ausgelesen. Die Ladeverluste, welche durch das Netzteil entstehen, belaufen sich im Mittel auf 6,4 %. Die aus den OBD-Daten ermittelten spezifischen Verbräuche liegen unter den Messwerten des RWC auf dem Rollenprüfstand, da am Rollenprüfstand wie beschrieben keine Rekuperation erfolgte.

Tabelle 4-6: Ladeverluste VW-e-Golf

Route	Beladung [kg]	Distanz [km]	$E_{\text{spez.}}$ [kWh/km]	E_{Fahrt} [kWh]	E_{Laden} [kWh]	Ladeverlust [%]
RWC (Ries)	90	83.757	0,161	13,48	14,37	6,16
RWC (Ries)	180	83.757	0,167	13,99	15,02	6,87
RWC (Ries)	250	83.757	0,168	14,10	15,02	6,12

4.3 Tesla Model S

Als zweites elektrisches Versuchsfahrzeug wurde ein Tesla Model S verwendet. Wegen des serienmäßigen Allradantriebs ist die Vermessung am Rollenprüfstand nicht möglich. Des Weiteren war es durch den Aufbau des Fahrzeugs nicht möglich, die Rollwiderstandskraft und Luftwiderstandskraft zur Bewertung des Energieverbrauchs zu messen. Dieses Fahrzeug repräsentiert den elektrischen Vertreter des Oberklassenfahrzeugsegments. Die Reichweite mit annähernd 500 km ist im Vergleich zu anderen Elektrofahrzeugen deutlich größer. Die technischen Daten und Messwerte des Herstellers sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst.

Mit dem Tesla Model S wurden Ausrollversuche durchgeführt, um die Fahrwiderstände zu ermitteln. Mit den ermittelten Ergebnissen kann das Fahrzeug mittels PHEM simuliert werden. Durch die Simulation kann der elektrische Verbrauch, der zur Bewertung und zum Vergleich mit anderen Elektroautos benötigt wird, ermittelt werden.

Tabelle 4-7: Technische Daten Tesla Model S 75D [25]

Leistung [kW]	315
Drehmoment [Nm]	660
Getriebe	1 Gang Automatikgetriebe
Leergewicht (EU) [kg]	2183
Batteriegröße [kWh]	75
Batterieart	Lithium-Ionen
Reichweite (Hersteller) [km]	490
Verbrauch NEDC (Hersteller) [kWh/km]	0,186

4.3.1 Ermittlung der Fahrwiderstände

Die resultierende Fahrwiderstandskraft, bestehend aus Rollwiderstandskraft und Luftwiderstandskraft, lässt sich durch Ausrollversuche ermitteln. Hierfür wird ein Fahrzeug auf ebener Fahrbahn mit einer definierten Geschwindigkeit durch auskuppeln ausgerollt. Die auf das Fahrzeug wirkende Rollwiderstandskraft und Luftwiderstandskraft beim Ausrollen ist im Gleichgewicht mit der Trägheitskraft, welche aus der Verzögerung des Fahrzeuges resultiert. Abbildung 4-12 zeigt die beim Ausrollen wirkenden Kräfte. Die Masse setzt sich aus Fahrzeugmasse, Beladung und rotierenden Massen zusammen. [18]

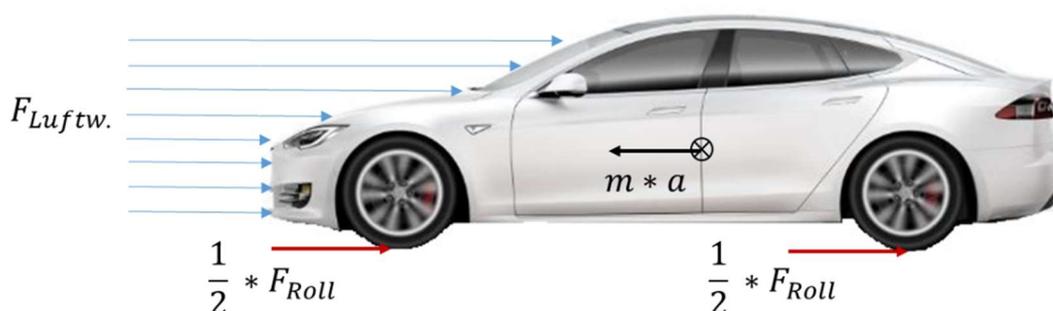


Abbildung 4-12: Kräfte am Fahrzeug beim Ausrollen

Durch Aufzeichnung der Geschwindigkeit beim Ausrollen erhält man den sekundlichen Geschwindigkeitsverlauf. Daraus wird die sekundliche Verzögerung berechnet. Multipliziert man die resultierende Beschleunigung mit der Gesamtmasse und trägt diesen Wert über der Geschwindigkeit auf, so erhält man den Verlauf von Rollwiderstandskraft und Luftwiderstandskraft. Durch ein Polynom 2. Ordnung kann somit die Fahrwiderstandskraft angenähert werden. Abbildung 4-13 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf beim Ausrollversuch mit einem Tesla Model S. [18]

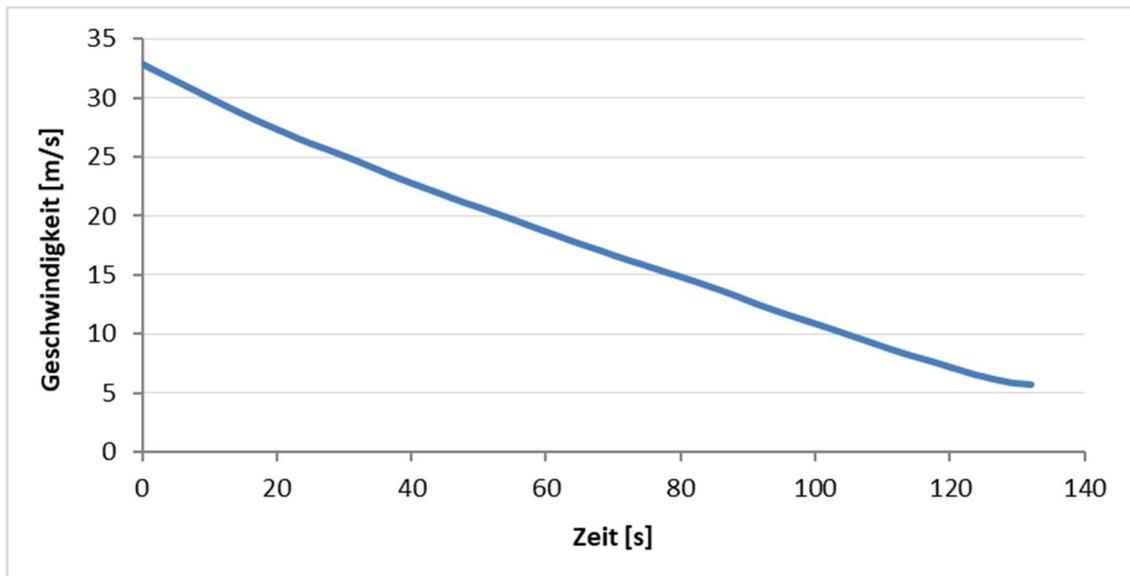


Abbildung 4-13: Geschwindigkeitsverlauf beim Ausrollen (Richtung Nord)

Der beschriebene Ansatz zur Ermittlung der Fahrwiderstände ist nur unter gewissen Bedingungen gültig. Zum einen soll die Teststrecke möglichst eben sein, und zum anderen soll die Messung bei Windstille erfolgen. Weiters sollten die Messungen unter Normbedingungen durchgeführt werden, d.h. bei Normtemperatur (20 °C) und Normluftdruck (1000 mbar). Da diese Randbedingungen in der Realität selten auftreten, müssen diese Einflüsse im Fahrwiderstandspolynom berücksichtigt werden. [18]

Im Fall einer unebenen Fahrbahn muss die Hangabtriebskraft von der resultierenden Fahrwiderstandskraft subtrahiert werden. Der Einfluss durch Wind wird durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und anströmender Luft in der Gleichung (4-4) beschrieben. Der Temperatureinfluss des Rollwiderstandes wird mit der Formel (4-5) berücksichtigt. Die aktuelle Dichte ergibt sich durch Umformung der idealen Gasgleichung (4-6). Das Kräftegleichgewicht beim Ausrollversuch ist mit der Beziehung (4-7) gegeben. Das resultierende Fahrwiderstandspolynom wird in der allgemeinen Form durch die Gleichung (4-8) beschrieben.

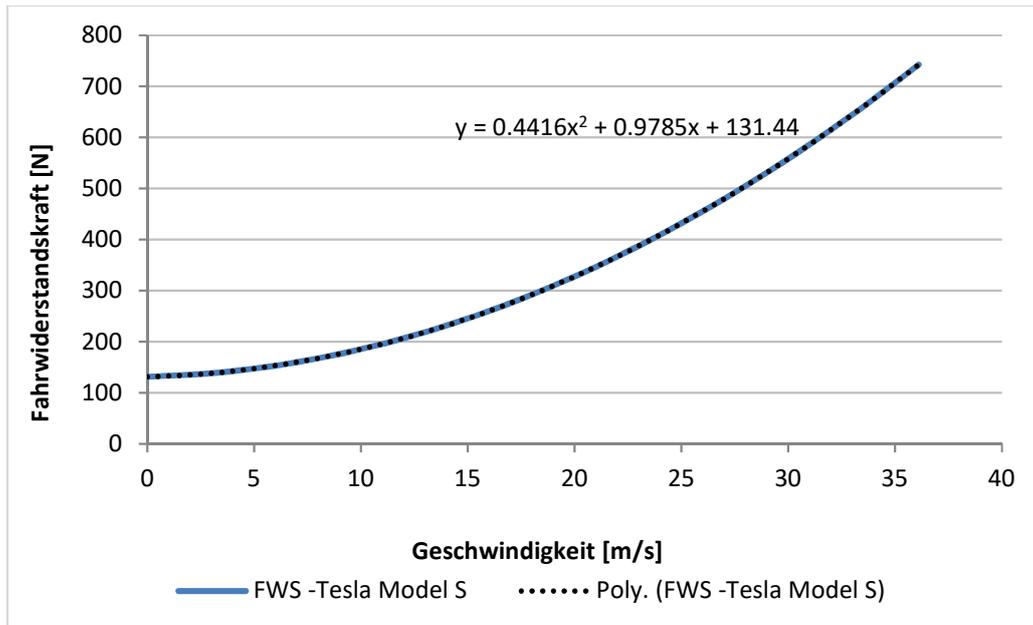


Abbildung 4-14: Verlauf der Fahrwiderstandskraft mit Fahrwiderstandspolynom

$$F_{Luftw.} = c_w * A_{Quer.} * \rho_{Luft} * \frac{v_{relativ}^2}{2} \quad (4-4)$$

$$R_{korr.} = R_0 * (1 + K * (T_{Luft} - T_{Norm})) \quad (4-5)$$

$$\rho_{Luft} = \frac{p_{Luft}}{R_{Luft} * T_{Luft}} \quad (4-6)$$

$$(m_{FZG} + m_{Beladung} + m_{rot}) * a = F_{Roll.} + F_{Luftw.} \quad (4-7)$$

$$F_{FWS} = R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 \quad (4-8)$$

4.3.2 Ergebnisse der Ausrollversuche und Simulation in PHEM

Die durchgeführten Ausrollversuche wurden auf nahezu ebener Fahrbahn durchgeführt. Um den Einfluss der vorhandenen Neigungen zu berücksichtigen, wurden jeweils 6 Versuche in Nord bzw. Südrichtung durchgeführt.

Der Temperatur- und Luftdruckeinfluss wurde mit den oben genannten Formeln berücksichtigt. Aufgrund von nahezu windstillen Verhältnissen bei den Messungen wurde der Windeinfluss vernachlässigt. Der resultierende Verlauf der Widerstandskräfte ist durch das Polynom in Abbildung 4-14 dargestellt. Das Polynom ergibt sich als Mittelwert aller durchgeführten Messungen in Nord- und Südrichtung.

Der sekundliche Geschwindigkeitsverlauf und die Fahrbahnneigungen wurden über GPS gemessen. Die anschließende Auswertung ergab folgende Ergebnisse, die mit fahrzeugspezifischen Daten in Tabelle 4-8 angeführt sind.

Der C_w -Wert, der sich aus den Versuchen ergibt, ist um etwa 4 % höher als jener laut Hersteller. Diese Abweichung kann durch nicht vermeidbare Messungenauigkeiten, wie z.B. seitliche Windeinflüsse, begründet werden. Die Querschnittsfläche wurde aus den Fahrzeugabmessungen abgeschätzt. In Abbildung 4-15 ist das verwendete Messfahrzeug abgebildet. Die Ergebnisse der Simulation sind im Abschnitt 5.6 zusammengefasst. Die technischen Daten der Messfahrzeuge sind im Anhang ausgewiesen.

Tabelle 4-8: Tesla Model S Fahrzeugdaten und Ergebnisse des Ausrollversuchs

Fahrzeug-Gesamtmasse [kg]	2266
äquivalente Masse der Räder [kg]	66
Lufttemperatur [°C]	26
Luftdruck [mbar]	993,7
Dichte der Luft [kg/m ³]	1,157
R_0 [N]	131,44
R_1 [Ns/m]	0,978
R_2 [Ns ² /m ²]	0,442
C_w [-]	0,26
C_w [-] laut Hersteller	0,25
$A_{\text{Querschnitt}}$ [m ²]	2,84



Abbildung 4-15: Messfahrzeug Tesla Model S

In Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse der Simulation aus PHEM, den Energieverbrauch, angezeigt am Display, des Fahrzeugs und die Abweichung der Herstellerangaben zusammengefasst. Eine genaue Beschreibung über die Simulation von Elektroautos folgt im Abschnitt 5.6. Die Fahrwiderstände, welche durch Ausrollversuche ermittelt wurden, wurden bei den Simulationen verwendet. Die Zyklen NEDC, ERMES und WLTC wurden ohne Beladung sowie ohne zusätzlichen Verbrauch durch Nebenaggregate simuliert.

Das RWC (Ries)-Fahrprofil wurde mit 123 kg zusätzlicher Beladung und mit einer Nebenverbraucherleistung von 1,45 kW berechnet. Diese Spezifikationen stammen aus dem Durchschnittselektrofahrzeug, welches im Abschnitt 5.6 definiert wird.

Der Vergleich zwischen dem elektrischen Verbrauch aus Herstellerangaben in Bezug auf den NEDC-Zyklus und das Ergebnis der Simulation zeigt eine Abweichung von 2,7%.

Tabelle 4-9: Ergebnisse der PHEM-Simulation mit Vergleich der Herstellerangaben

Zyklus	Energieverbrauch (PHEM) [kWh/km]	Energieverbrauch (Display Tesla) [kWh/km]	Abweichung Simulation zu Herstellerangabe bzw. Messung [%]
NEDC	0,181	-	2,7
ERMES	0,203	-	-
WLTC	0,187	-	-
RWC (Ries)	0,234	0,220	6,0

5 Simulationen von Durchschnittsfahrzeugen

Zur Beurteilung von unterschiedlichen Antriebskonzepten werden durchschnittliche Fahrzeuge definiert. Um alle konventionellen und alternativen Antriebsarten so gut wie möglich abzubilden, werden folgende Durchschnittsfahrzeuge berücksichtigt:

- Otto-Fahrzeug
- Diesel-Fahrzeug
- Otto- und Diesel-HEV
- Otto- und Diesel-PHEV
- BEV
- FCEV

Die genannten Antriebsvarianten basieren auf realen, am Markt erhältlichen Kompaktklassefahrzeugen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, haben die Ottovarianten und Dieselvarianten jeweils ein 6-Gang-Getriebe mit zum Konzept passenden Übersetzungen. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor besitzen die Emissionsklasse EURO 6. Antriebskonzepte mit Elektromotor und zusätzlicher Elektrifizierung besitzen je nach benötigter Akkugröße Batterien auf Li-Ion Basis. Die hier ermittelten Daten dienen als Basis für den TTW-Teil, der durchgeführten Lebenszyklusanalyse.

Die Verbräuche durch Nebenaggregate wurden bei konventionellen Antrieben mit 1,2 kW und bei elektrifizierten Fahrzeugen, bei denen die Nebenaggregate ausschließlich elektrisch betrieben werden, mit 1,45 kW beaufschlagt. Der höhere Verbrauch bei elektrifizierten Konzepten begründet sich dadurch, dass hier die Heizung rein elektrisch gespeist wird und keine Abwärme des VKM zur Verfügung steht. Die Ladeverluste, die durch die AC/DC-Wandlung entstehen, werden durch 10 % vom elektrischen Energieverbrauch des Fahrzeuges berücksichtigt.

5.1 PHEM

Das verwendete Simulationsprogramm PHEM wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik als Alternative zu Rollenprüfstandsmessungen und RDE-Fahrten entwickelt, und dient der Ermittlung von Verbrauch und Emissionen.

PHEM berechnet über den Fahrzyklus (Geschwindigkeit über Zeit) die sekundliche Motorleistung, die notwendig ist, um die Fahrwiderstände bestehend aus Roll- und Luftwiderstand, zu überwinden. Die Motordrehzahlen ergeben sich aus Achs- und Getriebeübersetzungen. Aus berechneter Leistung und Drehzahl können somit sekundlich die Emissionen aus dem vorgegebenen Motorkennfeld interpoliert werden. Die Gesamtemission über den Fahrzyklus ergibt sich schlussendlich als Summe der sekundlichen Emissionswerte. [18]

$$P = P_{Roll.} + P_{Luftw.} + P_{Beschl.} + P_{Steig.} + P_{Schlupf} + P_{Getr.} + P_{Agg.} \quad (5-1)$$

$$P_{roll} = m * g * (F_{r0} + F_{r1} * v + F_{r4} * v^4) * v \quad (5-2)$$

$$P_{Luftw.} = c_w * A_{Quer.} * \frac{\rho}{2} * v^3 \quad (5-3)$$

$$P_{Beschl.} = (m_{FZG} + m_{Beladung} + m_{rot}) * a * v \quad (5-4)$$

$$P_{Steig.} = m * g + \sin \alpha * v \quad (5-5)$$

$$P_{Getr.} = P_e * (1 - \eta_{Getr.}) \quad (5-6)$$

Um ein möglichst reales Ergebnis zu gewährleisten müssen alle Leistungsanteile, die auch im realen Betrieb eines Fahrzeugs auftreten, berücksichtigt werden. Die Leistungsbilanzierung erfolgt mit den angeführten Formeln (5-1) bis (5-6). [18]

Die Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte werden durch Ausrollversuche ermittelt oder stammen aus empirischen Daten. Die rotierenden Massen, durch Berechnung über die Formel (5-7), berücksichtigen alle drehenden Teile. In Abbildung 5-1 ist das Modellschema, welches PHEM verwendet, graphisch dargestellt. [18]

$$m_{rot} = \frac{I_{Räder}}{r_{Rad}^2} + I_{Motor} * \left(\frac{i_{Achse} * i_{Gang}}{r_{Rad}} \right)^2 + I_{Getr.} * \left(\frac{i_{Achse}}{r_{Rad}} \right)^2 \quad (5-7)$$

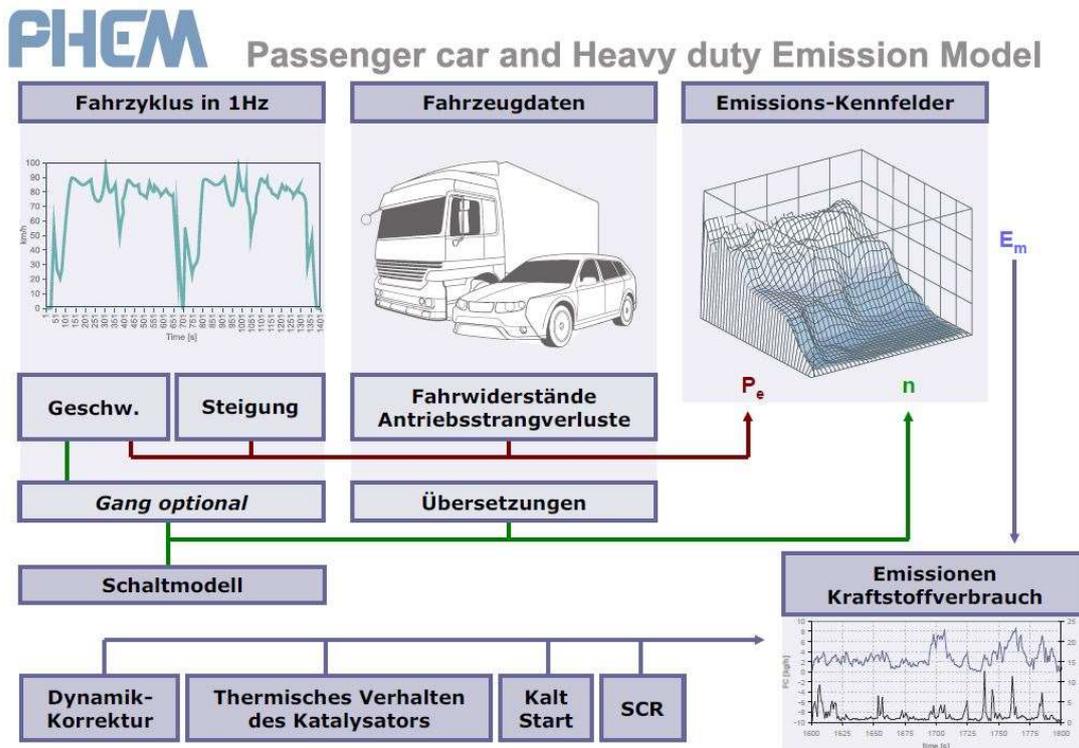


Abbildung 5-1: Schema des PHEM Simulationsprogrammes [18]

5.2 RWC-Fahrzyklus

Der für die vorliegende Arbeit in der Simulation verwendete Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf repräsentiert einen „Real World“ Zyklus. Dieser Fahrzyklus beinhaltet einen Drittmix aus Stadt-, Land- und Autobahnanteilen und ist insgesamt etwa 85 km lang. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt etwa 50 km/h.

Die Berücksichtigung der verschiedenen Fahranteile soll ein möglichst reales Fahrverhalten widerspiegeln. Das Fahr- und Steigungsprofil stammt aus einer Standardroute, die am Institut für RDE-Messfahrten verwendet wird.

Um als „RDE-konform“ zu gelten, muss der Zyklus einige Rahmenbedingungen in Bezug auf Dauer, Durchschnittsgeschwindigkeit sowie äußere Einflüsse, wie etwa Temperatur, erfüllen. Der gültige Temperaturbereich liegt zwischen 0-30°C. Des Weiteren müssen auch Dynamikparameter eingehalten werden, die sich auf die positive Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrzeugs beziehen. [19]

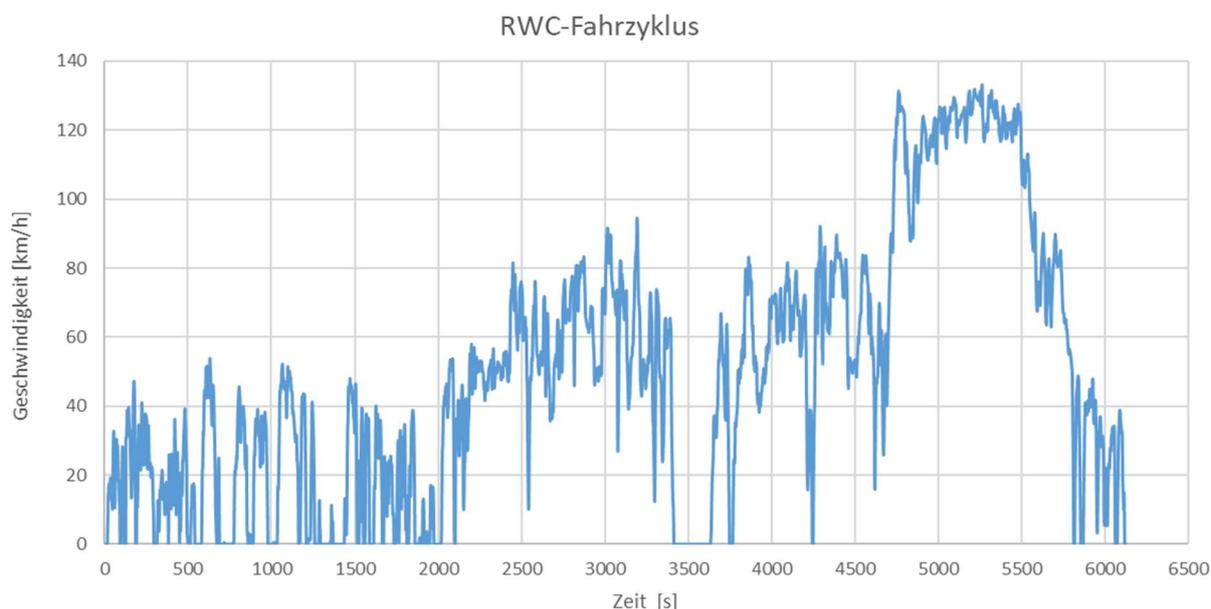


Abbildung 5-2: RWC-Fahrzyklus

Der RWC-Zyklus wurde für alle hier beschriebenen Fahrzeugvarianten als Fahrprofil verwendet. Abbildung 5-2 zeigt den zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf des RWC- Fahrzyklus.

5.3 Simulation von konventionellen Konzepten

Das durchschnittliche Benzin- und Dieselfahrzeug, dargestellt in der allgemeinen Konfiguration in Abbildung 5-3, wurde in PHEM im „Standardmode“ simuliert.

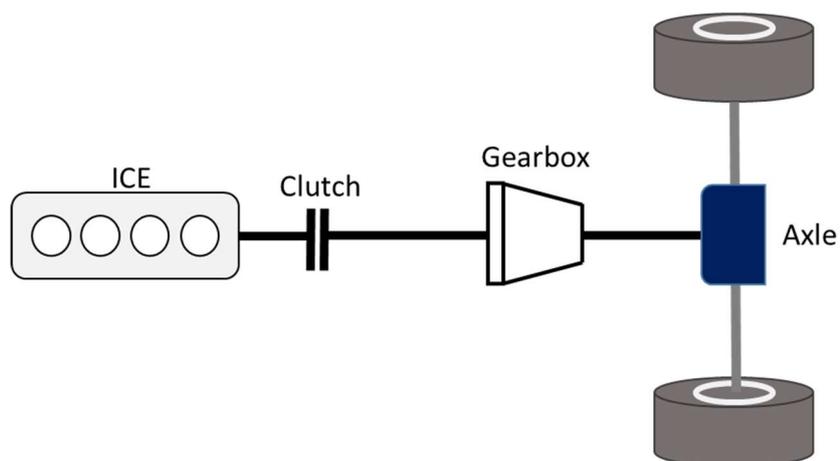


Abbildung 5-3: Topologie des Durchschnittsfahrzeugs mit VKM

PHEM benötigt für diesen Simulationsmodus bestimmte Informationen, die dem Programm durch „Files“ vorgegeben werden. Fahrzeugspezifische Daten, wie z.B. Gewicht, Rollwiderstandsbeiwerte etc., werden im „VEH-File“ angegeben. Motor- und Emissionskennfelder sind im „MAP-File“ hinterlegt. Die Informationen zur Volllast- und Schlepplastkurve stehen im „FLD-File“. Der im vorigen Abschnitt beschriebene Fahrzyklus wird über das „DRI-File“ vorgegeben.

Anzumerken ist, dass PHEM mit normierten Werten in Bezug auf Leistung und Drehzahlen arbeitet. Die Normierung von Leistung und Drehzahl erfolgt mit den Formeln (5-8) und (5-9). Die Benutzeroberfläche mit den erwähnten Files, sind in Abbildung 5-4 rot markiert. Die wichtigsten Daten für das konventionelle Benzin/Diesel-Fahrzeug sind in Tabelle 5-1 angeführt. Es handelt sich dabei jeweils um einen generischen Mittelklassewagen bei dem in die identische Karosserie (Masse, Stirnfläche, Reifen) jeweils die Massen der unterschiedlichen Antriebe simulativ eingebaut wurden. Simulationsergebnisse sind in Abbildung 12-25 angeführt.

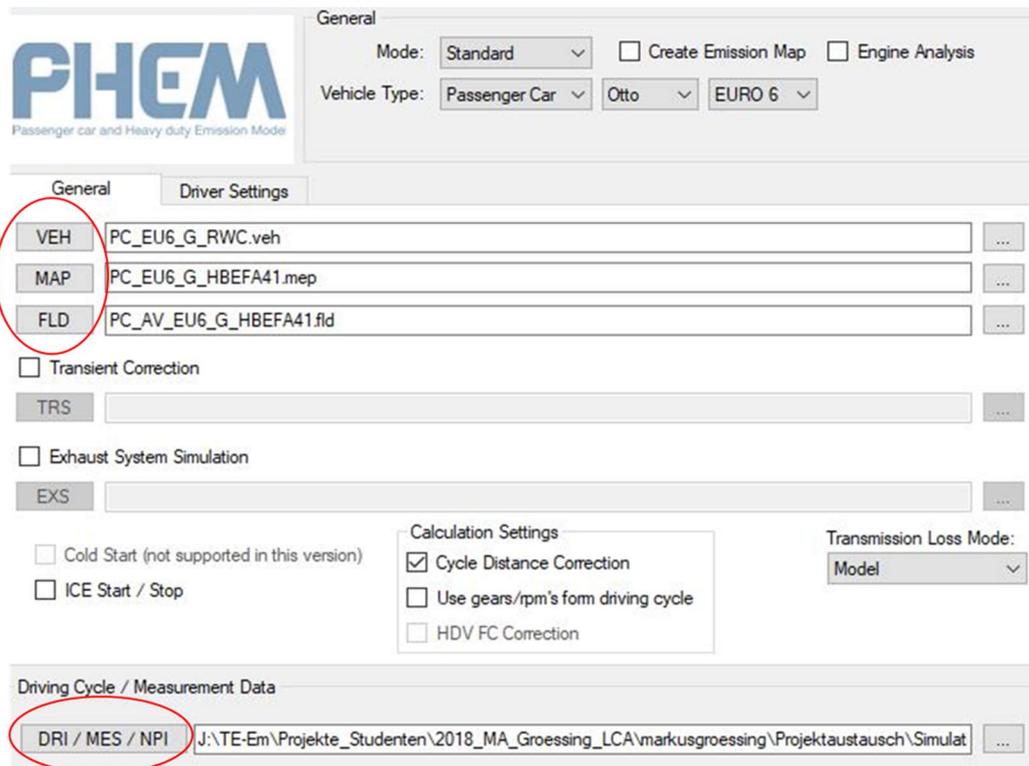


Abbildung 5-4: Benutzeroberfläche in PHEM im „Standardmode“

$$P_{norm} = \frac{P}{P_{rated}} \quad (5-8)$$

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad (5-9)$$

Tabelle 5-1: Fahrzeugdaten Ø Benzin/Diesel-Fahrzeug

Ø-Otto/Diesel-Fahrzeug	Daten (Benzin)	Daten (Diesel)
Masse [kg]	1276	1361
Beladung [kg]	123	123
Nennleistung VKM [kW]	90	90 kW
Nenndrehzahl VKM [U/min]	5247	3672
Getriebe	6 Gang	6 Gang

5.4 Simulation von HEV

Grundsätzlich besteht ein Hybridfahrzeug aus einer Kombination von verschiedenen Antriebskonzepten, die entweder seriell oder parallel betrieben werden. Seriell bedeutet im Falle einer Kombination aus VKM und Elektromotor, dass der VKM über einen Generator die Leistung, welche zum elektrischen Fahren nötig ist, erzeugt und in einer Traktionsbatterie speichert. Der Leistungsfluss geht somit immer seriell vom VKM bis zum Elektromotor. [18] [22]

Beim parallelen Hybridkonzept erfolgt der Antrieb mittels VKM und Elektromotor über eine Antriebsachse. Durch diese Ausführung kann dieses Konzept den VKM und den Elektromotor bei Bedarf gleichzeitig betreiben, wodurch beide Leistungen als Antriebsmöglichkeit bereitstehen. Weitere Betriebsmodi, die dadurch möglich sind, sind rein elektrisches Fahren durch Abkoppelung des VKM, nur VKM-Betrieb, Lastanhebung und elektrisches Assistieren. Durch die Nutzung des Elektromotors als Generator kann Bremsenergie rückgewonnen werden. In den Simulationen werden ausschließlich parallele Hybride berücksichtigt. Abbildung 5-5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines parallelen HEV-Fahrzeug. [18] [22]

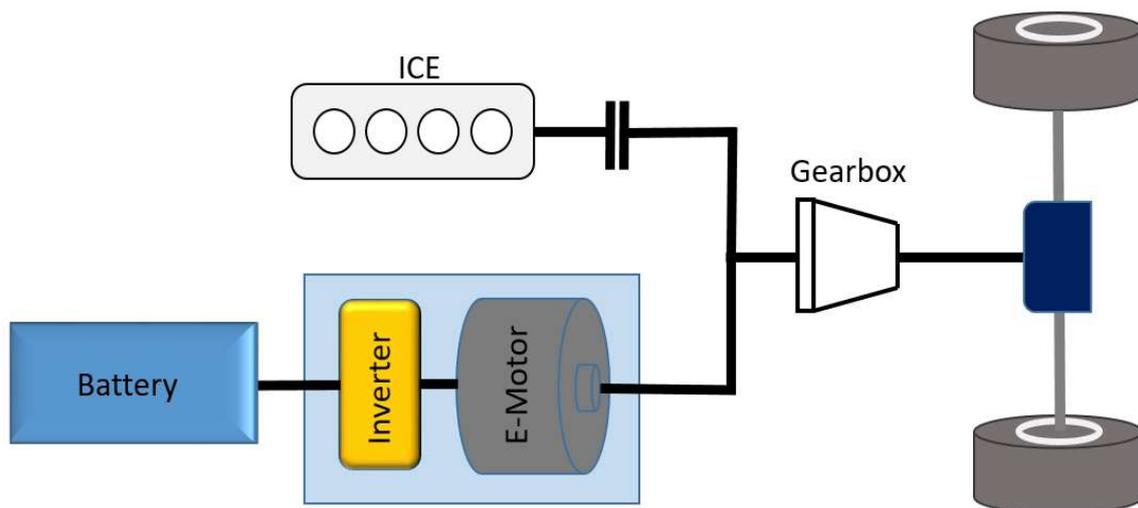


Abbildung 5-5: Topologie des parallelen HEV-Konzepts [27]

Die PHEM-Eingabefiles für den VKM-Teil des hybriden Konzepts sind äquivalent zu den Files, die im vorigen Abschnitt für Benzin/Diesel-Fahrzeuge vorgestellt wurden. Hinzu kommen weitere Informationen über den elektrischen Part. Wichtig für die Längsdynamiksimulation sind vor allem Informationen über die elektrische Leistung, die durch die Batterie zu Verfügung steht. [18]

Der SOC gibt den momentanen Ladezustand im Verhältnis zur maximal möglichen Lademenge in der Batterie an. Bei Li-Ionen Batteriesystemen ist der nutzbare SOC-Bereich aus Gründen der Lebensdauer eingeschränkt. Schlecht für die Lebensdauer sind „tiefe“ Entladezyklen und „zu volles“ Aufladen. [18]

Die effektive Ladungsmenge ergibt sich somit als Produkt des nutzbaren SOC-Bereich und der maximal möglichen Ladungsmenge. Die SOC-Bereiche unterscheiden sich je nach Antriebskonzept. Bei HEV-Fahrzeugen, bei denen betriebsbedingt die Batterie ständig geladen und entladen wird, fällt der nutzbare Bereich aus Gründen der Lebensdauer am geringsten aus.

In Abbildung 5-6 wird die Oberfläche zur HEV-Simulation gezeigt. Erkennbar sind die für Hybridfahrzeuge benötigten Files. Zur Erklärung des BAT-Files, MAP-Files und FLD-Files, welche Informationen über die Batterie und den Elektromotor beinhalten, wird hier auf den Abschnitt 5.6: „Simulation von BEV“ verwiesen.

Von großer Bedeutung ist das sogenannte „STE-File“, welches die Betriebsstrategie des Hybridfahrzeuges maßgeblich beeinflusst. Im File ist eine Kennlinie hinterlegt, die für die Regelung eines günstigen Betriebspunktes aus der Kombination von VKM und Elektromotor mit allen auftretenden Wirkungsgradketten zuständig ist.

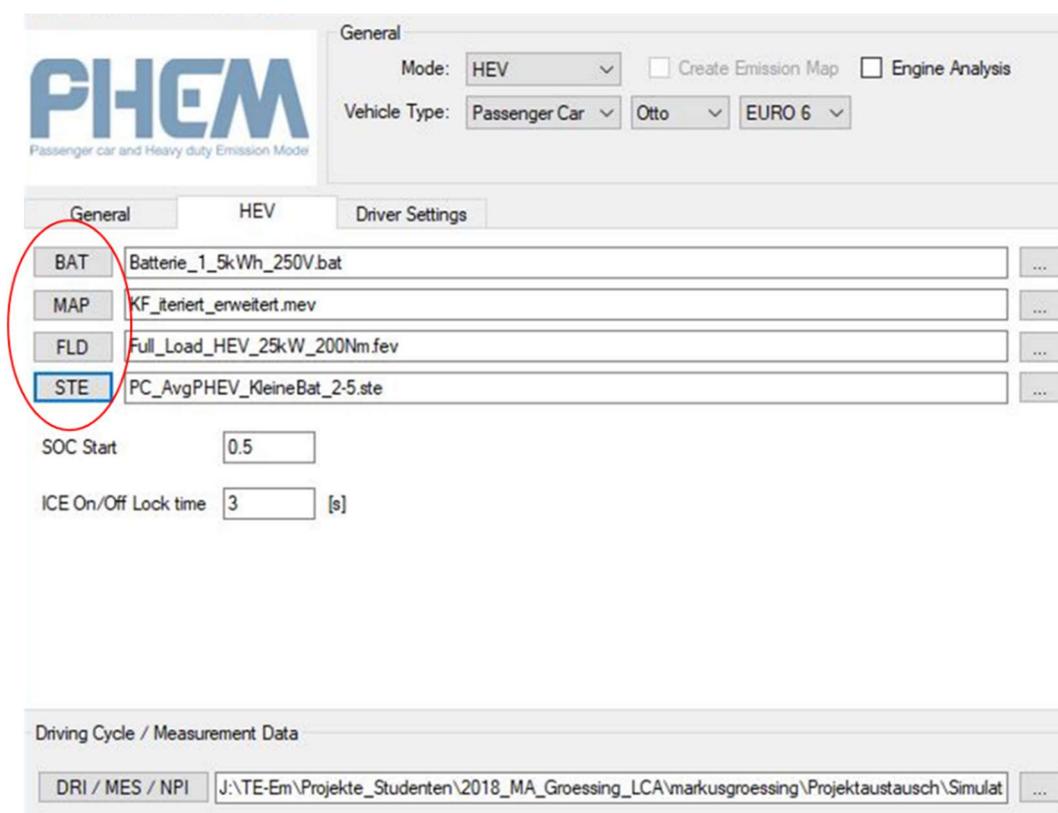


Abbildung 5-6: HEV-Mode Oberfläche im PHEM

In Abbildung 5-7 ist beispielhaft eine HEV Steuerkennlinie über den SOC gezeigt. Über der Kennlinie liegt der Bereich „Generieren“. In diesem Bereich wird vorzugsweise elektrische Energie durch Lastanhebung des VKM generiert. Durch die Lastanhebung wird der VKM in besseren Wirkungsgradbereichen betrieben. Im unteren Teil der Steuerkennlinie wird rein elektrisches Fahren sowie assistieren des Elektromotors begünstigt. Durch das Assistieren können beispielsweise ungünstige Betriebspunkte des VKM durch Unterstützung des elektrischen Antriebs vermieden werden, was sich wiederum durch eine Kraftstoffeinsparung bemerkbar macht. [19] [22]

Wenn beispielsweise, die Leistung des Verbrennungsmotors in auftretenden Lastpunkten nicht ausreichend ist, kann durch elektrisches Assistieren die benötigte Antriebsleistung ermöglicht werden. Bei großen Beschleunigungen, wie etwa durch zügiges Anfahren, kann damit der Elektromotor zusätzlich Leistung zur Verfügung stellen, was unter der Betriebsart „boosten“ bekannt ist. [18] [22]

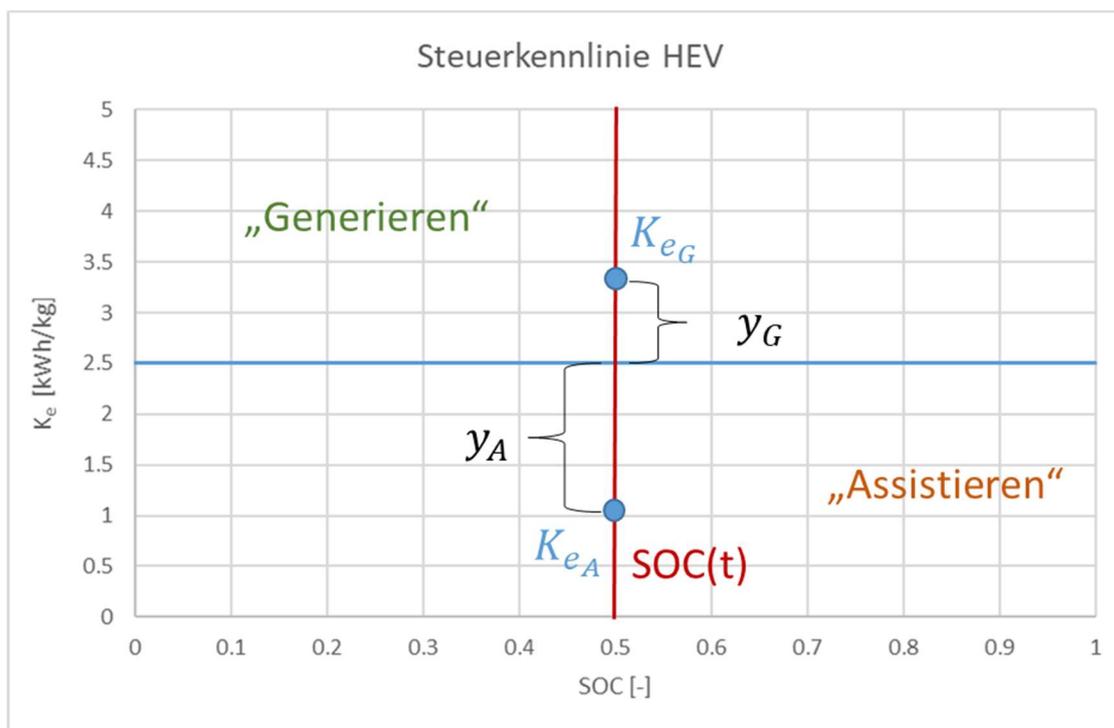


Abbildung 5-7: HEV Steuerkennlinie über SOC

Die Entscheidung, welcher Bereich nun der verbrauchsgünstigste ist, geschieht über die Berechnung von sogenannten Effizienzfaktoren und deren Lage zur Steuerkennlinie. Der Effizienzfaktor fürs Assistieren berücksichtigt die von der Batterie abgegebene elektrische Arbeit sowie die Differenz aus dem Kraftstoffverbrauch durch reinen VKM-Betrieb und Hybridbetrieb. Beim Generieren wird die zur Batterie elektrisch zugeführte Arbeit berücksichtigt und wiederum die resultierende Kraftstoffdifferenz aus VKM- und Hybridbetrieb. [19]

Durch die Lage zur Steuerkennlinie wird somit entschieden, ob „Assistieren“ oder „Generieren“ momentan energetisch sinnvoll ist. Ist der Abstand y_G , wie in Abbildung 5-7 gezeigt, kleiner als der Abstand y_A , wird „Assistieren“ bevorzugt. Die Gleichungen (5-13) und (5-14) beschreiben die Berechnung der Effizienzfaktoren fürs Assistieren und Generieren.

Im STE-File werden zusätzlich SOC-Warn Grenzen festgelegt. Im Bereich der unteren Warn Grenze ist das Aufladen der Batterie durchs Generieren dominant. Die obere Warn Grenze gibt den Bereich an, der rein elektrisches Fahren bevorzugt.

Der Abstand der oberen Warn Grenze zum SOC_{max} wurde so ausgelegt, dass die Rekuperation einer Bremsung von maximaler Geschwindigkeit von der Batterie aufgenommen werden kann.

Die untere Grenze wird dann für eine symmetrische Verteilung mit dem gleichen Abstand beaufschlagt. Die Überschlagsrechnung der Bremsenergie und der SOC-Warngrenzen erfolgt mit den Formeln (5-10) bis (5-12) (Annahme: konstante Bremsverzögerung).

Weiteres können auch Geschwindigkeitsgrenzen vorgegeben werden, die beschreiben, ob elektrisches Fahren oder Fahren mit dem Verbrennungsmotor zu bevorzugen ist.

$$W_{Brems.} = m_{FZG} * a_{Brems.} * s_{Brems.} * \frac{1}{3,6 * 10^6} \quad (5-10)$$

$$SOC_{WG_{oben}} = SOC_{max} - \frac{W_{Brems.}}{SOC_{max} * E_{Batt.}} \quad (5-11)$$

$$SOC_{WG_{unten}} = SOC_{min} + \frac{W_{Brems.}}{SOC_{max} * E_{Batt.}} \quad (5-12)$$

$$K_{eA} = \frac{W_{E_{ab}}}{\Delta m_{Kraftstoff}} \quad (5-13)$$

$$K_{eG} = \frac{W_{E_{zu}}}{\Delta m_{Kraftstoff}} \quad (5-14)$$

Für die durchgeführten Simulationen wurde die Lage der Steuerkennlinie variiert, um ein Verbrauchsoptimum zu finden. Auf der vertikalen Achse wurde durch eine Schrittweite von 0,5, der K_e -Wert, sukzessive von 2 auf 5 gesteigert. Durch die Erhöhung dieses Wertes wird zum einen der Bereich des Assistierens vergrößert und zum anderen der Bereich des Generierens verkleinert. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass das Optimum für das Benzin-Hybridfahrzeug bei einem K_e -Wert von 3 liegt, im Vergleich zu Diesel welcher bei 3,5 liegt. Einen Überblick über die wichtigsten Eckdaten der simulierten Hybridfahrzeuge liefert Tabelle 5-2. Gesamtergebnisse der Simulationen sind im Anhang unter 12.6 angeführt.

Tabelle 5-2: Fahrzeugdaten Ø Otto/Diesel HEV

Ø-HEV Fahrzeug	Daten (Benzin)	Daten (Diesel)
Masse [kg]	1360	1443
Beladung [kg]	123	123
Nennleistung VKM [kW]	70	70
Nennleistung EM [kW]	25	25
Nenndrehzahl VKM [U/min]	5200	3672
Nenndrehzahl EM [U/min]	1194	1194
Batteriegröße [kWh]	1,5	1,5
Batteriespannung [V]	250	250
Energiedichte Batterie [Wh/kg]	50	50
Batterieart	Li-Ion	Li-Ion
SOC-Bereich	0,3-0,7	0,3-0,7
Getriebe	6 Gang	6 Gang

5.5 Simulation von PHEV

Ein Plug-In-Hybridfahrzeug unterscheidet sich von einem HEV-Fahrzeug durch eine größere Batterie, die auch über ein externes Stromnetz geladen werden kann. Der Verbrennungsmotor kann sowohl als Antrieb als auch als Range-Extender verwendet werden. Das PHEV-Konzept stellt somit eine Mischung aus Elektrofahrzeug und Hybridfahrzeug dar. Durch die extern aufladbare Batterie kann dieses Hybridkonzept wie ein Elektrofahrzeug betrieben werden, was sich durch eine Verbrauchsreduzierung im Vergleich zu HEV-Konzepten niederschlägt. In Abbildung 5-8 ist ein klassisches PHEV-Modell dargestellt. [18] [19] [22]

Die Simulation dieses Konzepts in PHEM benötigt, wie auch bei HEV-Konzepten, Informationen zum elektrifizierten Antriebsstrang. Die Handhabung des Elektromotors und der Batterie folgt in Kapitel 5.6. Die Steuerkennlinie, welche im STE-File hinterlegt wird, unterscheidet sich im Verlauf von jener die bei der HEV-Simulation verwendet wird.

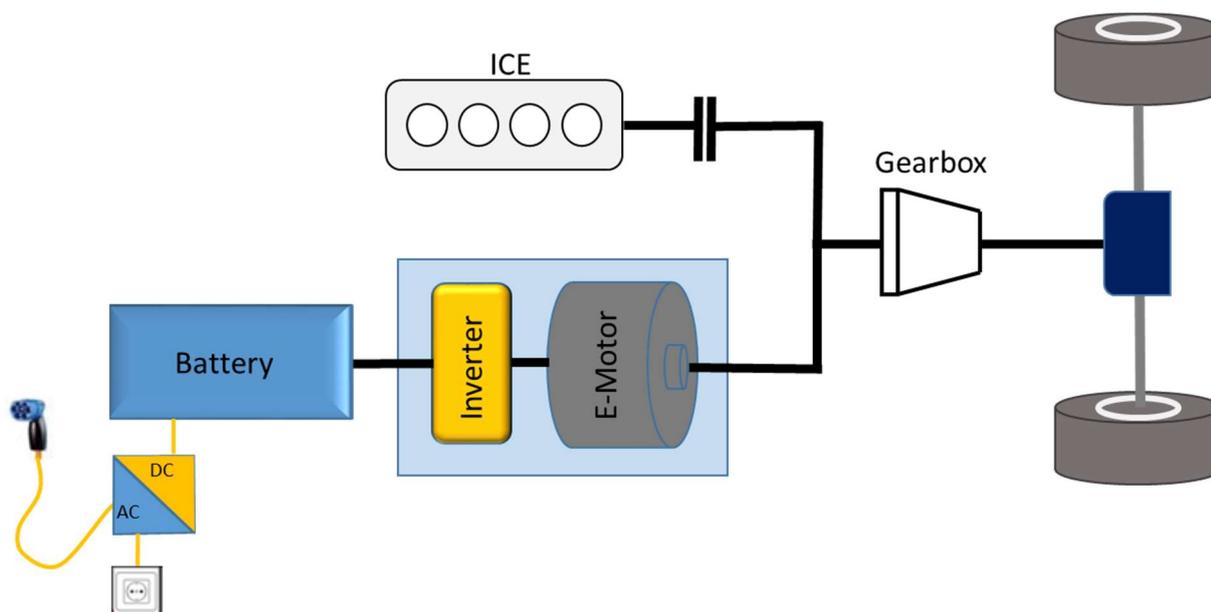


Abbildung 5-8: Topologie des PHEV-Fahrzeugs [27]

In Abbildung 5-9 ist die verwendete Steuerkennlinie für PHEV-Konzepte dargestellt. Ersichtlich ist, dass sich der Graph in zwei Bereiche teilen lässt. Der erste Teil, „HEV-Bereich“, basiert auf derselben Kennlinie, die auch bei HEV-Simulation verwendet wird. Der Effizienzwert K_e wird auch hier in 0,5 Teilschritten ausgehend von 2 bis 5 variiert, um das Verbrauchsoptimum zu finden.

Der Unterschied zur HEV-Kennlinie ist die obere SOC-Warngrenze, die sich überschlagsmäßig durch die Formel (5-15) ergibt. In dieser Formel wird der Bereich, in dem das PHEV-Konzept als HEV betrieben wird, berücksichtigt. Eine Batterie wird durch Annahme der typischen Kapazität und SOC-Grenzen, die für HEV-Anwendungen in Frage kommt, ins Verhältnis zu einer typischen PHEV-Batterie gesetzt.

Addiert man zu der unteren SOC-Warngrenze den Wert des Verhältnisses, ergibt sich die obere SOC-Warngrenze. Die untere SOC-Warngrenze ergibt sich durch Formel (5-12).

$$SOC_{WG_{oben}} = SOC_{WG_{unten}} + \frac{E_{Batt_{HEV}} * (SOC_{Max} - SOC_{Min})_{HEV}}{E_{Batt_{PHEV}} * (SOC_{Max} - SOC_{Min})_{PHEV}} \quad (5-15)$$

Abbildung 5-9 zeigt eine PHEV-Steuerkennlinie über den SOC. Durch die Sprungfunktion ab der oberen SOC-Warngrenze soll elektrisches Fahren und Assistieren je nach Betriebspunkt bevorzugt werden. Der Bereich des elektrischen Assistierens ist durch diese Funktion im Gegensatz zum HEV deutlich vergrößert, um das Potential der extern aufgeladenen Batterie voll nutzen zu können. Die Steuerkennlinie soll eine Verbrauchsminimierung durch die elektrische Betriebsweise gewährleisten.

Unter der oberen SOC-Warngrenze wird das Fahrzeug wie ein Hybridkonzept gehandhabt, mit den, im vorigen Kapitel vorgestellten Effizienzentscheidungen. Die wichtigsten technischen Daten der Benzin/Diesel-PHEV-Fahrzeuge sind in Tabelle 5-3 ersichtlich. Im Anhang unter 12.6 befinden sich die gesamten Ergebnisse aus den Simulationen.

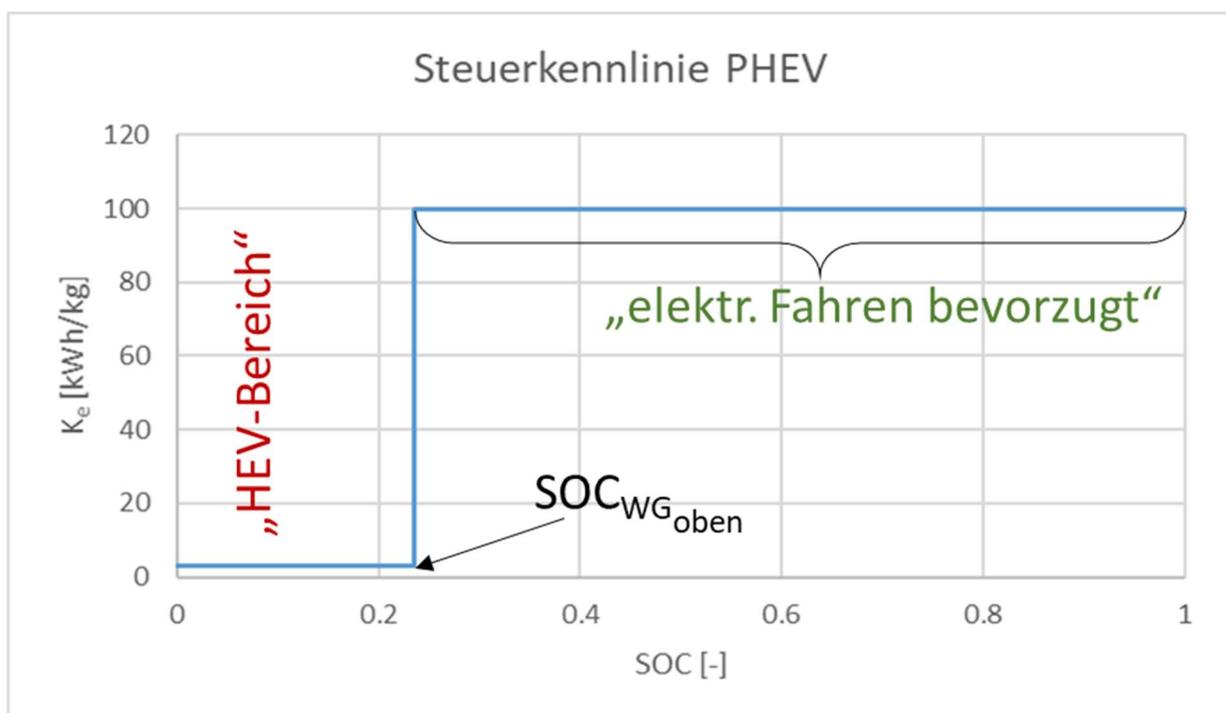


Abbildung 5-9: PHEV-Steuerkennlinie über SOC

Tabelle 5-3: Fahrzeugdaten Ø Otto/Diesel PHEV

Ø-PHEV Fahrzeug	Daten (Benzin)	Daten (Diesel)
Masse [kg]	1496	1578
Beladung [kg]	123	123
Nennleistung VKM [kW]	70	70
Nennleistung EM [kW]	60	60
Nennmoment EM [Nm]	200	200
Nenn Drehzahl VKM [U/min]	5740	3672
Nenn Drehzahl EM [U/min]	2865	2865
Batteriegröße [kWh]	9,9	9,9
Batteriespannung [V]	314 V	314 V
Energiedichte Batterie [Wh/kg]	80	80
Batterieart	Li-Ion	Li-Ion
SOC-Bereich	0,15-0,85	0,15-0,85
Getriebe	6 Gang	6 Gang

5.6 Simulation von BEV

Die ausführliche Beschreibung von Aufbau und Eigenschaften des Elektrofahrzeuges erfolgt im Kapitel 4.1. Nachfolgend wird ein Überblick über die wichtigsten Parameter für die Simulation in PHEM gegeben.

Im Tab „General“ ist, wie auch bei den anderen Fahrzeugtypen, das „VEH-File“ hinterlegt. Im Reiter „EV“ stehen alle Informationen über den elektrischen Antriebsstrang. In Abbildung 5-10 ist die Bedienoberfläche für das Elektroauto in PHEM gezeigt.

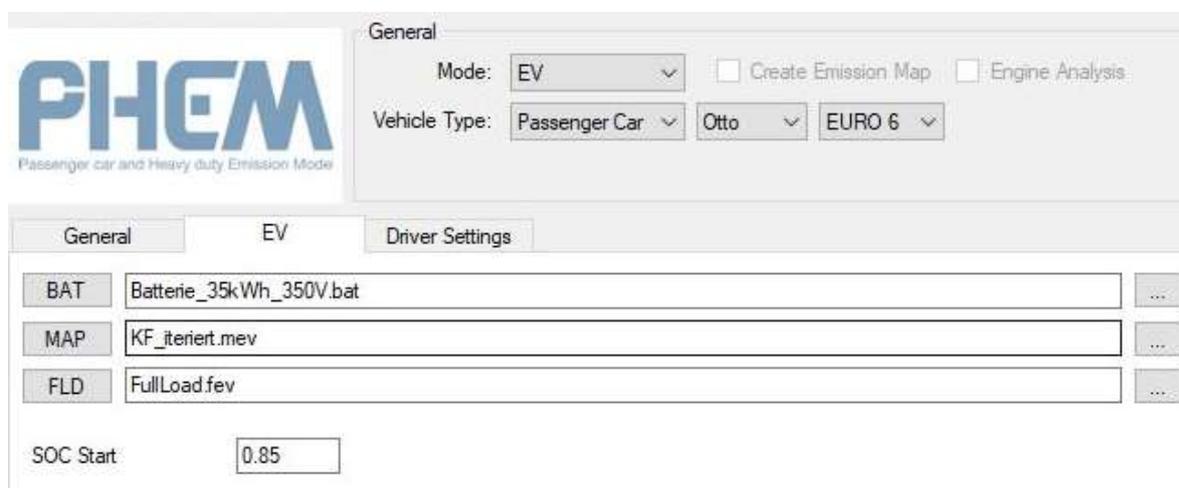


Abbildung 5-10: BEV-Mode-Oberfläche im PHEM

Im sogenannten „BAT-File“ werden batteriespezifische Daten vorgegeben. Unter anderem wird eine Auflade- und Entladekurve der Batterie über den SOC hinterlegt. Die Funktion, die diesen Graphen beschreibt, ergibt sich durch eine Polynomfunktion 6. Ordnung, welche in Formel (5-16) dargestellt ist. Die Koeffizienten a_0 bis a_6 ergeben sich aus Messungen. Die Schrittweite i kann im Intervall 0 bis 1 beliebig gewählt werden. Bei den durchgeführten Simulationen wurde eine Schrittweite von 0,1 gewählt.

In Abbildung 5-11 ist die Batteriespannung über den SOC am Beispiel der BEV-Batterie gezeigt.

$$U_{SOC_i} = a_0 + a_1 * SOC_i + a_2 * SOC_i^2 + a_3 * SOC_i^3 + a_4 * SOC_i^4 + a_5 * SOC_i^5 + a_6 * SOC_i^6$$

$$[0,1] = \{i \in \mathbb{R} \mid 0 \leq i \leq 1\} \quad (5-16)$$

Darüber hinaus werden die minimalen und maximalen SOC-Grenzen im „BAT-File“ festgelegt. Für die durchgeführten Simulationen wurde für das Elektrofahrzeug ein SOC-Bereich von 0,15 bis 0,85 gewählt. Die Batteriekapazität wird in Amperestunden angegeben und errechnet sich aus der Batteriegröße mit der Formel (5-17) wie folgt:

$$C_{Batt.} = \frac{E_{Batt.} * 1000}{U_{SOC_{i=1}}} \quad (5-17)$$

Der Innenwiderstand der gesamten Batterie ergibt sich durch die Anzahl, der in Serie geschalteten Zellen, multipliziert mit dem Zellwiderstand. Die Zellenanzahl ergibt sich aus der Batterienennspannung, dividiert durch die Zellspannung einer Zelle. Die Werte für Widerstand und Spannung auf Zellebene stammen aus einer ausgeführten Batterie, welche für fahrzeugspezifische Anwendungen konzipiert ist. In Abbildung 12-26 ist das Datenblatt mit den Werten angeführt.

$$Z_{cell} = \frac{U_{Batt.}}{U_{Cell}} \quad (5-18)$$

$$R_{iBatt.} = R_{Cell} * Z_{Cell} \quad (5-19)$$

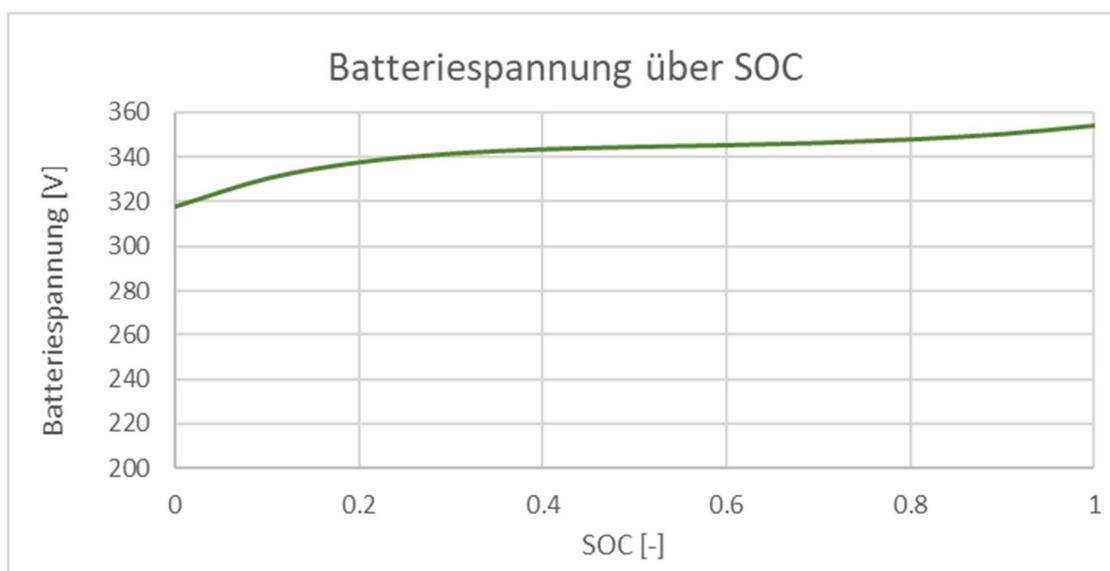


Abbildung 5-11: Batteriespannung über SOC

Im „MAP-File“ sind Drehzahl, Drehmoment und die elektrisch aufgenommene Leistung des Elektromotors jeweils normiert vorgegeben. Durch die Vorgabe des Drehmoments und der aufgenommenen Leistung ist der Wirkungsgrad indirekt gegeben. Das „MAP-File“ dient somit als Wirkungsgradkennfeld des verwendeten Elektromotors.

Die Zusammenhänge zwischen Drehmoment, Leistung und Wirkungsgrad werden durch die Formeln (5-20) bis (5-22) beschrieben. Der Wirkungsgrad, welcher durch die Formel (5-20) gegeben ist, berücksichtigt den Elektromotor wie auch den Inverter. Die Normierung erfolgt wie beschrieben über die Nennleistung bzw. Nenndrehzahl.

Bei den durchgeführten Simulationen wurde ein bestehendes Wirkungsgradkennfeld durch Messergebnisse eines dem Durchschnittselektroauto sehr ähnlichem Fahrzeug justiert. (VW-e-Golf in Kapitel 4.2)

$$\eta_{EM} = \frac{P_{eEM}}{P_{iEM}} \quad (5-20)$$

$$P_{eEM} = M_e * \omega \quad (5-21)$$

$$P_{iEM} = I_{Batt.} * U_{SOC_i} \quad (5-22)$$

Die Vollastkurve des Elektromotors wird im „FLD-File“ vorgegeben. Die hierfür benötigte Größe ist die Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl des Elektromotors. Die Leistungskurve einer Synchronmaschine ist in Abbildung 4-2 gezeigt. Die wichtigsten Eckdaten des durchschnittlichen Elektrofahrzeugs sind in Tabelle 5-4 angeführt.

5.6.1 Kennfeldjustierung mittels Messdaten

Für die durchgeführten Simulationen des durchschnittlichen Elektrofahrzeugs wurde ein bereits vorhandenes Wirkungsgradkennfeld eines PSM-Motors durch Messdaten eines dem Durchschnittselektroauto sehr ähnlichem Fahrzeug justiert. Durch die durchgeführte Justierung werden die Wirkungsgradbereiche, des vorhandenen Kennfelds, dem realen Elektromotor angepasst. Die Methode, mit der das Kennfeld angepasst wurde, beruht auf dem Vergleich von Messdaten zu Simulationsdaten.

Im ersten Schritt werden die positiven Werte der aufgenommenen elektrischen Leistung P_i über der positiven Leistung am Rad P_{Wheel} jeweils für die Simulation und Messung aufgetragen. Durch die entstehende Punktwolke werden lineare Trendlinien, einerseits für die Messdaten und andererseits für die Simulationsdaten, gelegt. Die Differenz dieser beiden Geraden ergibt die Korrekturfunktion für das Kennfeld. Mit der Korrekturfunktion wird anschließend eine korrigierte Leistung P_i errechnet. Die allgemeine Beschreibung der Geraden und der Leistungskorrektur wird in den Formeln (5-23) bis (5-26) gezeigt.

$$y_{Sim} = k_{Sim} * x + d_{Sim} \quad (5-23)$$

$$y_{Mess} = k_{Mess} * x + d_{Mess} \quad (5-24)$$

$$y_{Korr.} = (k_{Sim} - k_{Mess}) * x + d_{Sim} - d_{Mess} \quad (5-25)$$

$$P_{iKorr.} = P_i + y_{Korr.} \quad (5-26)$$

Im zweiten Schritt wird die elektrische Leistung über die Drehzahl für die Simulation und Messung aufgetragen. Anschließend werden wieder lineare Trendlinien durch die entsprechenden Punktwolken gelegt. Durch die erhaltene Korrekturfunktion ergeben sich schlussendlich drehzahlkorrigierte Werte für die elektrische Leistung P_i .

Im dritten Schritt werden die Änderungen der Leistungskorrektur und Drehzahlkorrektur in Bezug auf die ursprünglichen Simulationswerte von P_i verglichen.

Im vierten und letzten Schritt wird die eigentliche Justierung des ursprünglichen Elektromotorkennfeldes durchgeführt. Hierfür werden die P_i -Werte mittels der resultierenden Werte aus der Korrektur-Geradengleichung, beschrieben durch die Gleichung (5-25), addiert. Dies geschieht sowohl für den negativen als auch für den positiven Bereich im Kennfeld.

Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 zeigen die Mess- und Simulationsergebnisse vor und nach der Justierung durch die Trendlinien. Erkennbar ist, dass sich die beiden Punktwolken aus Messdaten und Simulationsdaten nach der Korrektur in weiten Bereichen überlappen. Die Abweichung der Steigung von den justierten Kennlinien beträgt in etwa 2,4 %, im Vergleich zu den Ausgangstrendlinien, bei denen die Abweichung von Steigungen etwa 20,5 % beträgt.

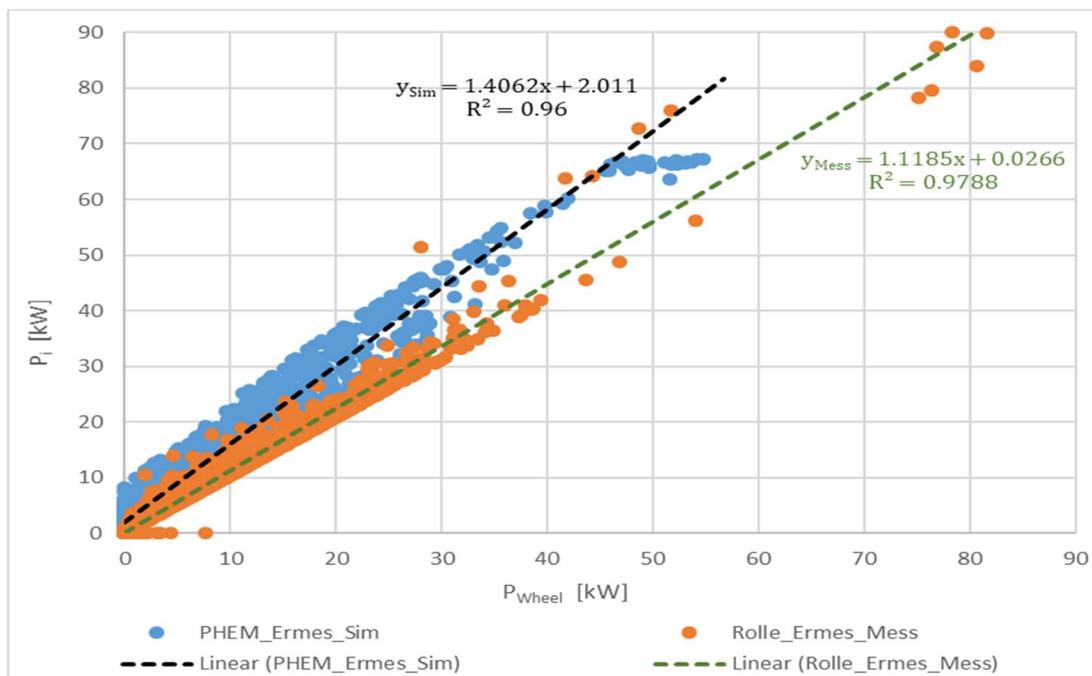


Abbildung 5-12: Lineare Trendlinien für Simulations- und Messwerte

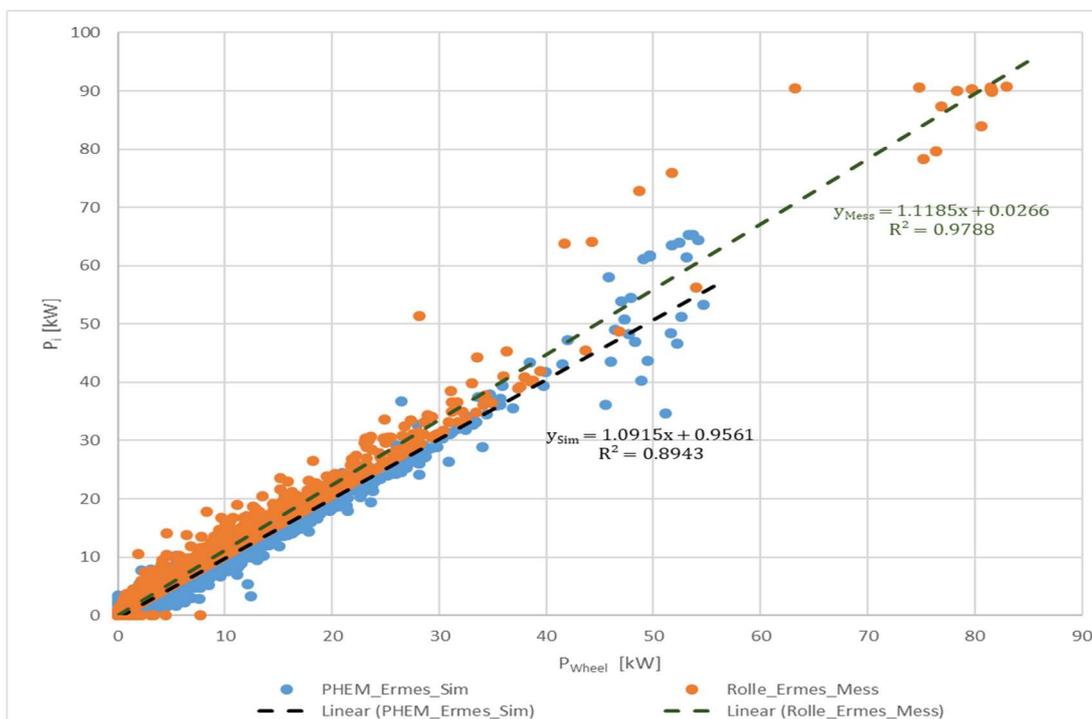


Abbildung 5-13: Trendlinien nach der Korrektur über Leistung und Drehzahl

Durch die Kennfeldjustierung wurde der Wirkungsgrad im Bestpunkt von 85% auf 92% erhöht. Darüber hinaus, wurde auch der linke untere Bereich im Kennfeld, mit geringer Drehzahl, Leistung und schlechtem Wirkungsgrad durchschnittlich um 5% verbessert. Simulationsergebnisse bzgl. BEV „heute“ und im Jahr 2030“ befinden sich unter 12.6.

Tabelle 5-4: Fahrzeugdaten Ø BEV

Ø-BEV Fahrzeug	Daten
Masse [kg]	1496
Beladung [kg]	123
Nennleistung EM [kW]	90
Nennmoment EM [Nm]	300
Nennzahl EM [U/min]	2865
Batteriegröße [kWh]	35
Batteriespannung [V]	350
Energiedichte Batterie [Wh/kg]	110
Batterieart	Li-Ion
SOC-Bereich	0,15-0,85
Getriebe	1 Gang

5.7 Simulation von FCEV

Ein Fahrzeug mit Brennstoffzelle nutzt Wasserstoff als Energieträger. In der Brennstoffzelle selbst, wird durch einen chemischen Prozess mit Sauerstoff, Energie, die im Wasserstoff gespeichert ist, in elektrische Energie umgewandelt und schlussendlich zum Antrieb verwendet. Die Funktionsweise einer Brennstoffzelle ist in Abbildung 5-15 gezeigt. Die Betriebsweise des Fahrzeugs ist dem Elektroauto sehr ähnlich und es werden, abgesehen von der Brennstoffzelle, die gleichen Komponenten verbaut. Zusätzlich benötigt das Fahrzeug Drucktanks, in denen der Wasserstoff mit etwa 700 bar gespeichert wird. Für Fahrzeugkonzepte werden Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen verwendet. [22]

Die Traktionsbatterie wird für die Bremsenergieerückgewinnung verwendet und senkt somit den Wasserstoffverbrauch. Auch für den Beschleunigungsvorgang wird auf die gespeicherte Energie in der Batterie zurückgegriffen um ein dynamisches Fahren zu gewährleisten. Die verwendeten Batterietypen sind ähnlich wie bei HEV-Konzepten. [22]

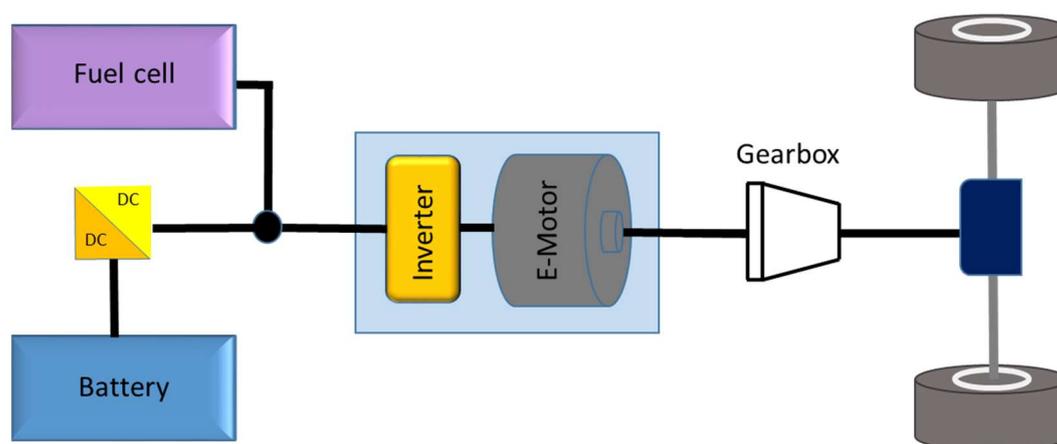


Abbildung 5-14: Topologie des FCEV-Fahrzeugs [27]

Größter Vorteil durch den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen ist, dass durch die Umwandlung des Wasserstoffes in elektrische Energie ausschließlich Wasser entsteht. Um Vergleiche mit anderen Konzepten zu ziehen, sollte hier die Herstellung des Wasserstoffes und der Brennstoffzelle berücksichtigt werden. Je nach Herstellungsvariante von Wasserstoff, entstehen unterschiedliche vorgelagerte CO₂-Emissionen. [22]

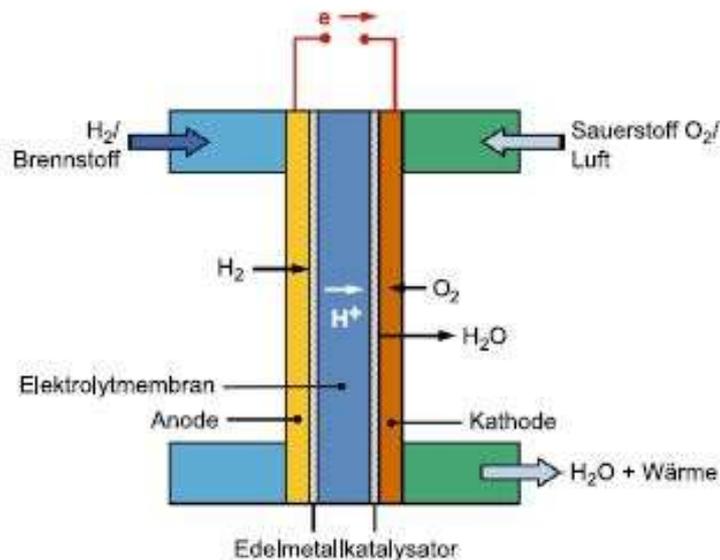


Abbildung 5-15: Funktionsweise einer Brennstoffzelle [22]

Ein FCEV-Fahrzeug wird in PHEM im „EV-Mode“ als Elektroauto simuliert. Die benötigten Informationen sind gleich wie bei der BEV-Simulation, mit dem Unterschied, dass im „BAT-File“ die Batteriespannung über den SOC konstant gesetzt wird und die Kapazität ausreichend groß angenommen wird.

Durch die Simulation wird der Energieverbrauch des Fahrzeuges über den vorgegebenen Zyklus ermittelt. Mit den erhaltenen Ergebnissen wird durch ein anschließendes „Post-Processing“ in Excel die Betriebsweise der Brennstoffzelle berücksichtigt. Die im „Post-Processing“ verwendete Wirkungsgradkennlinie der Brennstoffzelle ist in Abbildung 5-16 dargestellt. [26] [27]

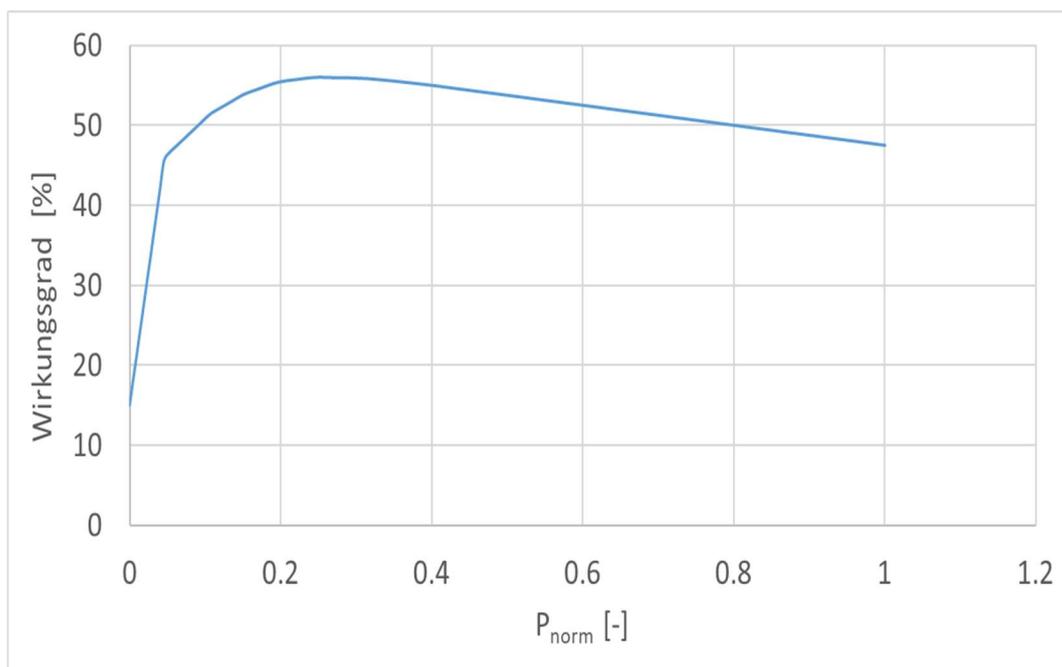


Abbildung 5-16: Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle über normierter Leistung [27]

Die technischen Daten des durchschnittlichen Brennstoffzellenfahrzeuges sind in Tabelle 5-5 angeführt.

Tabelle 5-5: Fahrzeugdaten Ø FCEV

Ø-FCEV Fahrzeug	Daten
Masse [kg]	1461
Beladung [kg]	123
Nennleistung EM [kW]	90
Nennmoment EM [Nm]	300
Nenndrehzahl EM [U/min]	2865
Batteriegröße [kWh]	1,25
Batteriespannung [V]	320
Energiedichte Batterie [Wh/kg]	80
Batterieart	Li-Ion
Energiedichte FC [Wh/kg]	650
FC-Bauart	PEMFC
Getriebe	1 Gang

5.8 Ergebnisse der Simulationen

Die Ergebnisse der Simulationen für die verschiedenen Antriebskonzepte werden als TTW-Part in der folgenden Lebenszyklusanalyse verwendet. Die hier angeführten Ergebnisse beziehen sich auf konventionellen Benzin (E0) und Diesel (B0). Die Verbrauchskennfelder für die verwendeten Kraftstoffe beziehen sich auf HBEFA 4.1 für EURO 6. Ergebnisse für alternative Kraftstoffe werden im Kapitel 7 angeführt.

FZG	Antriebsarbeit [kWh/km] ⁽¹⁾	Energieverbrauch VKM/EM/FC [kWh/km]			CO ₂ [gCO ₂ /km]	H ₂ [gH ₂ /km]
Ø-Benzin	0,146	0,622	-	-	164,3	-
Ø-Diesel	0,152	0,519	-	-	136,8	-
Ø-HEV (B)	0,151	0,518	-	-	136,9	-
Ø-HEV (D)	0,157	0,461	-	-	121,5	-
Ø-PHEV (B)	0,161	0,282	0,102	-	74,6	-
Ø-PHEV (D)	0,167	0,2513	0,099	-	66,2	-
Ø-BEV	0,161	-	0,194	-	-	-
Ø-FCEV	0,159	-	-	0,335	-	10,1

(1)...positive Antriebsarbeit an den angetriebenen Rädern

6 Lebenszyklusanalyse

Lebenszyklusanalysen werden allgemein dafür verwendet um Umweltauswirkungen eines bestimmten Produktes über den ganzen Lebenszyklus hinweg, von der Produktion, über die Nutzung bis hin zur Entsorgung, zu beurteilen. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit werden generische Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antrieben durch eine Lebenszyklusanalyse anhand der äquivalenten CO₂-Emissionen bewertet. Für die hier durchgeführte LCA wurden folgende Teilprozesse berücksichtigt: [18]

- Fahrzeugherstellung
- Batterieherstellung
- Wartung
- Fahrzeugentsorgung
- WTT-Kraftstoffbereitstellung
- TTW-Kraftstoffverbrauch
- Strombereitstellung und Ladeverluste
- Infrastrukturbereitstellung (Österreich)

Die WTT- und TTW-Daten sind in den Abschnitten 3 und 5 angeführt. Daten der Strombereitstellung finden sich in den Kapiteln 3.4 und 3.5. Die Ermittlung der Ladeverluste wird in Abschnitt 4.2.2 gezeigt. Für die weitere Berücksichtigung der Ladeverluste in der LCA, werden 10 % des Fahrzeugenergiebedarfs angenommen. Um den Einfluss der Stromherstellung bei BEV-Konzepten zu verdeutlichen, wurden verschiedene Szenarien der Strombereitstellung berücksichtigt. Die Ergebnisse aller Antriebskonzepte werden im Abschnitt 7 präsentiert.

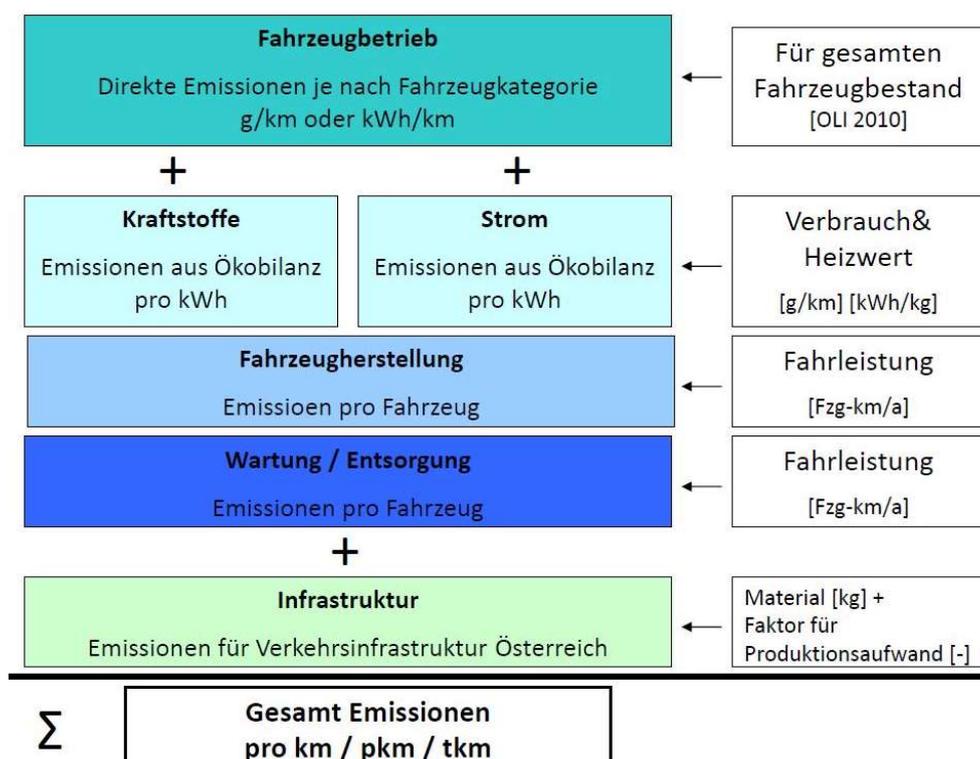


Abbildung 6-1: Prinzip einer Lebenszyklusanalyse [38]

Das Prinzip, anhand der die Lebenszyklusanalyse durchgeführt wurde, ist in Abbildung 6-1 gezeigt. Für die Fahrleistung, welche die gefahrenen Kilometer über ein Fahrzeugleben beschreiben, wurde ein für Österreich entsprechendes Profil gewählt. Die Fahrleistungen pro Jahr für verschiedene Antriebskonzepte, belaufen sich auf 14.500 km. Die Fahrzeuglebensdauer beläuft sich auf durchschnittlich 15 Jahre. [29]

Dieses Fahrprofil spiegelt einen durchschnittlichen PKW in Österreich wider. [29] Für alle Antriebskonzepte wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit dieselben Jahresfahrleistungen und Lebensdauer angenommen. Bei PHEV-Konzepten wird ein 50/50-Mix gewählt, d.h. zu 50% wird das PHEV-Konzept als HEV betrieben und zu 50% wird das Fahrzeug rein elektrisch gefahren. Diese Annahme stützt sich auf eine vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik durchgeführte Analyse bezüglich elektrischer Fahranteile bei PHEV-Konzepten. [42]

6.1 Fahrzeugherstellung, Wartung und Entsorgung

In der vorliegenden Arbeit werden Daten aus den Studien [16] und [31] für Kfz Erzeugung, Wartung und Entsorgung verwendet. Die Studie [31] berücksichtigt Daten für verschiedene Fahrzeugkonzepte u.a. für Benzin/Diesel-Fahrzeuge, Elektrofahrzeuge und Hybridkonzepte.

Durch Umrechnung auf die oben genannte Lebensdauer und Fahrleistung von 15 Jahren und 14500 km pro Jahr, ergibt sich der Wert für die verschiedenen Antriebskonzepte. Bei Antriebskonzepten mit Traktionsbatterie werden die CO_{2-eq}-Emissionen der Batterieherstellung separat ermittelt und anschließend addiert. Das Brennstoffzellenfahrzeug wird nachfolgend, in Bezug auf Treibhausgasemissionen wie ein Elektroauto mit kleinerer Batterie gehandhabt. Die zusätzlichen Emissionen, welche bei der Herstellung einer Brennstoffzelle anfallen, werden im Abschnitt 6.3 berücksichtigt.

Tabelle 6-1: Treibhausgasemission der Fahrzeugherstellung, Wartung und Entsorgung [31]

FZG	Fahrzeugherstellung [gCO _{2-eq} /km]	Wartung [gCO _{2-eq} /km]	Entsorgung [gCO _{2-eq} /km]
Ø-Benzin	26,7	3,7	2,1
Ø-Diesel	27,1	3,7	1,9
Ø-HEV	30,6	3,3	1,7
Ø-PHEV	30,8	3,7	1,7
Ø-BEV	26,9	3,1	1,9
Ø-FCEV	26,9	3,1	1,9

In Abbildung 6-2 sind Vergleichswerte aus der Studie [16] in Bezug auf die Fahrzeugherstellung, Wartung und Entsorgung dargestellt. Daten für HEV und PHEV werden hier nicht angegeben. Im Vergleich zu den hier verwendeten Daten aus der Studie [31] gibt es eine Abweichung, die im arithmetischen Mittel 15% beträgt. Diese Abweichung lässt sich durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen der Datenbeschaffung und Genauigkeit der verfügbaren Daten von Herstellern in Bezug auf Herstellung, Wartung und Entsorgung erklären.

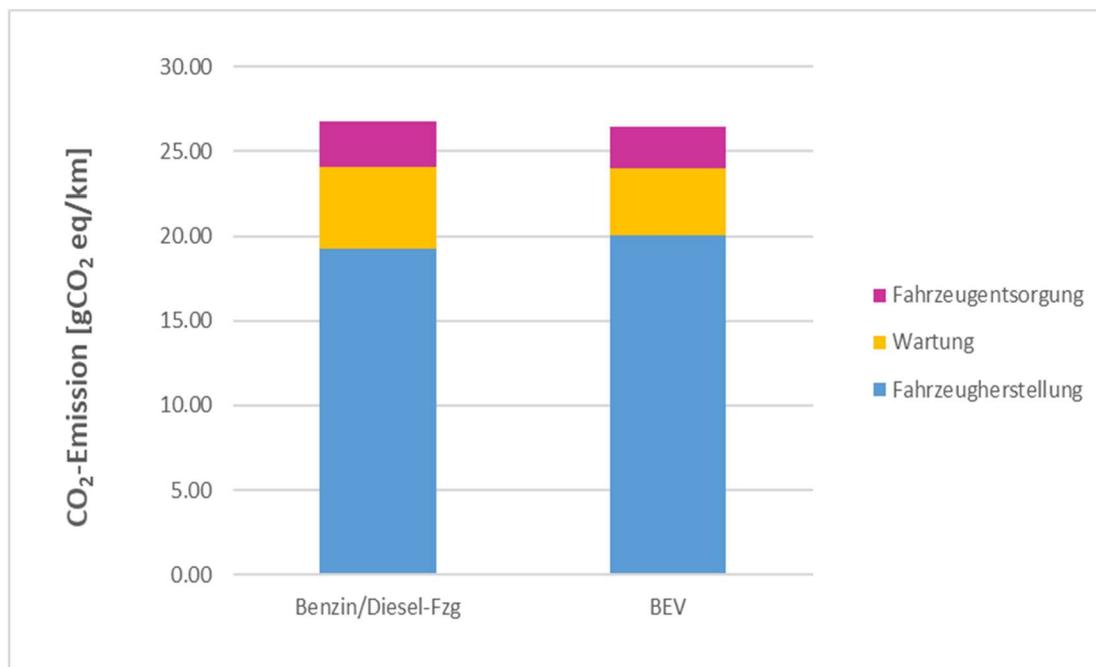


Abbildung 6-2: CO₂-Emissionen aus einer Vergleichsstudie für Herstellung, Wartung und Entsorgung von Fahrzeugkonzepten [16]

6.2 Batterieherstellung

Bei elektrifizierten Fahrzeugkonzepten und vor allem für Elektrofahrzeuge, müssen die Emissionen, die bei der Herstellung von Batterien entstehen, zur Bewertung in einer Lebenszyklusanalyse mitberücksichtigt werden.

Durch die Verwendung von verschiedenen Datensätzen, aus unterschiedlichen Quellen ergeben sich für die Gesamtbilanz in Bezug auf den Ausstoß von Emissionen bei der Herstellung von Batterien verschiedene Werte. Für die hier durchgeführte LCA wurde der Wert für die CO₂-Emission, die vom Joaneum Research ermittelt wurde, herangezogen. [30]

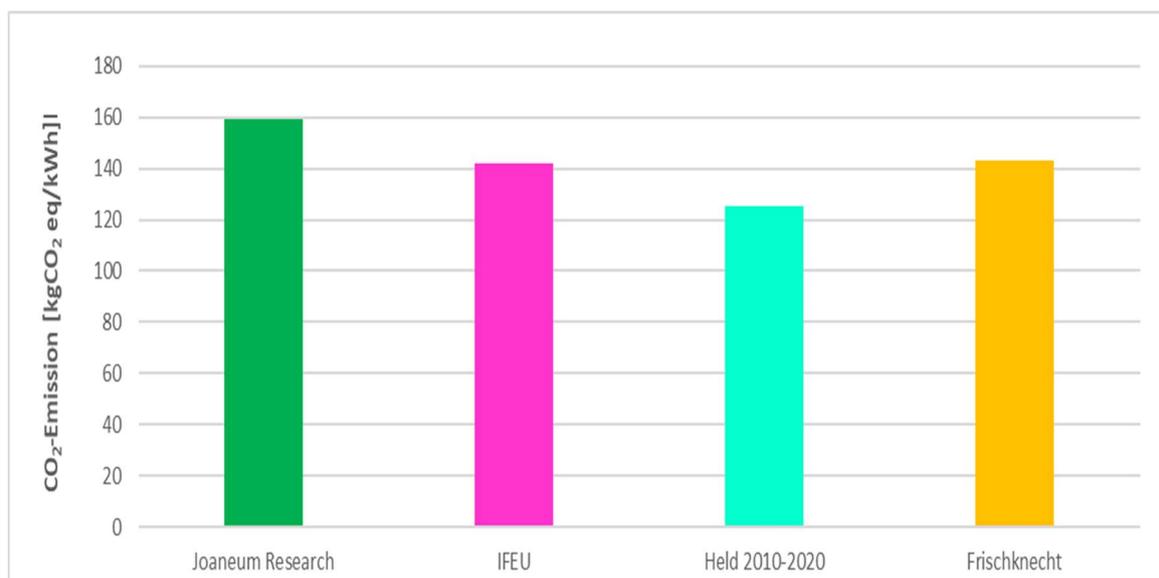


Abbildung 6-3: Vergleich verschiedener Studien zu Treibhausgasemission bei der Batterieherstellung [30] [31] [32] [33]

In Abbildung 6-3 sind die Ergebnisse der betrachteten Studien für Vergleichszwecke graphisch dargestellt. Grundsätzlich kann der Lebensweg einer Batterie in 7 Teilschritte aufgeteilt werden. [30]

- Rohstoffgewinnung
- Rohstoffverarbeitung
- Herstellung des Batteriesystems
- Nutzungsphase
- Wiederverwendung (2. Life)
- Recycling
- Transport

Für die LCA werden die ersten 4 Schritte berücksichtigt. Durch Anwendung des Batteriesystems in einer zweiten Nutzungsphase und nach anschließendem Recycling, sinkt der spezifische CO₂-Ausstoß. Mit Berücksichtigung von Recycling und zweiter Nutzung belaufen sich die CO₂-Emissionen auf etwa 95 gCO₂/km. [30]

6.3 Brennstoffzellenherstellung

In Tabelle 6-2 sind Daten angeführt, welche bei der Herstellung von Brennstoffzellen entstehen. Für die durchgeführte LCA wurden die Treibhausgasemissionen als Mittelwert der betrachteten Studien berücksichtigt. Lebensdauer und Jahresfahrleistung entsprechen den oben angeführten Werten. [30]

Tabelle 6-2: CO₂-Ausstoß bei der Herstellung von Brennstoffzellen [30] [34] [35] [36]

	kgCO ₂ -eq/FC	gCO ₂ -eq/km
Studie 1 [34]	840	3,9
Studie 2 [35]	2500	11,5
Studie 3 [36]	1400	6,4
arithmetischer Mittelwert	1580	7,3

6.4 Infrastrukturbereitstellung

Der Einfluss des Straßenbaus, die Instandhaltung und Bereitstellung von Infrastruktur, wird in der LCA als zusätzliche CO₂-Emission pro gefahrenem Kilometer berücksichtigt. Der hier berücksichtigte Wert beläuft sich auf 16,4 gCO₂-eq/km und beschreibt die Situation der österreichischen Infrastruktur. [37]

7 Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse

Die hier präsentierten Ergebnisse der LCA beziehen sich auf die durchgeführten Simulationen mit den definierten generischen Fahrzeugen. Der elektrische Energiebedarf für elektrifizierte Antriebe wird mit der österreichischen Stromaufbringung bewertet. Die Ladeverluste, die durch die AC/DC-Wandlung entstehen, werden durch 10% vom elektrischen Energieverbrauch des Fahrzeuges berücksichtigt.

Die Lebenszyklusanalyse zielt somit auf den Betrieb der Fahrzeugkonzepte in Österreich ab. Die vorgelagerten Emissionen der Kraftstoffbereitstellung spiegeln die europäische Situation wider. Der verwendete Fahrzyklus deckt in einem Drittmix Stadt, Land und Autobahn ab, und entspricht somit einem realen Fahrprofil.

Zusätzlich zu den herkömmlichen Kraftstoffen wie Benzin und Diesel wurden alternative Kraftstoffe in der LCA bewertet. Aus dem WTT-Teil ergeben sich je nach Kraftstoff erhebliche Abweichungen bei der Bereitstellung, bedingt durch verschiedene Herstellungsvarianten und Prozesse, die nötig sind, um den Kraftstoff „an den Mann“ zu bringen. Aus diesem Grund wird je Kraftstoffart der arithmetische Mittelwert der betrachteten WTT-Varianten gebildet, und somit „Durchschnittskraftstoffe“ definiert. Die kleinste und größte Abweichung der CO₂-eq-Emissionen, bedingt durch diese Unterschiede, wird in den Abbildungen mittels Fehlerindikatoren angegeben.

7.1 Ergebnisse für Ottofahrzeugkonzepte

In der folgenden Abbildung 7-1 sind die Treibhausgasemissionen der simulierten Antriebskonzepte für Ottokraftstoffe abgebildet. Der rein elektrische Anteil vom Fahrzyklus der PHEV-Varianten entspricht 50 %. Bei biogen hergestellten Kraftstoffen entfallen bei der Bilanzierung die CO₂-Emissionen durch die Verbrennung des Kraftstoffes. Die folgenden Vergleiche beziehen sich auf die „Durchschnittskraftstoffe“.

Die Einsparung über den Lebenszyklus, im Vergleich von HEV zum konventionellen Benzinfahrzeug beträgt 11,6 %. Bei PHEV beträgt sie durch Berücksichtigung des österreichischen Stromes und der Ladeverluste etwa 25,3 %. Beim Vergleich über die TTW-Emissionen, mit Benzin E5 betragen die Einsparungen beim HEV-Konzept 16,6 % und 54,6 % für PHEV gegenüber dem konventionellen Antrieb.

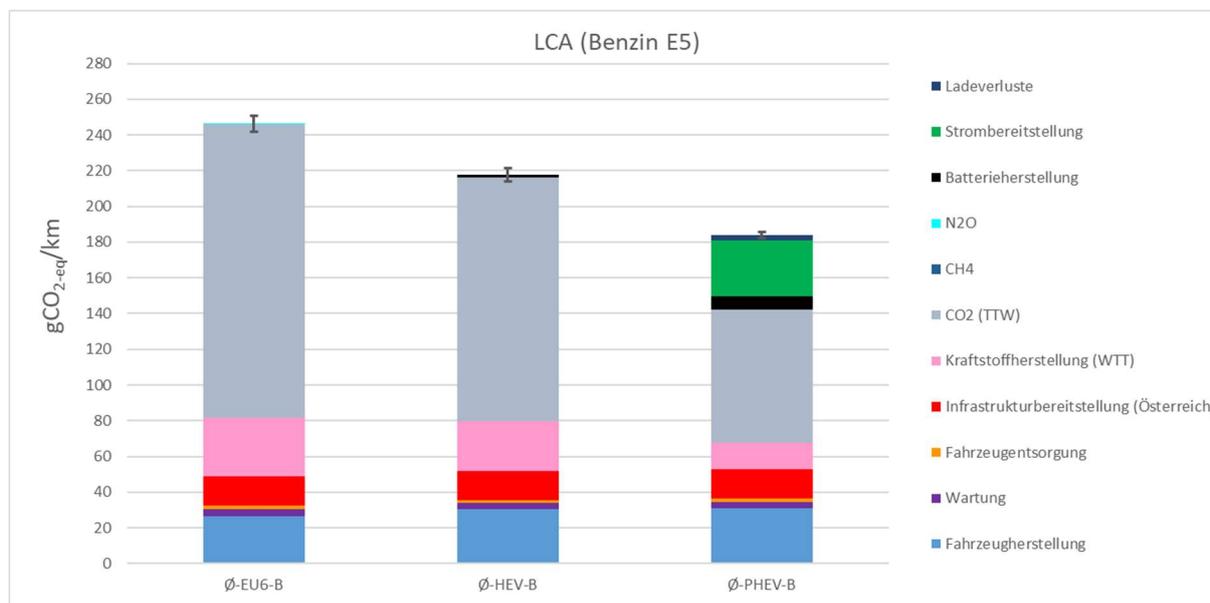


Abbildung 7-1: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Benzin (E5)

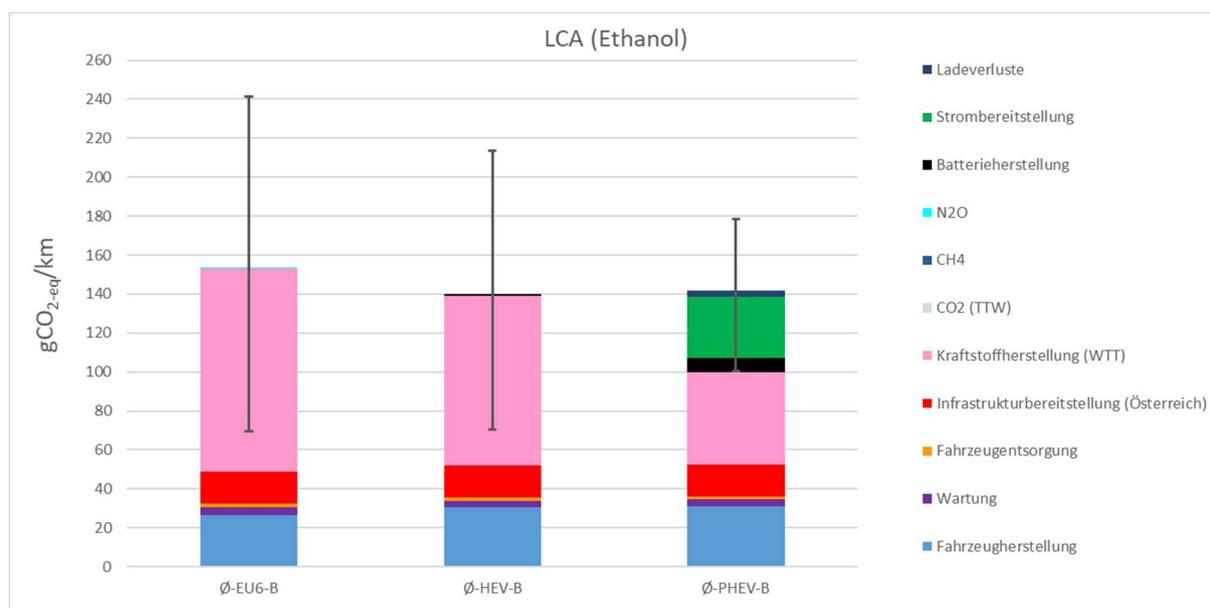


Abbildung 7-2: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Ethanol

In Abbildung 7-2 ist biogen hergestelltes Ethanol dargestellt, um Vergleiche zu Benzin aus fossilen Quellen zu ziehen. Die CO₂-eq-Einsparung durch Betrieb mit Bio-Ethanol gegenüber Benzinbetrieb über einen Lebenszyklus beträgt 37,8 %, bei HEV 35,6 % und bei PHEV 22,6 %. Weitere Ergebnisse bei Verwendung alternativer Kraftstoffe befinden sich im Anhang unter 12.2.

7.2 Ergebnisse für Dieselfahrzeugkonzepte

Es wurden für alle Dieselmotoren die Energieverbrauchswerte (kWh/km) und Fahrzeugdaten des Diesel-PKW, relevant für Erzeugungs- und Entsorgungsemissionen, als Basis verwendet. Als Vergleich zum fossilen Kraftstoff kommt hier Bio-Diesel zum Einsatz. Aus Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 geht hervor, dass die Einsparung über ein Fahrzeugleben, im Vergleich zum konventionellen Dieselfahrzeug, bei HEV etwa 6,6 % beträgt.

Das PHEV-Konzept emittiert, mit Berücksichtigung der vorgelagerten CO₂-eq-Emissionen der Strombereitstellung und Ladeverluste, in etwa 19 % weniger Treibhausgas im betrachteten Lebenszyklus.

Beim Vergleich des TTW-Kohlendioxid ausstoßes durch den Kraftstoffverbrauch ergibt sich folgendes Bild: Die Einsparung von HEV gegenüber dem Dieselfahrzeug beträgt ca. 11,2 %. Beim PHEV mit 50 % elektrischem Anteil beläuft sich die Einsparung auf 51,6 %.

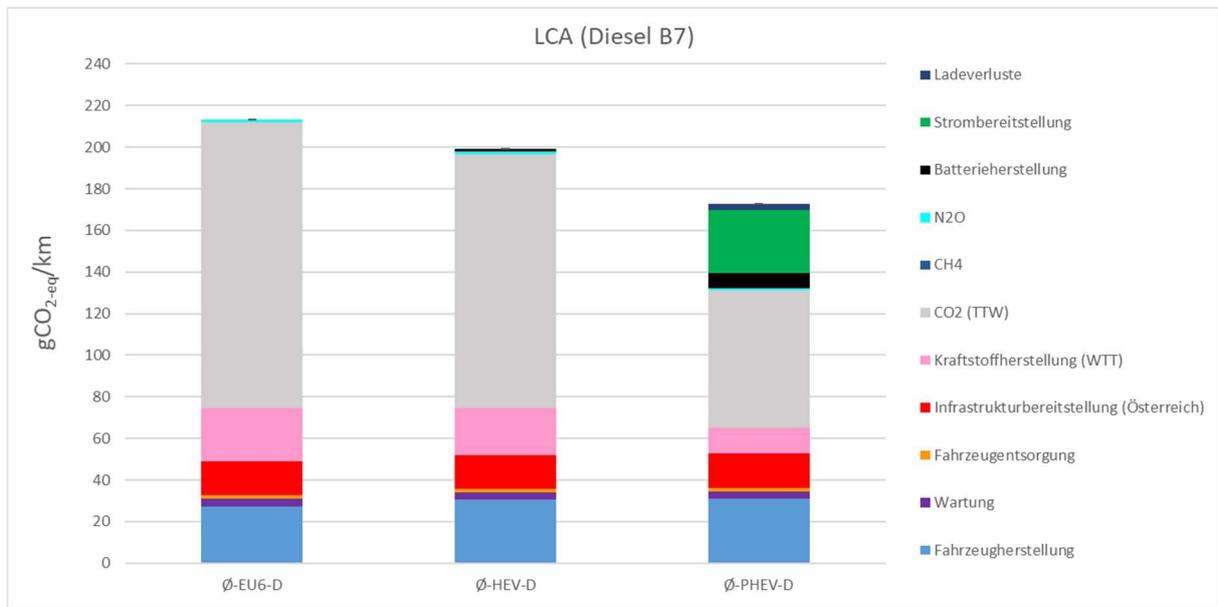


Abbildung 7-3: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Diesel (B7)

Bei der Verwendung von Bio-Diesel ergeben sich bezogen auf Diesel B7 folgende Unterschiede: Der Treibhausgasausstoß im Lebenszyklus eines Ø-Dieselfahrzeugs verringert sich um ca. 33,7 %, der des HEV-Konzepts um 32 %. Bei PHEV sind es 20,1 % Verbesserung. Weitere Dieselalternativen befinden sich im Anhang unter dem Abschnitt 12.4.

Durch die Reduktion der Treibhausgasemissionen aus dem Kraftstoffverbrauch, sinkt auch der Vorteil des PHEV Konzeptes, bei dem die Emissionen aus Stromverbrauch und für Batterieherstellung als relevante Größen nicht abnehmen.

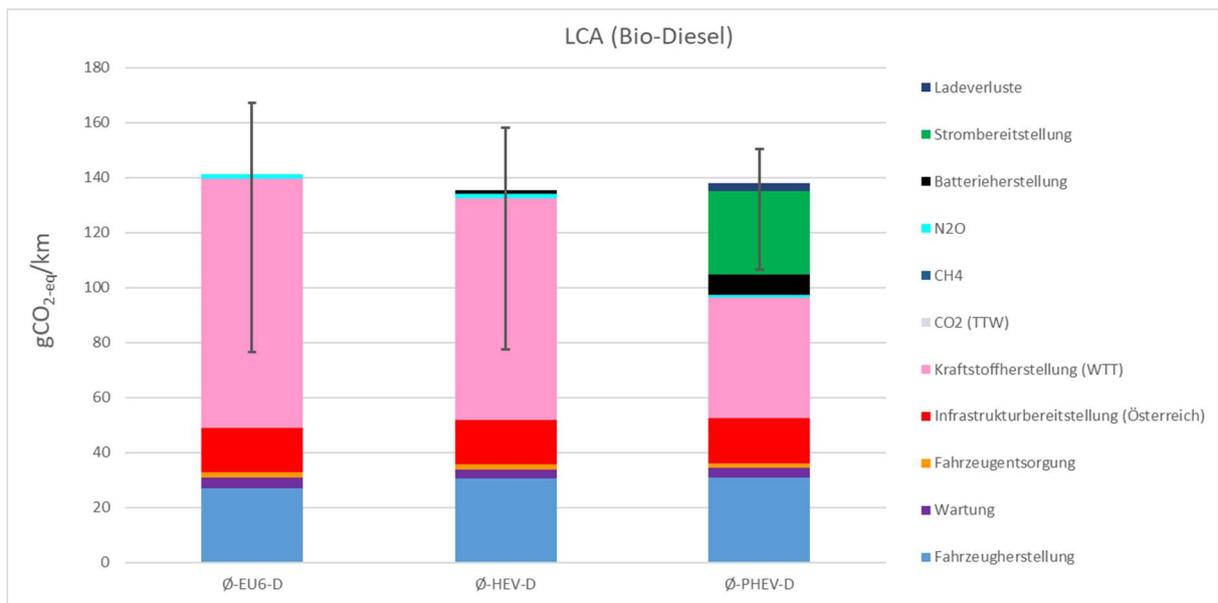


Abbildung 7-4: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Bio-Diesel

7.3 Ergebnisse für Elektrofahrzeuge

Die Annahmen der Lebensdauer und der jährlichen Fahrleistung wurden auch beim Elektrofahrzeug übernommen. Angenommen wird ebenso, dass über den Lebenszyklus dieselbe Batterie verwendet wird. Die verwendeten Emissionsfaktoren der Strombereitstellung berücksichtigen mehrere Szenarien, um zu zeigen wie sich die Stromherstellung auswirkt. Die Ladeverluste sind mit 10% des Energiebedarfs berücksichtigt.

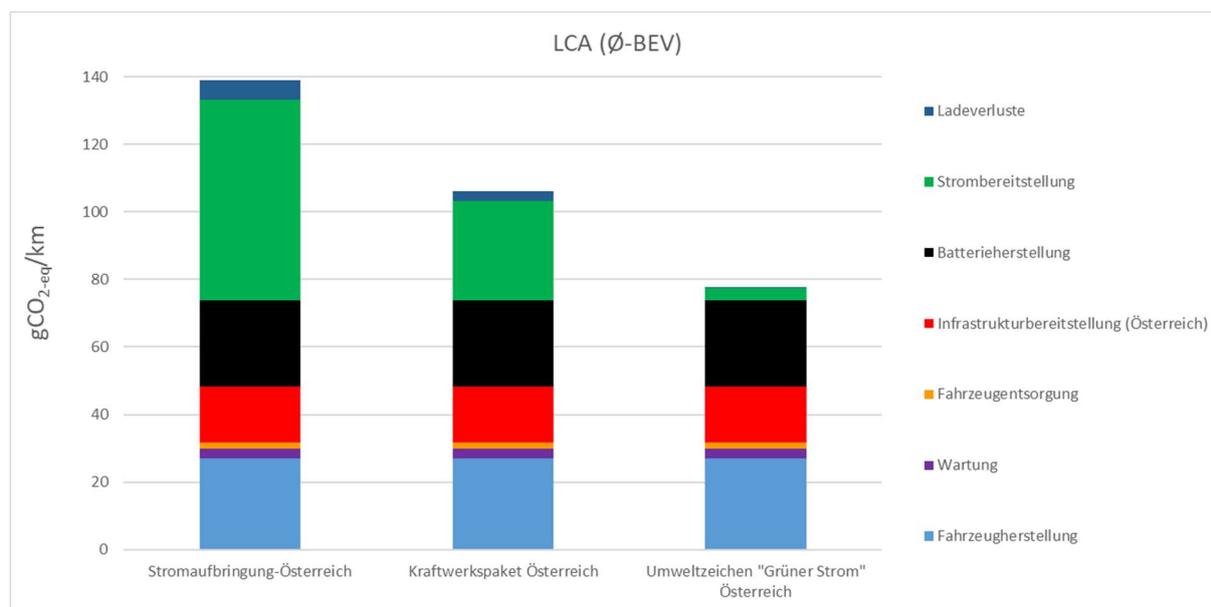


Abbildung 7-5: Treibhausgasemission eines Ø-BEV über einen Lebenszyklus

In Abbildung 7-5 wird deutlich, welche Auswirkungen die vorgelagerten Emissionen der Strombereitstellung haben. Zusätzlich kommt ein gravierender Anteil an den Gesamtemissionen durch die Batterieherstellung hinzu. Im Vergleich zum Durchschnittsbenziner werden 43,5 % weniger Treibhausgase, bei Berücksichtigung der „Stromaufbringung Österreich“ mit 306 gCO₂/kWh, emittiert. Durch Verwendung von „Grünem Strom“, der sich in Österreich mit lediglich 18 gCO₂/kWh zu Buche schlägt, erhöht sich die Einsparung auf 68,4%.

Der Vergleich mit dem Dieselfahrzeug (B7) bringt folgende Ergebnisse: 34,8 % Einsparung mit der Verwendung des österreichischen Strommix und 63,5 % Einsparung durch „Grünen Strom“.

Im Anhang befinden sich unter Abschnitt 12.5 weitere Ergebnisse von Elektrofahrzeugen, die mit Emissionsfaktoren der Strombereitstellung verschiedener Länder berechnet wurden. In Tabelle 7-1 sind die verwendeten Emissionsfaktoren ausgewählter Länder angeführt.

Tabelle 7-1: Emissionsfaktoren der Strombereitstellung, ausgewählter Länder [16] [17]

Strommix	Emissionsfaktor in gCO ₂ -eq/kWh
Deutschland	600
Schweden	41
Estland	1199

7.4 Ergebnis Brennstoffzellenfahrzeug

Die Ergebnisse bei Brennstoffzellenfahrzeugen zeigen, dass ein großer Teil der CO₂-Emissionen durch die Herstellung des Wasserstoffes entsteht. Hinzu kommt die Belastung durch die Herstellung der Brennstoffzelle. Der Vergleich zwischen Benzin-PKW und FCEV ergibt 19,2 % CO₂-Einsparung bei Verwendung von Wasserstoff, der mittels Dampfreformierung von Methan hergestellt wird. Mit Wasserstoff der durch Elektrolyse hergestellt wird, wobei der verwendete Strom mittels europäischem Strommix (540 gCO₂/kWh) bewertet wird, ergibt sich eine Einsparung von etwa 15,2 %.

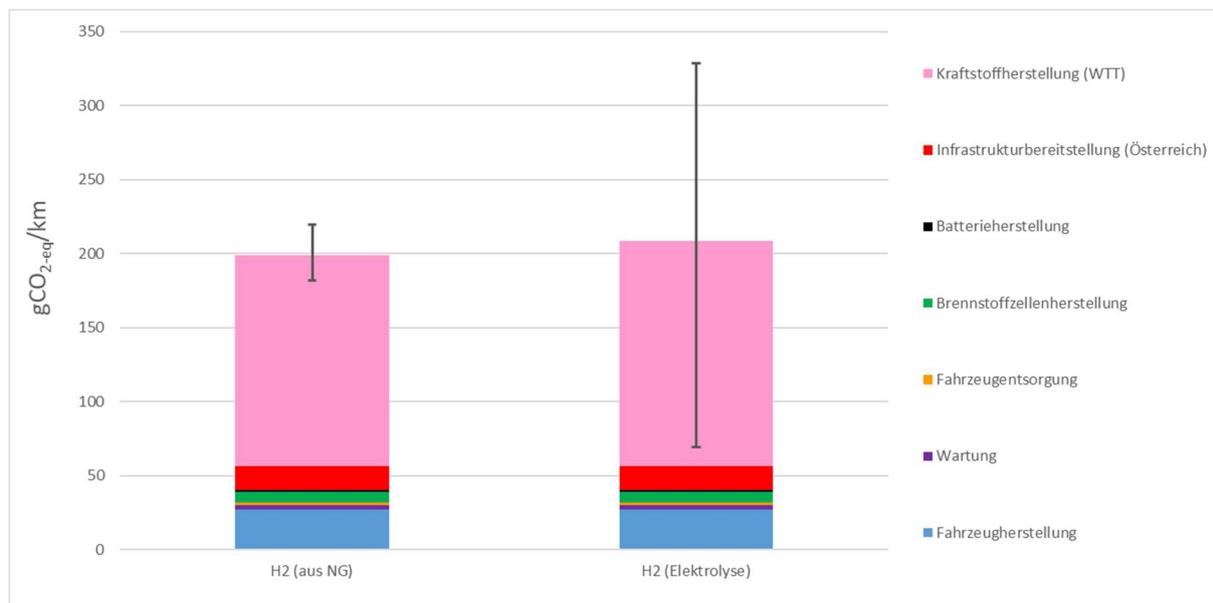


Abbildung 7-6: Treibhausgasemission eines Ø-FCEV über einen Lebenszyklus

Im Vergleich zum Dieselfahrzeug ergeben sich folgende Ergebnisse: 6,7 % weniger CO₂-eq mit H₂ aus NG. Beim Szenario mit Wasserstoff durch Elektrolyse ergibt sich zum durchschnittlichen Dieselfahrzeug ein CO₂-eq-Vorteil von 2,1 % über den Lebenszyklus.

8 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durchaus Verbesserungen bei Verwendung von alternativen Antriebskonzepten und Kraftstoffen, in Bezug auf Treibhausgasemissionen über einen Lebenszyklus ergeben können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand diverser Daten versucht ein möglichst gut fundiertes Bild widerzugeben. Zum einen wird durch das verwendete Fahrprofil ein reales Fahren simuliert. Zum anderen zielt die Definition der Durchschnittsfahrzeuge auf das weit verbreitete Kompaktklassensegment ab. Mit der Berücksichtigung aller gängigen Alternativen zum klassischen Benziner und Diesel sollen alle Facetten abgedeckt werden. Darüber hinaus werden mit der Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe weitere Eventualitäten abgebildet.

Durch die Verwendung von Hybridkonzepten konnte eine merkliche Kraftstoffeinsparung nachgewiesen werden. Eine größere Einsparung in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch erfolgt mit dem PHEV-Konzept. Um diese Einsparung auch in der Realität umzusetzen, muss die Batterie des PHEV extern geladen werden. Durch die externe Aufladung der Batterie aus dem Stromnetz, kommen zusätzlich vorgelagerte Treibhausgasemissionen bedingt durch die Strombereitstellung, hinzu. Diese indirekten Emissionen nehmen in der Lebenszyklusanalyse des PHEV-Konzepts, bei Berücksichtigung des österreichischen Stroms, einen beachtlichen Anteil ein. Über einen Lebenszyklus schneidet das PHEV-Konzept im betrachteten Fall besser ab als das HEV-Konzept. Grund dafür ist, dass bei PHEV-Fahrzeugen der Anteil der TTW-CO₂-Emissionen durch den rein elektrischen Betrieb gesenkt werden. Bei Verwendung von „Grünen Strom“ und den gleichen 50/50-Mix schneidet das PHEV-Fahrzeug noch besser ab. Zu sehen in der Abbildung 12-12 für Benzin (E5) und für Diesel (B7) in der Abbildung 12-13.

Bei Elektrofahrzeugen ist aus den Ergebnissen klar ersichtlich, dass der Emissionsfaktor der Strombereitstellung einen wesentlichen Einfluss besitzt. Der Betrieb von Elektroautos ist nur dann wirklich sinnvoll, wenn die vorgelagerten Emissionen, die durch die Stromherstellung entstehen, die Emissionen aus der Verbrennung eines Kraftstoffes nicht übersteigen. Ein weiterer, nicht unwesentlicher Teil der Gesamtemission über ein Fahrzeugleben ist die Herstellung der Batterie. Die Annahmen bei der durchgeführten Bewertung gehen davon aus, dass die Batterie über das Fahrzeugleben nicht getauscht wird. Wenn im Lebenszyklus allerdings weitere Batterien benötigt werden, schlägt sich das unweigerlich sehr negativ auf die Gesamtbilanz nieder. Weitere Aspekte die gesellschaftlich von Bedeutung sind, sind Reichweite, Ladedauer und Kosten von Elektrofahrzeugen, welche hier nicht bewertet wurden. Das hier simulierte, in Österreich betriebene E-Fahrzeug ist in Sachen CO₂-Einsparung, trotz Berücksichtigung aller vorgelagerten Emissionen, im Vergleich zu Benzin/Diesel-Fahrzeugen eindeutig zu bevorzugen.

Für das simulierte Brennstoffzellenfahrzeug gibt es, je nach Wasserstoffbereitstellung, Verbesserungen gegenüber Benzin und Diesel-Fahrzeugen. Bei der Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse können durch die CO₂-Emissionen aus der Strombereitstellung Nachteile entstehen. Problematisch für dieses Fahrzeugkonzept ist die Tatsache, dass die Infrastruktur, in Bezug auf Wasserstofftankstellen, hierzulande nicht annähernd flächendeckend vorhanden ist. Auch die hohen Anschaffungskosten stellen einen Nachteil dieses Konzeptes dar.

Um in Zukunft Treibhausgase in Bezug auf den Verkehr effektiv zu vermeiden, müsste der Anteil der elektrifizierten Fahrzeuge deutlich steigen, oder der Anteil erneuerbarer Kraftstoffe mit niederen WTT-Emissionen stark erhöht werden. Eine Zunahme an Elektrofahrzeugen hätte zur Folge, dass es zu einer Verlagerung der Energiebereitstellung hin zur Stromerzeugung kommt. Unweigerlich müsste in Zukunft die Erzeugung von Strom klimafreundlicher geschehen, um die Nachhaltigkeit der Emissionseinsparungen zu gewährleisten. Durch die zukünftig prognostizierten Verbesserungen bei der Strombereitstellung, durch Einsatz regenerativ erzeugten Stroms, steigt das Potential von Elektrofahrzeugen.

Wie die Ergebnisse zeigen, ist der CO₂-Ausstoß der Stromerzeugung für elektrifizierte Fahrzeuge der größte „Hebel“, in Bezug auf die Einsparung von Emissionen. Auch die Batterieherstellung soll zukünftig durch Recycling und eine zweite Nutzungsphase deutlich verringert werden.

9 Literaturverzeichnis

[1]	Homepage: „Forschungs-Informationssystem“, https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/ , 22.08.18
[2]	Homepage: „Science-Direct“, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214008573 , 22.08.18
[3]	Robert Edwards, Jean-François Larivé, David Rickeard, Werner Weindorf: „Report, WELL-TO-TANK Report Version 4.a“, JEC, 2014
[4]	Homepage: „Aral Forschung“, https://www.aral.de/de/forschung/kraftstoffe/diesekraftstoffe/herstellung.html , 29.08.2018
[5]	Homepage: „Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau“, https://www.svlfg.de/30-praevention/prv051_fachinfos_a_z/prv0504-gesundheitsschutz/021_Gefahrstoffe/01_die-4-gase-in-der-guelle.html , 30.08.2018
[6]	Homepage: „CHEMIE.DE“, http://www.chemie.de/lexikon/Methanol.html , 30.08.2018
[7]	Homepage: „CHEMIE.DE“, http://www.chemie.de/lexikon/Biogas.html , 05.09.2018
[8]	Homepage: „Energieaufwand und Emissionen bei der Herstellung von Diesekraftstoff und Benzin“, https://www.energie-lexikon.info/rp-energie-blog_2017_09_25.html , 05.09.2018
[9]	Homepage: „DIESEL MIT BIS ZU 7% BIODIESEL“, https://www.shell.at/autofahrer/shell-treibstoffe/technische-informationen/diesel-mit-bis-zu-7-biodiesel.html , 05.09.2018
[10]	Homepage: „Hydrierte Pflanzenöle (HVO)“, https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/hydrierte-pflanzenoele-hvo/ , 05.09.2018
[11]	Homepage: „Zweistufige Dimethylethersynthese“, https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3463180-2/*/*Zweistufige%20Dimethylethersynthese.html?op=Wiki.getwiki&search=Meeresenergie&scope=all , 05.09.2018
[12]	Homepage: „CHEMIE.DE“, http://www.chemie.de/lexikon/Elektrolyse.html , 10.09.2018
[13]	VDMA Power Systems: „Expertenausblick, Strommix in der EU27 Entwicklung der Stromerzeugung in Europa von 2007 bis 2030“, 2010
[14]	Österreichs Energie: „Jahresbericht, Land am Strom“, 2017

[15]	Homepage: „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger“, http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html , 10.09.8
[16]	Hans-Peter Lenz Hrsg. Werner Tober: „Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor, Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte“, 2016
[17]	Homepage: „Electricity Map“, https://www.electricitymap.org/?page=country&solar=false&remote=true&wind=false&countryCode=EE , 10.09.2018
[18]	Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Stefan Hausberger: „Skriptum, Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I“, TU Graz, 2015
[19]	Lukas Schreiber: „Abbildung eines durchschnittlichen Plug-In-Hybridfahrzeuges für die Fahrzeugsimulation“, Diplomarbeit TU Graz, 2017
[20]	U Sauer, J Kowal: „MTZ-Motortechnische Zeitschrift Batterietechnik Grundlagen und Übersicht“, 2012
[21]	Homepage: „BRUSA Elektronik AG“, https://www.brusa.biz/ , 18.09.2018
[22]	Helmut Tösche: „Fachbuch, Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs“, Springer Vieweg, 2015
[23]	Homepage: „Fluke i410 Gleich-/Wechselstromzange“, https://www.fluke.com/de-de/produkt/zubehoer/strommesszangen/fluke-i410 , 24.09.18
[24]	Homepage: „Testec Differential-Tastkopf Aktiv TT-SI 9001, 25MHz 100:1, 10:1, Serie SI“, https://at.rs-online.com/web/p/oszilloskop-tastkopfe/2241219/ , 24.09.2018
[25]	Homepage: „ADAC“, https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/detail.aspx?KFZID=266575&info=VW+e-Golf , 25.09.2018
[26]	Prasada Rao Akula, Lakshmi Jandhyala, Frieder Herb, Akash Narayana: „Paper, Development of Energy Management Strategies and Analysis with Standard Drive Cycles for Fuel Cell Electric Vehicles“, SAE International, 2012
[27]	M. Röck , M. Rexeis, S. Hausberger: „Report, Heavy Duty Vehicles, TANK-to-WHEELS“, JEC, Juli 2018
[28]	Hinrich Helms, Julius Jöhrens, Claudia Kämper, Jürgen Giegrich, Axel Liebich, Regine Vogt, Udo Lambrecht: „Endbericht, Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen“, August 2015
[29]	Homepage: „Umweltbundesamt“, http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/verkehrsdaten/emissionsf

	aktoren_verkehrsmittel/ , 27.09.2018
[30]	Martin Beermann, Gerfried Jungmeier Stefan Hausberger, Silke Lipp: „Workshop, Lebenszyklusanalyse von Transportsystemen“, Mai 2018
[31]	H. Helms, U. Lambrecht, J. Jöhrens, M. Pehnt, A. Liebich, U. Weiß, C. Kämper: „Endbericht, Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität, Institut für Energie- und Umweltforschung“, Heidelberg, 2013
[32]	Held M.: „Current LCA results and need for further research, Fraunhofer System Research for Electromobility (FSEM)“, 2011
[33]	Frischknecht R.: „Ein Argumentarium, Umweltaspekte von Elektroautos, ESU-services Ltd. Uster, 2012
[34]	Notter D. et al: „Life cycle assessment of PEM FC applications, Energy and Environmental Science. Issue 7“, 2015
[35]	Evangelisti S., Tagliaferri C. Lettieri P: „Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles“, Journal of Cleaner Production, Vol 142, Part 4. Jan 2017
[36]	Simons A., Bauer C. A: „Life-cycle perspective on automotive fuel cells“, Applied Energy, 157, March 2015
[37]	M. Schwingshackl: „Persönliche Auskunft, Abschätzung der CO2 Emissionen der Bahn- und Straßeninfrastruktur in Österreich, Datenbasis 2009“, September 2018
[38]	M. Schwingshackl: „Präsentation, Infrastrukturabschätzung zu Energieverbrauch und Emissionen, Straße und Bahn im Vergleich“, Fair-Move, 2012
[39]	Harald Lesch, Klaus Kamphausen: „Buch, Die Menschheit schafft sich ab. Die Erde im Griff des Anthropozän“, 2. Auflage 2017
[40]	Homepage: „tele-akademie“, http://www.tele-akademie.de/03_suche.php?suchw=die+menschheit+schafft+sich+ab , Prof. Dr.Harald Lesch: „Vortrag, Die Menschheit schafft sich ab“, 2018
[41]	Homepage: „Umweltbundesamt“, http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/verkehr/auswirkungen_verkehr/verkehr_treibhausgase/ , 30.09.2018
[42]	S. Lipp, S. Hausberger, L. Schreiber: „Paper, Measurement and simulation of hybrid and plug in hybrid vehicles for the handbook of emission factors“, 2017

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Treibhausgaszunahme von 1990 bis 2016 [41]	1
Abbildung 2-1: Prinzip der Well-to-Wheel-Betrachtung [2]	3
Abbildung 2-2: Beispielhafter Well-to-Tank-Pfad [3].....	4
Abbildung 2-3: Prinzip des Tank-to-Wheel-Teilprozess [2].....	4
Abbildung 3-1: WTT-Treibhausgasemissionen von Ottokraftstoffen [3].....	8
Abbildung 3-2: CO ₂ -Emission bei vollständiger Verbrennung von Ottokraftstoffen [3].....	8
Abbildung 3-3: gesamte CO _{2-eq} Emission von Ottokraftstoffen aus WTT und Verbrennung [3]	9
Abbildung 3-4: Anteile der Rohölproduktion in Europa [3].....	10
Abbildung 3-5: WTT-Treibhausgasemissionen von Dieselmotoren [3]	17
Abbildung 3-6: WTT-Treibhausgasemissionen von Wasserstoff [3]	24
Abbildung 3-7: Strombereitstellung in Europa von 2007 bis 2030 [13].....	26
Abbildung 3-8: Anteile der Stromerzeugung in Österreich 2016 [14].....	27
Abbildung 4-1: Topologie des BEV-Fahrzeugs [27]	28
Abbildung 4-2: Vollastkurven einer Synchronmaschine	29
Abbildung 4-3: Leistung und Energiedichte von Batterietypen [20].....	30
Abbildung 4-4: Wirkungsgradkennfeld einer Synchronmaschine	30
Abbildung 4-5: Voltcraft Energy Logger 4000 zur Messung der Ladeverluste	32
Abbildung 4-6: Geschwindigkeitsverlauf NEDC	33
Abbildung 4-7: Geschwindigkeitsverlauf ERMES	33
Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsverlauf WLTC	34
Abbildung 4-9: Geschwindigkeitsverlauf RWC	34
Abbildung 4-10: VW e-Golf am Rollenprüfstand.....	35
Abbildung 4-11: Strom- und Spannungsmessung am Messfahrzeug	36
Abbildung 4-12: Kräfte am Fahrzeug beim Ausrollen.....	38
Abbildung 4-13: Geschwindigkeitsverlauf beim Ausrollen (Richtung Nord).....	39
Abbildung 4-14: Verlauf der Fahrwiderstandskraft mit Fahrwiderstandspolynom.....	40
Abbildung 4-15: Messfahrzeug Tesla Model S.....	41
Abbildung 5-1: Schema des PHEM Simulationsprogrammes [18]	44
Abbildung 5-2: RWC-Fahrzyklus	45
Abbildung 5-3: Topologie des Durchschnittsfahrzeugs mit VKM	46
Abbildung 5-4: Benutzeroberfläche in PHEM im „Standardmode“	47
Abbildung 5-5: Topologie des parallelen HEV-Konzepts [27]	48
Abbildung 5-6: HEV-Mode Oberfläche im PHEM	49
Abbildung 5-7: HEV Steuerkennlinie über SOC	50

Abbildung 5-8: Topologie des PHEV-Fahrzeugs [27].....	52
Abbildung 5-9: PHEV-Steuerkennlinie über SOC.....	53
Abbildung 5-10: BEV-Mode-Oberfläche im PHEM	54
Abbildung 5-11: Batteriespannung über SOC	55
Abbildung 5-12: Lineare Trendlinien für Simulations- und Messwerte	58
Abbildung 5-13: Trendlinien nach der Korrektur über Leistung und Drehzahl	58
Abbildung 5-14: Topologie des FCEV-Fahrzeugs [27].....	59
Abbildung 5-15: Funktionsweise einer Brennstoffzelle [22].....	60
Abbildung 5-16: Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle über normierter Leistung [27]	60
Abbildung 6-1: Prinzip einer Lebenszyklusanalyse [38]	62
Abbildung 6-2: CO ₂ -Emissionen aus einer Vergleichsstudie für Herstellung, Wartung und Entsorgung von Fahrzeugkonzepten [16]	64
Abbildung 6-3: Vergleich verschiedener Studien zu Treibhausgasemission bei der Batterieherstellung [30] [31] [32] [33].....	64
Abbildung 7-1: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Benzin (E5).....	66
Abbildung 7-2: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Ethanol.....	67
Abbildung 7-3: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Diesel (B7).....	68
Abbildung 7-4: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Bio-Diesel.....	68
Abbildung 7-5: Treibhausgasemission eines Ø-BEV über einen Lebenszyklus.....	69
Abbildung 7-6: Treibhausgasemission eines Ø-FCEV über einen Lebenszyklus	70
Abbildung 12-1: WTT Benzin und Diesel [3]	81
Abbildung 12-2: WTT von 19 Ethanolherstellungsarten [3]	81
Abbildung 12-3: WTT CNG [3].....	82
Abbildung 12-4: WTT Methanol [3].....	82
Abbildung 12-5: WTT Bio-Gas [3].....	83
Abbildung 12-6: WTT Bio-Diesel [3].....	83
Abbildung 12-7: WTT 6 FT-Dieselherstellungsarten [3]	84
Abbildung 12-8: WTT HVO [3]	84
Abbildung 12-9: WTT 6 HVO-Herstellungsarten [3].....	85
Abbildung 12-10: WTT 8 H ₂ -Herstellungsarten aus NG [3].....	85
Abbildung 12-11: WTT 8 H ₂ -Herstellungsarten aus Elektrolyse [3].....	86
Abbildung 12-12: LCA mit Benzin E5 und „Grünem Strom“ (18 gCO ₂ /kWh)	87
Abbildung 12-13: LCA mit Diesel B7 und „Grünem Strom“ (18 gCO ₂ /kWh)	87
Abbildung 12-14: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Methanol.....	88
Abbildung 12-15: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von CNG.....	88
Abbildung 12-16: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Bio-Gas	89
Abbildung 12-17: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von FT-Diesel	89

Abbildung 12-18: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von HVO.....	90
Abbildung 12-19: CO ₂ -Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von DME	90
Abbildung 12-20: Treibhausgasemission eines Ø-BEV mit div. Strommix	91
Abbildung 12-21: Treibhausgasemission VW e-Golf über einen Lebenszyklus in Österreich	91
Abbildung 12-22: Treibhausgasemission VW-e-Golf mit div. Strommix	92
Abbildung 12-23 Treibhausgasemission Tesla Model S 75D über einen Lebenszyklus in Österreich	92
Abbildung 12-24: Treibhausgasemission Tesla Model S 75D mit div. Strommix	93
Abbildung 12-25: Energieverbrauch, CO ₂ - und H ₂ -Verbrauch der Durchschnittsfahrzeuge „heute“	93
Abbildung 12-26: Auszug aus Batteriedatenblatt [21].....	94
Abbildung 12-27: Kraftstoffeigenschaften [27].....	94

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Treibhausgasfaktoren für CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O [3].....	7
Tabelle 3-2: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} bei E0 [3].....	10
Tabelle 3-3: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} bei E5 [3].....	11
Tabelle 3-4: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} bei E10 [3].....	11
Tabelle 3-5: WTT-CO _{2-eq} Emissionen von Ethanolherstellungsarten [3].....	12
Tabelle 3-6: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Ethanol [3].....	12
Tabelle 3-7: WTT-CO _{2-eq} Emissionen von Methanolherstellungsarten [3].....	13
Tabelle 3-8: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Methanol [3].....	13
Tabelle 3-9: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Bio-Methanol [3].....	14
Tabelle 3-10: WTT-CO _{2-eq} -Emissionen von CNG Variationen [3].....	15
Tabelle 3-11: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für CNG [3].....	15
Tabelle 3-12: WTT CO _{2-eq} -Emissionen von CBG Varianten [3].....	16
Tabelle 3-13: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO ₂ für CBG [3].....	16
Tabelle 3-14: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Diesel B0 [3].....	18
Tabelle 3-15: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Diesel B7 [3].....	18
Tabelle 3-16: WTT-CO _{2-eq} -Emissionen von Bio-Diesel-Varianten [3].....	19
Tabelle 3-17: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Bio-Diesel [3].....	19
Tabelle 3-18: WTT-CO _{2-eq} Emissionen von FT-Diesel-Varianten [3].....	20
Tabelle 3-19: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für FT-Diesel [3].....	20
Tabelle 3-20: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für FT-Bio-Diesel [3]...	21
Tabelle 3-21: WTT-CO _{2-eq} Emissionen von HVO-Varianten [3].....	21
Tabelle 3-22: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für HVO [3].....	22
Tabelle 3-23: WTT-CO _{2-eq} Emissionen von DME-Varianten [3].....	22
Tabelle 3-24: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für DME [3].....	23
Tabelle 3-25: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Bio-DME [3].....	23
Tabelle 3-26: WTT-CO _{2-eq} -Emissionen von H ₂ aus NG Variationen [3].....	24
Tabelle 3-27: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Wasserstoff aus NG [3]	25
Tabelle 3-28: WTT-CO _{2-eq} -Emissionen von H ₂ aus Elektrolyse Varianten [3].....	25
Tabelle 3-29: WTT, Verbrennung und Gesamtemission von CO _{2-eq} für Wasserstoff aus Elektrolyse [3].....	26
Tabelle 3-30: Emissionsfaktoren des österreichischen Strommix [15].....	27
Tabelle 4-1: Technische Daten VW-Golf [25].....	31
Tabelle 4-2: Technische Daten Voltcraft Energy Logger 4000.....	33
Tabelle 4-3: Technische Daten der Strommesszange Fluke i410 [23].....	35

Tabelle 4-4: Technische Daten Testec SI-9001 Differential-Tastkopf [24]	36
Tabelle 4-5: Ergebnisse der Messungen im Vergleich zur Simulation.....	37
Tabelle 4-6: Ladeverluste VW-e-Golf	37
Tabelle 4-7: Technische Daten Tesla Model S 75D [25].....	38
Tabelle 4-8: Tesla Model S Fahrzeugdaten und Ergebnisse des Ausrollversuchs.....	41
Tabelle 4-9: Ergebnisse der PHEM-Simulation mit Vergleich der Herstellerangaben	42
Tabelle 5-1: Fahrzeugdaten Ø Benzin/Diesel-Fahrzeug	47
Tabelle 5-2: Fahrzeugdaten Ø Otto/Diesel HEV	51
Tabelle 5-3: Fahrzeugdaten Ø Otto/Diesel PHEV	54
Tabelle 5-4: Fahrzeugdaten Ø BEV	59
Tabelle 5-5: Fahrzeugdaten Ø FCEV	61
Tabelle 6-1: Treibhausgasemission der Fahrzeugherstellung, Wartung und Entsorgung [31] 63	
Tabelle 6-2: CO ₂ -Ausstoß bei der Herstellung von Brennstoffzellen [30] [34] [35] [36]	65
Tabelle 7-1: Emissionsfaktoren der Strombereitstellung, ausgewählter Länder [16] [17]	69

12 Anhang

12.1 WTT-Ergebnisse Kraftstoffe

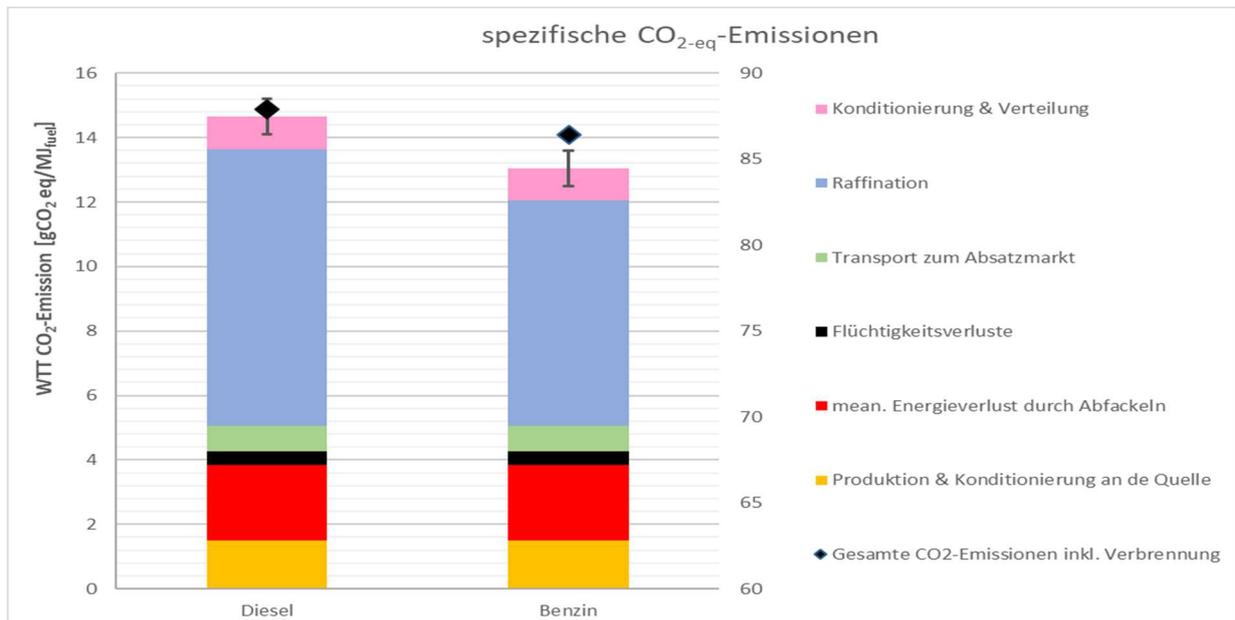


Abbildung 12-1: WTT Benzin und Diesel [3]

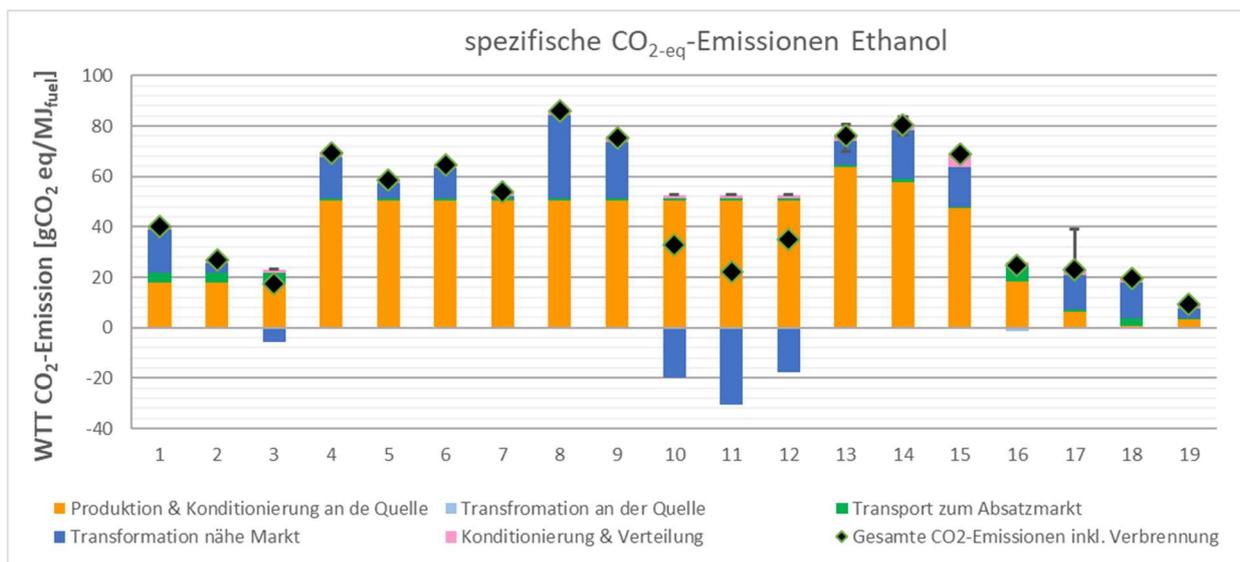


Abbildung 12-2: WTT von 19 Ethanolherstellungsarten [3]

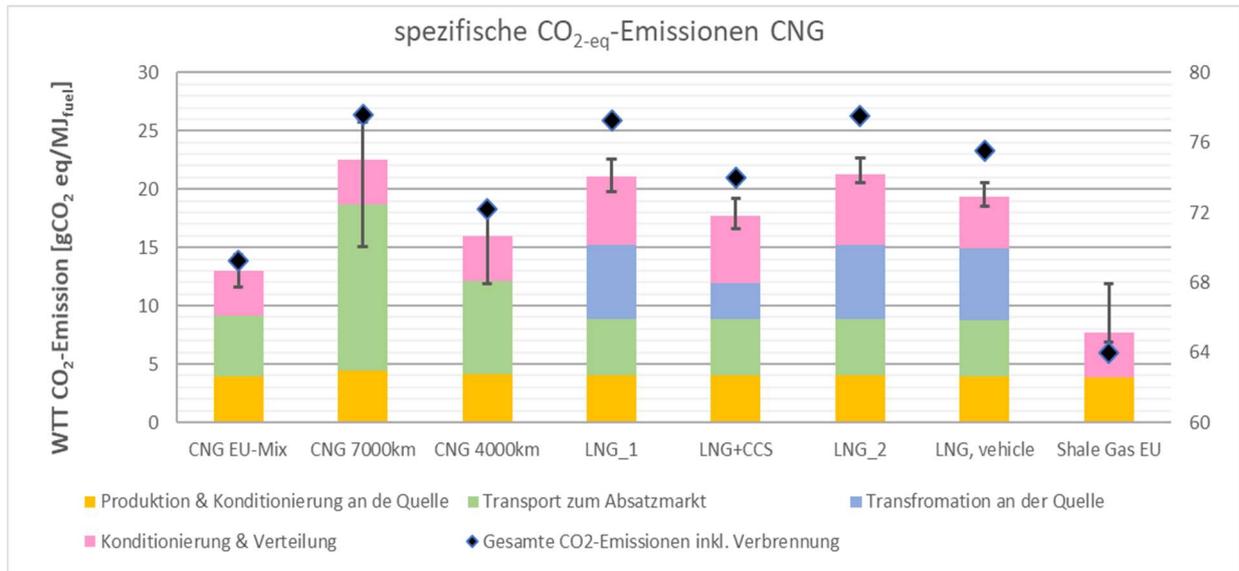


Abbildung 12-3: WTT CNG [3]

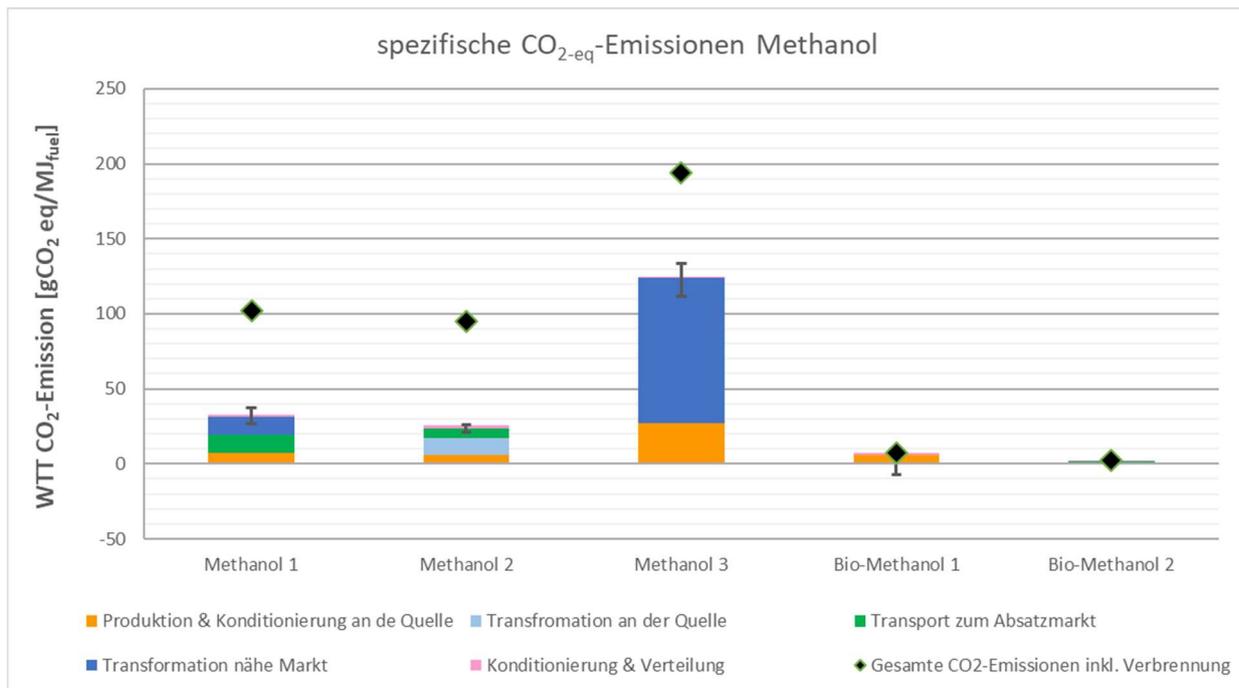


Abbildung 12-4: WTT Methanol [3]

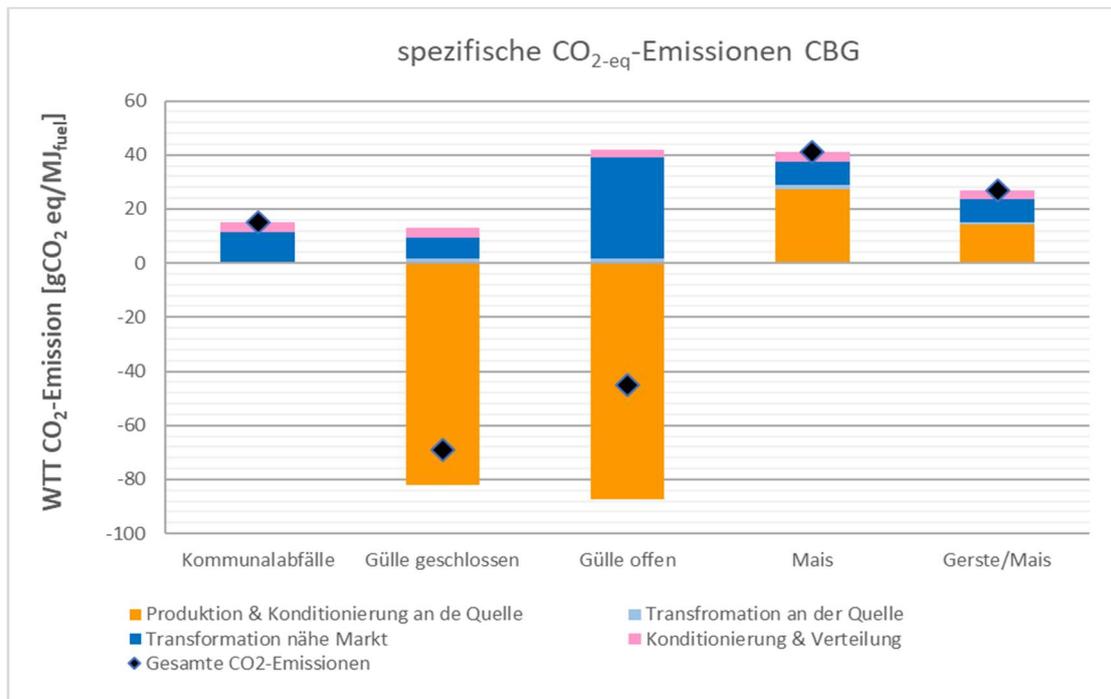


Abbildung 12-5: WTT Bio-Gas [3]

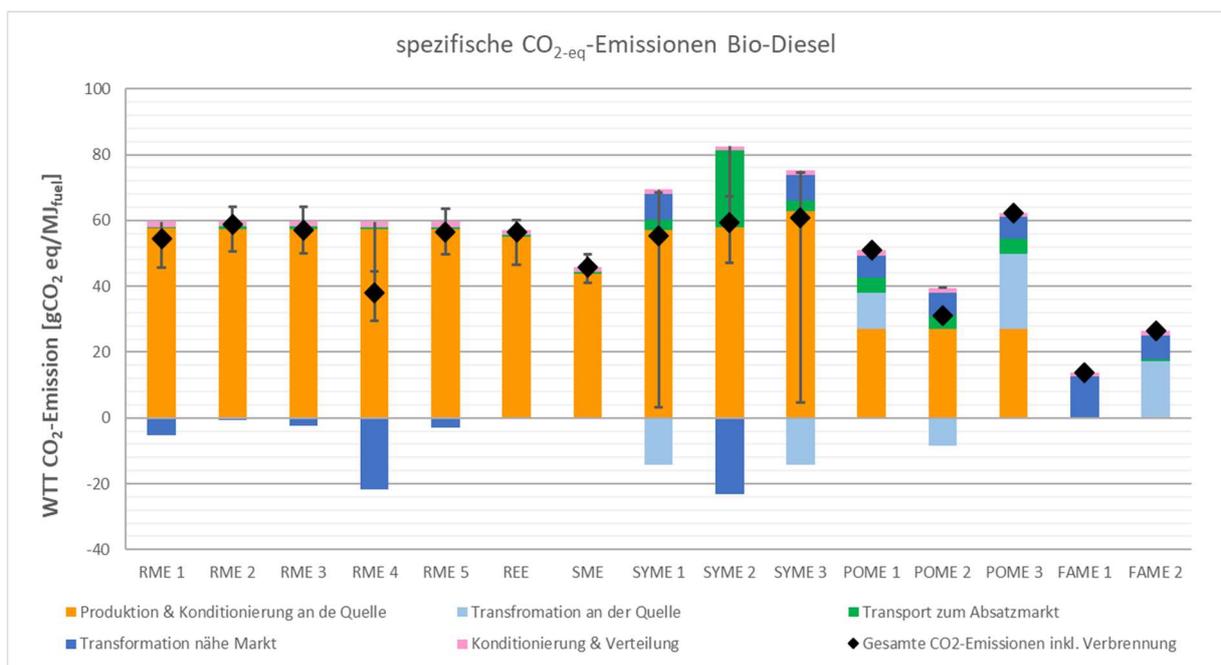


Abbildung 12-6: WTT Bio-Diesel [3]

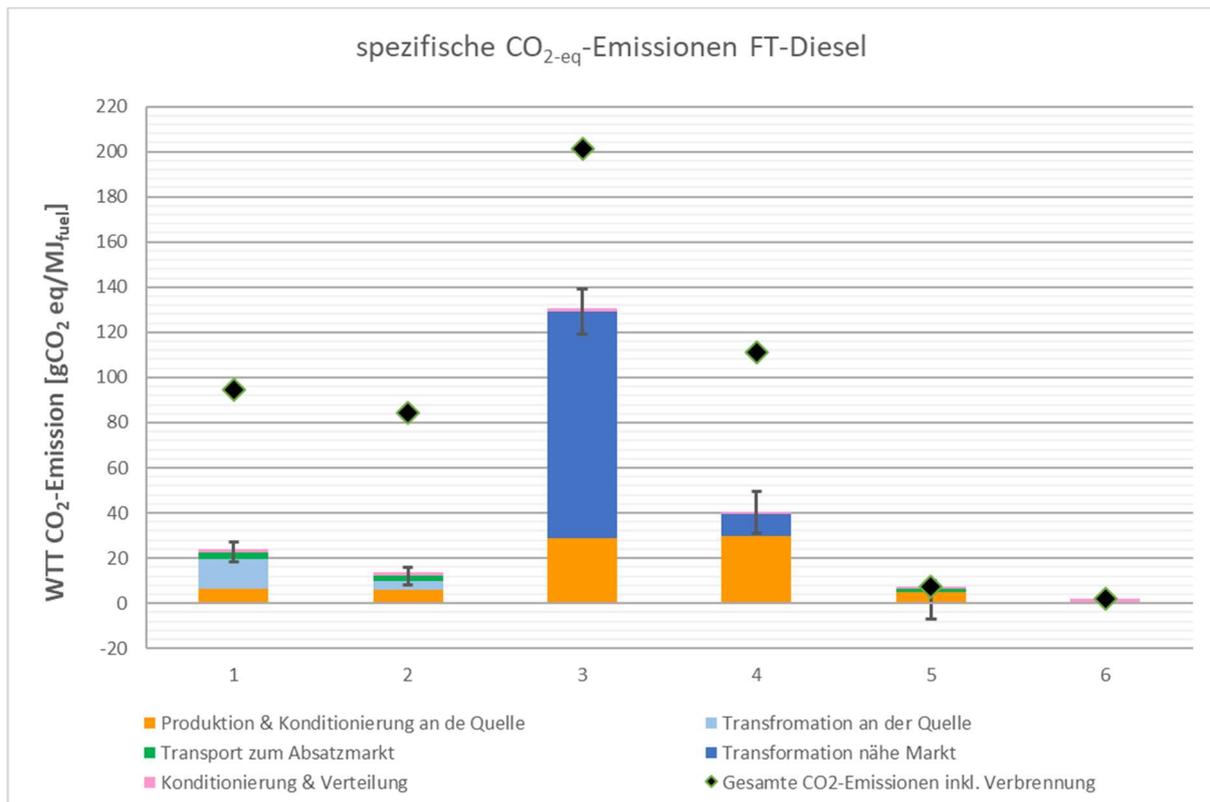


Abbildung 12-7: WTT 6 FT-Dieselerstellungsarten [3]

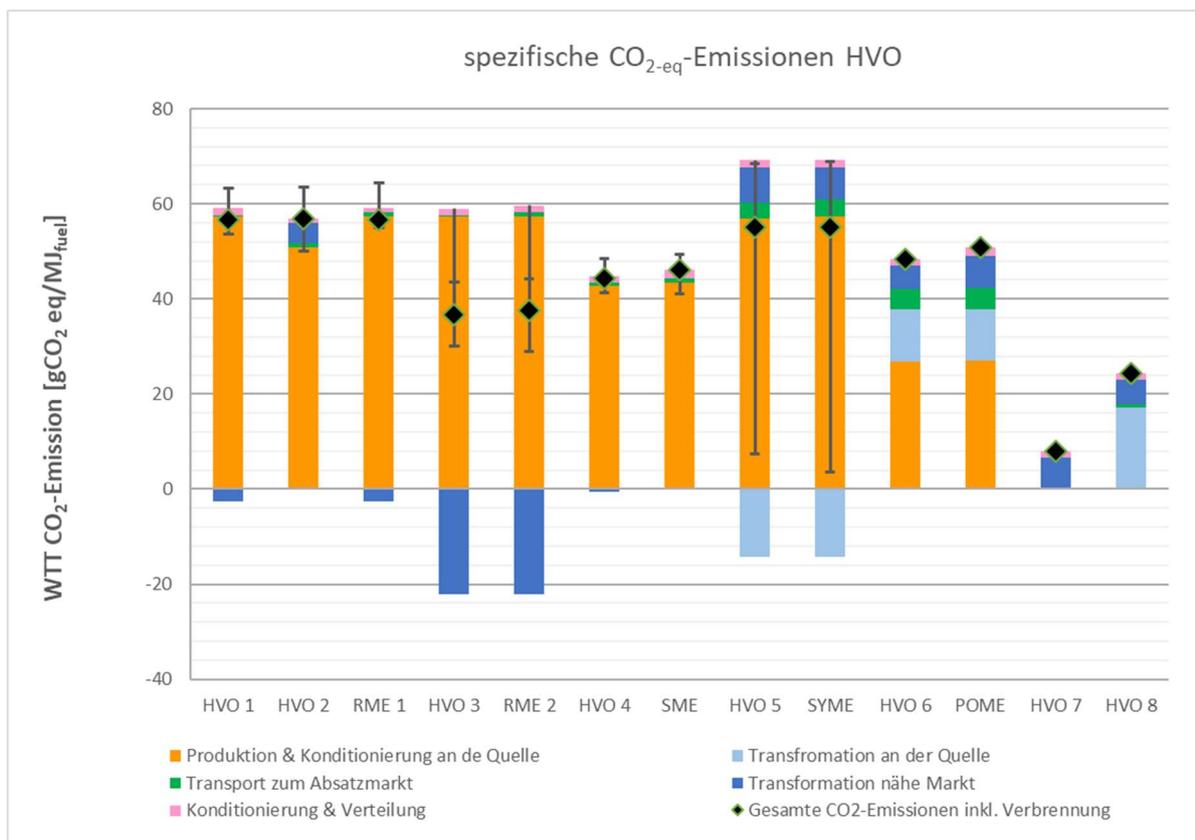


Abbildung 12-8: WTT HVO [3]

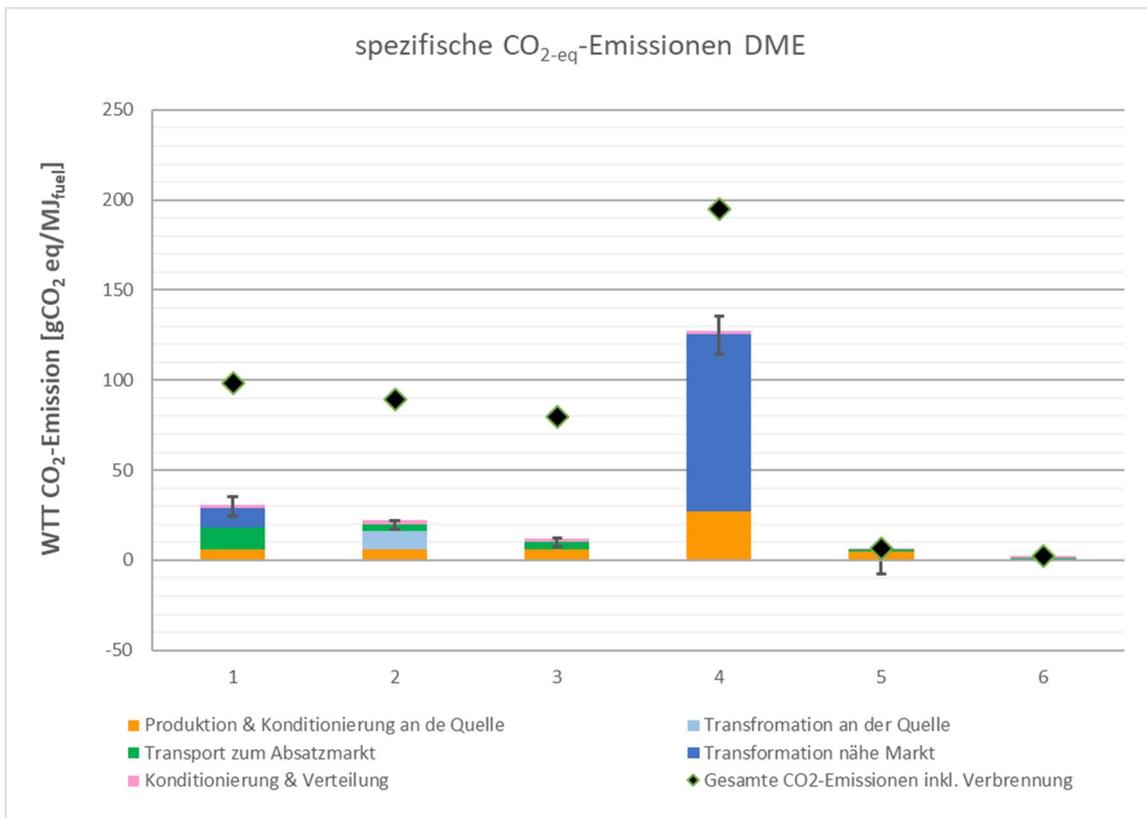


Abbildung 12-9: WTT 6 HVO-Herstellungsarten [3]

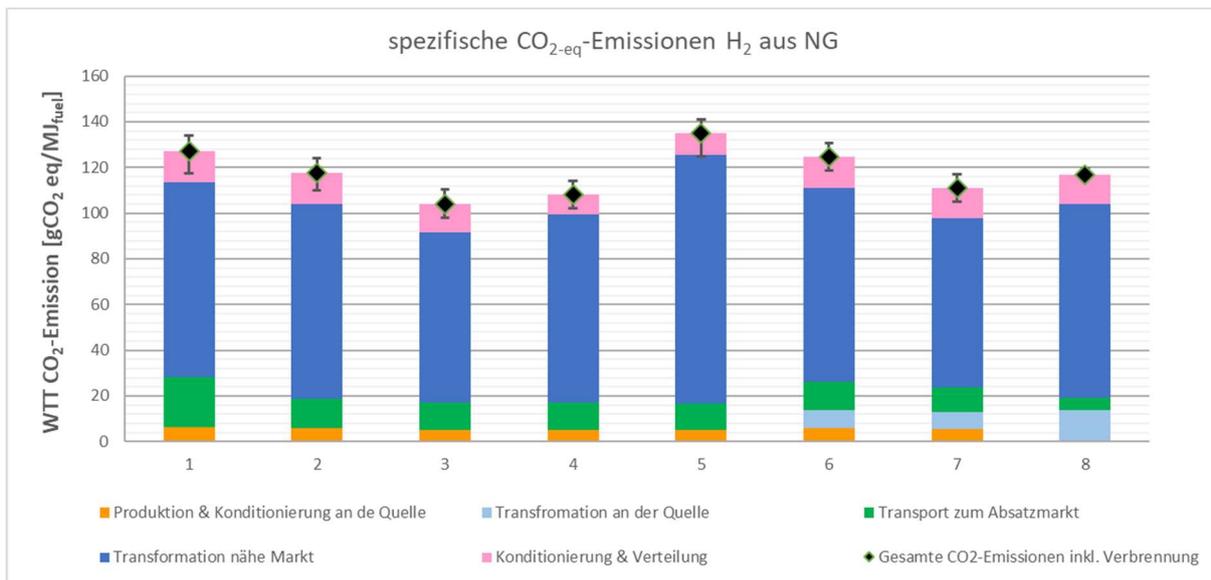


Abbildung 12-10: WTT 8 H₂-Herstellungsarten aus NG [3]

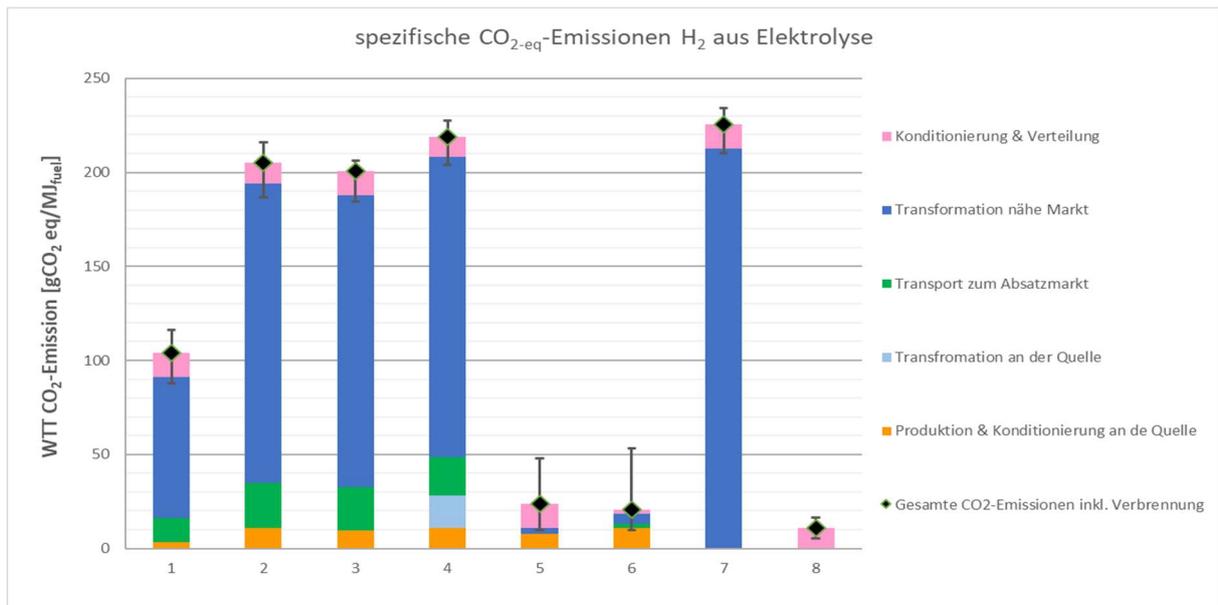


Abbildung 12-11: WTT 8 H₂-Herstellungsarten aus Elektrolyse [3]

12.2 LCA-Ergebnisse für PHEV mit „Grünem Strom“

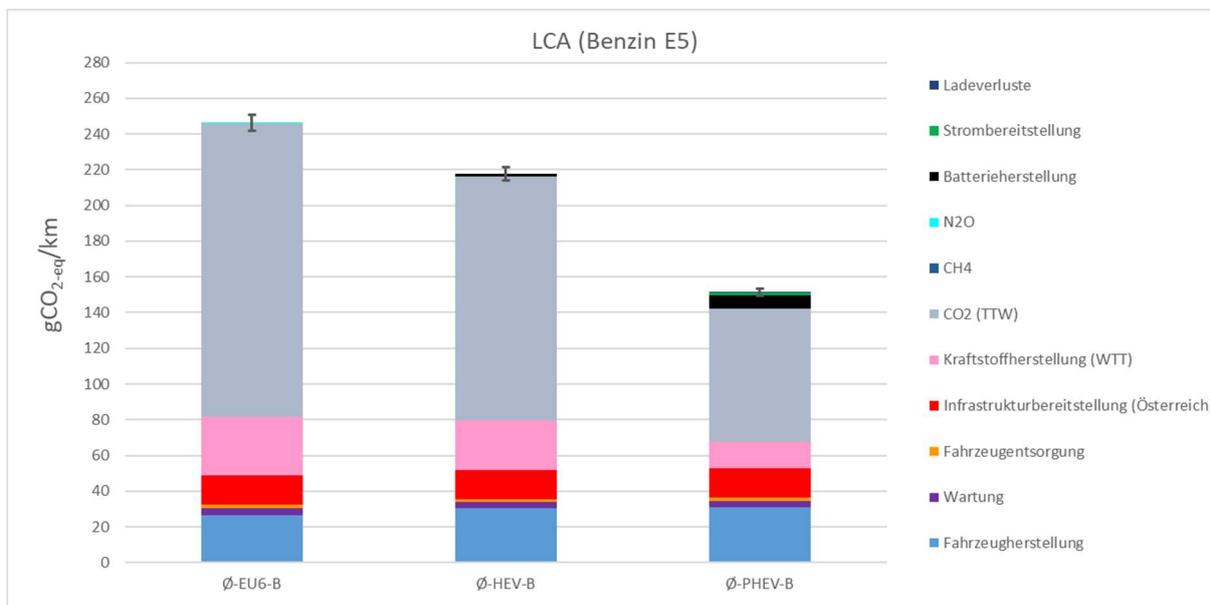


Abbildung 12-12: LCA mit Benzin E5 und „Grünem Strom“ (18 gCO₂/kWh)

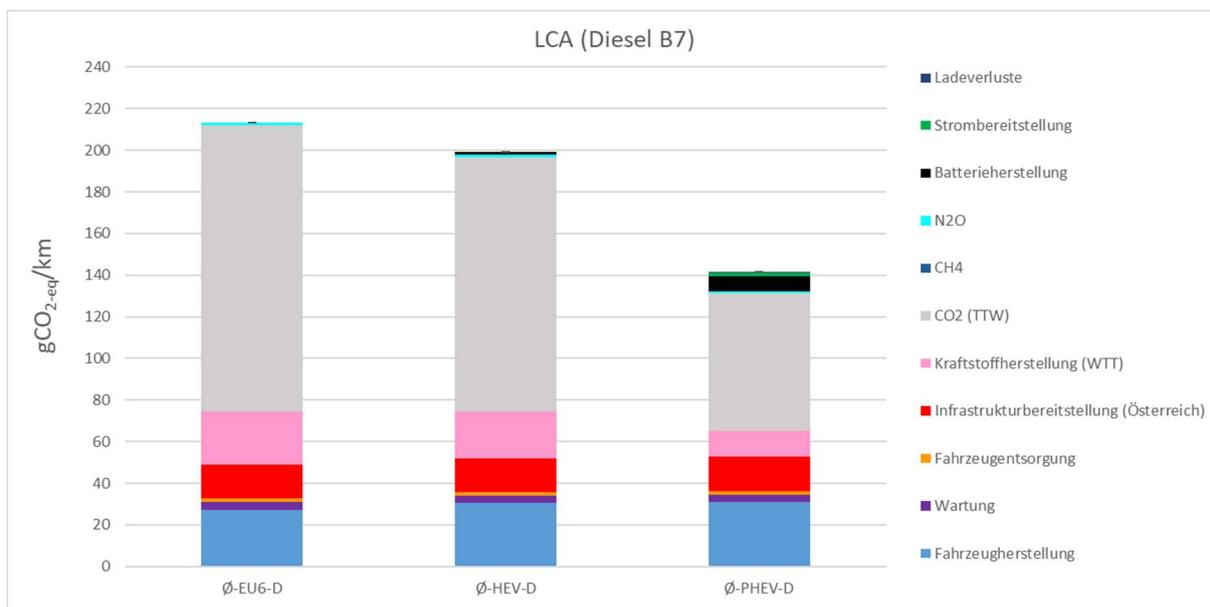


Abbildung 12-13: LCA mit Diesel B7 und „Grünem Strom“ (18 gCO₂/kWh)

12.3 LCA-Ergebnisse alternativer Otto-Kraftstoffe

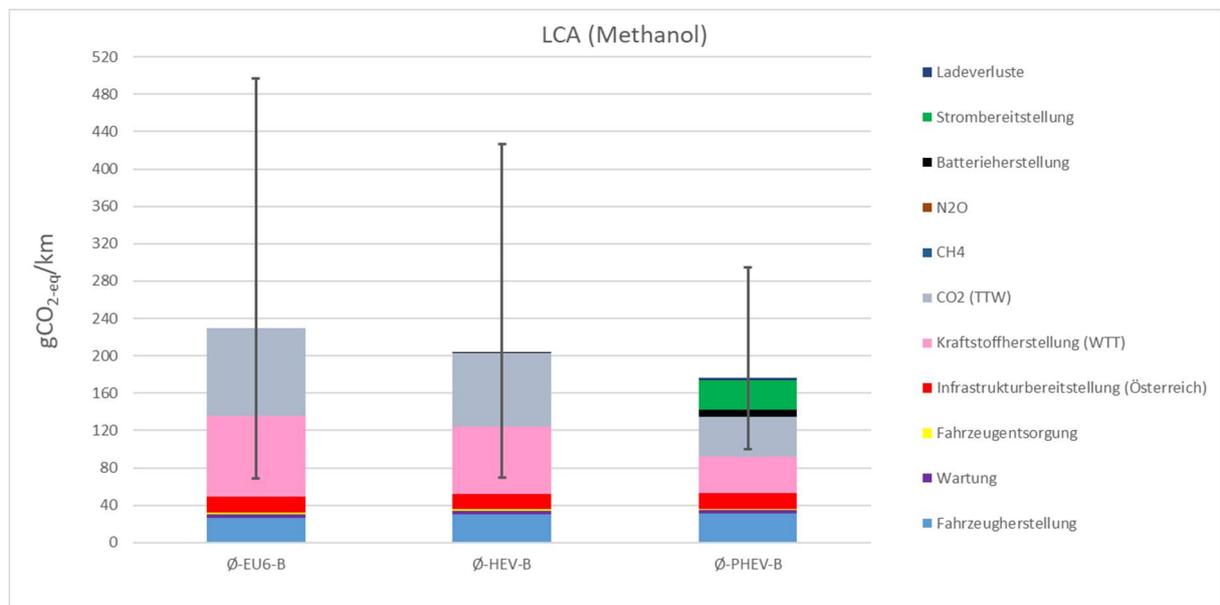


Abbildung 12-14: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Methanol

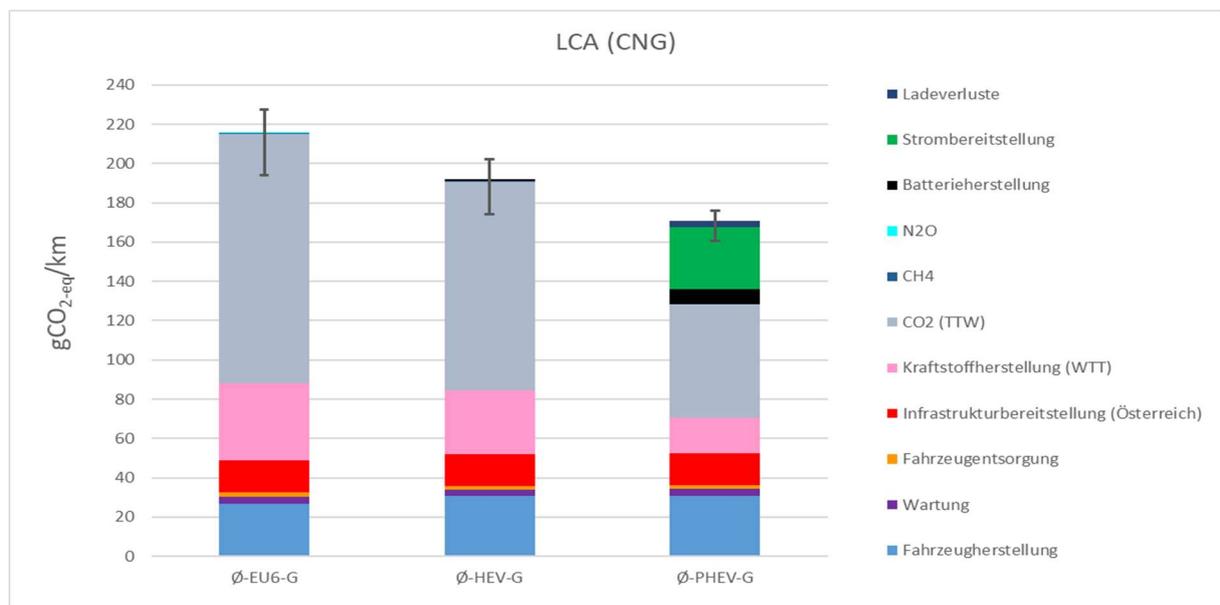


Abbildung 12-15: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von CNG

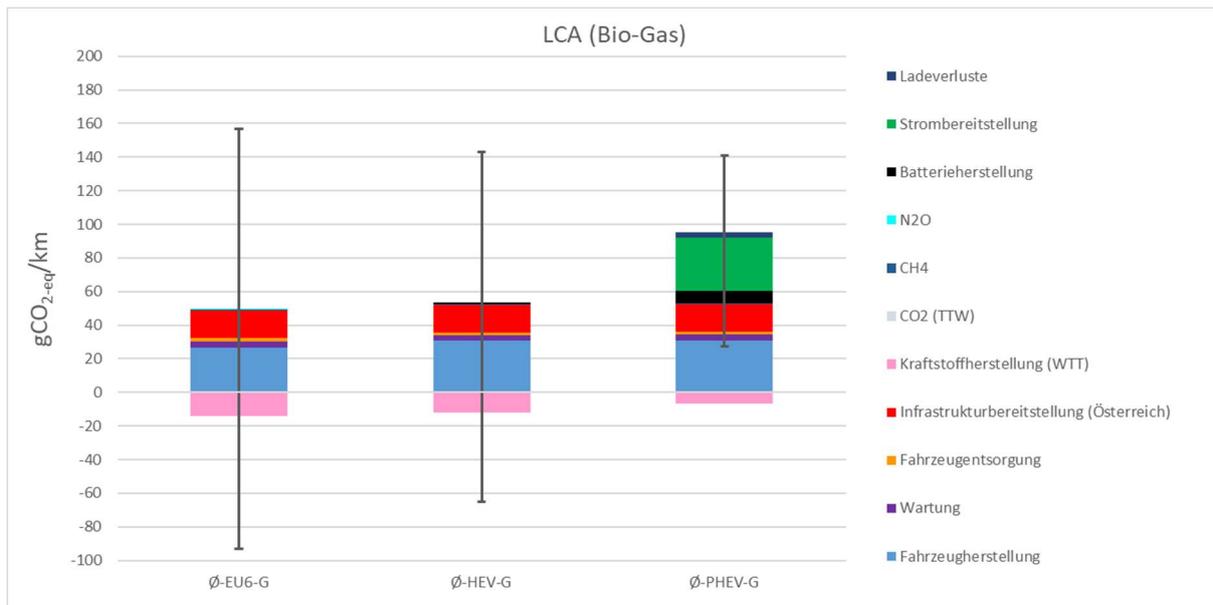


Abbildung 12-16: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von Bio-Gas

12.4 LCA-Ergebnisse alternativer Diesel-Kraftstoffe

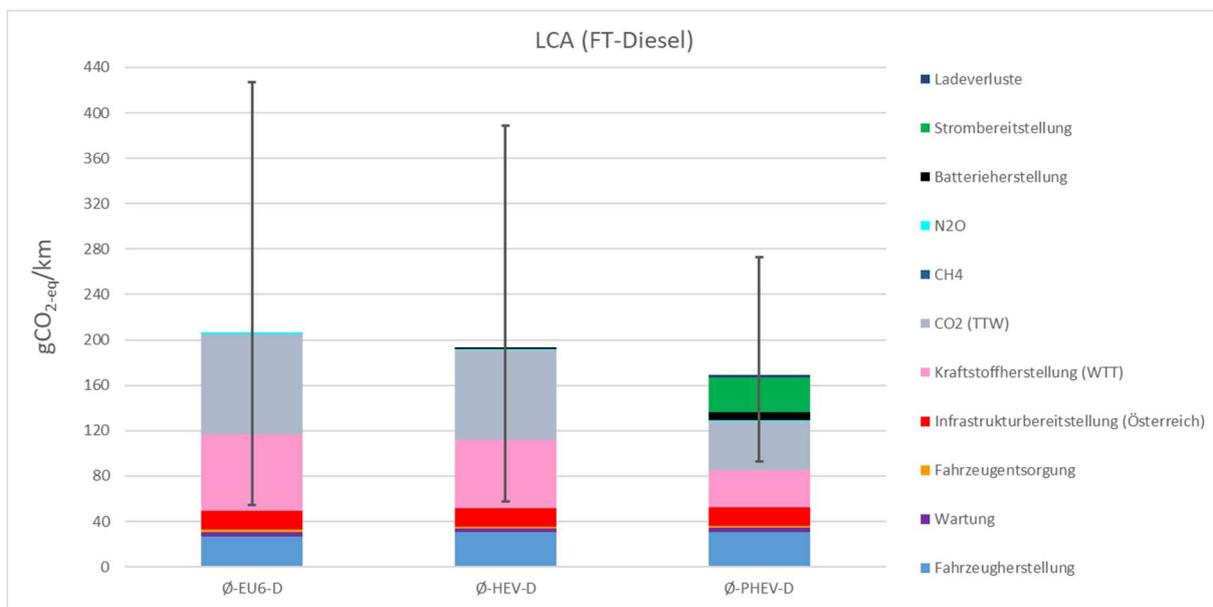


Abbildung 12-17: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von FT-Diesel

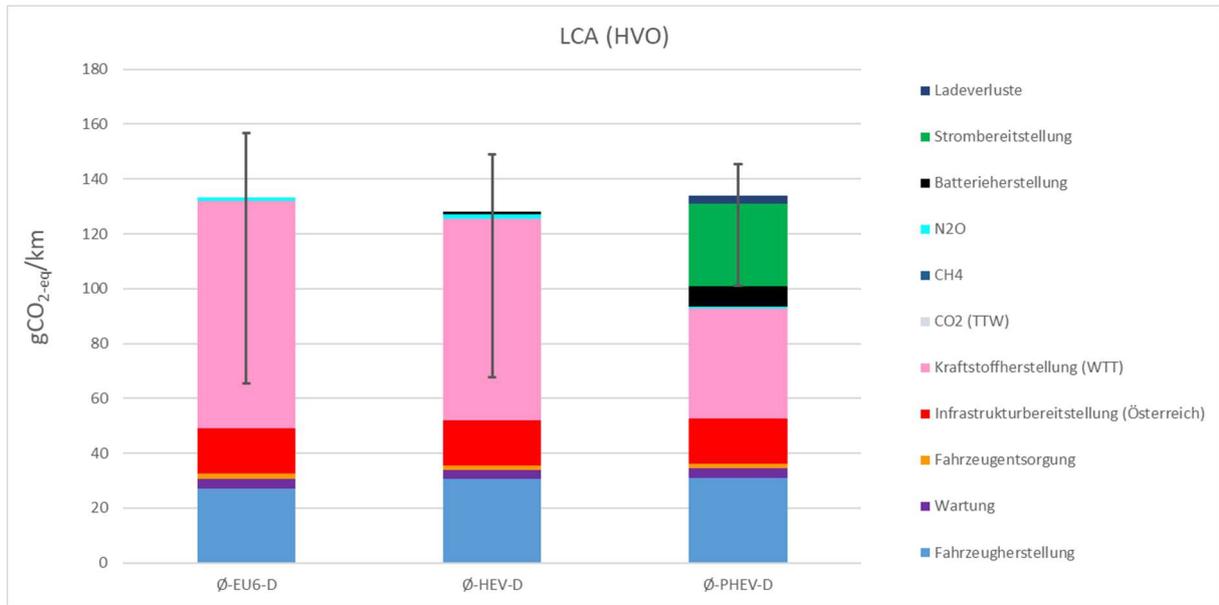


Abbildung 12-18: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von HVO

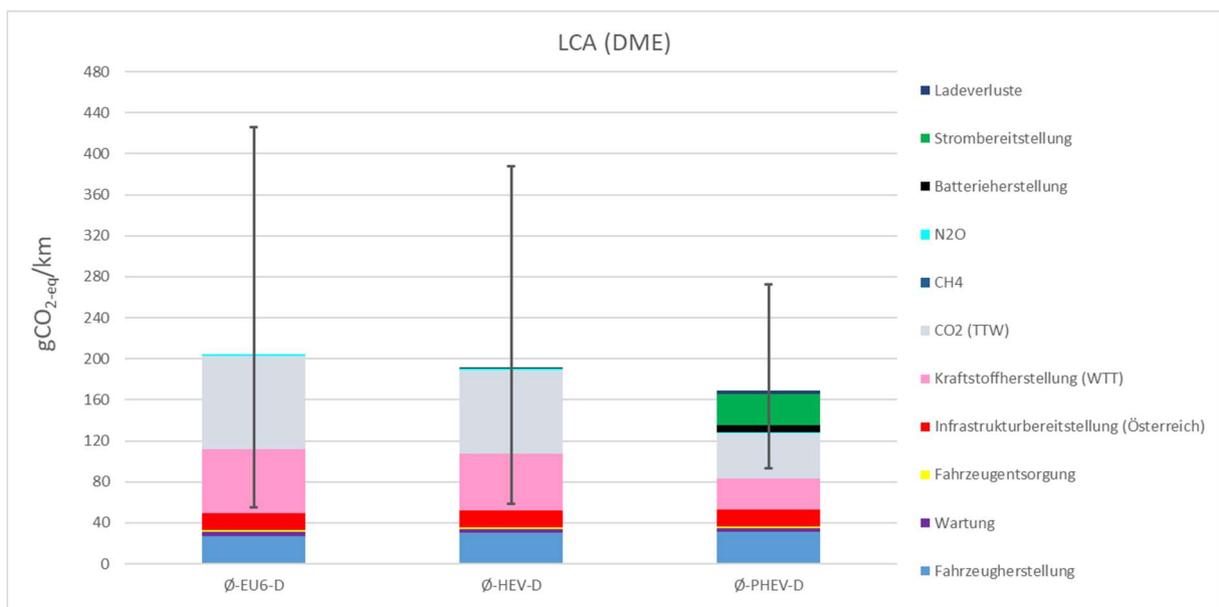


Abbildung 12-19: CO₂-Ausstoß über Lebenszyklus bei Verwendung von DME

12.5 LCA-Ergebnisse Elektrofahrzeuge in Österreich und mit diverser Strombereitstellung

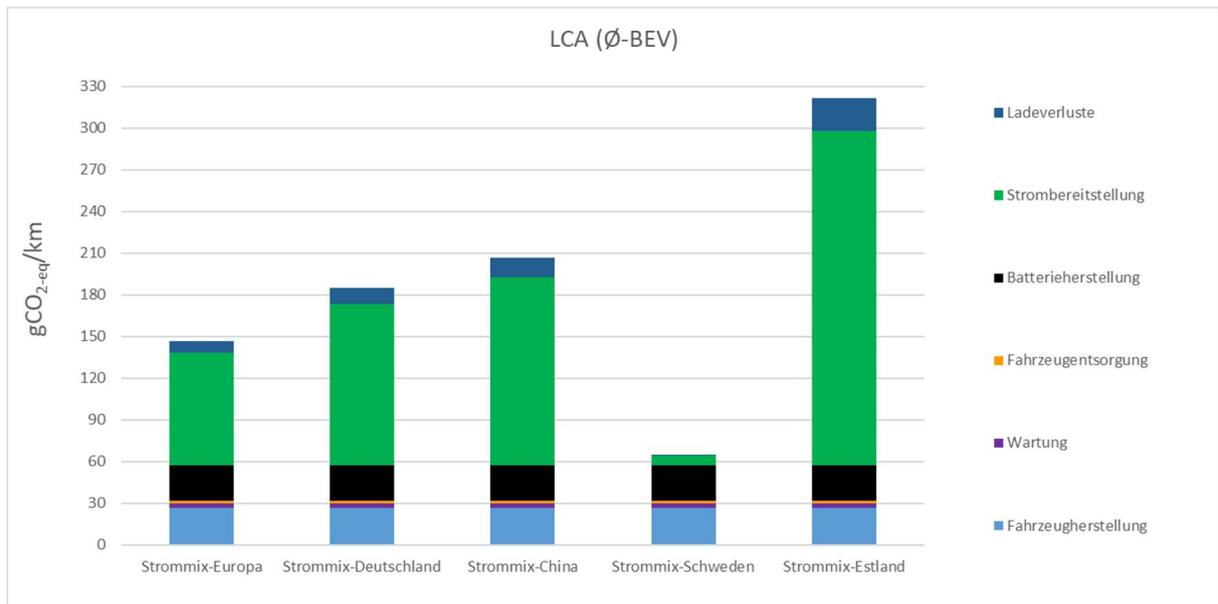


Abbildung 12-20: Treibhausgasemission eines Ø-BEV mit div. Strommix

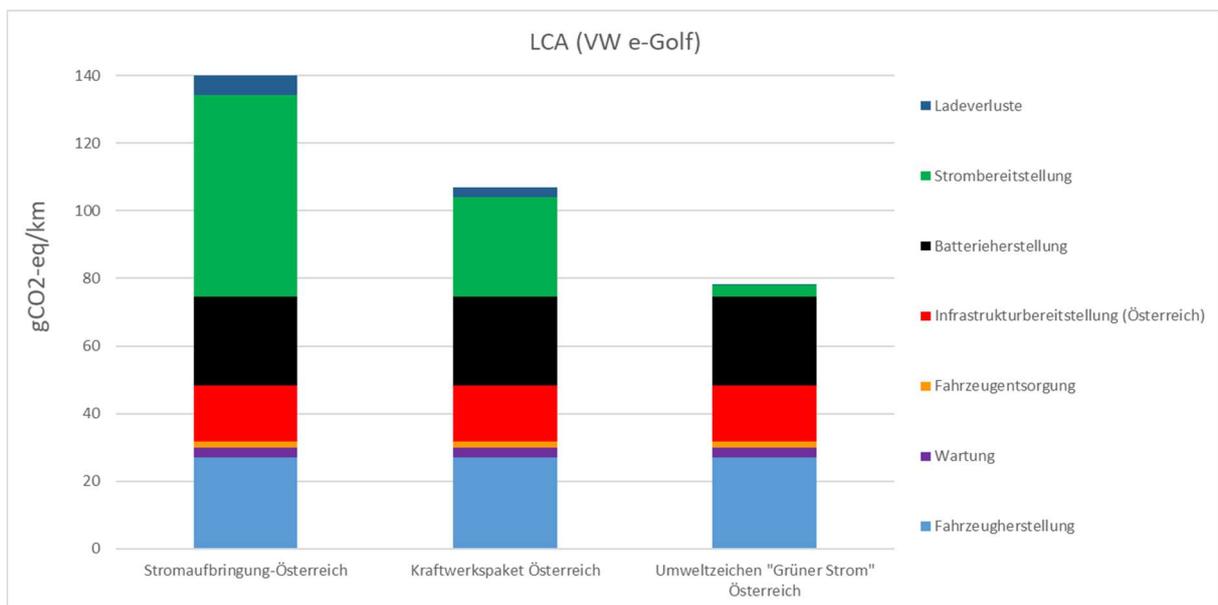


Abbildung 12-21: Treibhausgasemission VW e-Golf über einen Lebenszyklus in Österreich

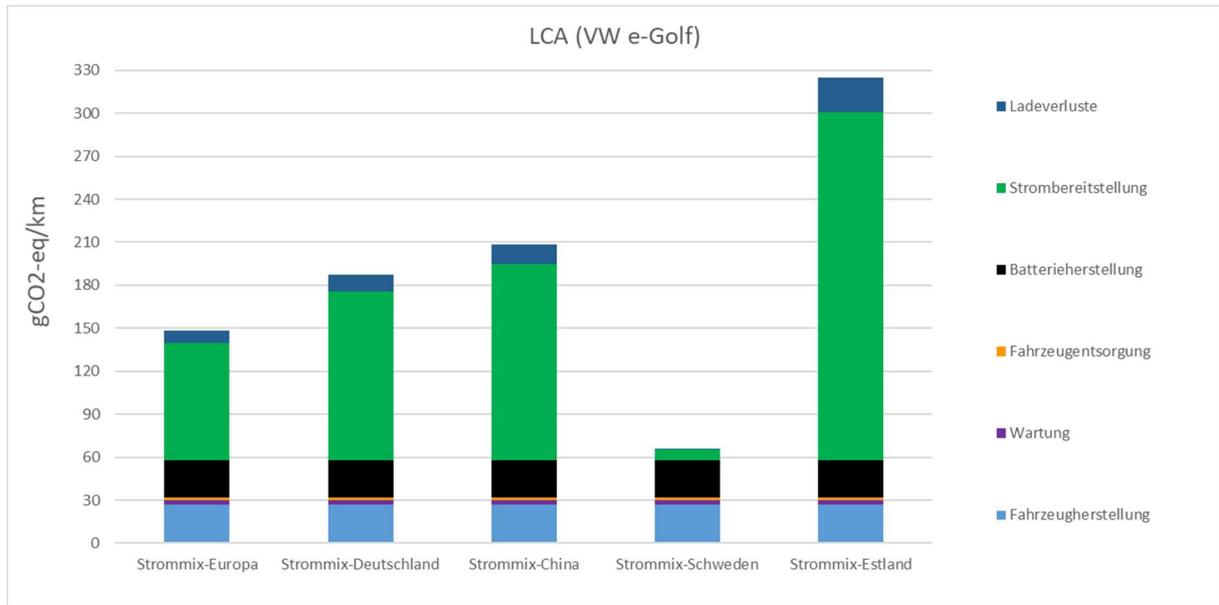


Abbildung 12-22: Treibhausgasemission VW-e-Golf mit div. Strommix

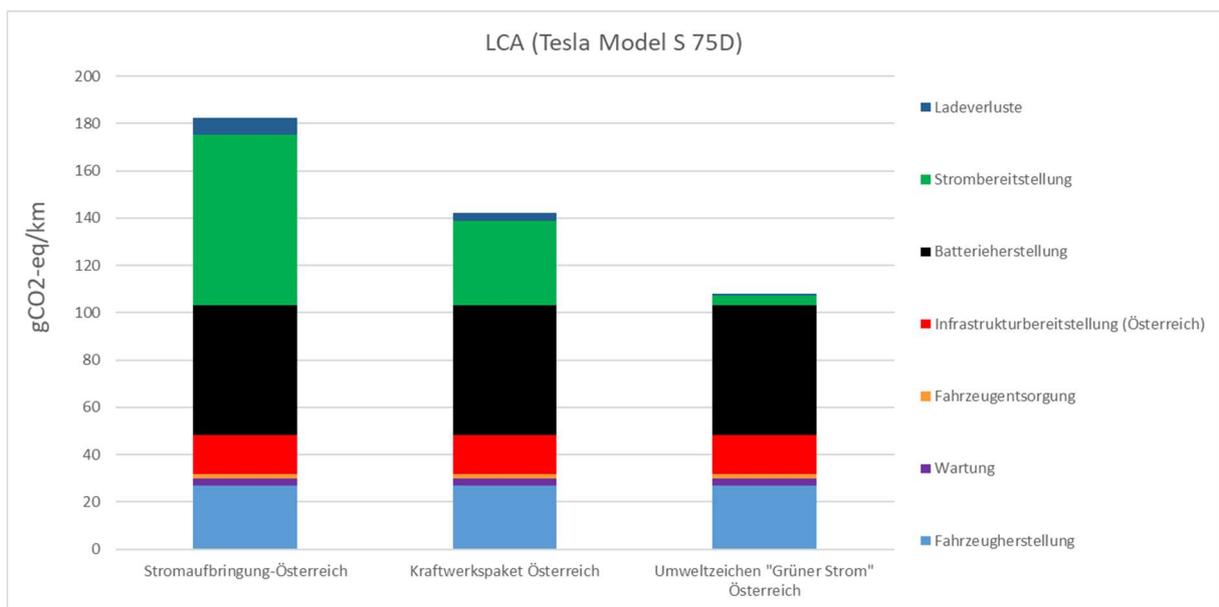


Abbildung 12-23 Treibhausgasemission Tesla Model S 75D über einen Lebenszyklus in Österreich

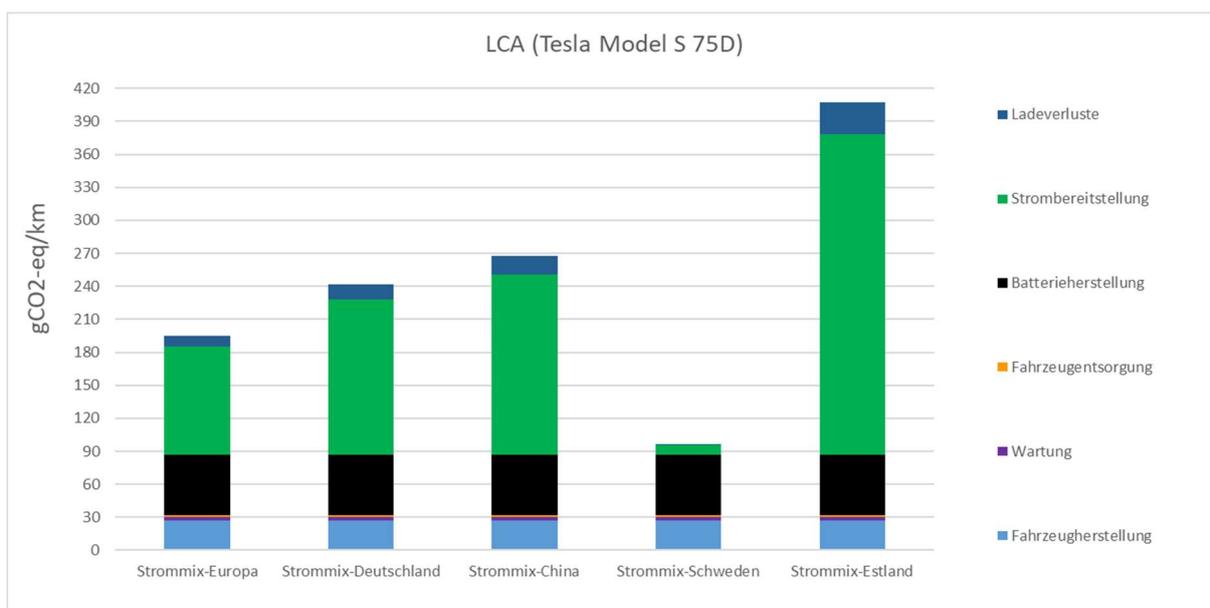


Abbildung 12-24: Treibhausgasemission Tesla Model S 75D mit div. Strommix

12.6 Verbrauchsergebnisse

PKW Golfklasse - Heute						Antriebsarbeit am Rad	Energieverbrauch des VKM/Brennstoffzelle	Energieverbrauch elektrisch (ohne Ladeverluste)	CO ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Verbrauch H ₂	Eta_gesamt
Treibstoff	VKM	HEV	PHEV	BEV	FCEV	[kWh/km]	[kWh/km] Kraftstoffenergie	[kWh/km]	[g/kWh] bezogen auf Kraftstoffenergie	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[%]
Benzin	x					0.1464	0.6218	0.0000	264.21	164.29	0.0007383	0.0004392	0	23.54%
Benzin		x				0.1511	0.5183	0.0000	264.21	136.94	0.0007383	0.0004392	0	29.16%
Benzin + Strom			x			0.1610	0.2824	0.1023	264.21	74.62	0.0005907	0.0003074	0	41.85%
Benzin + E5	x					0.1464	0.6218	0.0000	263.97	164.14	0.0007383	0.0004392	0	23.54%
Benzin + E5		x				0.1511	0.5183	0.0000	263.97	136.81	0.0007383	0.0004392	0	29.16%
Benzin + E5 + Strom			x			0.1610	0.2824	0.1023	263.97	74.55	0.0006128	0.0003074	0	41.85%
Diesel	x					0.1521	0.5190	0.0000	263.54	136.79	0.0001599	0.0046746	0	29.31%
Diesel		x				0.1569	0.4612	0.0000	263.54	121.54	0.0001599	0.0046746	0	34.02%
Diesel + Strom			x			0.1667	0.2513	0.0988	263.54	66.23	0.0000959	0.0028048	0	47.62%
Diesel + B7	x					0.1521	0.5190	0.0000	264.24	137.15	0.0001599	0.0046746	0	29.31%
Diesel + B7		x				0.1569	0.4612	0.0000	264.24	121.86	0.0001599	0.0046746	0	34.02%
Diesel + B7 + Strom			x			0.1667	0.2513	0.0988	264.24	66.41	0.0000959	0.0028048	0	47.62%
Erdgas CNG	x					0.1480	0.6289	0.0000	202.02	127.06	0.0161143	0.0004392	0	23.54%
Erdgas CNG		x				0.1529	0.5242	0.0000	202.02	105.91	0.0161143	0.0004392	0	29.16%
Erdgas CNG + Strom			x			0.1628	0.2857	0.1034	202.02	57.71	0.0132943	0.0003074	0	41.85%
Bioethanol	x					0.1464	0.6218	0.0000	256.98	159.79	0.0007383	0.0004392	0	23.54%
Bioethanol		x				0.1511	0.5183	0.0000	256.98	133.19	0.0007383	0.0004392	0	29.16%
Bioethanol			x			0.1610	0.2824	0.1023	256.98	72.57	0.0006128	0.0003074	0	41.85%
Biodiesel	x					0.1521	0.5190	0.0000	274.27	142.36	0.0001279	0.0056095	0	29.31%
Biodiesel		x				0.1569	0.4612	0.0000	274.27	126.49	0.0001279	0.0056095	0	34.02%
Biodiesel			x			0.1667	0.2513	0.0988	274.27	68.93	0.0000767	0.0033657	0	47.62%
Biomethan	x					0.1480	0.6289	0.0000	202.02	127.06	0.0161143	0.0004392	0	23.54%
Biomethan		x				0.1529	0.5242	0.0000	202.02	105.91	0.0161143	0.0004392	0	29.16%
Biomethan			x			0.1628	0.2857	0.1034	202.02	57.71	0.0132943	0.0003074	0	41.85%
HVO	x					0.1521	0.5190	0.0000	254.87	132.29	0.0001599	0.0046746	0	29.31%
HVO		x				0.1569	0.4612	0.0000	254.87	117.54	0.0001599	0.0046746	0	34.02%
HVO			x			0.1667	0.2513	0.0988	254.87	64.05	0.0000959	0.0028048	0	47.62%
FT-Diesel	x					0.1521	0.5190	0.0000	254.87	132.29	0.0001599	0.0046746	0	29.31%
FT-Diesel		x				0.1569	0.4612	0.0000	254.87	117.54	0.0001599	0.0046746	0	34.02%
FT-Diesel			x			0.1667	0.2513	0.0988	254.87	64.05	0.0000959	0.0028048	0	47.62%
Elektrische Energie				x		0.1613	0.0	0.1937	0	0	0	0	0	83.30%
H2 gasförmig					x	0.1589	0.3351	0	0	0	0	0	10.057	47.42%

Abbildung 12-25: Energieverbrauch, CO₂- und H₂-Verbrauch der Durchschnittsfahrzeuge „heute“

12.7 Datenblätter


BRUSA

Specifications EVB1

Electrical data	EVBI-400-40	EVBI-350-40	
Battery configuration	1P108S	1P96S	---
Number of cells	108	96	---
Capacity (per cell) (charge at 0.2 C, 25 °C / discharge at 0.2 C, 25 °C)	40	40	Ah
Energy content (charge at 0.2 C, 25 °C / discharge at 0.2 C, 25 °C)	16	14	kWh
Technology	Li-Ion	Li-Ion	---
Nominal voltage	400	350	V
Max. voltage	448	400	V
Min. voltage	324	290	V
Discharge cont.	200 (80)	200 (70)	A(kW)
Discharge peak (default derating)	400 (160)	400 (140)	A(kW)
Max. charging current	80 (32)	80 (28)	A(kW)
Internal resistance at 25°C	130-150	120-140	mΩ
Internal fuse protection	400	400	A
Control	CAN-Bus (500k/1Mbit)	CAN-Bus (500k/1Mbit)	---
Power consumption offline / Standby (per Cell)	40	40	uA
BMS-Power consumption at internal fan power = 100% (KI. 30 = 12V)	3.6	3.6	A
BMS-Power consumption at internal fan power = 0% (KI. 30 = 12V)	0.75	0.75	A
Life expectancy to 80% cap. (80% DoD or 3.4V -4.1V at 25°C)	up to 4000	up to 4000	---

Abbildung 12-26: Auszug aus Batteriedatenblatt [21]

Fuel Type	Density	RON / CN	LHV	Elemental composition of Carbon	CO2 emission factor	
	kg/m ³ i.N.*	---	MJ/kg	%m	g/MJ	kg/kg
Gasoline 2016 (E0)	743.3	95	43.2	86.4	73.4	3.17
Gasoline 2016 (E5)	745.8	95	42.3	84.7	73.3	3.10
Gasoline E10	748.3	95	41.5	82.8	73.3	3.04
Gasoline High Octane. Case 1 (100 RON)	761	100	42.4	84.8	73.3	3.11
Gasoline High Octane. Case 2 (102 RON / E5eq)	759	102	42.4	84.8	73.3	3.11
Gasoline High Octane. Case 3 (102 RON/ E10eq)	759	102	41.6	83.3	73.4	3.05
Pyrolysis-based Naptha	745.0	95	43.2	86.4	73.4	3.17
Methanol	793.0	132	19.9	37.5	68.9	1.37
Ethanol	794.0	108	26.8	52.2	71.4	1.91
ED95	820.0	n.a	25.4	49.4	71.3	1.81
Diesel (B0)	832.0	51.0	43.1	86.1	73.2	3.16
Pyrolysis-based Diesel	832.0	51.0	43.1	86.1	73.2	3.2
Diesel B7 market blend	836.1	53.0	42.7	85.4	73.4	3.13
FAME	890.0	56.0	37.2	77.3	76.2	2.83
FT Diesel	780.0	70	44.0	85.0	70.8	3.12
HVO	780.0	70	44.0	85.0	70.8	3.12
DME	670.0	55	28.4	52.2	67.3	1.91
OME	1066.6	84	19.2	43.5	83.3	1.60
LPG	0.55	**	46.0	82.4	65.7	3.02
CNG (EU mix piped NG)	0.780	**	46.6	70.8	56.1	2.60
CNG (2016 EU mix)	0.782	**	46.6	71.3	56.2	2.62
CNG (2030 EU mix)	0.782	**	46.8	71.7	56.2	2.63
H-CNG (2016)	0.775	**	48.0	73.5	56.2	2.69
H-CNG (2030)	0.775	**	48.0	73.5	56.2	2.70
LNG (EU mix. 2016/2030)	0.798	**	49.1	75.6	56.4	2.77
Biogas (2016/2030)	0.752	**	46.1	71.3	56.7	2.61
Hydrogen (CGH2 & cCGH2)	0.084	#	120	0	0	0

*) All values are related to standard conditions according to DIN 1343 & ISO 2533; **) can vary significantly

Abbildung 12-27: Kraftstoffeigenschaften [27]