



Lukas Schreiber, BSc

Abbildung eines durchschnittlichen Plug-In-Hybridfahrzeuges für die Fahrzeugsimulation

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau / Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/in
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Hausberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer/in
Dipl.-Ing. Silke Lipp, BSc
FVT

Graz, September 2017



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

Vorwort

Die ausgesprochen interessanten Lehrveranstaltungen im Laufe meines Studiums am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik haben mein Interesse im Bereich des Automobils und der Motorentechnik verstärkt. Durch die Möglichkeit am Institut die Masterarbeit zu verfassen, konnte ich mein Wissen in diesem Themengebiet weiter vertiefen, wofür ich mich an erster Stelle bei Professor Stefan Hausberger bedanken möchte. Die angenehme Gesprächsatmosphäre und seine fachliche Kompetenz, waren bei der Erstellung dieser Arbeit sehr hilfreich.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei meinen betreuenden Dissertanten, DI Silke Lipp und DI Claus Matzer, bedanken, die mir stets zur Seite gestanden sind und für die reibungslose Erarbeitung meiner Masterarbeit einen wesentlichen Teil beigetragen haben.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an DI Gerard Silberholz für die Hilfsbereitschaft und konstruktiven Diskussionen.

Nicht zuletzt möchte ich auch DI Thomas Vuckovic und allen Prüfstands Mitarbeiter danken, die mich bei dem praktischen Teil am Rollenprüfstand unterstützt haben.

Meinen Freunden und Mitbewohner danke ich für die unvergesslichen Jahre auch abseits des Studiums.

Der größte Dank gilt meinen Eltern für den motivierenden Beistand und emotionalen Rückhalt über die Dauer des gesamten Studiums, für die Unterstützung in allen Belangen und noch vieles mehr!

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	VIII
ZUSAMMENFASSUNG	IX
ABSTRACT.....	X
1 EINLEITUNG	1
THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	2
1.1 GESETZGEBUNG	2
1.2 REGLEMENTIERTE EMISSIONEN.....	3
1.2.1 Kohlenstoffdioxid CO_2	4
1.2.2 Kohlenwasserstoff HC	5
1.2.3 Kohlenmonoxid CO	5
1.2.4 Stickoxide NO_x	5
1.2.5 Partikel / Feinstaub.....	6
1.3 FAHRZYKLEN	8
1.3.1 NEDC.....	8
1.3.2 WLTP	9
1.3.3 CADC.....	10
1.3.4 ERMES.....	10
1.3.5 RDE.....	11
1.4 HYBRIDFAHRZEUGE	12
1.4.1 Klassifizierung und Hybridkonzepte	15
1.4.1.1 Serielle Hybridantriebe.....	16
1.4.1.2 Parallele Hybridantriebe	16
1.4.1.3 Leistungsverzweigte Hybridantriebe	16
1.4.1.4 Micro-Hybrid.....	18
1.4.1.5 Mild-Hybrid.....	18
1.4.1.6 Voll-Hybrid	18
1.4.1.7 Plug-In-Hybrid.....	18
1.4.2 Hybridkomponenten	19
1.4.2.1 Elektromaschinen	19
1.4.2.2 Energiespeicher	20
1.4.3 Hybridmanagement.....	23
2 SIMULATIONSSOFTWARE PHEM.....	24
2.1 AUFBAU UND SIMULATION.....	24
2.2 HEV - SIMULATION	28
2.2.1 Batterie.....	28
2.2.2 Elektromotor	29
2.2.3 Steuerkennlinie.....	29

3	VORGEHENSWEISE ZUR ABBILDUNG DES Ø – PHEV IN PHEM	32
4	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	34
4.1	AUDI A3 E-TRON	35
4.1.1	<i>Messgeräte</i>	37
4.1.1.1	PKW – Rollenprüfstand.....	38
4.1.1.2	CVS – Anlage.....	39
4.1.1.3	FTIR	40
4.1.1.4	Strom- und Spannungsmessung.....	40
4.1.1.5	PEMS.....	41
4.1.2	<i>Messungen</i>	43
4.1.2.1	Ermittlung der Fahrwiderstände	43
4.1.2.2	Rollenprüfstand	45
4.1.2.3	RDE – Fahrten	46
5	MODELLERSTELLUNG IN PHEM.....	48
5.1	AUDI A3 E-TRON	48
5.1.1	<i>Allgemeine Daten</i>	49
5.1.1.1	VEH – File.....	50
5.1.1.2	MAP – File	50
5.1.1.3	FLD – File	52
5.1.2	<i>HEV – Daten</i>	53
5.1.2.1	BAT – File.....	53
5.1.2.2	EMO – File.....	56
5.1.2.3	STE – File.....	58
5.2	Ø – PHEV	60
5.2.1	<i>Allgemeine Daten</i>	60
5.2.1.1	VEH - File	60
5.2.1.2	MAP - File.....	62
5.2.1.3	FLD - File.....	62
5.2.2	<i>HEV – Daten</i>	63
5.2.2.1	BAT – File.....	63
5.2.2.2	EMO – File.....	63
5.2.2.3	STE – File.....	63
6	ERGEBNISSE	64
6.1	PHEM – SIMULATION AUDI A3 E-TRON.....	64
6.2	PHEM – SIMULATION Ø – PHEV	68
6.2.1	<i>HBEFA</i>	70
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	76
8	LITERATURVERZEICHNIS	78
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	79
10	TABELLENVERZEICHNIS	81
11	ANHANG	82

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

a	m/s^2	Beschleunigung
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
v	m/s	Geschwindigkeit
d	m	Durchmesser
F	N	Kraft
I	A	Stromstärke
l	m	Länge
m	kg oder mol	Masse
M	$\text{N}\cdot\text{m}$	Drehmoment
p	bar , Pa	Druck
P	$(\text{k})\text{W}$	Leistung
s	m	Weg
t	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
T	K	thermodynamische Temperatur
U	V	elektrische Spannung
I	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	Trägheitsmoment
i	-	Übersetzungsverhältnis
r	m	Radius
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
F_r	-	Fahrwiderstandskoeffizienten
K_e	kWh/kg	Effizienzfaktor
W_{el}	kWh	elektrische Energie
M	$\text{l}/100\text{km}$	Kraftstoffverbrauch
D_e	km	elektrische Reichweite

Konstanten

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

Griechische Formelzeichen

α	$^{\circ}$; rad	Winkel
η	-	Wirkungsgrad
ρ	kg/m^3	Dichte
Δ	-	Differenz

Operatoren und Bezeichnungen

$\int dx$	Integraloperator
-----------	------------------

Weitere Indices und Abkürzungen

CARB	California Air Resources Board
EPA	Environmental Protection Agency
NSK	NO _x Speicher Katalysator
SCR	Selective Catalytic Reduction
CVS	Constant Volume Sampling
RDE	Real Driving Emissions
PEMS	Portable Emission Measurement System
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle
NEDC	Neuer Europäischer Fahrzyklus
CADC	Common Artemis Driving Cycle
ARTEMIS	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
ERMES	European Research on Mobile Emission Sources
BEV	Battery Electric Vehicle
PHEV	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle
RSG	Riemenstartergenerator
mhd	micro hybrid drive
KSG	Kurbelwellenstartergenerator
ISG	Integrierter Startergenerator
SOC	State of Charge
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
HEV	Hybrid Electric Vehicle
EV	Electric Vehicle
SOC _{min}	minimaler Ladezustand
SOC _{max}	maximaler Ladezustand
NDIR	Nichtdispersiver Infrarotsensor
FID	Flammenionisationsdetektor
CPC	Condensations Particle Counter
FTIR	Fourier Transformations Infrarotspektrometer
EFM	Exhaust Flow Meter
VKM	Verbrennungskraftmaschine
GuD	Gas und Dampf
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road transport
CO ₂	Kohlendioxid
CO	Kohlenmonoxid
H _x C _x	Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
Ø	Durchschnitt

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.

Vorname Nachname

Graz, Datum

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Plug-In-Hybridmodells im Simulationsprogramm PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model), welches das Durchschnittsfahrzeug der in Europa befindlichen PHEVs (Plug-In-Hybrid Electric Vehicles) darstellt. Damit sollen Aussagen über das Emissionsverhalten in verschiedenen Verkehrssituationen getroffen werden können und zugleich die Vor- und Nachteile dieses Antriebskonzeptes aufgezeigt werden.

Einleitend werden in dieser Arbeit die theoretischen Grundlagen behandelt. Dazu zählen gesetzliche Rahmenbedingungen von Fahrzyklen über Emissionsgrenzwerte bis hin zur Berechnungsformel für die Ermittlung des Normverbrauchs von Plug-In-Hybridfahrzeugen. Des Weiteren wird ein Überblick über gängige Hybridkonzepte und den Hybridisierungsgrad gegeben. Zum Abschluss des Theorieteils ist das Simulationsprogramm PHEM, im Speziellen die Hybridsimulation und deren Hybridmodule, erklärt.

Im Hauptteil sind alle notwendigen Schritte zur Findung eines repräsentativen PHEM – Hybridmodells durchgeführt und erläutert worden. Im ersten Schritt wurde aus den Zulassungsstatistiken von Europa 2016 eine Liste der meistverkauften Plug-In-Hybridfahrzeuge erstellt, um daraus die Spezifikationen des Durchschnittsfahrzeugs durch gewichtete Mittelwertbildung zu errechnen. Mit den nun bekannten Spezifikationen konnte ein Versuchsfahrzeug gewählt werden, das möglichst ähnliche Eckdaten aufweist. Anschließend sind mit dem gewählten Versuchsfahrzeug Rollentests und RDE – Fahrten (Real Driving Emissions) durchgeführt worden, sowie auch ein Ausrollversuch zur Ermittlung der Fahrwiderstandskoeffizienten. Im nächsten Schritt erfolgten die Modellierung des Versuchsfahrzeugs im PHEM und eine Gegenüberstellung mit den Messwerten aus den Versuchen. Iterativ wurde das Modell dahingehend angepasst, dass die Simulationsergebnisse dem Normverbrauch laut Herstellerangabe entsprachen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend auf die Modellbildung des Durchschnittsfahrzeugs übertragen. Durch iterative Vorgehensweise bei der Simulation und Anpassung des Modells, konnte schlussendlich ein für den europäischen Raum repräsentatives Plug-In-Fahrzeug im PHEM abgebildet werden.

Bei der Simulation des \emptyset – PHEV mit verschiedenen Fahrzyklen konnten unter anderem die Vor- und Nachteile, im Vergleich zu herkömmlichen PKWs, aufgezeigt werden. Der Vergleich der Fahrzyklen NEDC und WLTC ergab, dass der Fahrzyklus der kommenden EU Norm für PHEVs einen Mehrverbrauch von ca. 29% gegenüber dem NEDC zur Folge hat. Zurückzuführen ist dieser Verbrauchsnachteil vor allem auf die geringere elektrische Reichweite in diesem Zyklus, was in der Berechnungsformel für den Normverbrauch starken Einfluss hat. Zudem wurden Emissionsfaktoren für das HBEFA errechnet. Diese geben den Kraftstoffverbrauch oder auch Schadstoffemissionen pro Fahrzeugkilometer an. Bei der Simulation der HBEFA Fahrzyklen wird ersichtlich, dass der Verbrauchsvorteil bei Fahrzyklen mit niedriger Durchschnittsgeschwindigkeit bis zu 50% beträgt und mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. Einen großen Einfluss auf den Verbrauch eines PHEV hat der elektrische Fahranteil, beziehungsweise wie oft das Fahrzeug an der Steckdose aufgeladen wird. Hierzu wurden ebenfalls Simulationen durchgeführt, welche gezeigt haben, dass bei der Annahme eines realistischen Wertes von 35% elektrischem Fahranteil ein Durchschnittsverbrauch des modellierten PHEV von 3,28 l/100 km resultiert.

Die Hybridisierung und Elektrifizierung von PKWs ist vor allem in urbanen Gebieten sinnvoll, was Anhand verschiedener Simulationsszenarien veranschaulicht werden konnte. In Zukunft könnten Plug-In-Hybridfahrzeuge eine große Rolle spielen, auch deswegen weil sie die Vorteile von Elektrofahrzeuge im Stadtverkehr aufweisen und im Fernreiseverkehr nicht an eine flächendeckende Ladeinfrastruktur gebunden sind.

Abstract

The goal of this thesis is the creation of a plug-in-hybrid model in the simulation program PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model), which represents the average vehicle of the PHEVs (plug-in hybrid electric vehicles) in Europe. In this way, statements about the emission behaviour in different traffic situations should be made, and at the same time the advantages and disadvantages of this drive concept should be pointed out.

As an introduction in this thesis theoretical foundations are given. These include statutory framework conditions from driving cycle over emission limit values to the calculation formula for determining the standard consumption of plug-in-hybrid vehicles. Furthermore, an overview of hybrid concepts and the degree of hybridization is given. The simulation program PHEM, in particular the hybrid simulation and its hybrid building blocks, are explained to conclude the theoretical part.

The path to the final PHEM hybrid model consists of many intermediate steps. As a first step, a list of the best-selling plug-in-hybrid vehicles was compiled from the registration statistics of Europe 2016, and the average vehicle's specifications were calculated by weighted averaging. With the known specifications, a test vehicle could be selected, which has as similar basic data as possible. Subsequently, roll tests and RDE (Real Driving Emissions) rides were carried out with the selected test vehicle, as well as a coast down test to determine the driving resistance coefficients. The next step was the modelling of the experimental vehicle in PHEM and a comparison with the measured values from the experiments. Iteratively, the model was adapted in such a way that the simulation results corresponded to the standard consumption according to the manufacturer's specification. The findings were subsequently transferred to the modelling of the average plug-in-hybrid vehicle. Through an iterative approach in the simulation and adaptation of the model, a representative plug-in-hybrid vehicle of the European area could finally be developed in PHEM.

During the simulation of the \emptyset - PHEV with different driving cycles, the advantages and disadvantages, compared to conventional vehicles, could be shown. The comparison of the driving cycles NEDC and WLTC showed that the driving cycle of the coming EU standard for PHEVs results in an additional consumption of approximately 29% compared to the NEDC. This reduction in consumption is mainly related to the lower electrical range in this cycle, which has a strong influence in the calculation formula for standard consumption. In addition, emission factors for the HBEFA were calculated. These factors indicate the fuel consumption or pollutant emissions per vehicle kilometre. During the simulation of the HBEFA driving cycles, it becomes clear that the consumption advantage for driving cycles with low average speed is up to 50% and decreases with increasing speed. A large influence on the consumption of a PHEV has the electric driving proportion, or how often the vehicle is recharged. For this purpose, simulations were also carried out which showed that assuming a realistic value of 35% of the electric driving proportion results in an average consumption of the modelled PHEV of 3.28 l / 100 km.

The hybridization and electrification of cars is particularly useful in urban areas, which can be illustrated by means of different simulation scenarios. In the future, plug-in-hybrid vehicles could play a major role, also because they have the advantages of electric vehicles in urban traffic and are not bound to a nationwide charging infrastructure in the long-distance traffic.

1 Einleitung

Das Hippomobile, konstruiert von Etienne Lenoir im Jahr 1863, war das erste Fahrzeug mit internem Verbrennungskraftmotor. Das Automobil entwickelte sich im 20. Jahrhundert zum beliebtesten Fortbewegungsmittel weltweit. Trotz der stetigen Verbesserungen im Bereich Kraftstoffeffizienz und Abgasnachbehandlung, zählt das Automobil in der heutigen Zeit zu den Hauptemittenten von Kohlendioxid und umweltrelevanten Schadstoffen. Vorangetrieben durch die drohenden Folgen der fortschreitenden Klimaerwärmung, der Pionierarbeit von Tesla im Elektromobilsektor und dem in jüngster Zeit aufgedeckten Dieselskandals, steht das Automobil eventuell kurz vor einer Revolution. Eine zunehmende Elektrifizierung verspricht große Kraftstoffeinsparungen im Betrieb und lokal emissionsfreie Fahrten.

Ein Zielwert von 95 gCO₂/km als Flottendurchschnitt im Jahr 2020, vorgegeben von der Europäischen Gesetzgebung, und immer niedrigere Schadstoffgrenzwerte, machen eine Hybridisierung scheinbar unumgänglich. Trotz dem bekannten Potential der Hybridisierung steht vor allem das Plug-In-Hybridfahrzeug bei Verfechtern von herkömmlichen Fahrzeugen in der Kritik. Der ohnehin hohe technische Aufwand eines Hybridfahrzeuges durch den Einsatz eines herkömmlichen Verbrennungsmotor in Verbindung mit einem Elektromotor und die dafür nötigen Regelsysteme, wird bei Plug-In-Hybridfahrzeugen durch den deutlich größeren Akku, der rein elektrisches Fahren über größere Distanzen ermöglicht und das Gesamtgewicht zusätzlich in die Höhe treibt, verstärkt. Hier stellt sich nun die Frage ob der technische Mehraufwand zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte gerechtfertigt ist, und wie hoch das Einsparungspotential im Realverkehr wirklich ist. Um sich nicht auf Herstellerangaben stützen zu müssen, bedarf es eines Modells welches durch Versuche validiert, zuverlässige Verbrauchsaussagen bei diversen realitätsnahen Betriebsszenarien liefert.

In dieser Masterarbeit soll ein Modell eines, für den europäischen Raum repräsentativen, Plug-In-Hybridfahrzeug erstellt werden, welches im Simulationsprogramm PHEM verschiedenste Untersuchungen ermöglichte und quantitative Aussagen zur Emissionsreduktion zulässt.

Die Arbeit ist unterteilt in die Hauptkapitel theoretische Grundlagen, Erläuterung der Simulationssoftware PHEM, Beschreibung zur Vorgehensweise zum Erlangen der Simulationsergebnisse, experimentelle Untersuchungen am Versuchsfahrzeug, Modellerstellung im PHEM, die Simulationsergebnisse und zuletzt eine Schlussfolgerung und Ausblick der Thematik.

Theoretische Grundlagen

1.1 Gesetzgebung

In den 1960er Jahren wurden in San Francisco, durch die Anfälligkeit auf Sommersmog, die Abgasemissionen der Kraftfahrzeuge erstmals begrenzt. Dafür wurde 1967 die CARB (California Air Research Board) gegründet. In Europa wurde 1970 die erste Abgasvorschrift durch die Gesetzgebung eingeführt.

Die zu limitierenden Schadstoffe sind Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Partikelmasse und -anzahl sowie Schwefelverbindungen. Dabei unterscheidet man je nach Art des Motors (Ottomotor, Dieselmotor) und des Fahrzeugtyps (PKW, LKW, Motorrad, Moped). Die Typprüfung von PKWs und Motorrädern erfolgt am Rollenprüfstand, auf dem ein bestimmtes Fahrprofil, entsprechend dem geltenden Fahrzyklus des jeweiligen Landes, nachgefahren wird. Die dabei gemessenen Schadstoffe müssen für eine positive Typisierung unterhalb der dafür gesetzlich festgelegten Grenzwerte sein. Für LKWs und Busse wäre die Typprüfung am Rollenprüfstand zu aufwändig, daher erfolgt die Überprüfung zur Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte nicht mit dem Gesamtfahrzeug, sondern am Motorprüfstand.

Kohlendioxid ist kein Schadstoff und ist für den einzelnen PKW nicht begrenzt. Es ist jedoch der gewichtete Flottendurchschnittsausstoß an Kohlendioxid (Kraftstoffverbrauch) der Hersteller limitiert. [1]

In der nachfolgenden Abbildung ist der chronologische Verlauf der weltweiten Abgasnormen dargestellt.

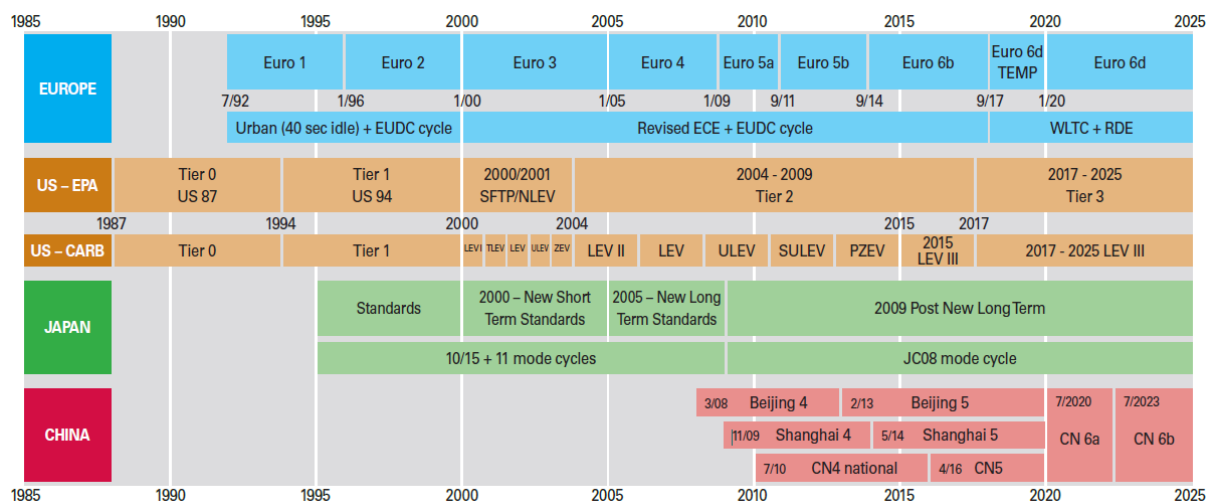


Abbildung 1: zeitlicher Verlauf der Emissionsstandards für PKW [2]

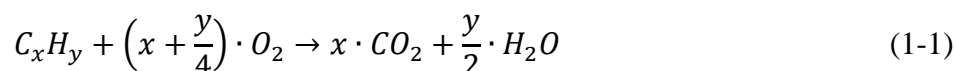
Ab September 2017 tritt die Abgasnorm Euro 6d TEMP in Kraft, bei der ein neuer Prüfzyklus, der sogenannte WLTP (Worldwide Light duty Test Procedure) zum Einsatz kommt. Zusätzlich zu den Messungen am Rollenprüfstand werden die Emissionen auch im realen Straßenverkehr (RDE, Real Driving Emissions) erfasst, wofür portable Messsysteme (PEMS, Portable Emission Measurement System) mitgeführt werden müssen. Die dabei gemessenen Emissionswerte dürfen, multipliziert mit einem Konformitätsfaktor, die jeweiligen Grenzwerte nicht überschreiten. Eine weitere Änderung betrifft PKWs mit Ottomotor und Direkteinspritzung, bei denen der Grenzwert für die Partikelanzahl um den

Faktor 10 reduziert wird. Dies macht den Einsatz eines Partikelfilters erstmals auch bei Ottomotoren erforderlich.

In den USA gibt es zwei Behörden zur Bestimmung der Abgasgesetzgebung. Historisch bedingt hat der Bundesstaat Kalifornien eine eigene Behörde (CARB, California Air Research Board), an deren Gesetzgebung sich die restlichen Bundesstaaten freiwillig anschließen können. Ansonsten unterliegen sie der Abgasgesetzgebung der EPA (Environmental Protection Agency). Die Emission Standards der CARB (LEV, ULEV, SULEV, ZEV) zählen weltweit zu den strengsten Abgasnormen, deren Grenzwerte vergleichbar mit der Europäischen EURO 6 Norm sind.

1.2 Reglementierte Emissionen

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen wie Benzin und Diesel entsteht durch Oxidation Kohlendioxid und Wasserdampf. Diese chemische Reaktion kann durch folgende Reaktionsgleichung beschrieben werden.



C_xH_yKohlenwasserstoffe

xKohlenstoffanteil

yWasserstoffanteil

CO_2Kohlendioxid

O_2Sauerstoff

H_2OWasser

Der Stickstoff und der überschüssige Sauerstoff gehen unverändert aus der Reaktion hervor. Aufgrund der nicht idealen Verbrennungsbedingungen entstehen neben Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf auch Kohlenmonoxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Partikel, Schwefelverbindungen und durch die hohen Verbrennungstemperaturen bedingt auch Stickoxide. Diese Verbrennungsprodukte werden Schadstoffe genannt und müssen, um die jeweiligen gesetzlichen Abgasgrenzwerte einhalten zu können, durch geeignete Katalysatoren und Filter oxidiert beziehungsweise reduziert werden.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Rohemissionen eines Dieselmotors und Ottomotors abgebildet. Auffallend ist, dass die Schadstoffe beim Ottomotor mit 0,9 % der Rohemissionen etwa zehn Mal so hoch sind wie beim Dieselmotor, bei dem der Anteil 0,09 % beträgt. Dieser beträchtliche Unterschied zwischen Otto- und Dieselmotor ist auf das Brennverfahren zurückzuführen. Während das ottomotorische Verfahren immer ein stöchiometrisches Gemisch vorsieht, herrscht beim dieselmotorischen Verfahren konzeptbedingt Luftüberschuss, was die Oxidation der Schadstoffe erleichtert. [3]

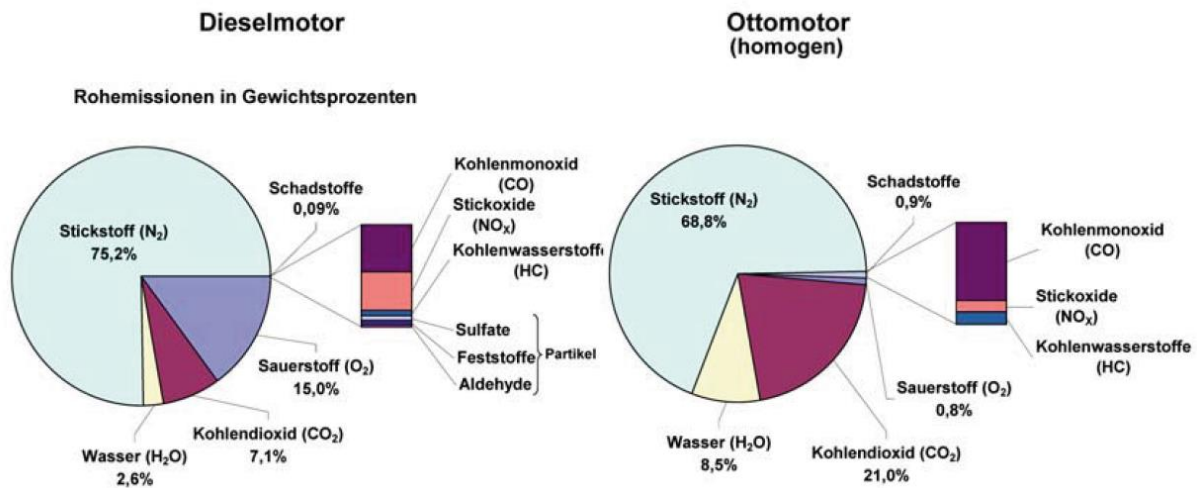


Abbildung 2: Zusammensetzung der Rohemissionen [4]

1.2.1 Kohlenstoffdioxid CO₂

Kohlenstoffdioxid ist ein ungiftiges, farb- und geruchloses Gas, das in der Atmosphäre eine Konzentration von etwa 400 ppm aufweist. Die größte Menge an Kohlenstoffdioxid entsteht auf natürliche Weise durch Veratmung und Verrottung. In den natürlichen Kohlenstoffdioxid – Senken wie Photosynthese oder Einlagerung in den Ozeanen, wird dieselbe Menge des produzierten CO₂ wieder umgesetzt. Durch vermehrte Nutzung von fossilen Kraftstoffen seit der Industrialisierung ist die CO₂ Bilanz aus dem Gleichgewicht geraten, was zu einer steigenden Konzentration in der Atmosphäre führte. Dies wirkt sich als eine Verstärkung des Treibhauseffekts aus, wodurch ein Anstieg der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche um 1,5 bis 2 K bis zum Jahr 2100 prognostiziert wird. [5]

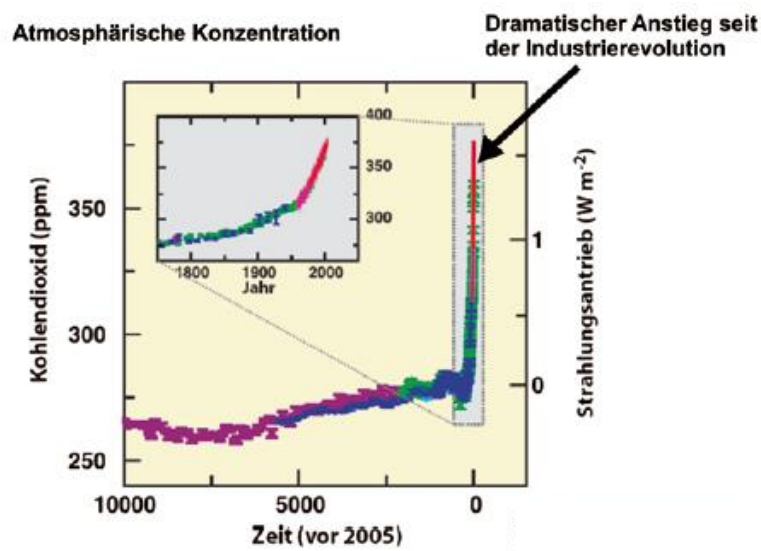


Abbildung 3: Verlauf der CO₂ – Konzentration [3]

Den Autoherstellern wird vorgeschrieben einen Flottendurchschnittswert von 130 gCO₂/km nicht zu überschreiten, andernfalls müssen Strafzahlungen geleistet werden. Im Jahr 2020 wird der Grenzwert auf 95 gCO₂/km herabgesetzt.

1.2.2 Kohlenwasserstoff HC

Entsprechend der Herkunft von Kohlenwasserstoffen werden Kohlenwasserstoffe unterteilt in „fuel-Emissionen“ und „non-fuel-Emissionen“. Es gibt mehr als 1000 verschiedener ketten-, oder ringförmiger Verbindungen. Sie werden in Untergruppen wie Alkane, Cycloalkane, Alkene, Alkine und Aromaten unterteilt. Dabei reicht die gesundheitliche Relevanz von ungiftigen Stoffen wie Methan (CH_4) über Reizstoffe bis hin zu krebserregenden Substanzen wie zum Beispiel die aromatische Verbindung Benzol (C_6H_6).

Zusammen mit Stickoxiden und Kohlenmonoxid sind sie verantwortlich für das Entstehen von Ozon, auch bekannt als Sommersmog.

Im Abgasnachbehandlungssystem von Ottomotoren werden Kohlenwasserstoffe im Dreiwegekatalysator oxidiert, bei Dieselmotoren erfolgt dies im Oxidationskatalysator. Das Erreichen der gesetzlichen Grenzwerte dieser Abgaskomponente stellt bei konventionellen Brennverfahren keine große technische Herausforderung dar. [5], [6]

1.2.3 Kohlenmonoxid CO

Kohlenmonoxid ist ein Produkt der unvollständigen Verbrennung und tritt vorrangig bei Luftmangel auf. Es ist ein farb- und geruchloses Gas und gilt als hoch giftig, da es eine stärkere Affinität zum Hämoglobin aufweist als Sauerstoff und Kohlendioxid. Schon geringe Konzentrationen von Kohlenmonoxid führen zu einem Sauerstoffmangel und Unterversorgung der Organe.

Aufgrund der relativ kurzen Verweildauer von durchschnittlich 2 Monaten in der Atmosphäre, ist die Umweltrelevanz eher gering.

Wie auch Kohlenwasserstoff wird Kohlenmonoxid bei Ottomotoren im Dreiwegekatalysator und bei Dieselmotoren im Oxidationskatalysator umgesetzt. Das Erreichen der Emissionsgrenzwerte von Kohlenmonoxid, im gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzyklus, ist ebenfalls unproblematisch. [5]

1.2.4 Stickoxide NO_x

Seit dem Abgasskandal im September 2015 stehen die Stickoxidemissionen vor allem bei Dieselmotoren stark in der Kritik.

Die Bildung von NO_x erfolgt auf drei verschiedene Arten:

- Thermisches NO
- Promptes NO
- NO aus in Brennstoff gebundenem Stickstoff

Durch die sehr hohen Temperaturen in Verbrennungsmotoren kommt es zur Bildung von NO aus Luftstickstoff. Dieser Prozess wird als Zeldovich Mechanismus bezeichnet und läuft in drei Elementreaktionen ab. Den Namen „thermisch“ ist der hohen Aktivierungsenergie der ersten Reaktion geschuldet, welche geschwindigkeitsbestimmend für den Gesamtmechanismus ist. Der größte Teil des NO entsteht beim Verbrennungskraftmotor auf diese Weise.

Das prompte NO, dessen Aktivierungsenergie viel geringer ist als die des thermischen NO, entsteht dementsprechend schon bei sehr viel niedrigeren Temperaturen. Daher kann es in vielen technischen Anwendungen wesentlich zur Gesamt NO – Bildung beitragen.

Die Umwandlung von Brennstoff – Stickstoff in Stickoxide ist ähnlich komplex wie die Bildung von thermischen NO. Diese Bildungsart ist vor allem bei der Verbrennung von Kohle problematisch und daher kein Thema in herkömmlichen Verbrennungskraftmotoren.

Die Maßnahmen zur Reduktion von NO_x Emissionen sind für Otto- und Dieselmotoren grundverschieden. Bei Ottomotoren erfolgt die Reduktion im Dreiwegekatalysator, wobei der Applikationsaufwand sehr gering ausfällt. In Dieselmotoren kommen zwei Systeme zur Reduktion von Stickoxiden in Frage, der NSK (NO_x – Speicherkatalysator) und der SCR – Katalysator (SCR = selective catalytic reduction). Die Konvertierungsraten beim SCR – Kat sind wesentlich höher als beim NSK, und betragen je nach Katalysatortemperatur über 90%. Der technische Aufwand dieses Systems ist jedoch wesentlich höher, da für die Konvertierung von Stickoxid eine Harnstofflösung mitgeführt werden muss, die in einer Vorreaktion zu Ammoniak reagiert um schließlich die giftigen Stickoxide zu reduzieren. Da Ammoniak hochgiftig ist, muss hinter dem SCR – Katalysator noch zusätzlich ein Oxidationskatalysator angebracht sein, der den Schlupf von NH₃ aufoxidiert. Die niedrigen Emissionsgrenzwerte für Stickoxide sind bei Dieselfahrzeugen kaum mehr mit einem NSK zu bewältigen. Deshalb sind moderne Dieselfahrzeuge fast ausschließlich mit einem SCR – Katalysator ausgestattet. [5]

1.2.5 Partikel / Feinstaub

Partikel bestehen grundsätzlich aus einem festen Kohlenstoffkern an dem sich feste sowie flüssige Stoffe anlagern. Die gesundheitliche Relevanz ist nicht nur durch die angelagerten Stoffe begründet, sondern sehr stark von der Partikelgröße abhängig. In Verbrennungskraftmotoren ist der Großteil der emittierten Partikel kleiner als 1µm. Diese lungengängige Partikelgröße kann bis in den Blutkreislauf vordringen und ist aus diesem Grund humanmedizinisch besonders bedeutsam. In der nachfolgenden Abbildung ist die Lungengängigkeit der Partikel in Abhängigkeit von deren Größe abgebildet.

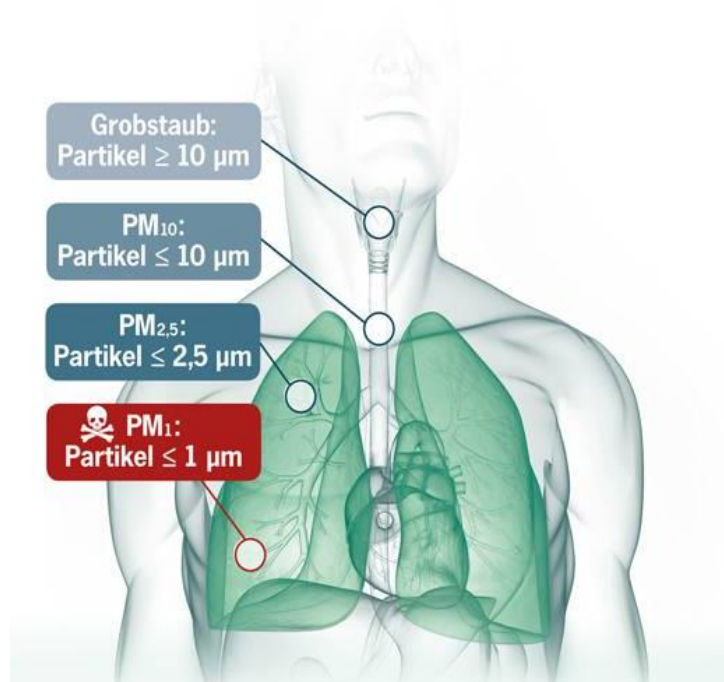


Abbildung 4: Lungengängigkeit in Abhängigkeit der Partikelgröße [7]

Partikelfilter in modernen Verbrennungsmotoren arbeiten sehr effektiv und zuverlässig. Für einen wartungsfreien Partikelfilter müssen Drucksensoren vor und nach dem Filter angebracht werden, die gegendruckabhängig die Beladung detektieren. Wenn der Gegendruck einen gewissen Wert übersteigt muss der Filter regeneriert werden, indem die Abgastemperatur erhöht wird um die im Filter gesammelten Kohlenstoffpartikel abzubrennen. Während bei modernen Dieselfahrzeugen der Partikelfilter zur Standardausstattung des Abgasnachbehandlungssystems zählt, macht die neue Abgasvorschrift ab September 2017, den Einsatz eines Filters vermutlich auch bei direkteinspritzenden Benzinfahrzeugen notwendig.

1.3 Fahrzyklen

Neue Fahrzeugtypen müssen, um die Typgenehmigung zu erlangen, bestimmte Emissionsvorgaben erfüllen. Die Testprozedur gibt den Fahrzyklus und die Prüfbedingungen, unter welchen die Verbrauchs- und Emissionswerte ermittelt werden, vor. Zu definierende Randbedingungen sind Starttemperatur, Vorkonditionierung des Fahrzeuges, Schaltpunkte (nicht für Automatikgetriebe), Zuladung und Beginn der Abgasmessung. Um Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten werden diese Tests am Rollenprüfstand von zertifizierten Prüfstellen durchgeführt.

Die Emissionen werden in einer CVS – Anlage (Constant Volume Sampling) gemessen, deren Funktionsweise im Kapitel 4.1.1.2 noch näher beschrieben wird. Der Kraftstoffverbrauch wird aus dem emittierten Kohlenstoffdioxid errechnet.

1.3.1 NEDC

Der NEDC (New European Driving Cycle) wurde im Jahr 1992 durch die Europäische Kommission eingeführt. Bis zur Einführung der Euro 3 Norm war eine 40 Sekunden dauernde Warmlaufphase im Fahrzyklus enthalten, nach der die Emissionsmessung begonnen hat. Die Umgebungstemperatur bei der Messung muss zwischen 20°C und 30°C liegen, und mindestens 6 Stunden vor Messbeginn bei abgestelltem Fahrzeug vorherrschen.

In der nachfolgenden Abbildung ist der Geschwindigkeitsverlauf abgebildet. Der Zyklus dauert 1180 Sekunden mit einer Gesamtlänge von 11 km, wobei eine Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h erreicht wird.

Da die benötigte Durchschnittsleistung eines Mittelklassewagens von 7 kW im NEDC deutlich niedriger ist als im realen Straßenverkehr und die Lastanforderungen wesentlich undynamischer sind, stellt der NEDC die Verbrauch- und Abgaswerte nicht sehr realitätsnahe dar.

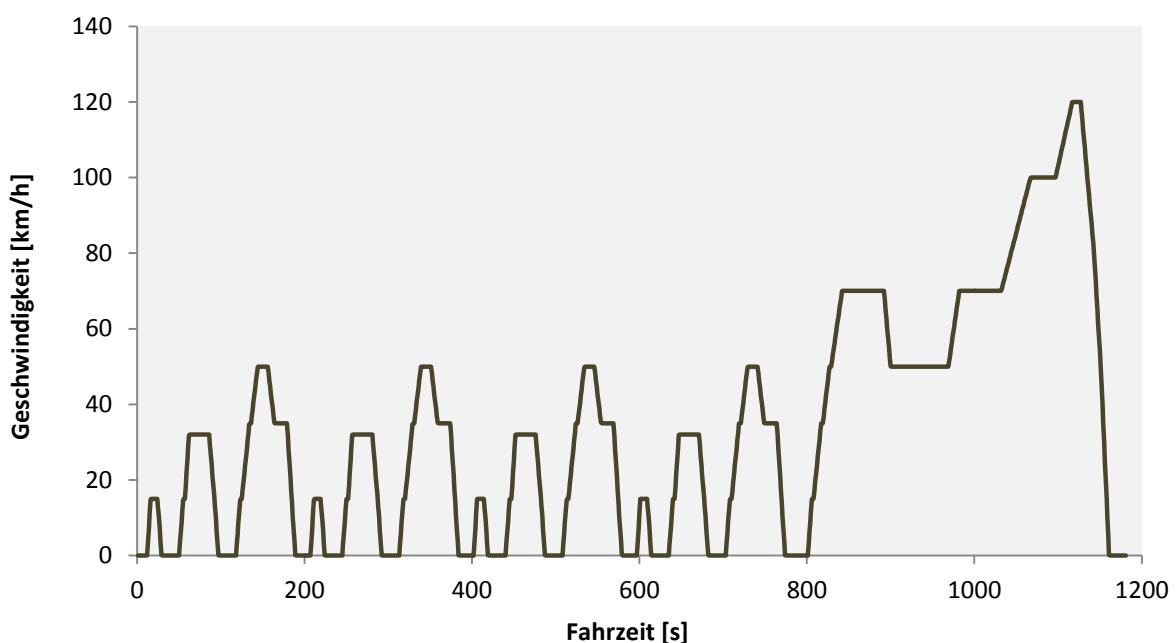


Abbildung 5: NEDC – Fahrzyklus

1.3.2 WLTP

Ab September 2017 wird der WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure) als Testprozedur für die Typgenehmigung neuer Fahrzeugtypen in Kraft treten und ab September 2018 für alle Neufahrzeuge gültig sein. Die Testprozedur beinhaltet auch einen neuen Fahrzyklus, den sogenannten WLTC (World Harmonized Light Vehicle Test Cycle), der realitätsnahe Fahrsituationen darstellen soll. Abhängig von Leistungsgewicht und Maximalgeschwindigkeit gibt es unterschiedliche Varianten. Für Fahrzeuge mit einem Leistungsgewicht >34 W/kg und einer Maximalgeschwindigkeit >120 km/h wurde ein Zyklus definiert, der einen Low-, Medium-, High- und Extra High Anteil beinhaltet (siehe Abbildung 6).

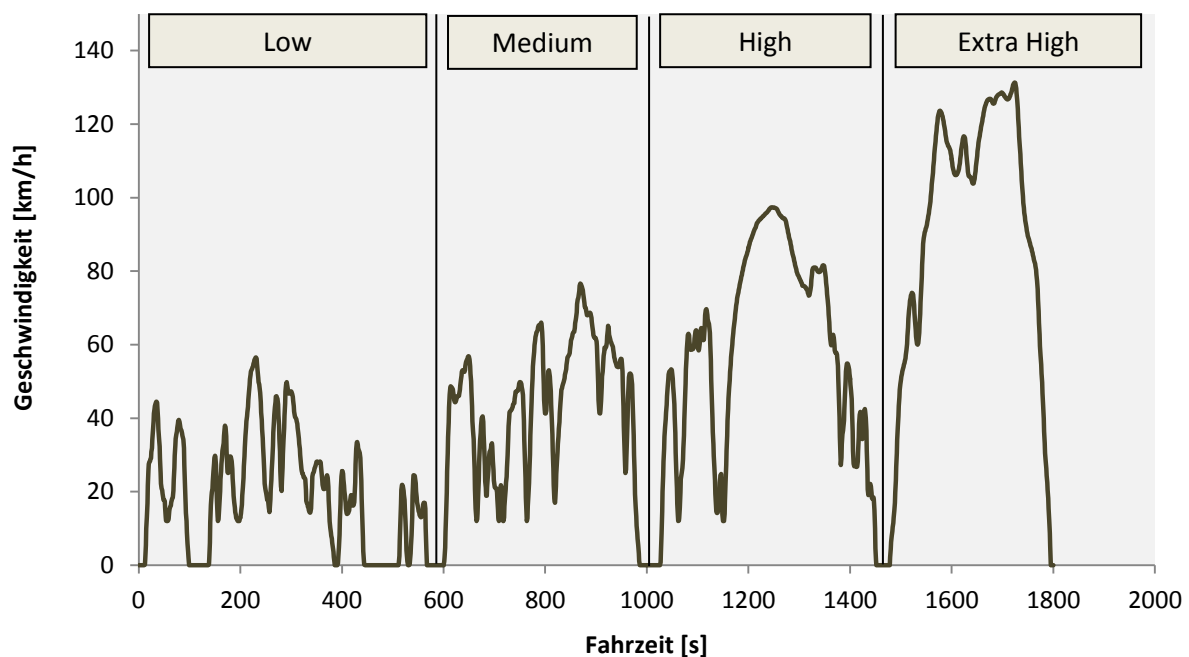


Abbildung 6: WLTP – Fahrzyklus

Im Vergleich zum NEDC ist der WLTC wesentlich dynamischer und stellt die realen Fahrbedingungen wesentlich besser dar. Flexibilitäten in der Testprozedur des NEDC welche zu realitätsfernen Emissionseinsparungen geführt haben, wurden identifiziert und für den WLTP entsprechend abgeändert. Unter anderem wurden folgende Parameter verändert:

- Temperature Set Point 23°C (Prüfstand: $\pm 5^{\circ}\text{C}$; Soak Area: $\pm 3^{\circ}\text{C}$)
- Testmasse einschließlich Zusatzausstattung
- Stufenlose Schwungmassen
- Kleinere Toleranzen bei der Lasteinstellung auf dem Prüfstand
- Keine externe Ladung der Batterie nach Start der Konditionierung

Aufgrund des realitätsnäheren Fahrzyklus und der geänderten Testprozedur rechnen Experten mit einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 20% im Vergleich zum NEDC. [8]

1.3.3 CADC

Der CADC (Common Artemis Driving Cycle) ging aus dem EU-Projekt ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems) hervor. Beteiligt waren verschiedene Forschungseinrichtungen mit dem Ziel einen Fahrzyklus zu erstellen, der basierend auf gesammelten Daten die Fahrweise des realen Straßenverkehrs bestmöglich widerspiegeln soll. Der Zyklus wird als „real world drive cycle“ bezeichnet und wird unterteilt in die Bereiche „urban“, „road“ und „motorway“. [9]

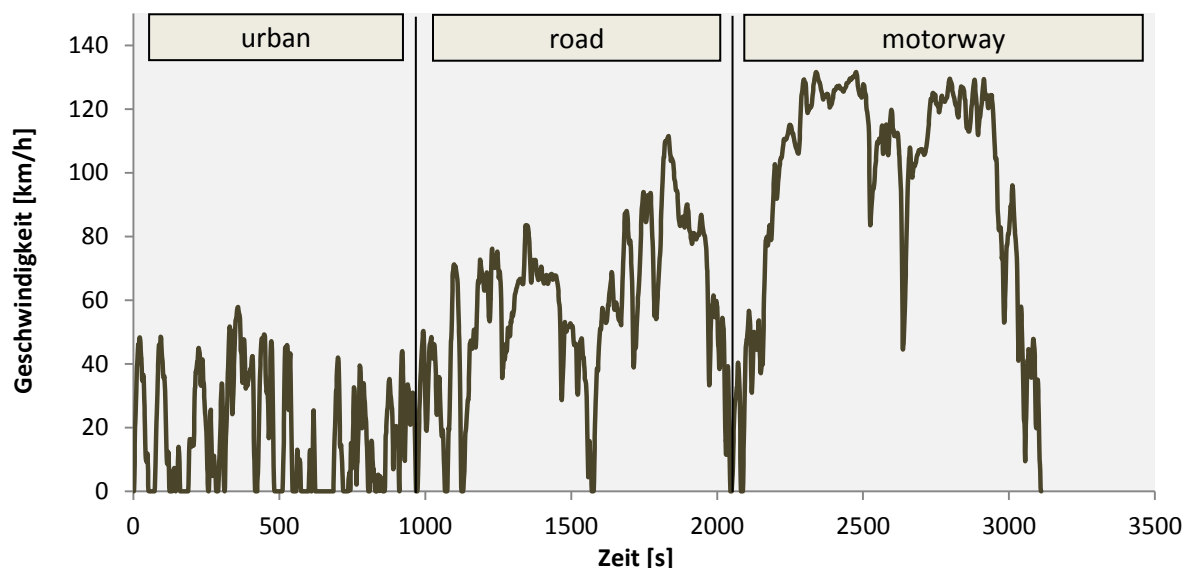


Abbildung 7: CADC - Fahrzyklus

1.3.4 ERMES

ERMES (European Research for Mobile Emission Sources) ist ein Zusammenschluss von Forschungsinstituten, Behörden und Industrieverbände zur Forschung im Bereich der Emissionsmodellierung. Aus dieser Forschungsgruppe ist der ERMES Fahrzyklus mit folgendem Fahrprofil entstanden.

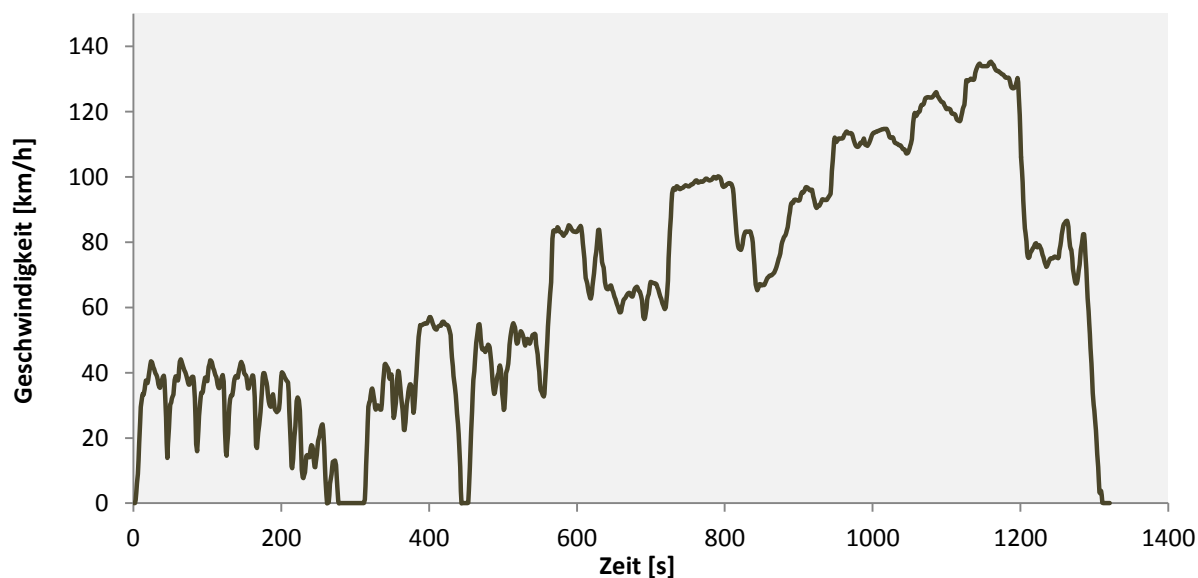


Abbildung 8: ERMES V8 – Fahrzyklus

1.3.5 RDE

Auch wenn die Tests am Rollenprüfstand auf realitätsnahe Bedingungen getrimmt werden, so können gewisse Einflussfaktoren des realen Straßenverkehrs nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund hat man die Einführung der Messung von RDE (Real Driving Emissions) beschlossen, wobei mithilfe eines mobilen Emissionsmessgerätes (PEMS, Portable Emission Measurement System) die Abgase während der Fahrt gemessen werden können. Ab September 2017 müssen bei Typprüfungen neben dem WLTC auf dem Rollenprüfstand auch RDE – Fahrten im realen Straßenverkehr miteinbezogen werden. Im Fokus stehen insbesondere die NO_x – Emissionen bei Dieselfahrzeugen und die Partikelanzahl bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. [8]

Die Rahmenbedingungen einer gesetzeskonformen RDE – Fahrt sind genau geregelt. Neben der Vorgabe von Streckenlänge, Geschwindigkeitsanteile, Dynamikparameter, Seehöhe etc., ist auch das Validierungsverfahren des PEMS – Gerätes vorgegeben. Das PEMS wird vor der Messfahrt am Rollenprüfstand validiert, wobei die gemessenen Emissionen eine maximale Abweichung von den Werten der CVS – Anlage nicht überschreiten dürfen. Eine Übersicht über Randbedingungen von RDE – Fahrten ist in **Tabelle 1** gegeben.

RDE Road Category			
URBAN	RURAL		MOTORWAY
$v \leq 60 \text{ km/h}$	$60 \text{ km/h} < v \leq 90 \text{ km/h}$		$v > 90 \text{ km/h}$
Value	Unit	MIN	MAX
trip length	s	5400	7200
trip distance	km	16	-
share URBAN	%	29	44
share RURAL	%	23	43
share MOTORWAY	%	23	43
stop periods URBAN	%	6	30
stop periods URBAN	s	-	300
avg. speed cold start	s	-	90
idling time after first ignition	s	-	15
Stop period during cold start	s	-	90
avg. speed URBAN	km/h	15	40
avg. speed MOTORWAY	km/h	90	110
maximum speed	km/h	-	145

Tabelle 1: RDE Anforderungen für PKWs [10]

Außerdem müssen gewisse dynamische Parameter für eine gültige RDE – Fahrt eingehalten werden. Die Umgebungstemperatur muss im Bereich von 0 bis 30°C liegen. Ein „extended“ Bereich reicht bis -7°C und +35°C. In jedem Zeitschritt in dem die Temperatur im „extended“ Bereich liegt, werden die NO_x Emissionen mit dem Faktor 1,6 dividiert.

1.4 Hybridfahrzeuge

Das Wort „Hybrid“ kommt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie „Zwitter“, von zweierlei, andersartigen Eltern.

„Die UNO definierte 2003 den Begriff „Hybridfahrzeug“ wie folgt: Ein „Hybridfahrzeug“ bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben.“ [3]

Die gebräuchlichsten Energieumwandler für Hybridfahrzeuge sind Verbrennungskraftmaschinen und elektrische Maschinen. Es sind aber auch Kombinationen mit Brennstoffzellen denkbar. Gespeichert wird die Energie grundsätzlich chemisch, elektrisch oder mechanisch. Praktische Anwendung finden heutzutage hauptsächlich Systeme, die einen herkömmlichen Verbrennungskraftmotor mit einem chemischen Energiespeicher (Akkumulator) und einem Elektromotor verbinden. Dadurch sind größere Freiheitsgrade in der Antriebsstrategie, wie rein elektrisches Fahren, boosten, rekuperieren, oder Lastpunktverschiebung möglich.

In der Vergangenheit gab es schon mehrere Pilotprojekte, bei denen mechanische Energiespeicher, ausgeführt als Druckluftspeicher oder Federspeicher, als Zusatzantrieb zum herkömmlichen Antrieb dienen. Bis auf Nischenanwendungen haben sich jedoch Hybridfahrzeuge mit Verbrennungskraftmotor und batterieelektrischem Antrieb durchgesetzt. Diese Antriebskombination steht auch in dieser Masterarbeit im Fokus.

Nachfolgend wird die Testprozedur zur Ermittlung des Normverbrauchs und Abgasemissionen für unterschiedliche Hybrid-Elektro-Fahrzeuge beschrieben. Unterschieden werden Fahrzeuge die extern aufgeladen werden können (Plug-In-Hybridfahrzeug) und nicht aufladbare Hybridfahrzeuge, sowie nach dem Vorhandensein eines Betriebsartschalters. [3]

1. Extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug ohne Betriebsartschalter

Die Testprozedur am Prüfstand muss in folgenden zwei Zuständen durchlaufen werden:

Zustand A: Die Prüfung ist mit voll aufgeladenem Energiespeicher durchzuführen.

Zustand B: Die Prüfung ist mit der Mindestladung des Energiespeichers durchzuführen.

Die Abgasgrenzwerte für die limitierten Emissionen dürfen in beiden Fällen nicht überschritten werden. Nach der Vorschrift ECE R 101 gibt es zwei Methoden zur Ermittlung des Verbrauchs bzw. der CO₂ Emissionen. Entweder man misst die elektrische Reichweite (Methode D_e) oder man misst so viele Fahrzyklen hintereinander bis der minimale Ladezustand erreicht ist (Methode DOVC).

Methode „elektrische Reichweite“

$$M = \frac{D_e \cdot M_{1e} + D_{av} \cdot M_2}{D_e + D_{av}} \quad (1-2)$$

M.....Gesamtkraftstoffverbrauch [l/100km]

*M*_{1e}.....Kraftstoffverbrauch bei voller Batterie [l/100km]

*M*₂Kraftstoffverbrauch bei leerer Batterie [l/100km]

*D*_e.....elektrische Reichweite [km]

D_{av} 25 km (willkürlich festgelegte Strecke, die mit Mindestladung des Energiespeichers gefahren wird)

Für die Ermittlung der elektrischen Reichweite wird der entsprechende Fahrzyklus mit dem Hybridfahrzeug solange durchfahren bis der Energiespeicher seine Mindestladung erreicht hat. Je nach Hybridstrategie des Herstellers kann sich bereits vor Erreichen der minimalen Batterieladung der Verbrennungskraftmotor einschalten. Zum Beispiel wenn vom Elektromotor zu wenig Antriebsleistung zur Verfügung gestellt werden kann, um dem Zyklus zu folgen. Anschließend werden alle elektrisch zurückgelegten Fahranteile aufsummiert, inklusive den Schubphasen, in denen durch Rekuperation elektrische Energie wieder zurückgewonnen werden kann. [3]

Methode „Gesamtreichweite“

Bei dieser Methode werden in einem „charge depleting“ Modus (Batterieladungsverbrauchender-Modus) so lange Zyklen hintereinander gefahren, bis der Mindestladezustand der Traktionsbatterie erreicht wird.

$$M = \frac{D_{OVc} \cdot M_{1OVc} + D_{av} \cdot M_2}{D_{OVc} + D_{av}} \quad (1-3)$$

MGesamtkraftstoffverbrauch

M_{1OVc}Kraftstoffverbrauch bei voller Batterie

M_2 Kraftstoffverbrauch bei leerer Batterie

D_{OVc}Gesamtreichweite [km]

D_{av} 25 km (willkürlich festgelegte Strecke, die mit Mindestladung des Energiespeichers gefahren wird)

2. Extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter

Die Prüfungen sind wie beim Fahrzeug ohne Betriebsartschalter durchzuführen. Der Betriebsartschalter muss, wie in **Tabelle 2** aufgelistet, in die entsprechende Stellung gebracht werden.

Hybridarten Batterieladezustand	- Reiner Elektrobetrieb - Hybridbetrieb Schalter in Stellung	- Reiner Kraftstoffbetrieb - Hybridbetrieb Schalter in Stellung	- Reiner Elektrobetrieb - Reiner Kraftstoffbetrieb - Hybridbetrieb Schalter in Stellung	- Hybridart (n) - Hybridart (m) Schalter in Stellung
Zustand A voll aufgeladen	Hybridbetrieb	Hybridbetrieb	Hybridbetrieb	Hybridart mit dem höchsten Stromverbrauch
Zustand B Mindestladung	Hybridbetrieb	Kraftstoffbetrieb	Kraftstoffbetrieb	Hybridart mit dem höchsten Kraftstoffverbrauch

Tabelle 2: Stellung Betriebsartschalter für Prüfung nach Zustand A und B [3]

3. Nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug ohne Betriebsartschalter

Grundsätzlich erfolgt die Prüfung wie bei konventionellen Fahrzeugen. Allerdings muss die Differenz der Batterieladung zwischen Beginn und Ende der Prüfung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs müssen entsprechend der Ladebilanz ΔE_{batt} korrigiert werden, damit sie einer Ladebilanz von $\Delta E_{\text{batt}} = 0$ entsprechen.

Unter gewissen Umständen dürfen unkorrigierte Werte als Prüfergebnisse verwendet werden:

- wenn der Hersteller nachweisen kann, dass zwischen der Ladebilanz und dem Kraftstoffverbrauch kein Zusammenhang besteht;
- wenn ΔE_{batt} einer Batterieaufladung entspricht, also mehr Energie gespeichert als entnommen wurde;
- wenn ΔE_{batt} einer Batterieentladung entspricht wobei ΔE_{batt} weniger als 1% des Energieinhalts des verbrauchten Kraftstoffes während des Zyklus beträgt.

4. Nicht extern aufladbares Hybrid-Elektro-Fahrzeug mit Betriebsartschalter

Die Prüfung erfolgt wie bei Hybrid-Elektro-Fahrzeugen ohne Betriebsartschalter und ist in der Betriebsart durchzuführen, welche nach dem Drehen des Zündschlosses standardmäßig aktiviert wurde. [3]

1.4.1 Klassifizierung und Hybridkonzepte

Abhängig von Energiefluss und Anordnung des Verbrennungsmotors, Elektromotor/Generator, Batterie und Getriebe werden Hybridfahrzeuge unterteilt in serielle, parallele und leistungsverzweigte Hybridantriebe. (siehe **Abbildung 9**)

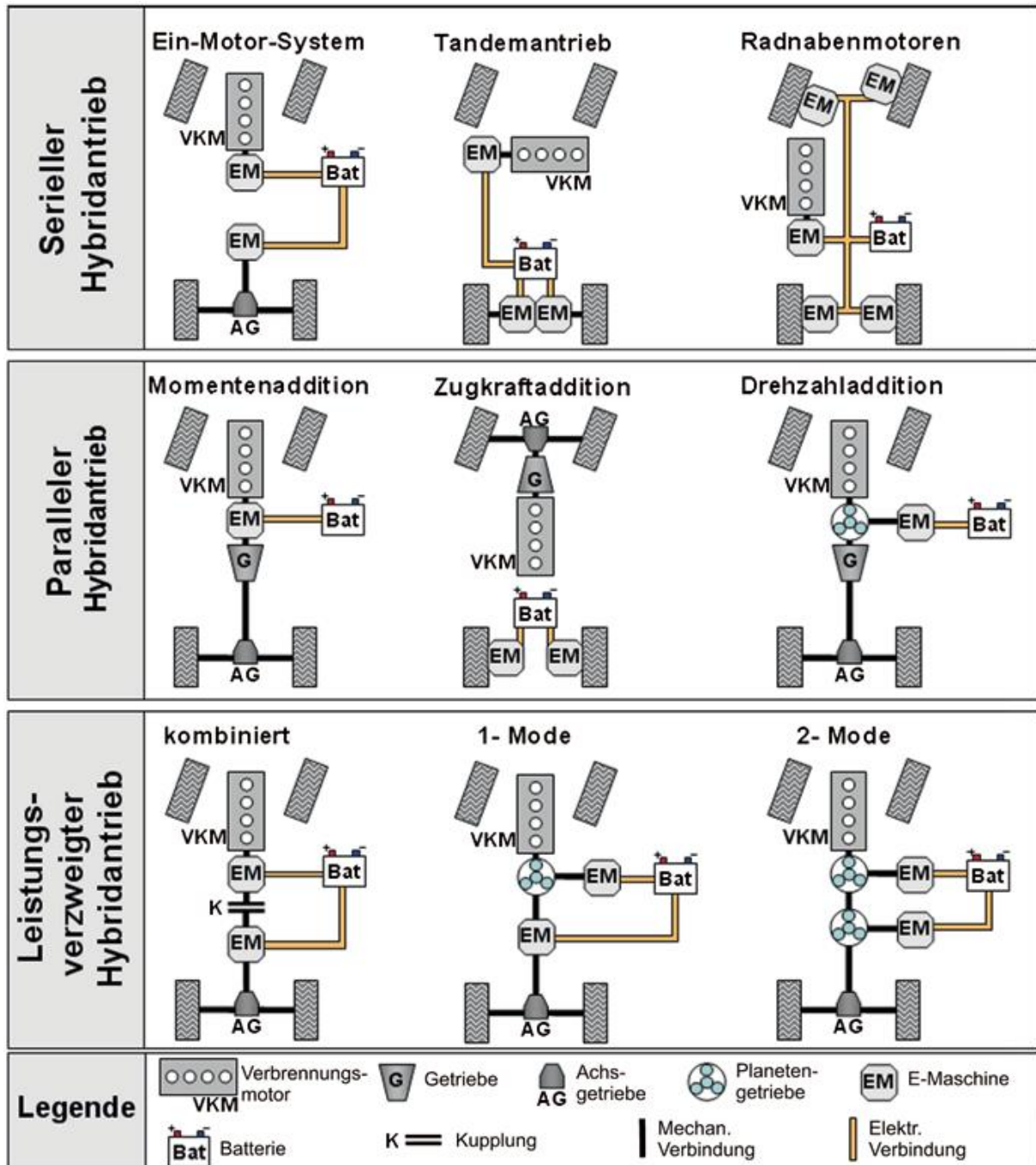


Abbildung 9: Strukturen von Hybridantrieben [3]

1.4.1.1 Serielle Hybridantriebe

Dieses Antriebskonzept besteht aus einer Ladegruppe (Verbrennungsmotor und Generator), welche über einen Umrichter oder Gleichrichter die Batterie versorgt. Die Energie für den Elektromotor wird entweder direkt von der Ladegruppe entnommen, oder aus Batterie über Umrichter bezogen. Auffälligstes Merkmal dieses Konzeptes ist, dass keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsrädern besteht.

Die verbreitetste Anwendung finden serielle Hybridkonzepte in Plug-In-Hybridfahrzeugen mit Range Extender (BMW i3 REX, Opel Ampera).

Vor- und Nachteile:

- + unabhängige Regelung der Ladegruppe vom Elektromotor
- + Betrieb des Verbrennungsmotors im Bestpunkt in Bezug auf Verbrauch und Emissionen möglich
- + freie Positionierung der Ladegruppe
- schlechter Wirkungsgrad durch mehrmalige Energieumwandlung

1.4.1.2 Parallele Hybridantriebe

Der parallele Hybridantrieb besteht prinzipiell aus einem Verbrennungsmotor, einer Motor/Generator Einheit und einer Batterie. Dabei ist der Verbrennungsmotor direkt mit der Antriebseinheit verbunden. Der elektrische Pfad ist hierbei parallel zum herkömmlichen Motor angeordnet und kann bei Bedarf über eine Kupplung zu- oder abgeschaltet werden. Je nach Ausführung von Elektro- und Verbrennungsmotor unterscheidet man zwischen Momenten-Addition, Zugkraft-Addition oder Drehzahl-Addition (siehe **Abbildung 9**). [3]

Vor- und Nachteile:

- + guter Wirkungsgrad durch direkten mechanischen Antrieb der VKM
- + nur eine elektrische Maschine notwendig, die wahlweise als Fahrmaschine oder Generator arbeitet
- keine optimalen Betriebspunkte wie bei Serienhybrid, da nicht stationär betrieben

1.4.1.3 Leistungsverzweigte Hybridantriebe

Bei dem leistungsverzweigten Hybridantrieb (engl. Power Split Hybrid) wird die übertragene Antriebsleistung in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad unterteilt. Es kann je nach Betriebswahl eine serielle oder parallele Antriebsart erfolgen. Bei einer weiteren Form des leistungsverzweigten Getriebes wird ein Planetengetriebe mit mindestens zwei elektrischen Maschinen und der zugehörigen Leistungselektronik verbunden. Durch die Wandlung von mechanischer in elektrische Energie, mit der als Generator ausgelegten elektrischen Maschine, können verschiedene Momente und Drehzahlen eingestellt werden (siehe **Abbildung 9**). Diese Form des leistungsverzweigten Antriebs wird beispielsweise von Toyota in verschiedenen Modellen angeboten. (vgl. [3] S.31)

Vor- und Nachteile:

- + Verbrennungsmotor kann fast immer in optimalem Lastpunkt betrieben werden
- sehr komplexer Aufbau und damit verbundene hohe Kosten

Des Weiteren wird in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrades unterschieden zwischen Micro-, Mild-, Voll- und Plug-In-Hybrid. In **Abbildung 10** sind Funktion, Charakteristika und ausgeführte Beispiele tabellarisch gelistet. Hybridkonzepte wie Micro-, Mild- und Voll-Hybridfahrzeuge, welche nicht an der Steckdose aufgeladen werden können nennt man autarke Hybridantriebe. Alle anderen Varianten wie Batterie elektrische Fahrzeuge (BEV) oder Plug-In-Hybridautos (PHEV) können, wie der Name unschwer erkennen lässt, an der Steckdose aufgeladen werden.

Funktionen, Charakteristika und Beispiele	Autarker Hybrid			Plug-In-Hybrid		Batterie elektrisches Fahrzeug (BEV)
	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Klassische Auslegung	Batterie elektr. Fzg. mit Range Extender (REEV)	
Konstruktive Merkmale	Leistungsfähiger Anlasser und regelbarer Generator oder Riemenstarter-Generator (RSG)	Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG)	Trennkupplung zum Verbrennungsmotor oder mehrere E-Maschinen	Wie Full-Hybrid aber mit zusätzlichem Anschluss zur Nachladung der Batterie über das externe Stromnetz	BEV mit Range Extender (z.B. Verbrennungsmotor) zur Reichweitenverlängerung	Batterieelektrisches Fahrzeug
Hybridstrukturen	RSG (parallel)	KSG (parallel)	seriell, parallel, leistungsverzweigt	seriell, parallel, leistungsverzweigt	seriell, parallel, leistungsverzweigt	
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> Start/Stop Eingeschränkt Rekuperation (über intelligentes Generatormanagement) 	<ul style="list-style-type: none"> Start/Stop Rekuperation Boosten Generatorbetrieb Eingeschränkt E-Fahren bei niedrigen Geschw. 	<ul style="list-style-type: none"> Start/Stop Rekuperation Boosten Generatorbetrieb E-Fahren für kurze Reichweiten 	<ul style="list-style-type: none"> Start/Stop Rekuperation Boosten Generatorbetrieb E-Fahren für mittlere Reichweiten Ext. Nachladung 	<ul style="list-style-type: none"> E-Fahren für größere Reichweiten (Hauptantrieb) Rekuperation Ext. Nachladung Range Extender Generatorbetrieb bei niedrigem Batterieladestand 	<ul style="list-style-type: none"> E-Fahren für größere Reichweiten Rekuperation
Leistung E-Maschine	2 – 3 kW (8kW)	10 – 15 kW	>> 25 kW	>> 25 kW	>> 40 kW	>> 40 kW
Spannungsniveau	12 – 48 V	48 – 150 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz
Hybridisierungsgrad $P_E/(P_E+P_{VKM}) \times 100\%$	< 5% (bei 48V bis 10%)	5 - 10%	10 - 50%	30-60%	50 - 80%	100%
Typische Batterietechnologie	Blei-Säure, Super Caps, AGM	NiMH, Li-Ion, Super Caps, +Blei-Säure	NiMH, Li-Ion, (+Blei-Säure)	NiMH, Li-Ion, (+Blei-Säure)	Li-Ion, (+Blei-Säure)	Li-Ion, (+Blei-Säure)
Batteriekapazität	<< 1kWh	< 1kWh	1 - 5 kWh	5 – 10 kWh	8 – 15 kWh	> 15 kWh
Energiezufuhr	Kraftstoff (Tankstelle)					Strom aus Stromnetz
Verbrauchseinsparung (CO ₂) ^a (NEFZ basiert)	5 – 10 %	10 – 20 %	> 15 %	- 50 %	-50 %	100 %
Ausgeführte Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> BMW 1er und 3er efficient Dynamics Smart mhd Mercedes A,B-Klasse 	<ul style="list-style-type: none"> Honda Insight IMA Mercedes S400h Honda CR-Z 	<ul style="list-style-type: none"> Toyota Prius Mercedes E300 BlueTEC Hybrid Audi Q5 Hybrid 	<ul style="list-style-type: none"> Toyota Prius Plug-In Volvo V60 Plug-in-Hybrid Audi Duo 1997 	<ul style="list-style-type: none"> Opel Ampera (Chevrolet Volt) Audi A1 e-tron 	<ul style="list-style-type: none"> Mitsubishi i-MiEV Nissan Leaf Smart fortwo electric drive

^a Strom aus Stromnetz wird beim Verbrauch nicht berücksichtigt bzw. als „CO₂-frei“ bewertet.

Abbildung 10: Übersicht Funktionen, Charakteristika und ausgeführte Beispiele unterschiedlicher Hybridisierungsgrade [3]

1.4.1.4 Micro-Hybrid

Die konstruktiven Maßnahmen sind bei diesem Hybridisierungsgrad am geringsten. Der Anlasser wird durch eine leistungsfähigere Version, oder gänzlich durch einen Riemenstarter/Generator (RSG) ersetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen kann bei Micro-Hybriden Bremsenergie rekuperiert werden und bei Ampelstopps der Verbrennungsmotor abgestellt werden. In Verbindung mit einem intelligenten Generatormanagement können so Kraftstoffeinsparungen von wenigen Prozentpunkten erreicht werden. Die elektrischen Leistungen dieses Systems liegen bei etwa 2 bis 3kW. Diese werden durch das 12V Bordnetz bei maximalen Stromstärken von 200 bis 300A begrenzt.

Ausgeführte Beispiele sind Modelle von BMW mit „efficient Dynamics“ Technologie oder Smart mhd (micro hybrid drive). [3]

1.4.1.5 Mild-Hybrid

Das Mild-Hybrid-Konzept setzt im Allgemeinen auf einen Kurbelwellenstarter/Generator (KSG). Zusätzlich zur Start/Stop Funktion und Rekuperation bei Micro-Hybriden sind Hybridfunktionen wie Kriechen, Boosten, Segeln oder Lastpunkterhöhung möglich. Um elektrische Leistungen von 10 bis 15 kW möglichst verlustarm bereitzustellen, setzen Mild-Hybridsysteme auf zwei Bordnetze, ein 12V Netz für die herkömmlichen Verbraucher und ein Hochvoltsystem von 48 bis 150V für den Kurbelwellenstarter/Generator. Aufgrund der höheren rekuperierbaren Leistungen und größeren Freiheitsgraden dieses Hybridsystems sind Verbrauchseinsparungen von 10 bis 20% möglich. [3]

Als Beispiel kann die Mercedes S-Klasse in der Modellgepflegten Version (Sommer 2017) genannt werden, dessen Mild-Hybrid Konzept ein 48V und 12V Bordnetz kombiniert. Aus dem 48V System wird der integrierte Starter/Generator (ISG, Mercedes-Bezeichnung) und ein elektrischer Verdichter, der das Turboloch überbrücken soll, gespeist.

1.4.1.6 Voll-Hybrid

Ein Voll-Hybrid kann verglichen mit einem Mild-Hybridfahrzeug kurze Strecken rein elektrisch zurücklegen. Dafür sind zusätzliche konstruktive Maßnahmen erforderlich, wie zum Beispiel eine Trennkupplung zum Verbrennungsmotor, ein oder mehrere Elektromotoren mit einer entsprechend hohen Antriebsleistung und eine Hochvoltbatterie mit größerer Kapazität. Neben dem Hochvoltnetz steht ebenfalls noch ein Niedervoltnetz mit 12V für die herkömmlichen Verbraucher zur Verfügung. Zwischen Hoch- und Niedervoltbatterie muss dafür ein DC/DC Konverter vorgesehen werden. Durch die hohe Komplexität und den konstruktive Mehraufwand steigen die Kosten im Vergleich zum Mild-Hybrid deutlich an.

Das weltweit meistverkaufte Hybridfahrzeug ist der Toyota Prius, der mittlerweile in der vierten Generation gefertigt wird. Sein Vollhybridkonzept basiert auf einem komplexen leistungsverzweigtem Hybridantrieb mit Verbrennungsmotor, Elektromotor und CVT-Getriebe. [3]

1.4.1.7 Plug-In-Hybrid

Plug-In-Hybridfahrzeuge entsprechen weitgehend den Voll-Hybridfahrzeugen mit der Besonderheit, dass die Batterie an der Steckdose aufgeladen werden kann und diese meist eine höhere Kapazität aufweist. Elektrofahrzeuge mit „Range Extender“ werden ebenfalls als Plug-In-Hybridfahrzeug bezeichnet, da sie ebenfalls zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme besitzen und die Batterie an der Steckdose aufgeladen werden kann.

1.4.2 Hybridkomponenten

Zu den wichtigsten Hybridkomponenten zählen die Batterie, Frequenzumrichter, Elektromotoren mit Getriebe und die Leistungselektronik. Jede Komponente besitzt im motorischen und generatorischen Betrieb abhängig vom Lastpunkt einen Wirkungsgrad, deren Produkt ein Gesamtwirkungsgrad ergibt. Für eine optimale Systemauslegung ist die Wahl geeigneter Komponenten für einen hohen Gesamtwirkungsgrad entscheidend.

1.4.2.1 Elektromaschinen

Elektrische Maschinen sind Energiewandler welche den Gleichstrom aus der Batterie in mechanische Energie wandeln. Je nach Bauart der Maschine (siehe **Abbildung 11**) wird Gleichstrom oder Wechselstrom zugeführt. Für die Einstellung der gewünschten Leistungsabgabe, kommen Wechselrichter und eine Leistungselektronik zum Einsatz. Anders als Verbrennungskraftmotoren können Elektromotoren auch als Generator betrieben werden.

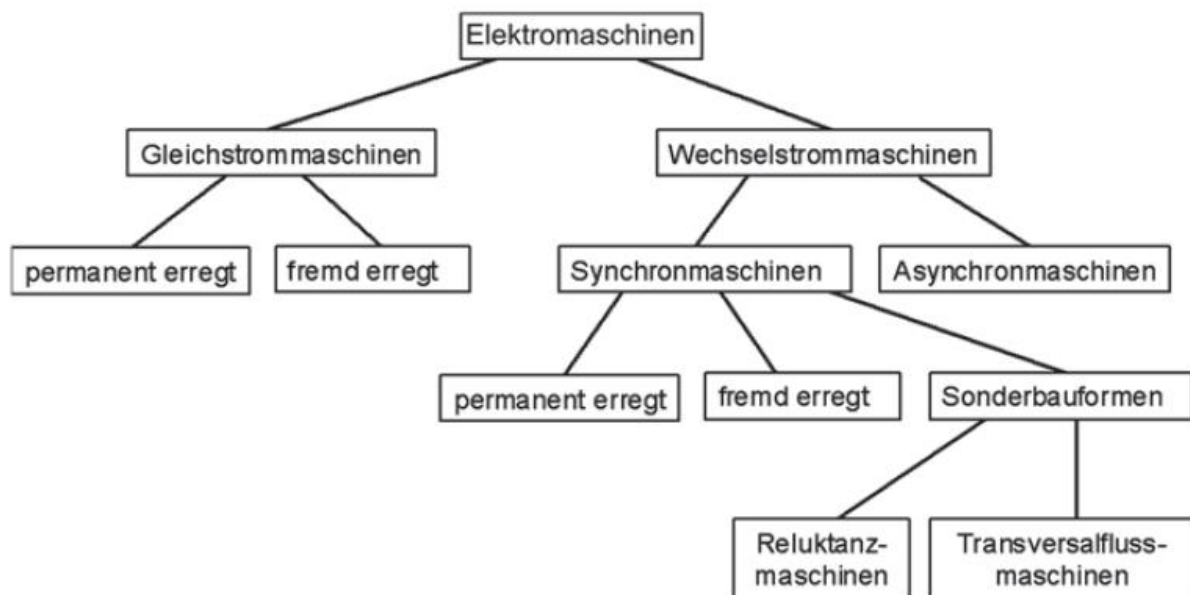


Abbildung 11: Bauarten elektrischer Maschinen [3]

Die elektrische Leistung wird dem Stator oder Ständer zu- oder abgeführt. Über einen Luftspalt getrennt, befindet sich der Rotor oder Läufer, der mechanische Leistung abgibt bzw. aufnimmt. Die Energiewandlung findet dabei im Luftspalt statt. Das erzielte Drehmoment ist dabei proportional zur Ringfläche des Spaltes und ist somit quadratisch vom Durchmesser und linear von der Baulänge abhängig. [3]

Die gängigsten Elektromotoren in Hybrid- und Elektrofahrzeugen sind permanenterrechte Synchronmaschinen. Diese erzielen die höchsten Wirkungsgrade von bis zu 94%. Als Permanentmagnet eignen sich vor allem sogenannte „Seltenerd – Materialien“, wie Neodym-Eisen-Bor oder Samarium-Kobalt. Im Tesla Model S sind Drehstrom – Asynchronmotoren verbaut, deren Wirkungsgrade unter denen von permanenterrechten Synchronmaschinen liegen. Die Vorteile einer Asynchronmaschine sind die niedrigeren Kosten und die Unabhängigkeit von seltenen Erden wie Neodym.

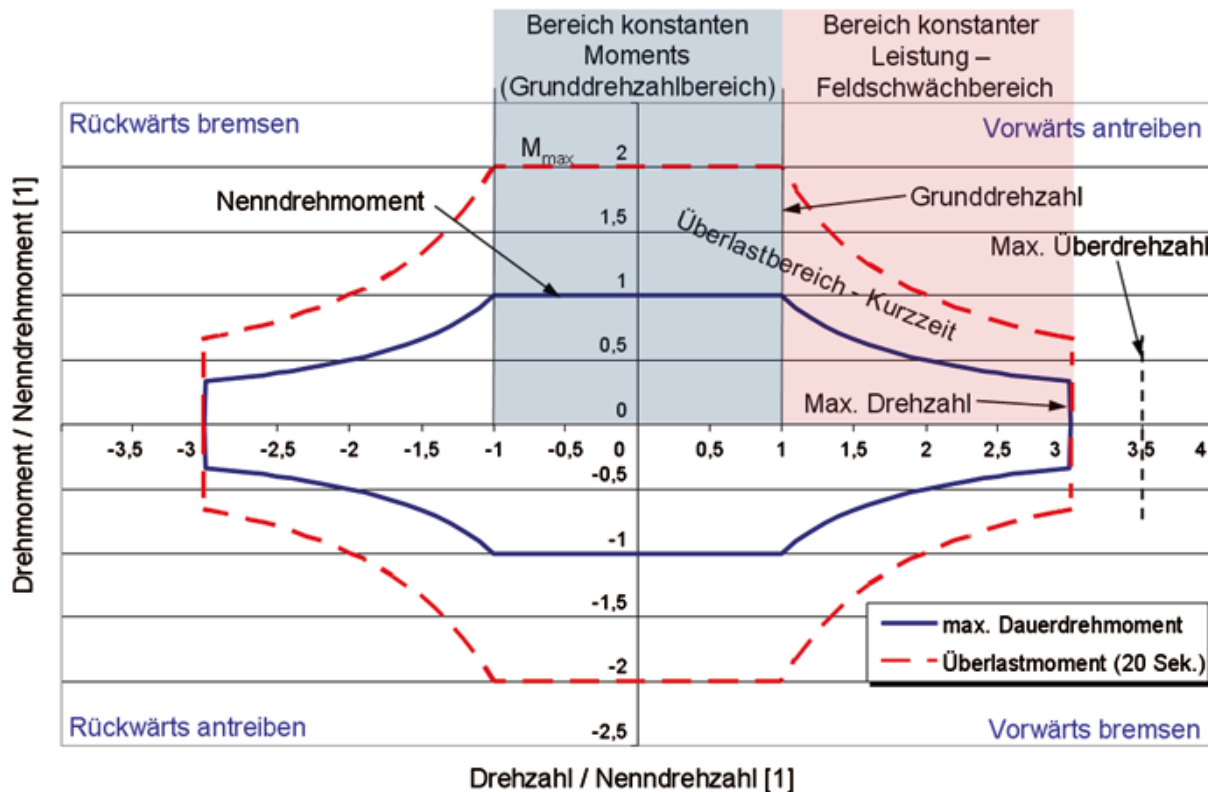


Abbildung 12: idealisiertes M/n Kennfeld eines PMSM [3]

In der oberen Abbildung ist schematisch der Drehmomentverlauf über der Drehzahl einer permanenten Synchronmaschine dargestellt. Diese elektrischen Maschinen erzeugen bereits im Stillstand ihr maximales Drehmoment. Im Bereich höherer Drehzahlen sinkt das Drehmoment infolge von Feldschwächung ab. Mit einer geeigneten Ansteuerung ist der Betrieb mit positiven und negativen Momenten, sowie in beide Drehrichtungen möglich (Vier-Quadranten-Betrieb).

1.4.2.2 Energiespeicher

In diesem Kapitel werden nur die für Hybridfahrzeuge relevanten elektrochemischen Energiespeicher betrachtet. Die Sekundärelemente oder auch Akkumulatoren genannt, bestehen aus vielen in Serie und/oder parallel geschalteten Zellen, deren Grundaufbau nachfolgend anhand einer elektrochemischen Zelle beschrieben wird (siehe **Abbildung 13**). Sie besteht grundsätzlich aus zwei Elektroden, die aus zwei unterschiedlichen Metallen bestehen. An diesen Elektroden findet die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie und umgekehrt, als auch die Speicherung, statt. Sie sind durch eine Elektrolytlösung voneinander getrennt, in der ein Ionen- aber kein Elektronenaustausch möglich ist. Den elektrischen Kontakt der beiden Elektroden verhindert ein Separator.

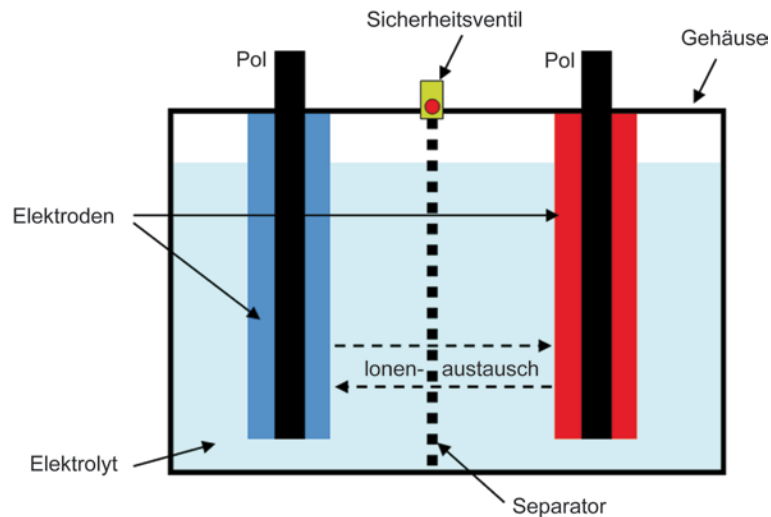


Abbildung 13: Aufbau eines Akkumulators [3]

Die Nennspannung einer Batterie ist abhängig von den eingesetzten Metallen der Elektroden und der Anzahl der in Serie geschalteten Zellen. Je nach Ladezustand (SOC, State of Charge) der Batterie, ändert sich die an den Klemmen messbare Spannung (Klemmenspannung). Fließt kein Strom, entspricht die Klemmenspannung der Leerlaufspannung U_0 (siehe Abbildung 14). Beim Laden des Akkumulators ($i > 0$) steigt die Klemmenspannung über das Niveau der Leerlaufspannung. Wird der Akkumulator entladen ($i < 0$), sinkt die Klemmenspannung. Die Größe des Spannungs-Anstieges bzw. -Abfalls beim Laden und Entladen ist abhängig vom Innenwiderstand des Akkumulators. Die nutzbare Kapazität (Nettokapazität) der Batterie ist vom Hersteller begrenzt, wobei meist nur jener Bereich nutzbar ist, wo sich die Klemmenspannung linear zum Ladezustand verhält. Damit wird der Akkumulator vor einer schädigenden Tiefentladung und Überladung bewahrt. [3]

Der Wirkungsgrad eines Akkumulators wird durch Lade- und Entladeverluste reduziert (siehe **Abbildung 15**). Diese Verluste entstehen durch Strom- und Wärmeverluste am Innenwiderstand, Ladungsverluste durch Gasung und Selbstentladung. Da die Verluste einen Temperaturanstieg zur Folge haben, ist ein Thermomanagement notwendig.

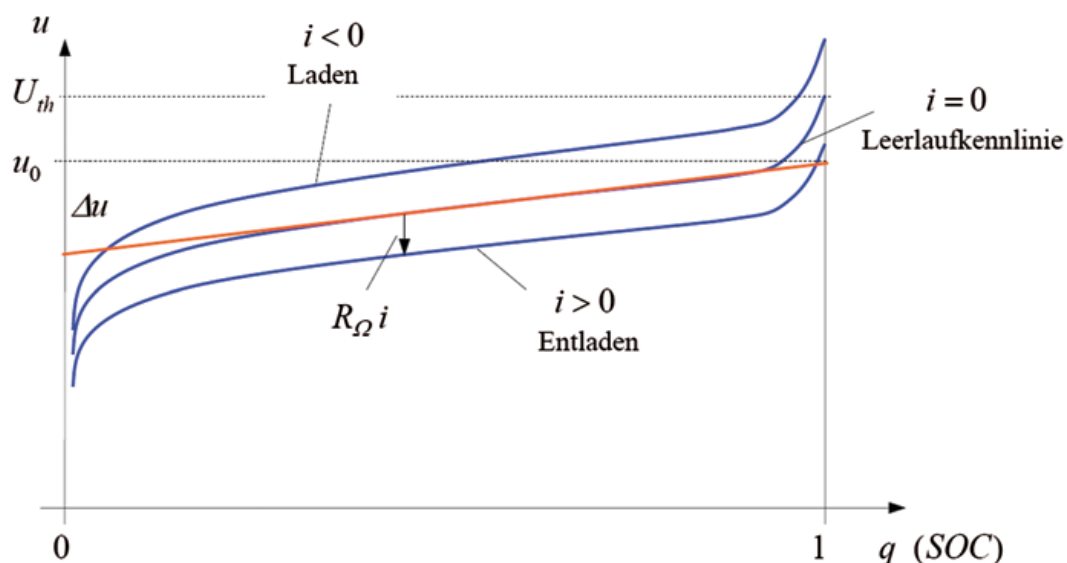


Abbildung 14: typischer Verlauf der Batteriespannung in Abhängigkeit des SOC [3]

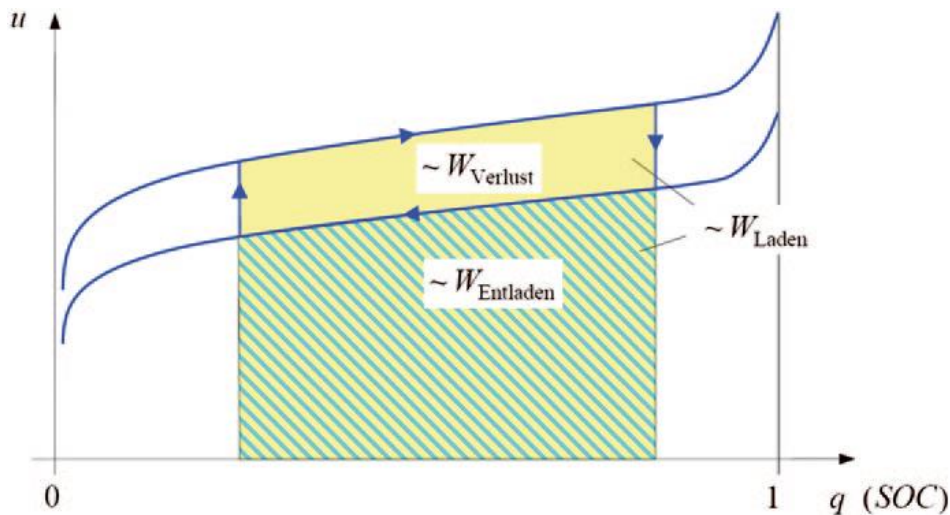


Abbildung 15: Wirkungsgrad eines Lade-Entlade-Zyklus [3]

$$\eta = \frac{\text{entnehmbare Energie}}{\text{geladene Energie}} = \frac{I_{\text{Entlade}} \cdot \int_0^{\text{Entladezeit}} U_{\text{Entlade}} \cdot dt}{I_{\text{Lade}} \cdot \int_0^{\text{Ladezeit}} U_{\text{Lade}} \cdot dt} \quad (1-4)$$

η_{Speicher}Speicherwirkungsgrad

I_{Entlade} Entladestrom [A]

U_{Entlade}Entladespannung [V]

I_{Lade} Ladestrom [A]

U_{Lade}Ladespannung [V]

Li-Ionen Akkumulatoren sind aufgrund ihrer hohen Energiedichte (siehe **Abbildung 16**) die bevorzugte Wahl als Energiespeicher. Durch die fortschreitende Entwicklung ist in den nächsten Jahren noch eine wesentlich größere Energiedichte zu erwarten. Mit einer Lebensdauer von mehr als 10 Jahren sind die Anforderungen für den Einsatz in Hybridfahrzeugen ebenfalls erfüllt.

Vor- und Nachteile: [3]

- + hohe spezifische Entlade- und Ladeleistung
- + hohe Leistungsdichte
- + hohe Zellspannung und damit verringerte Zahl im Batterieverband zu verschaltender Zellen
- + nahezu 100% Ladungswirkungsgrad
- + sehr gutes Langzeitverhalten
- sensibel gegen Überladung und Tiefentladung
- Einzelzellüberwachung notwendig

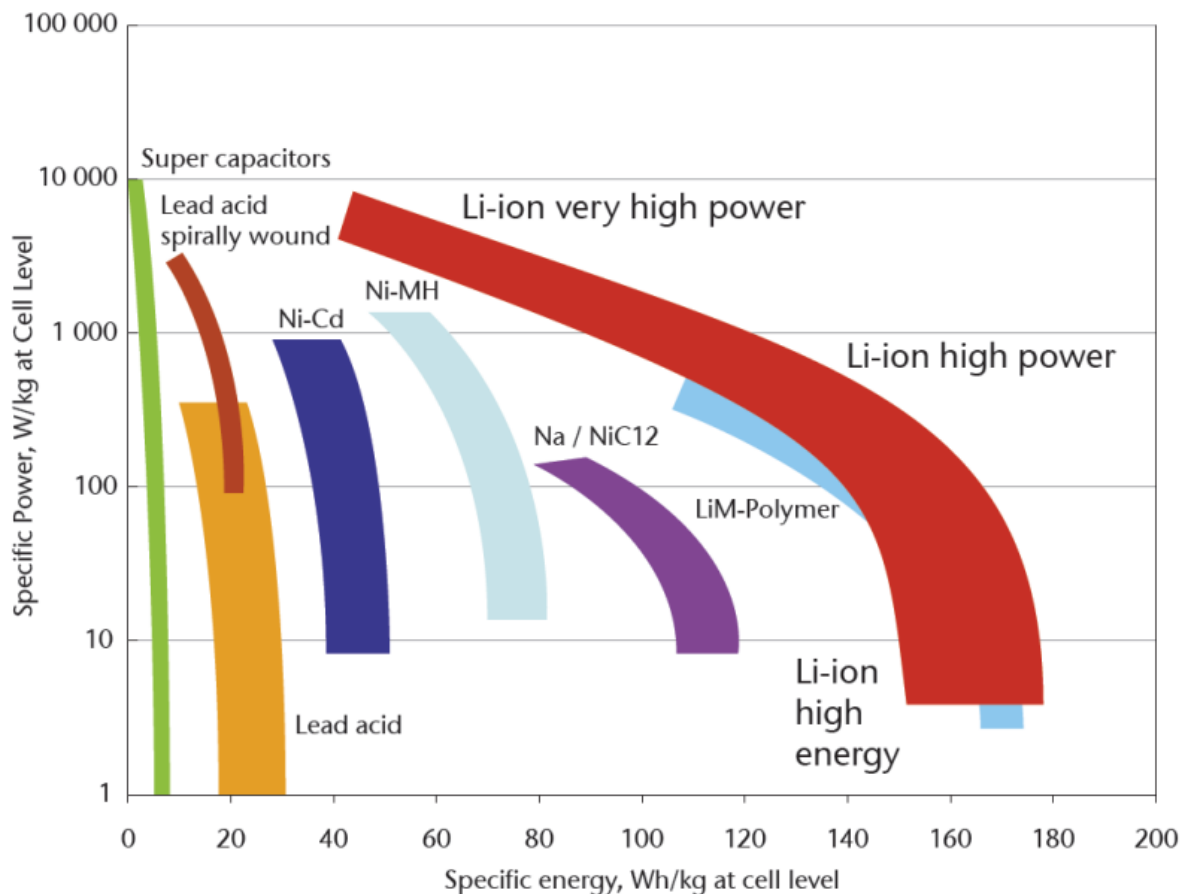


Abbildung 16: Batterietechnologien im Vergleich [11]

1.4.3 Hybridmanagement

Durch die vielen Freiheitsgrade eines Hybridantriebsstranges ist ein intelligentes Antriebsmanagement nötig. Neben der primären Aufgabe zur Erfüllung der Fahrervorgaben, sind Verbrauchsminderung, Emissionsreduzierung und Komfort Ziele der Hybridstrategie. Zu regeln ist vor allem das Zusammenspiel von Elektromotor und Verbrennungsmotor unter Berücksichtigung gewisser Randbedingungen. Diese sind unter anderem das Einhalten der Batterieladegrenzen, der maximale Lade- und Entladestrom und Temperaturgrenzen.

Dabei sind folgende Antriebsvariationen möglich:

- reiner VKM Betrieb
- rein elektrisches Fahren
- boosten (Unterstützung des Verbrennungsmotors mit dem Elektromotor)
- Lastpunkterhöhung (Vortrieb mit VKM und laden des Akkumulators zugleich)
- Segeln (Antriebskomponenten sind entkoppelt, Fahrzeug rollt ohne Antriebsenergie)

2 Simulationssoftware PHEM

Als Alternative zu Verbrauchs- und Emissionsmessungen am Rollenprüfstand oder RDE – Fahrten, kann wesentlich einfacher und kostengünstiger das gewünschte Fahrzeug mit einem Simulationsprogramm nachsimuliert werden. Das am Institut entwickelte Simulationsprogramm nennt sich PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model). PHEM errechnet sich aus einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil, Fahrbahnneigung und Fahrzeugdaten, wie Masse und Fahrwiderstände, die sekundlich erforderliche Antriebsleistung. Falls die Getriebestufe nicht vorgegeben wird, wählt ein entsprechendes Modell den optimalen Gang in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und Antriebsleistung. Anhand dieser sekundlich errechneten Motorleistung und Drehzahl, können aus Motorkennfeldern Verbrauch und Emissionen herausinterpoliert werden. Die Endresultate ergeben sich durch Aufsummierung der sekundlichen Werte.

Des Weiteren können mit PHEM anhand von Prüfstands-Messwerten Emissionskennfelder erstellt werden. Dabei werden die gemessenen Emissionswerte der entsprechenden Motordrehzahl und Leistung zugeordnet und somit ein Kennfeld der jeweiligen Abgaskomponente erstellt. Die Gaslaufzeit, sprich die Zeit die das Abgas von Motorausstritt bis zum Eingang des Messgerätes benötigt, muss ebenfalls berücksichtigt werden. Mit den daraus gewonnenen Kennfeldern können wiederum Fahrzeugsimulationen durchgeführt werden.

Da im Rahmen dieser Masterarbeit Plug-In-Hybridfahrzeuge untersucht wurden, wird speziell auf die Simulation von Hybridfahrzeugen eingegangen. Hierfür müssen alle Komponenten eines Hybridfahrzeugs wie Batterie, Elektromotor/Generator und Antriebsstrategie berücksichtigt werden.

2.1 Aufbau und Simulation

Im Standardmodus von PHEM werden nur konventionelle mit VKM betriebene Fahrzeuge simuliert. Der prinzipielle Ablauf der Simulation ist in **Abbildung 17** ersichtlich. Als Eingabedaten zur Errechnung der Motorleistung dienen der Fahrzyklus und die Fahrzeugdaten. Im Fahrzyklus sind Werte von Fahrgeschwindigkeit, Neigung der Fahrbahn und optional die Getriebestufe in 1Hz Auflösung vorgegeben. Falls die Getriebestufe nicht angegeben ist, wird sie anhand eines Schaltmodells vom Simulationsprogramm berechnet. Die Fahrzeugdaten, siehe **Tabelle 3** unter „VEH“, „MAP“ und „FLD“, können für ein spezifisches Fahrzeug oder auch für ein Durchschnittsfahrzeug, zum Beispiel Euro 6 Dieselfahrzeug, angegeben werden. Aus diesen Eingabedaten kann die Motorleistung, wie später genauer beschrieben, errechnet werden. Um Verbrauchs- und Emissionswerte aus dem Kennfeld zu erlangen, muss zusätzlich zur Motorleistung die Drehzahl ermittelt werden. Diese Information erhält man aus der eingelegten Getriebestufe, Achs- und Getriebeübersetzungen. Somit können Verbrauch und Emissionen eines gewünschten Fahrzeuges simuliert werden.

Zusätzlich zum Standardmodus können auch Hybridfahrzeuge (HEV, Hybrid Electric Vehicle) oder Elektrofahrzeuge (EV, Electric Vehicle) simuliert werden. Bei Hybridfahrzeugen ist zusätzlich zum Kraftstoffverbrauch und Emissionen der Verbrauch an elektrischer Energie von Bedeutung. Elektrofahrzeuge sind lokal emissionsfrei, weshalb nur der elektrische Energieverbrauch aus der Simulation hervor geht. Die zusätzlichen Module, welche für die Simulation eines Hybridfahrzeuges benötigt werden, sind in Kapitel 2.2 genauer beschrieben.

Funktionen wie Dynamikkorrektur, thermisches Verhalten des Katalysators, Kaltstartemissionen oder Simulation eines SCR – Katalysators sind in PHEM ebenfalls enthalten. Die Genauigkeit der Simulation steigt, je detaillierter das Gesamtfahrzeug modelliert wird. Jedoch steigt damit auch der Aufwand. Somit muss und kann für jede neue Fahrzeugsimulation entschieden werden, abhängig der gewünschten Genauigkeit, welcher Aufwand dafür betrieben wird.

PHEM Passenger car and Heavy duty Emission Model

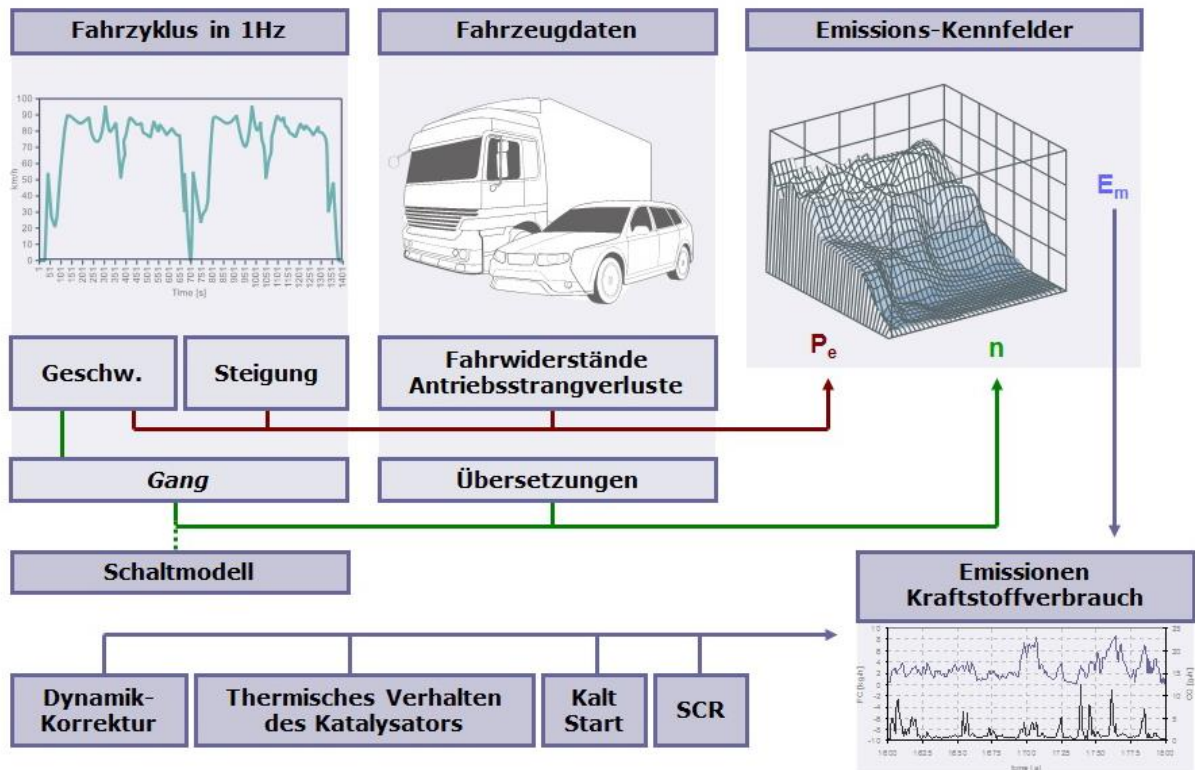


Abbildung 17: Schema des Emissionsmodells auf Basis von Motorkennfelder [6]

Module	Allgemeine Eingabeparameter
VEH	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrzeugmasse ▪ Beladung ▪ Red. Masse Räder ▪ Raddurchmesser ▪ Luftwiderstandsbeiwert ▪ Querschnittsfläche ▪ Rollwiderstandskoeffizienten ▪ Motordaten ▪ Schaltmodellparameter ▪ Getriebeübersetzungen ▪ Getriebeträgheitsmoment ▪ Nebenverbraucherleistung
MAP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Motorkennfeld (Verbrauch, Emissionen, ...)
FLD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vollast- und Schleppkurve der VKM
DRI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fahrzyklus mit Fahrbahnneigung und optional Getriebestufe

Tabelle 3: Allgemeine Eingabeparameter in PHEM

Module	Hybride Eingabeparameter
BAT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leerlaufspannungsverlauf ▪ SOC – Minimum ▪ SOC – Maximum ▪ Zellanzahl ▪ Innenwiderstand ▪ Batteriekapazität
EMO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkungsgradkennfeld Motor und Generator ▪ Vollastlinien von Motor und Generator
STE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Steuerkennlinie für Hybridstrategie

Tabelle 4: Hybrid Eingabeparameter in PHEM

Zur Abbildung der Antriebsleistung müssen Roll-, Luft-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand sowie Schlupfverluste an den Reifen, Getriebeverluste und die Leistung von Nebenaggregaten berücksichtigt werden.

$$P = P_{Roll} + P_{Luft} + P_a + P_{Steigung} + P_{Schlupf} + P_{Getriebe} + P_{Nebenaggregate} \quad (2-1)$$

Der Rollwiderstand entsteht an Reifen und der Lagerung des Antriebsstranges und ist abhängig vom Fahrzeuggewicht und deren Geschwindigkeit. Diese Abhängigkeit wird meist mit einem Polynom über der Fahrgeschwindigkeit abgebildet. Üblicherweise werden nur Koeffizienten ersten Grades angeschrieben. Die Koeffizienten können mit einem Ausrollversuch ermittelt werden (siehe Kapitel 4.1.2.1)

$$P_{Roll} = m \cdot g \cdot (Fr_0 + Fr_1 \cdot v + Fr_4 \cdot v^4) \cdot v \quad (2-2)$$

m Fahrzeugmasse [kg]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

Fr Rollwiderstandskoeffizienten

v Geschwindigkeit [m/s]

Die Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes wird beeinflusst von der Querschnittsfläche des Fahrzeugs, dem Luftwiderstandsbeiwert und der Luftdichte. Diese Daten können ebenfalls aus dem Ausrollversuch gewonnen werden.

$$P_{Luft} = c_w \cdot A_{Quer} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^3 \quad (2-3)$$

c_w Luftwiderstandsbeiwert [-]

A_{Quer} Querschnittsfläche des Fahrzeugs [m^2]

ρ Dichte der Luft [kg/m^3]

Bei der Beschleunigungsleistung müssen alle translatorisch und rotatorisch beschleunigten Teile des Fahrzeugs berücksichtigt werden. Die rotatorischen Massen können auf eine translatorische Beschleunigung reduziert werden.

$$P_a = (m_{\text{Fahrzeug}} + m_{\text{rot}} + m_{\text{Beladung}}) \cdot a \cdot v \quad (2-4)$$

m_{Fahrzeug} Fahrzeugmasse [kg]

m_{rot} Masse der rotierenden Teile [kg]

m_{Beladung} Masse der Beladung [kg]

a Beschleunigung [m/s^2]

$$m_{\text{rot}} = \frac{I_{\text{Räder}}}{r_{\text{Rad}}^2} + I_{\text{mot}} \cdot \left(\frac{i_{\text{Achse}} \cdot i_{\text{Gang}}}{r_{\text{Rad}}} \right)^2 + I_{\text{transmission}} \cdot \left(\frac{i_{\text{Achse}}}{r_{\text{Rad}}} \right)^2 \quad (2-5)$$

$I_{\text{Räder}}$ Trägheitsmoment Räder [kg m^2]

r_{Rad} Radius [m]

I_{mot} Trägheitsmoment Motor [kg m^2]

i_{Achse} Achsübersetzung [-]

i_{Gang} Übersetzung des jeweiligen Ganges [-]

$I_{\text{transmission}}$ Trägheitsmoment Getriebe [kg m^2]

Bei einer Steigung muss der Fahrzeugantrieb zusätzlich Leistung bereitstellen. Diese Leistung berechnet sich aus der Neigung, der Fahrzeugmasse und der Fahrgeschwindigkeit.

$$P_{\text{Steigung}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v \quad (2-6)$$

α Neigung der Fahrbahn [%]

Die Leistungsverluste durch Schlupf werden in der aktuellen PHEM Version nicht berücksichtigt, da sie bei PKWs unter normalen Bedingungen verschwindend klein sind.

Die Verlustleistung im Getriebe ergibt sich aus dem Getriebewirkungsgrad, der als Quotient von Rad- zu Motorleistung definiert ist.

$$\eta_{\text{Getriebe}} = \frac{P_{\text{Rad}}}{P_e} \quad (2-7)$$

$$P_{\text{Getriebe}} = P_e - \eta_{\text{Getriebe}} \cdot P_e \quad (2-8)$$

P_{Rad} Radleistung

P_{Getriebe} Getriebeverlustleistung

P_e Motorleistung

η_{Getriebe} Getriebewirkungsgrad

Die genaue Ermittlung des Leistungsbedarfs für die Nebenverbraucher ist sehr schwierig, weshalb meistens ein konstanter Wert angenommen wird. Zu den größten Nebenverbrauchern zählen der Klimakompressor und die Lichtmaschine, welche das Bordnetz mit Strom versorgt. Zusammengefasst beträgt die Leistung der Nebenaggregate einige wenige Kilowatt.

2.2 HEV - Simulation

Im Modus zum Simulieren von elektrohybriden Fahrzeugen im PHEM wird ein parallelhybrider Antriebsstrang nachgebildet. Diese Erweiterung erfordert einige zusätzliche Parametereingaben für Batterie, Elektromotor und Steuerkennlinie. Nachfolgend werden diese Module näher beschrieben und die wichtigsten Eingabeparameter erläutert.

2.2.1 Batterie

Das in PHEM implementierte Batteriemodell wurde im Zuge einer Projektarbeit erstellt. Ziel war es, ein Modell zu erschaffen, das für möglichst alle Batterietypen anwendbar ist und die Einsatzbedingungen realitätsnah abbildet. In **Abbildung 18** ist das vereinfachte Schema des Batteriemodells ersichtlich. Die Leerlaufspannung U_{Batt} wird mittels eines Polynoms 5. Ordnung nachgebildet. Die Batterieverluste entstehen beim Laden und Entladen durch Spannungsverlust am Innenwiderstand R_i . Es wurde außerdem die Beeinflussung der Temperatur auf die Batteriespannung modelliert. [12] Im Zuge dieser Masterarbeit wurde diese Funktion allerdings nicht verwendet.

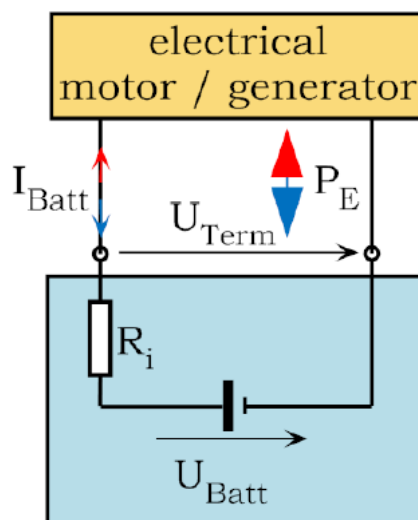


Abbildung 18: vereinfachtes Schema des Batteriemodells [12]

Mit folgenden Grundgleichungen kann der erforderliche Batteriestrom für die benötigte Motorleistung ermittelt werden. Die Formel (2-9) zeigt die allgemeine Definition der elektrischen Leistung in Abhängigkeit von Spannung und Stromstärke. Wenn man die Maschenregel auf das Schema des Batteriemodells anwendet erhält man Gleichung (2-10).

$$P_{emo} = U_{Term} \cdot I_{Batt} \quad (2-9)$$

$$U_{Term} = U_{Batt} - U_i = U_{Batt} - R_i \cdot I_{Batt} \quad (2-10)$$

Durch einsetzen von Gleichung (2-10) in Gleichung (2-9) erhält man:

$$P_{emo} = U_{Batt} \cdot I_{Batt} - R_i \cdot I_{Batt}^2 \quad (2-11)$$

Das Lösen der quadratischen Gleichung ergibt:

$$I_{Batt} = \frac{U_{Batt}}{2R_i} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{Batt}}{2R_i}\right)^2 - \frac{P_{emo}}{R_i}} \quad (2-12)$$

Nach dieser Formel kann die erforderliche Stromstärke in Abhängigkeit der bekannten Größen U_{Batt} (SOC), R_i und der benötigten elektromotorischen Leistung berechnet werden. Unter Beachtung, dass der Wert unter der Wurzel nicht negativ werden darf, ist die maximale Leistung aus der Batterie begrenzt:

$$P_{emo} \leq \frac{U_{Batt}^2}{4R_i} \quad (2-13)$$

Die aus der Batterie entnommene bzw. gespeicherte Leistung kann mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$P_{Batt} = P_{emo} + R_i \cdot I_{Batt}^2 \quad (2-14)$$

Aus dieser Gleichung erkennt man, dass die auftretenden Batterieverluste vom Innenwiderstand abhängig sind und einen quadratischen Zusammenhang mit der Stromstärke aufweisen.

Die nutzbare Energie der Batterie ist durch den maximalen (SOC_{max}) und minimalen (SOC_{min}) Batterieladezustand begrenzt. Die erreichbaren Nettokapazitäten liegen bei Plug-In-Hybridautos bei ungefähr 70 – 80 %.

2.2.2 Elektromotor

Für die realitätsgetreue Nachbildung des Elektromotors im PHEM, muss der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine berücksichtigt werden. In dafür angefertigten Tabellen sind die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von Drehzahl und Leistung abgebildet. Da in PHEM der Wechselrichter nicht extra nachgebildet ist, ist es naheliegend die Wirkungsgradkennfelder von Elektromaschine und Wechselrichter zu vereinen. Somit ist in einem Kennfeld der Elektromotor und Wechselrichter für negative und positive Leistungen abgebildet. Die maximalen Leistungen sind für motorischen und generatorischen Betrieb mit einer Vollastlinie begrenzt.

2.2.3 Steuerkennlinie

Die Hybridstrategie für PHEM wurde im Zuge eines Forschungsprojektes (HERO = Hybrid Electric Recuperation and Operation Strategies) erstellt. Als Zielgrößen stehen die Minimierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen im Vordergrund. Das NVH – Verhalten wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Strategie regelt das Zusammenspiel von Elektromotor und Verbrennungsmotor und soll dabei die Grundlagen der Effizienzsteigerung durch Hybridisierung korrekt abbilden. Die Effekte sind:

- Bremsenergieerückgewinnung
- Motorstopp wenn kein Antriebsbedarf herrscht

- Lastpunktverschiebung des VKM in Bereiche optimaler Wirkungsgrade

Im Vordergrund bei der Wahl der Antriebsstrategie steht die Wirkungsgradkette des elektrischen Antriebs und jener des herkömmlichen Antriebsstrangs. Zu berücksichtigen beim elektrischen Pfad sind Verluste die sowohl beim Generieren als auch Assistieren in Batterie, Umrichter, Elektromotor und Getriebe auftreten. Beim herkömmlichen Antriebspfad reduzieren sich die Verluste auf den Verbrennungsmotor und das Getriebe.

Grundsätzlich ist die Rückgewinnung der Bremsenergie immer sinnvoll, solange der maximale Ladezustand nicht erreicht ist oder die Fahrsicherheit dadurch nicht beeinträchtigt wird. In Phasen wo der Verbrennungsmotor keine Antriebsleistung abgibt, wird er abgekoppelt und abgestellt. Damit eine Häufung von Wiederstarts vermieden wird, ist eine minimale Zeit zwischen zwei Motorstopps definiert.

Der am Institut entwickelte Ansatz zur Wahl der günstigsten Betriebsstrategie beruht auf der Definition eines Effizienzfaktors, der in Abhängigkeit seines Wertes die Auswahl zwischen assistieren und generieren trifft.

Energetisch sinnvoll ist:

- „Elektrisch Fahren bzw. Assistieren: Wenn dabei mehr Kraftstoff eingespart wird, als zuvor oder danach für das Generieren dieser elektrischen Energie aufgewendet wurde“
- „Generieren von elektrischer Energie durch Lastpunktanhebung am VKM: Wenn dabei weniger Kraftstoffmehrverbrauch auftritt, als davor oder danach durch elektrisch Fahren bzw. Assistieren gespart werden kann.“ [12]

Der Effizienzfaktor ist wie folgt definiert:

$$K_e = \frac{W_{\text{elektrisch}}}{\Delta m_{\text{Kraftstoff}}} \quad (2-15)$$

$W_{\text{elektrisch}}$ Entnommene bzw. gespeicherte elektrische Energie der Batterie

$\Delta m_{\text{Kraftstoff}}$ Differenz Kraftstoffverbrauch gegenüber dem reinen VKM Betrieb

$$K_{e_{\text{assistieren}}} = \frac{W_{\text{elektrisch_entnommen}}}{\Delta m_{\text{Kraftstoff}}} \quad (2-16)$$

$$K_{e_{\text{generieren}}} = \frac{W_{\text{elektrisch_gespeichert}}}{\Delta m_{\text{Kraftstoff}}} \quad (2-17)$$

Der Effizienzfaktor beim Assistieren soll möglichst klein und beim Generieren möglichst hoch sein. Über einen Fahrzyklus gesehen müssen die Werte von $K_{e_{\text{generieren}}}$ über denen von $K_{e_{\text{assistieren}}}$ liegen, andernfalls wird keine Effizienzsteigerung im Vergleich zum reinen VKM – Betrieb erreicht. Diese Anforderung wird anhand einer Steuerkennlinie (siehe **Abbildung 19**) umgesetzt. Die Abhängigkeit der Steuerkennlinie vom Ladezustand ist nötig, damit bei der Annäherung des minimalen Ladezustandes „generieren“ bevorzugt wird und somit das SOC_{min} nicht unterschritten wird. Dasselbe gilt für Ladezustände nahe dem SOC_{max} , wo „assistieren“ bevorzugt wird, um eine Überladung zu vermeiden.

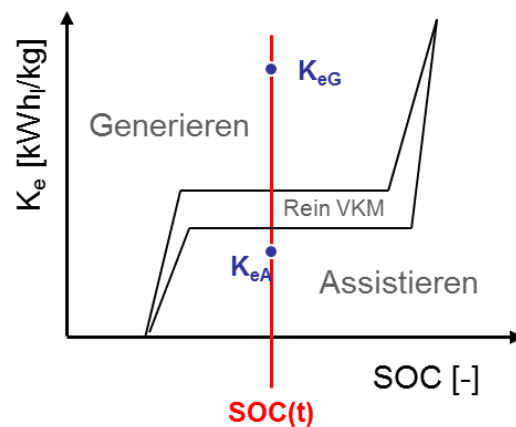


Abbildung 19: Steuerkennlinie in Abhängigkeit des Ladezustandes

Die Betriebsstrategie berechnet sich für jeden Zeitschritt die Effizienzfaktoren für Generieren und Assistieren und deren Abstand zur Steuerkennlinie in Abhängigkeit des SOC. Ist der Abstand von $K_{e_generieren}$ zur Steuerkennlinie größer als der Abstand von $K_{e_assistieren}$ zur Steuerkennlinie, wird generiert, andernfalls assistiert. Die Steuerkennlinie besitzt einen horizontalen Mittelteil, in dem eine Betriebsstrategie verfolgt wird, nach der der Ladezustand über die Dauer eines Fahrzyklus ausgeglichen sein soll. Die Höhe dieses Kennlinienabschnitts wird folgendermaßen ermittelt. Es wird ein Zyklus dreimal simuliert, wobei einmal nur generiert, einmal nur assistiert und einmal mit reinem VKM – Betrieb gerechnet wird. Die $K_{e_assistieren}$ – Werte aus der Simulation werden aufsteigend über der kumulierten elektrischen Energie aufgetragen. Die $K_{e_generieren}$ – Werte werden absteigend sortiert. Der Schnittpunkt dieser beiden Linien ergibt die Höhe der Steuerkennlinie (siehe **Abbildung 20**). [12]

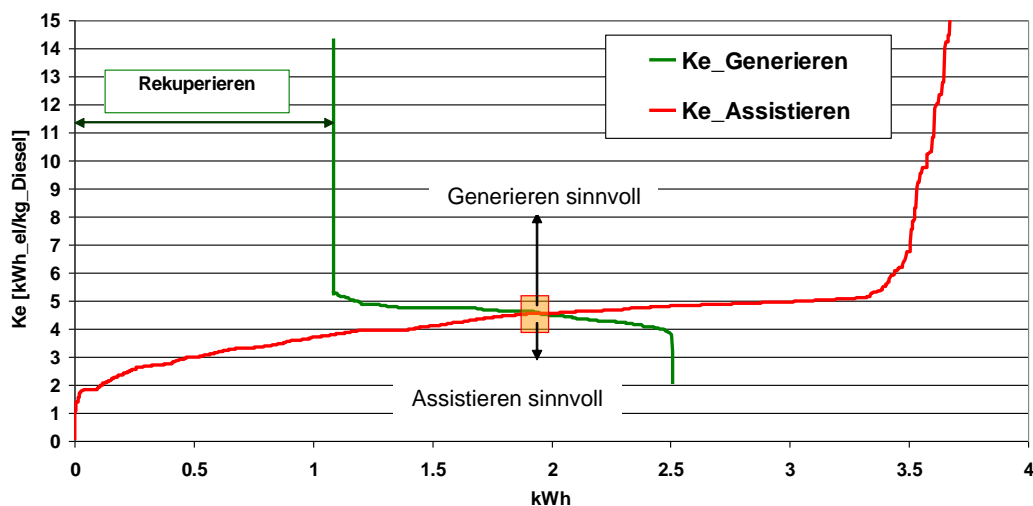


Abbildung 20: Bestimmung der Lage der Steuerkennlinie

3 Vorgehensweise zur Abbildung des \emptyset – PHEV in PHEM

In diesem Kapitel ist die Vorgehensweise beschrieben, wie aus den erhobenen Daten die Modellbildung erfolgte und schlussendlich die Simulationsergebnisse erlangt wurden. In **Abbildung 21** ist der Ablauf illustriert.

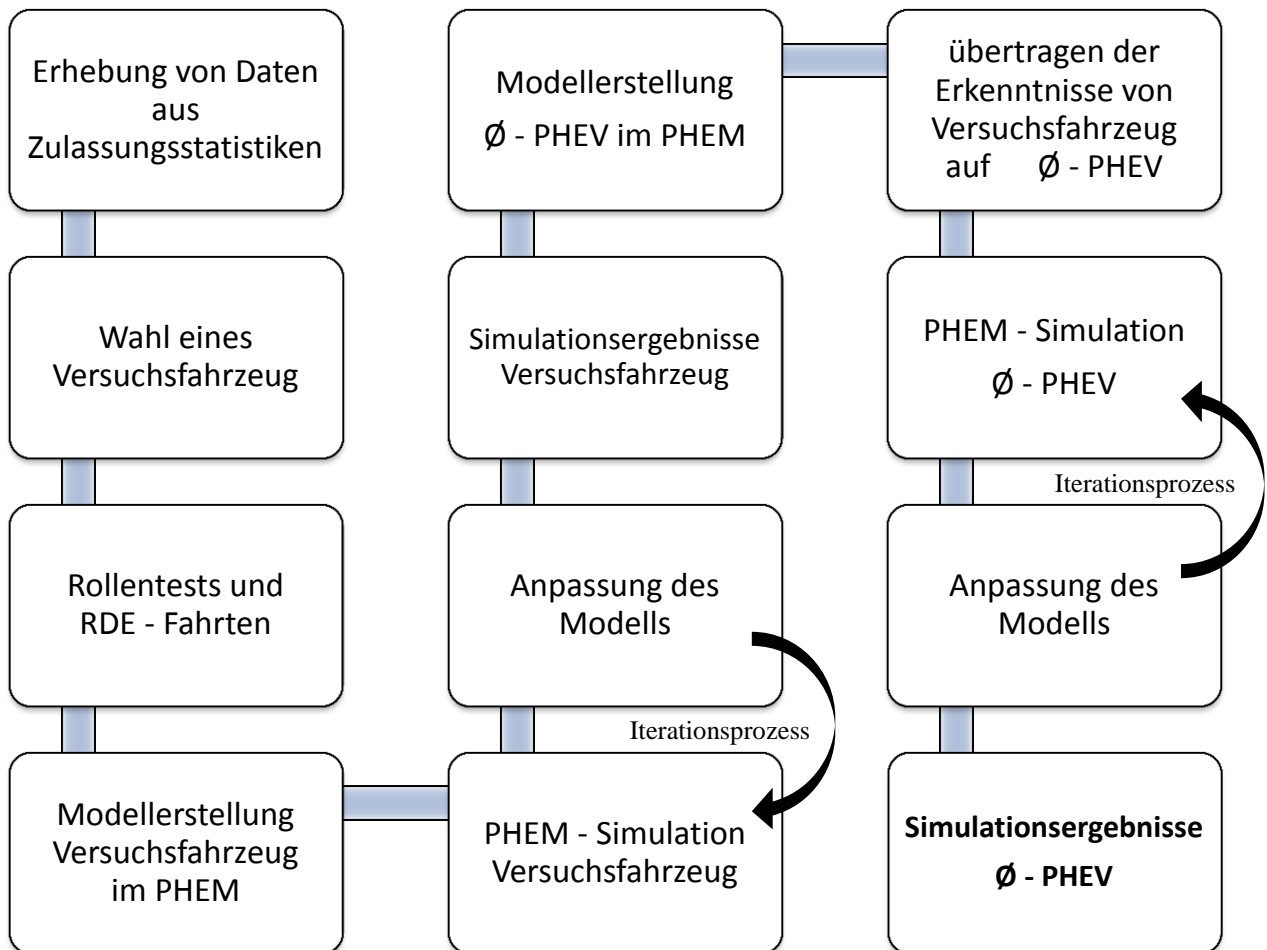


Abbildung 21: Ablaufdiagramm Modellbildung und Simulation

Für die Modellbildung eines Durchschnitts-Plug-In-Hybridfahrzeug wurden zuerst Daten aus den Zulassungsstatistiken von ganz Europa aufgenommen. Aus den Fahrzeugspezifikationen der zehn meistverkauften Plug-In-Hybridfahrzeuge im Jahr 2016, wurden gewichtete Mittelwerte berechnet. Mit diesen Werten, wie Fahrzeugmasse, Leistungen von Elektromotor und Verbrennungskraftmaschine, Kraftstoffverbrauch usw., wurde ein fiktives Fahrzeug erstellt, welches das durchschnittliche PHEV für das Jahr 2016 repräsentieren soll.

Als nächster Schritt konnte anhand des modellierten Fahrzeuges ein geeignetes Versuchsfahrzeug ausgewählt werden. Die Wahl fiel auf den Audi A3 e-tron, der seinen Hybridantriebsstrang mit den Konzernbrüder VW Golf GTE und VW Passat GTE teilt. Alle drei Modelle sind in der Liste der zehn meistverkauften PHEVs Europas vertreten, weshalb das Versuchsfahrzeug und das Durchschnittsfahrzeug auch sehr ähnliche Spezifikationen aufweisen.

Mit dem Versuchsfahrzeug sind Tests auf dem Rollenprüfstand und RDE – Fahrten durchgeführt worden. Dabei sind verschiedene Emissionsmessgeräte zum Einsatz gekommen. Eine nähere Beschreibung dazu, folgt in Kapitel 4.1.

Anschließend wurde der Audi A3 e-tron im Simulationsprogramm PHEM modelliert. Wichtigste Elemente für die HEV – Simulation sind neben den allgemeinen Fahrzeugdaten und Fahrwiderständen, die Batterie, Elektromotor und Steuerkennlinie. Da Daten wie Wirkungsgradkennfelder von Elektromotor oder Leerlaufspannungsverlauf der Batterie von Herstellern nicht preisgegeben werden, wurden diese Daten am Prüfstand und aus RDE – Fahrten erhoben.

Mit dem erstellten Modell des Audi A3 e-tron wurden verschiedenste Simulationen durchgeführt. Vorrangig dienten diese zur Anpassung und Verbesserung des Modells. Der Iterationsprozess von Simulation und Modellanpassung wurde so lange wiederholt, bis die Abweichungen der Simulationsergebnisse von den Herstellerangaben in einem tolerierbaren Bereich waren. Hauptaugenmerk lag dabei auf dem Kraftstoffverbrauch.

Als nächstes konnte mithilfe des PHEM – Modells des Versuchsfahrzeugs, das PHEM – Modell des durchschnittlichen PHEV bedatet werden. Einige Daten waren aus den berechneten Durchschnittswerten des fiktiven Durchschnittsfahrzeugs bereits vorgegeben. Das Batteriemodell und Wirkungsgradkennfelder des Elektromotors wurden jedoch vom Versuchsfahrzeug in angepasster Form übernommen.

Wie beim Modell des A3 e-tron wurde auch beim \emptyset – PHEV die Simulation und Anpassung des Modells so lange wiederholt, bis der simulierte Durchschnittsverbrauch im NEDC dem vorgegebenen Wert weitgehend entsprach.

Schlussendlich konnte ein Fahrzeugmodell generiert werden, welches das durchschnittliche europäische Plug-In-Fahrzeug vom Jahr 2016 repräsentiert. Mit diesem Modell konnten nun im PHEM verschiedenste Simulationen durchgeführt werden. Eine ausführliche Beschreibung dazu ist in Kapitel 6 gegeben.

4 Experimentelle Untersuchungen

Im folgenden Kapitel ist beschrieben, wie die Wahl des Versuchsfahrzeugs getroffen wurde, was für Messgeräte zur Verfügung standen und welche Tests an diesem Fahrzeug durchgeführt wurden.

Zuerst wurde aus der Zulassungsstatistik der in Europa 2016 zugelassenen Plug-In-Hybridfahrzeuge eine Tabelle erstellt (siehe **Tabelle 5**), in der die zehn meistverkauften PHEVs aufgelistet sind. Aus den Spezifikationen der einzelnen Fahrzeuge wurden gewichtete Mittelwerte errechnet, die das Durchschnittsfahrzeug darstellen sollen (siehe **Tabelle 6**). Der BMW i3 Rex wurde bei der Berechnung der Mittelwerte nicht berücksichtigt, da sein Antrieb auf einem seriellen Hybridkonzept basiert und in der PHEM Hybridsimulation ein paralleler Hybridantriebsstrang nachgebildet ist.

Ranking	Make	Model	Stückzahl 2016	Anteil in %
1	Mitsubishi	Outlander PHEV	21328	21.77
2	Volkswagen	Passat GTE	13248	13.52
3	Volkswagen	Golf GTE	11351	11.59
4	Mercedes	C350e	10231	10.44
5	Volvo	XC90 PHEV	9586	9.78
6	BMW	330e	8702	8.88
7	Audi	A3 e-tron	6894	7.04
8	BMW	225xe Active Tourer	5915	6.04
9	BMW	X5 40e	5393	5.50
10	BMW	i3 Rex	5322	5.43
Summe			97970	100.00

Tabelle 5: Zulassungsstatistik der 10 meistverkauften PHEVs in Europa [13]

	Einheit	Wert
Leergewicht (DIN)	kg	1738
Normverbrauch	l/100km	1,81
Leistung VKM	kW	123
Leistung Elektromotor	kW	79
Elektromotortyp	-	PMSM
Batteriekapazität	kWh	8,8
Batteriespannung	V	314
Elektrische Reichweite	km	43

Tabelle 6: Spezifikationen des Ø – PHEV

Weil das erstellte \emptyset – PHEV ein fiktives Fahrzeug ist, wurde ein Versuchsfahrzeug ausgewählt, das möglichst ähnliche Spezifikationen aufwies. Das Wunschfahrzeug war eines der Modelle von VW (Golf GTE, Passat GTE) oder Audi (A3 e-tron), da diese Fahrzeuge zu den meistverkauften PHEVs in Europa zählen und den gleichen Antriebsstrang besitzen. Der Audi A3 e-tron wurde schlussendlich von einem Händler zur Verfügung gestellt.

4.1 Audi A3 e-tron

Der parallele Hybridantrieb des Audi A3 e-tron besteht aus einem 1,4 Liter Ottomotor mit Abgasturboaufladung und Direkteinspritzung. Seine permanenterregte Synchronmaschine ist direkt im Doppelkupplungsgetriebe untergebracht. Der Motor kann über eine zusätzliche Kupplung auch während der Fahrt, von Getriebeeinheit entkoppelt werden. Damit auch bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor die Klimatisierung der Fahrgastzelle möglich ist, ist der Klimakompressor nicht über einen Keilriemen mit der VKM verbunden, sondern elektrisch angetrieben. Eine Explosionsansicht dieses Antriebsstranges ist nachfolgend abgebildet.

Audi A3 Sportback e-tron

Antriebseinheit
Drive unit
09/13

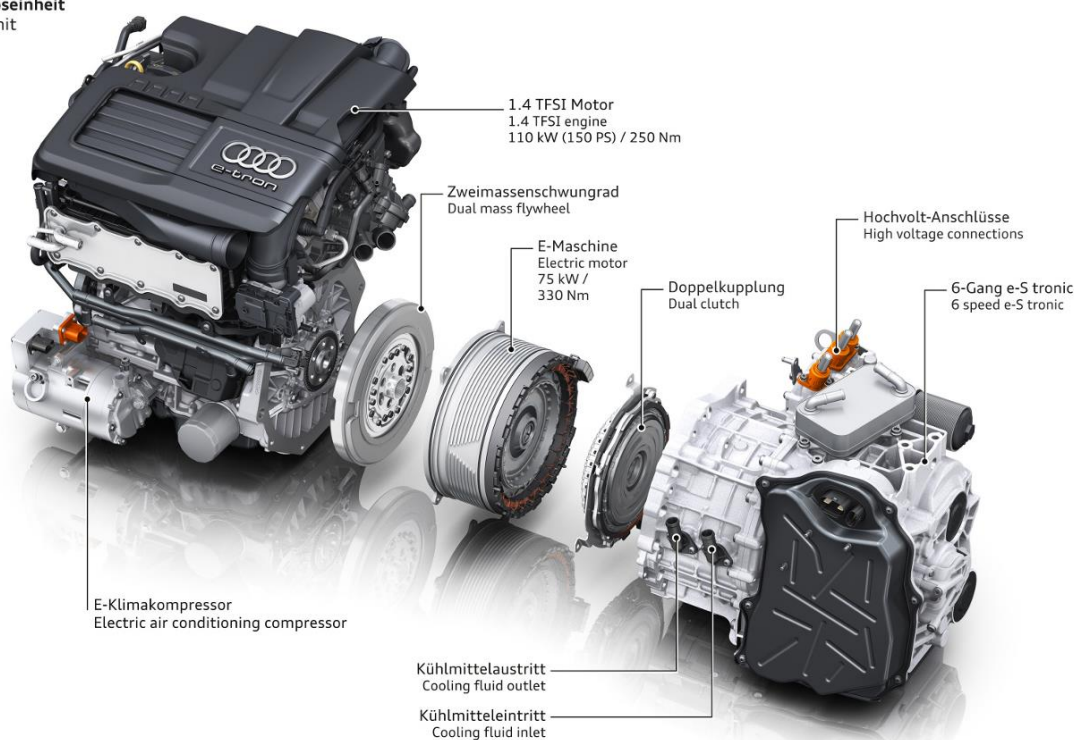


Abbildung 22: Hybridantriebsstrang des Audi A3 e-tron [14]

Die Lithium-Ionen-Hochvoltbatterie zur Speicherung der elektrischen Energie für emissionsfreie Fahrten bis 50 km, ist unter der Rücksitzbank untergebracht. Diese besteht aus acht Zellmodulen, in denen eine Kapazität von 8,8 kWh gespeichert werden kann. Um die beim Laden und Entladen entstehende Wärme abzuführen, muss die Batterie aktiv gekühlt werden. Der Aufbau der Batterie des A3 e-tron ist in **Abbildung 23** ersichtlich.

Audi A3 Sportback e-tron

Aufbau der Lithium-Ionen-Hochvolt-Batterie
Structure of the lithium-ion high-voltage battery
09/13

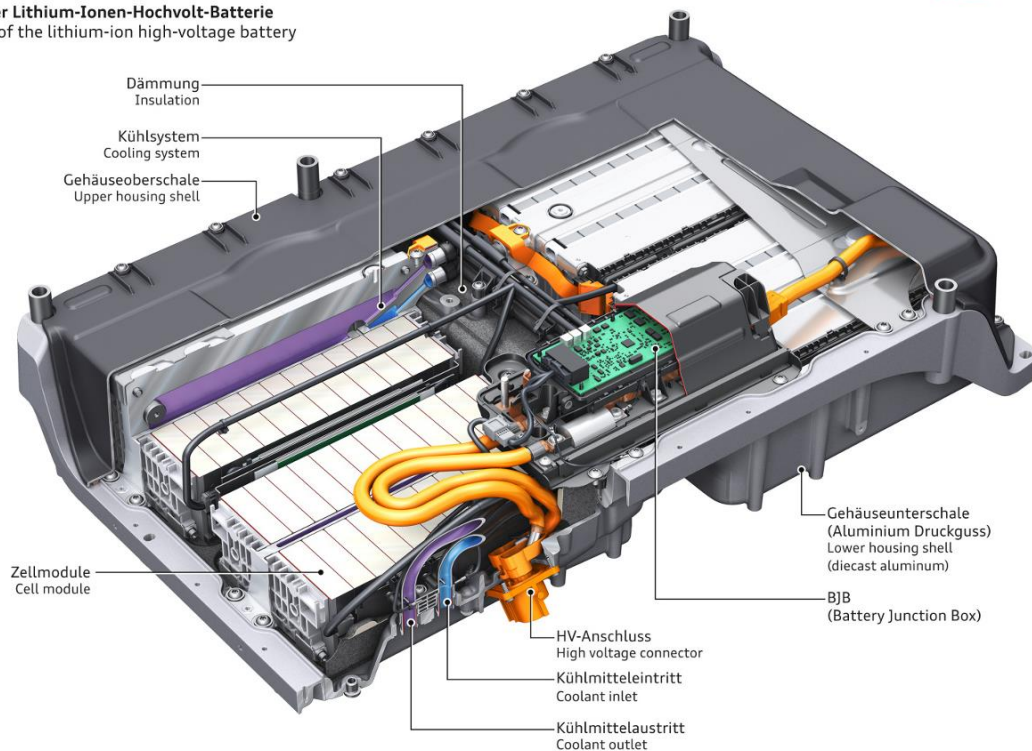


Abbildung 23: Hochvoltbatterie des Audi A3 e-tron [14]

In nachfolgender Tabelle sind die technischen Daten des A3 e-tron ersichtlich, welche auch für die Modellerstellung im PHEM übernommen wurden.

Motor / Elektrik		
Motorbauart	-	Reihen-Vierzylinder-Ottomotor mit Benzindirekteinspritzung und Abgasturboaufladung mit indirekter Ladeluftkühlung
Hubraum	ccm	1395
max. Leistung	kW	110
max. Drehmoment	Nm	250
Gemischaufbereitung	-	vollelektronische Direkteinspritzung mit E-Gas
Abgasreinigungssystem	-	Motornaher Keramikkatalysator mit Katalysatorheizfunktion über Doppeleinspritzung
Emissionsklasse	-	EU6
Antrieb / Kraftübertragung		
Antriebsart	-	Frontantrieb mit elektronischer Stabilisierungskontrolle ESC

Kupplung	-	Drei elektrohydraulisch betätigte Nasskupplungen (zwei Fahrkupplungen und eine Motortrennkupplung)
Getriebeart	-	6-Gang-Doppelkupplungsgetriebe S tronic
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5/6	-	3,500/2,773/1,852/1,020/1,023/0,840
Achsübersetzung 1. & 4. Gang	-	3,750
Achsübersetzung 2., 3., 5., 6. Gang	-	2,885
Fahrleistung / Verbrauch		
Höchstgeschwindigkeit	km/h	hybridisch: 222, elektrisch: 130
Beschleunigung 0-100 km/h	s	7,6
Verbrauch nach ECE R101	l/100km	1,5-1,8
CO ₂ – Massenemission	g/km	35
Hybridisch		
elektrische Leistung	kW	75
max. elektrisches Drehmoment	Nm	330
max. Gesamtleistung	kW	150
max. Gesamtdrehmoment	Nm	350
Batterietyp	-	Lithium-Ionen-Batteriesystem
Batterieenergiegehalt	kWh	8,8
Gewicht / Belastbarkeit		
Leergewicht nach EG 92/21	kg	1615
Karosserie / Abmessungen		
Luftwiderstandsbeiwert cw	-	0,32
Stirnfläche A	m ²	2,13
Länge	mm	4312
Breite	mm	1785
Höhe	mm	1424

Tabelle 7: Technische Daten Audi A3 e-tron 2014 [15]

4.1.1 Messgeräte

Für die verschiedensten Untersuchungen am Audi A3 e-tron, standen am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik modernste Messgeräte zur Verfügung. Am PKW – Rollenprüfstand mit einer CVS – Anlage konnten Emissionsmessungen unter Laborbedingungen durchgeführt werden, um zum Beispiel den Normverbrauch nach WLTP zu ermitteln. Mit dem PEMS – Gerät sind mobile Emissionsmessungen auf der Straße möglich, was in der kommenden Gesetzgebung zusätzlich gefordert sein wird. Des Weiteren wurden Abgasmessungen mit einem FTIR – Messgerät durchgeführt. Damit standen uns drei unabhängige Abgasmessgeräte zur Verfügung.

4.1.1.1 PKW – Rollenprüfstand

An einem Rollenprüfstand können Fahrzeuge unter Laborbedingungen getestet werden. Dafür wird das Fahrzeug mit seinen angetriebenen Rädern auf Rollen gespannt. Es gibt Prüfstände an denen das angetriebene Rad auf dem Scheitelpunkt der Rolle steht, oder zwischen einem Rollenpaar. Am IVT sind die angetriebenen Räder zwischen einem Rollenpaar, wobei nur eine Achse gebremst wird und somit keine Allradgetriebenen Fahrzeuge vermessen werden können. Die Bremskraft wird von zwei elektrischen Maschinen, einer Gleichstrommaschine und einer Wechselstrommaschine, erzeugt. Im Allgemeinen wird sie so geregelt, dass sie den Fahrwiderständen auf der Straße entspricht. Die erforderliche Antriebsleistung zur Überwindung der Fahrwiderstände ist folgendermaßen definiert:

$$P_A = P_{Roll} + P_{Luft} + P_a + P_{Steigung} + P_{Schlupf} + P_{Getriebe} + P_{Nebenaggregate} \quad (4-1)$$

Die Leistungen von Schlupf, Getriebe und der Nebenaggregate ergeben sich am Rollenprüfstand von selbst, und müssen nicht von der Bremse aufgenommen werden. Die Beschleunigungsleistung wird durch Gewichte, die an die Rollen der gebremsten Räder angekuppelt werden, simuliert. Abhängig vom Fahrzeuggewicht sind unterschiedliche Gewichtsklassen definiert.

Insgesamt müssen die elektrischen Maschinen also nur die Leistung zur Überwindung von Rollreibung und Luftwiderstand aufnehmen. Die Bremskraft kann mit einem Polynom 2. Ordnung abgebildet werden. Die Leistung ergibt sich aus dem Produkt von Kraft und Geschwindigkeit.

$$F_{Rolle-soll} = R_0 + R_1 \cdot v + R_2 \cdot v^2 \quad (4-2)$$

$$P_{Rolle-soll} = F_{Rolle} \cdot v \quad (4-3)$$

$F_{Rolle-soll}$ Soll – Bremskraft

$P_{Rolle-soll}$ Soll – Bremsleistung

R_0 bis R_2 Konstante

v Geschwindigkeit

Die Konstanten R_0 bis R_2 können aus einem Ausrollversuch ermittelt werden. Eine Beschreibung dazu ist in Kapitel 4.1.2.1 zu finden.

Ein Teil der im Ausrollversuch ermittelten Rollwiderstandskraft entsteht jedoch am Rollenprüfstand selbst durch Reibungsverluste, die vom eigentlichen Widerstandspolynom abgezogen werden müssen. Verluste die im Antriebsstrang des Fahrzeugs bis zur Kupplung entstehen, müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Für die Ermittlung der Eigenverluste wird ein sogenannter „Loss Run“ durchgeführt. Dabei wird das Fahrzeug auf der Rolle, analog zu einem Ausrollversuch, auf 120 km/h beschleunigt und ohne Bremskraft ausgerollt. Daraus erhält man das Polynom der Eigenverluste. [6]

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

Durch Differenzbildung der Polynome kann die erforderliche Bremskraft dargestellt werden.

$$F_{Bremse} = (R_0 - A_0) + (R_1 - A_1) \cdot v + (R_2 - A_2) \cdot v^2 \quad (4-5)$$

4.1.1.2 CVS – Anlage

In der CVS – Anlage (CVS, Constant Volume Sampling) wird das Abgas direkt nach dem Auspuff mit Umgebungsluft verdünnt. Durch die Verdünnung der Abgase mit Umgebungsluft sinkt der Volumensanteil der Abgaskomponenten und damit die Gefahr von Kondensation und unerwünschten Nachreaktionen. Der Volumenstrom wird mit Venturi Düsen konstant gehalten und ein Wärmetauscher sorgt für konstante Temperaturen des Abgasstroms. Diesem verdünnten Abgasstrom wird kontinuierlich ein Teilvolumenstrom entnommen und in Beuteln gesammelt. Parallel dazu werden in eigenen Beuteln Umgebungsluft gesammelt, damit bei der Auswertung der Beutelemissionen, die sogenannten Hintergrundemissionen aus der Umgebungsluft abgezogen werden können. Denn die in der Verdünnungsluft bereits vorhandenen Emissionen, müssen dem Ergebnis der Beutelwerte abgezogen werden. Ein weiterer Teilmassenstrom wird für die modale Emissionserfassung und für Partikelmesssysteme entnommen.

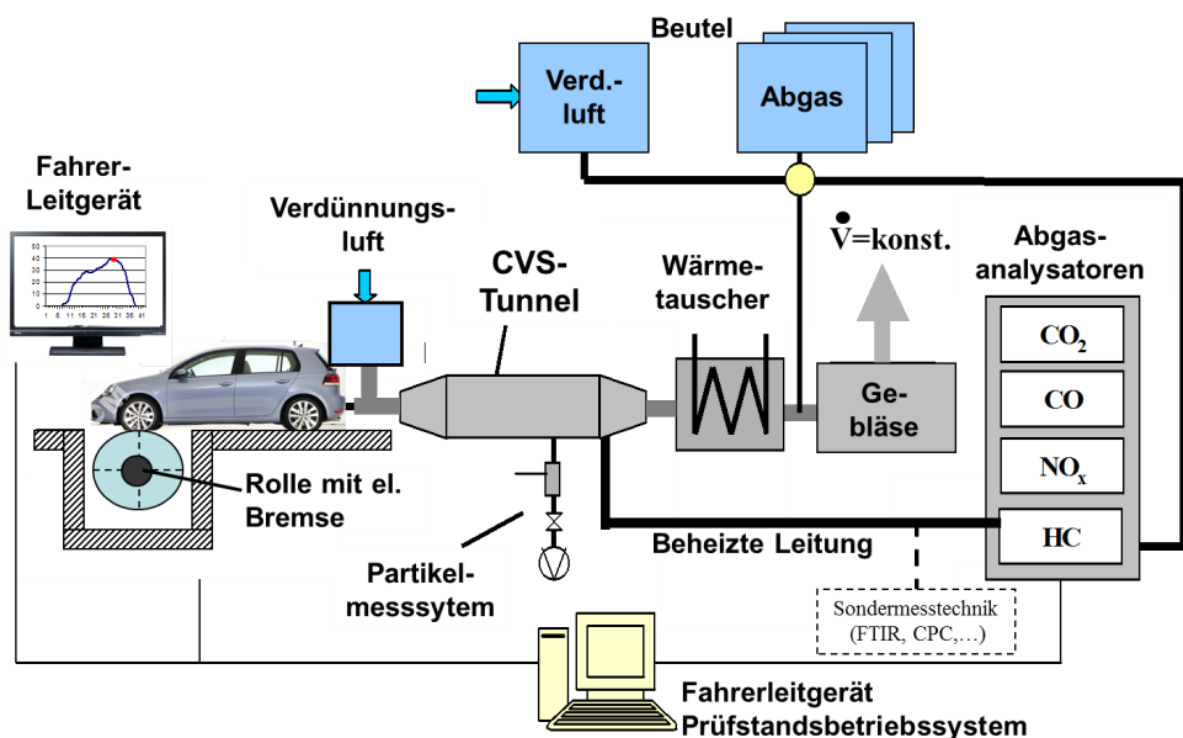


Abbildung 24: Schema PKW – Rollenprüfstand mit CVS – Anlage [6]

Der Abgasanalysator beinhaltet folgende Messgeräte:

- NDIR (nicht dispersiver Infrarot-Analysator) für CO_2 und CO
- FID (Flammenionisationsdetektor) für C_mH_n
- Chemilumineszenzmessung für NO_x
- Gravimetrische Partikelmessung

Zusätzlich kam bei unseren Messungen am Rollenprüfstand ein Partikelmessgerät zum Einsatz, das die Partikelanzahl bestimmen konnte:

- CPC (Condensation Particle Counter) für Partikelanzahl

4.1.1.3 FTIR

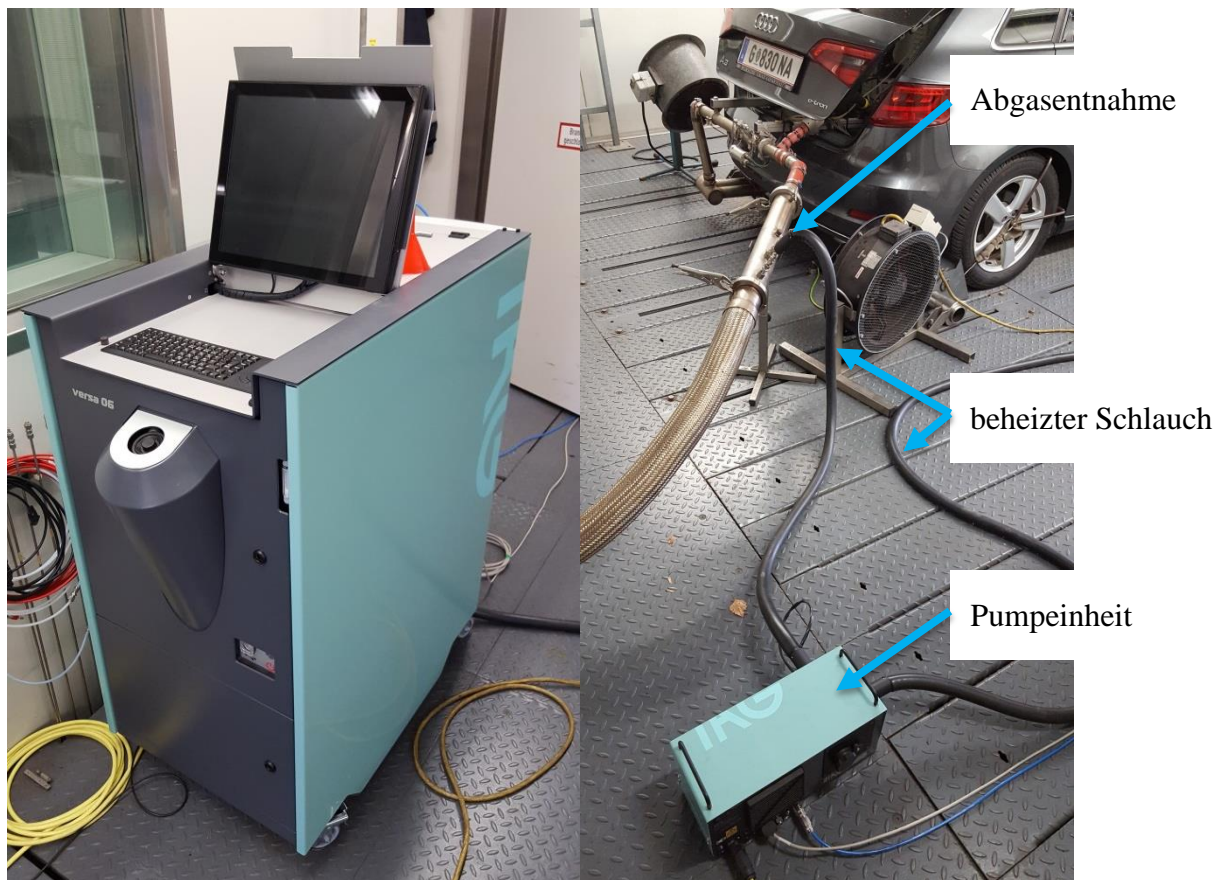


Abbildung 25: FTIR Messgerät und Pumpeinheit

Am Rollenprüfstand ist uns ein FTIR (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer), zur Messung der Abgaszusammensetzung, zur Verfügung gestanden. In **Abbildung 25** ist das Messgerät, die Abgasentnahmestelle und die Pumpeinheit abgebildet. Das zu untersuchende Abgas wird über einen beheizten Schlauch mit einer Pumpeinheit aus dem Abgasstrang entnommen und in das Messgerät geleitet. In diesem befindet sich der Infrarot Spektrometer, wo die Gaszusammensetzung bestimmt werden kann. Der Detektor muss dabei mit flüssigem Stickstoff auf Arbeitstemperatur gehalten werden.

4.1.1.4 Strom- und Spannungsmessung

Für eine exakte Bestimmung der Batterieleistung, wurden Messgeräte im Motorraum zur modalen Datenerfassung installiert. Bei der Installation halfen uns Experten vom Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung, da aufgrund der hohen Spannung von bis zu 400V besondere Vorsicht geboten war. Zur Berechnung der elektrischen Leistung aus der Batterie wurden eine Stromzange und ein Spannungsmessgerät angebracht. Diese berechnet sich aus Klemmenspannung und Stromstärke wie folgt.

$$P_{Batt} = U_{Klemm} \cdot I \quad (4-6)$$

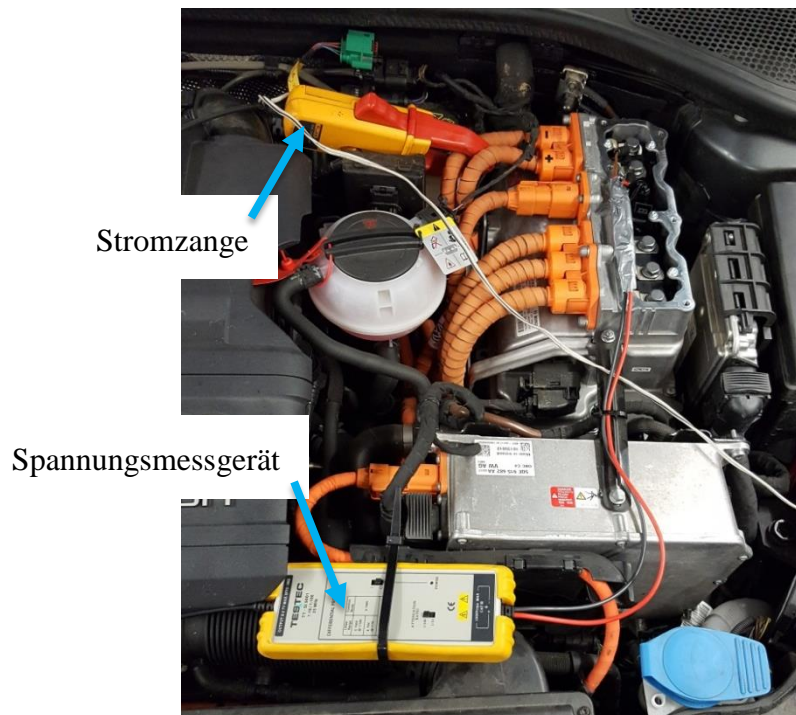


Abbildung 26: Strom- und Spannungsmessung

4.1.1.5 PEMS

Zur mobilen Messung von Emissionen kommen sogenannte PEMS – Geräte (PEMS, Portabel Emission Measurement System) zum Einsatz. Am IVT steht ein solches Messgerät der Firma AVL mit dem Produktnamen „M.O.V.E“ zur Verfügung. Dieses Gerät besitzt einen UV Analysator zur synchronen Messung von NO und NO₂ Konzentrationen. Das NDIR (Nicht Dispersiver Infrarot-Analysator) misst CO und CO₂ Emissionen mit einer Auflösung von unter 0,1%. Das AVL „M.O.V.E“ beinhaltet kein FID (Flammenionisationsdetektor) zur Messung von HC – Emissionen, da dieser Analysator für den Messbetrieb ein Brenngas (Helium/Wasserstoff Mix) benötigt, das aus Sicherheitsgründen nicht im Fahrgastraum transportiert werden darf. Dementsprechend ist die HC-Messung auch in der RDE Gesetzgebung für On-Board Tests nicht vorgeschrieben. Ein zusätzliches Modul, das PN – PEMS, misst zeitaufgelöst die Partikelanzahl auf dem Prinzip des Elektrometers.

Die Steuerung der Analysatoren erfolgt mit einer Steuereinheit, über die ein Laptop angeschlossen werden kann, um Daten auszulesen und zu speichern.

Der gesamte Abgasstrom wird am herkömmlichen Auspuffende entnommen und über ein Chromstahlrohr zur Abgasentnahmestelle des PEMS geführt. Noch davor wird der Abgasvolumenstrom mit einem Differenzdrucksensor (EFM, Exhaust Flow Meter) gemessen. Das Gerät stammt ebenfalls von der Firma AVL. Der Massenstrom wird benötigt um aus den gemessenen Konzentrationen der jeweiligen Abgaskomponenten die zugehörigen Massenemissionen zu bestimmen. An der Abgasentnahmestelle werden die Abgase über einen beheizten Schlauch, um Kondensation zu vermeiden, den Analysatoren zugeführt.

Für die Aufzeichnung der gefahrenen Route, Geschwindigkeiten, Fahrbahnneigung und Wetterdaten, sind am Dach ein GPS – Empfänger und eine Wetterstation montiert. Die Wetterstation liefert Informationen über Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit.

Die Energieversorgung wird über zwei Akkukoffer sichergestellt. Auf keinem Fall darf die nötige Energie aus dem Bordnetz genommen werden, da dies die Leistung der Nebenverbraucher erhöhen würde und eine Messverfälschung zur Folge hätte.

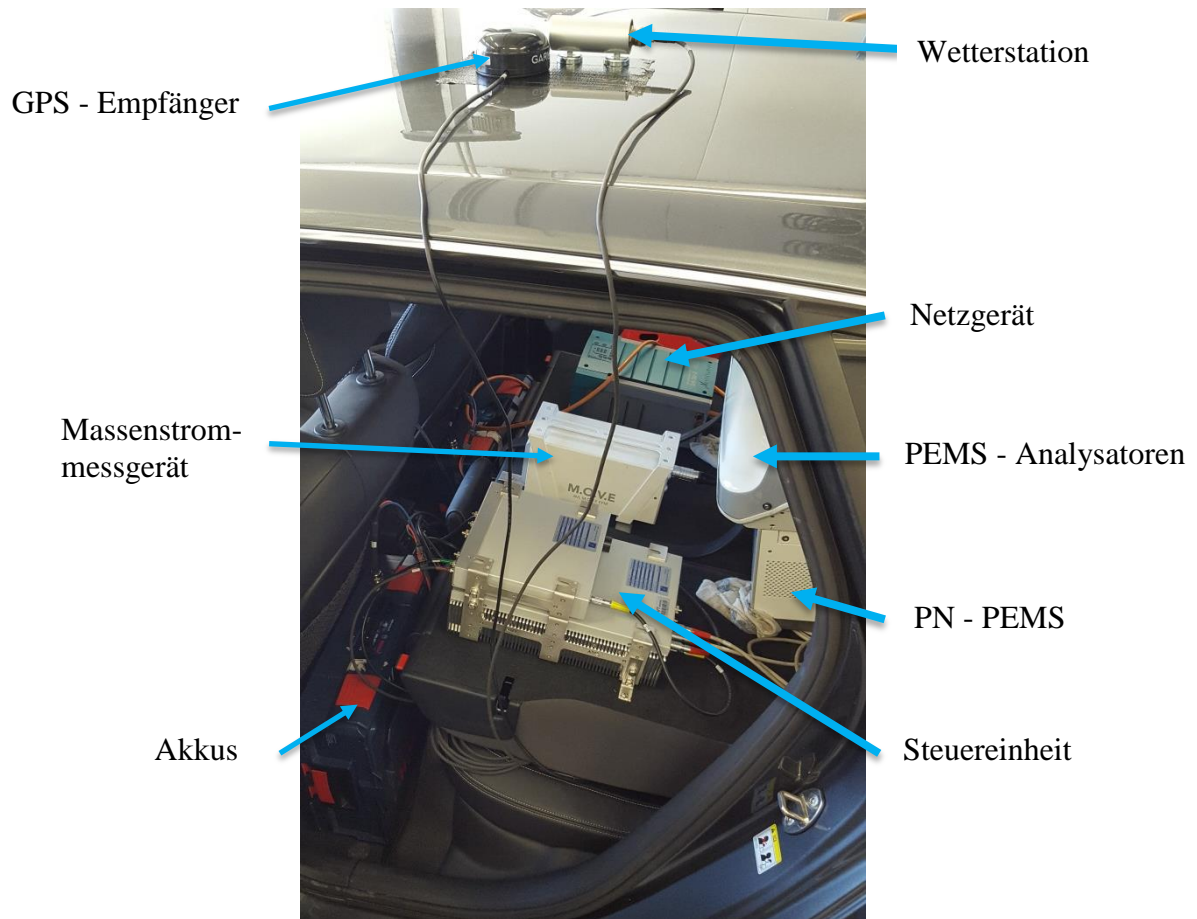


Abbildung 27: Messtechnik im Audi A3 e-tron (1/2)

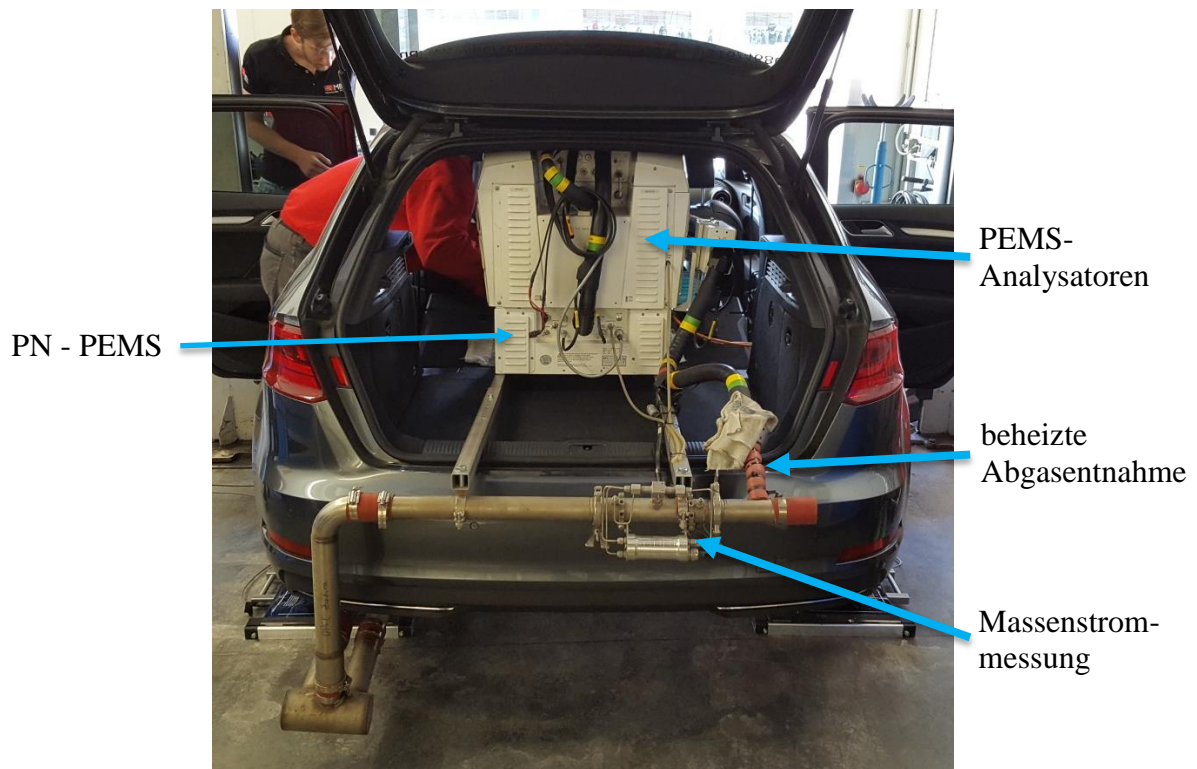


Abbildung 28: Messtechnik im Audi A3 e-tron (2/2)

4.1.2 Messungen

In diesem Kapitel sind die Messungen, welche am Audi A3 e-tron durchgeführt wurden, beschrieben. Im Vordergrund standen bei meiner Masterarbeit Erkenntnisse über den Hybridantriebsstrang zu gelangen um ein entsprechendes Modell in PHEM nachzubilden, und weniger die Emissionsmessung des Fahrzeugs.

4.1.2.1 Ermittlung der Fahrwiderstände

Bei den Tests am Rollenprüfstand muss für die Abbildung der realen Fahrwiderstände ein Fahrwiderstandspolynom eingegeben werden. Die Formeln dafür sind im vorigen Kapitel beschrieben. Für eine exakte Bestimmung der Fahrwiderstände, wird dieses Polynom aus einem Ausrollversuch ermittelt.

Dabei wird das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit von 120km/h beschleunigt und ausgekuppelt. Beim Ausrollen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Trägheitskräften des Fahrzeugs (Fahrzeugmasse, Masse der Beladung, rotatorische Massen) und den Widerstandskräften (Luftwiderstand, Rollwiderstand) ein.

$$(m_{\text{Fahrzeug}} + m_{\text{Beladung}} + m_{\text{rot}}) \cdot a = F_{\text{Luftwiderstand}} + F_{\text{Rollwiderstand}} \quad (4-7)$$

Während das Fahrzeug ausrollt, wird die Geschwindigkeit mittels eines GPS – Empfängers aufgezeichnet.

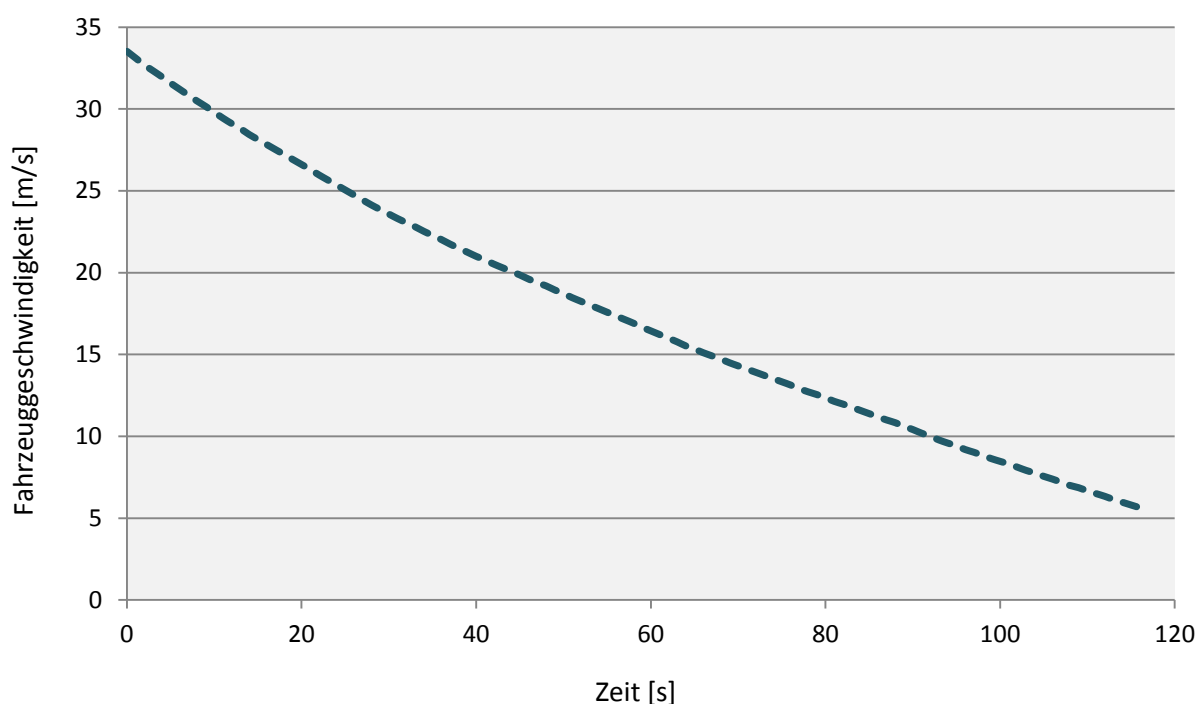


Abbildung 29: Geschwindigkeitsverlauf eines Ausrollversuchs

Aus dem Geschwindigkeitsverlauf kann sekundlich die negative Beschleunigung aus der Geschwindigkeitsdifferenz je Zeitschritt berechnet werden. Daraus erstellt man ein Diagramm, in dem die Fahrwiderstandskraft, also Fahrzeugmasse mal Beschleunigung, über der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen sind. Die Fahrzeugmasse muss exakt bestimmt werden, wobei auch die Massen der Insassen mitberücksichtigt werden müssen.

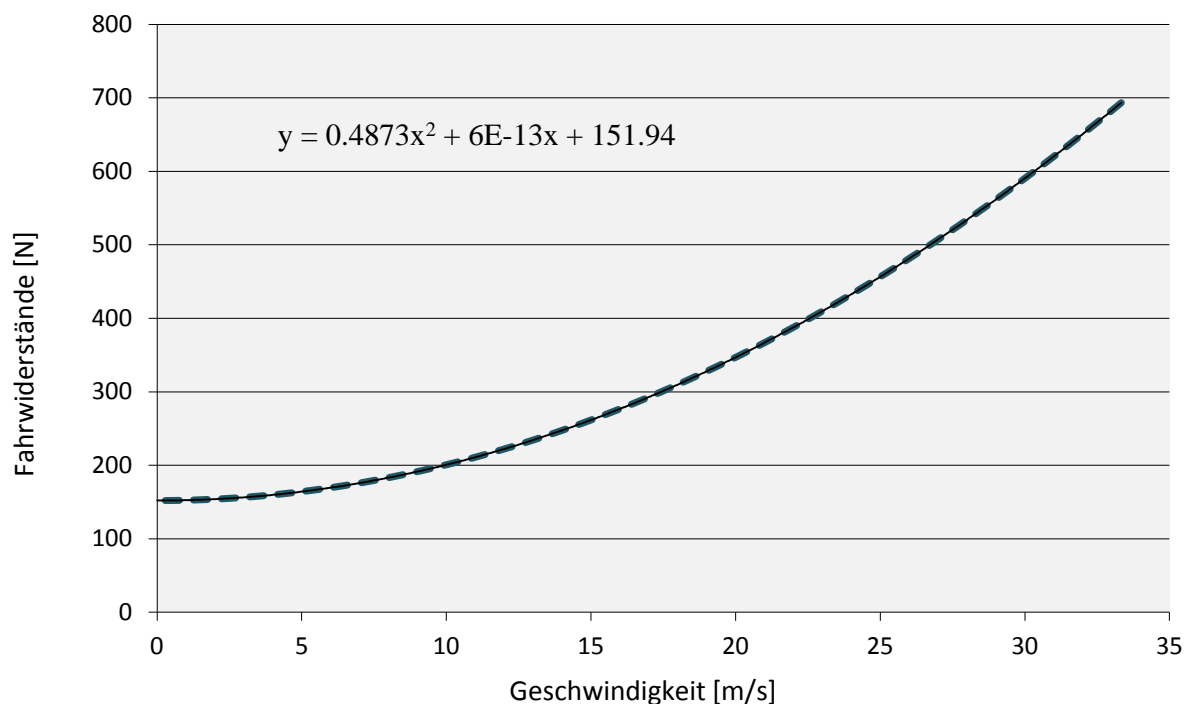


Abbildung 30: Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aus Ausrollversuchen für den Audi A3 e-tron

Der ermittelte Verlauf der Fahrwiderstände wird mit einem Polynom 2. Ordnung angenähert. Die Koeffizienten dieses Polynoms, werden zur Bedatung der Fahrwiderstände am Rollenprüfstand übernommen.

Mit unserem Testfahrzeug haben wir ebenfalls einen Ausrollversuch durchgeführt. Dabei liegt die Schwierigkeit vor allem in der Auswahl einer geeigneten Teststrecke, die möglichst gerade und keine Fahrbahnneigung aufweisen soll. Die Ausrollversuche müssen in beide Richtungen mehrmals durchgeführt werden, damit Umgebungseinflüsse durch Mittelung eliminiert werden. Umgebungseinflüsse die das Messergebnis verfälschen sind zum Beispiel Wind, Fahrbahnneigung, Luftstöße durch Gegenverkehr oder Luftverwirbelungen von vorausfahrenden Fahrzeugen. Die gemittelten Messwerte müssen anschließend mit einer Korrekturfunktion auf Normbedingungen (Luftdruck, Temperatur) korrigiert werden.

Für die genaue Ermittlung der Fahrzeugmasse wurde der Audi A3 e-tron auf vier Kraftmessplatten gestellt (siehe **Abbildung 31**), deren Summe die Gesamtmasse ergab.



Abbildung 31: Kraftmesseinrichtung

Folgende Ergebnisse sind für unser Testfahrzeug ermittelt worden.

Bezeichnung	Einheit	Wert
Testmasse (inkl. PEMS + 2 Insassen)	kg	1855
R0	N	132,24
R1	N/(m/s)	4,52
R2	N/(m/s) ²	0,4046

Tabelle 8: ermittelte Fahrwiderstände Audi A3 e-tron (Ausrollversuche wurden mit Winterreifen gefahren)

Das Fahrwiderstandspolynom des Audi A3 e-tron ist somit folgendermaßen definiert:

$$F_W = 132,24 + 4,52 \cdot v + 0,4046 \cdot v^2 \quad (4-8)$$

Die Widerstandskoeffizienten R0 und R1 stehen dabei für den Rollwiderstand und R2 für den Luftwiderstand. Aus der allgemeinen Formel für den Luftwiderstand kann der Zusammenhang mit dem Koeffizienten R2 gezeigt werden.

$$F_L = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_w \cdot A_q \cdot v^2 = R2 \cdot v^2 \quad (4-9)$$

$$R2 = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_w \cdot A_q \quad (4-10)$$

4.1.2.2 Rollenprüfstand

Eine Problematik zur Verwertung der Messergebnisse war, dass der Audi A3 e-tron am Rollenprüfstand in Bremsphasen nicht rekuperierte. Aufgrund der stehenden Hinterräder detektierte das Fahrzeug eine instabile Fahrsituation, weshalb kein Bremsengriff über Rekuperation erfolgen durfte. Aus diesem Grund sind die Messergebnisse vom Rollenprüfstand nur bedingt verwertbar. Eine Nachmessung des Normverbrauchs ist aus

diesem Grund ebenfalls nicht möglich.

Es wurden insgesamt 14 Rollentests durchgeführt, wobei drei verschiedene Fahrzyklen (WLTC, CADC, ERMES V8) zum Einsatz kamen. Variiert wurden Zyklus, Vorkonditionierung (hot/cold) und die Wahl der Betriebsart. Mit dem Betriebsartschalter konnte ein Batterie nutzender Modus (charge – depleting operation) oder ein Batterie erhaltender Modus (charge – sustaining operation) eingestellt werden.

Da beim Hybridmodell das Abbilden des Energiemanagements zur richtigen Verbrauchssimulation von Kraftstoff und elektrischer Energie im Vordergrund stand, waren die Emissionsmesswerte vom Rollenprüfstand nebensächlich. Aufgrund der bereits beschriebenen Problematik, konnten für die Anpassung des Hybridmodells die Kraftstoffverbrauchswerte aus den Rollentests ebenfalls nicht verwendet werden.

Eine Auflistung der Messergebnisse aller Prüfstandfahrten ist im Anhang ersichtlich.

4.1.2.3 RDE – Fahrten

Die Erstellung einer geeigneten RDE – Route, welche die beschriebenen Randbedingungen erfüllt, ist im Rahmen der Dissertation meiner Betreuerin Silke Lipp entstanden. Die Route startet bei der Einfahrt zum Institutsgelände und Endet am selbigen Ort. Darin enthalten sind ein Stadtabschnitt in Graz, ein Überlandabschnitt der von Graz über Gleisdorf nach Sinabelkirchen führt und ein Autobahnanteil zurück nach Graz. In Abbildung 32 ist die RDE – Route in einer Google Maps Karte abgebildet.

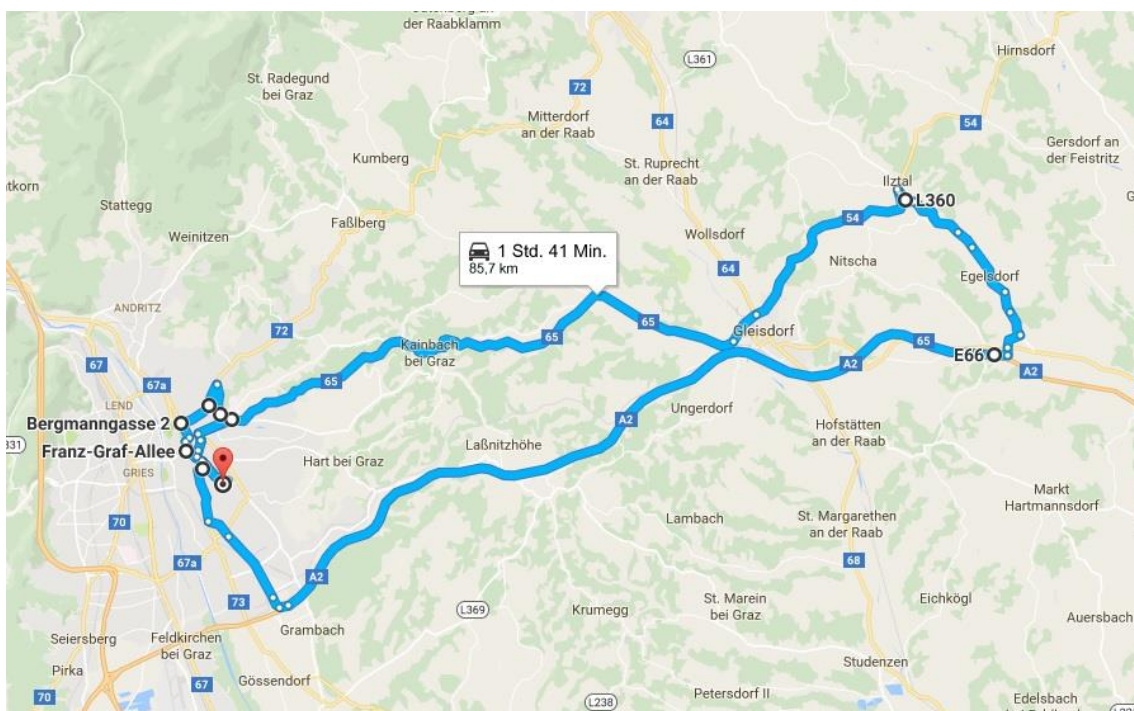


Abbildung 32: Ries – Route zur RDE Messung

Mit dem Versuchsfahrzeug wurden drei RDE – Fahrten auf der Ries – Route durchgeführt. Es waren drei verschiedene Fahrer hinterm Steuer und als Betriebsmodus wurde der „charge-sustaining-mode“ gewählt. Die Messergebnisse stammen vom PEMS – Gerät und sind in **Tabelle 9** dargestellt. Über die OBD – Schnittstelle wurden zusätzliche Informationen ausgelesen.

Nr.	hot/ cold	operation mode	v_mean	FC	CO ₂	CO	NO _x	NO	PN
			km/h	l/100km	g/km	mg/km	mg/km	mg/km	#/km
Ries 01	hot	charge – sustaining	58.00	5.87	136.7	173.56	10.27	9.45	1.88E+12
Ries 02	hot	charge – sustaining	52.66	5.18	120.7	539.18	8.69	7.60	1.40E+12
Ries 03	hot	charge – sustaining	48.46	4.39	102.3	371.57	35.34	32.02	1.27E+12

Tabelle 9: Messergebnisse der RDE – Fahrten

Bei vergleichbarem Verkehrsaufkommen lässt die Durchschnittsgeschwindigkeit auf unterschiedliches Verkehrsaufkommen und verschiedene Fahrstile schließen. Dies macht auch der Kraftstoffverbrauch deutlich, der zwischen 4,39 und 5,87 l/100km gemessen wurde. Der Verbrauch in l/100km wird aus den gemessenen CO₂ Emissionen mit einem Faktor von 3,153 als Vereinfachung errechnet. Der Zusammenhang kann über die Molanteile des im Kraftstoff gebundenen Kohlenstoffs, und im Abgas enthaltenen Kohlenstoff hergeleitet werden. Trotz der Betriebsart „charge-sustaining-mode“ müsste man für die exakte Bestimmung des Verbrauchs in Bezug auf einen ausgeglichenen Ladezustand, die genaue Differenz der Batterieladung ermitteln und den Verbrauch dementsprechend korrigieren.

Es liegen bei allen RDE – Fahrten die gemessenen Emissionswerte unterhalb des Grenzwertes. Nur die Partikelanzahl wäre für die ab September 2017geltende Abgasnorm zu hoch. Dort ist ein Grenzwert von 6×10^{11} #/km festgelegt.

Bei einer Fahrt quer durch die Stadt ohne Streckenvorgabe, wurde die elektrische Reichweite untersucht. Die Batterie des Fahrzeugs wurde dafür voll aufgeladen. Gemäßigte Temperaturen ließen es zu, den Klimakompressor ausgeschaltet zu lassen, was der elektrischen Reichweite zugute kam. Über die OBD – Schnittstelle konnten sämtliche hybridelektrische Parameter, wie Batteriespannung, Stromstärke und Ladezustand aufgezeichnet werden. Aus diesen Daten wurde zu einem späteren Zeitpunkt das Batteriemodell für PHEM modelliert. Bei der Testfahrt wurde eine elektrische Reichweite von genau 50 km erreicht, was genau der Herstellerangabe entspricht. Es muss allerdings bedacht werden, dass diese Fahrt keiner normierten Testrunde entspricht und die vom Hersteller angegebenen 50 km im Normzyklus ermittelt wurden.

5 Modellerstellung in PHEM

In den folgenden Kapiteln ist die Erstellung des Hybridmodells im PHEM, für den Audi A3 e-tron und das durchschnittliche Plug-In-Hybridfahrzeug, erklärt. Zunächst wurde das Modell des A3 e-tron erstellt, um danach aus den gewonnenen Erkenntnissen das \emptyset – PHEV Modell anzufertigen. Zur Optimierung und Kalibrierung der Modelle wurden Messdaten aus den Versuchsreihen von Rollenprüfstand und RDE - Fahrten verwendet.

5.1 Audi A3 e-tron

Da die Messwerte am Rollenprüfstand ohne Rekuperation zustande kamen, wurde das Hybridmodell des A3 e-tron so angepasst, dass die simulierten Werte von Verbrauch und elektrischer Reichweite möglichst gut mit den Herstellerangaben übereinstimmten. Die Verbrauchswerte des Herstellers gehen noch aus dem NEDC hervor, weshalb auch die Simulation mit diesem Zyklus durchgeführt werden musste.

Nachfolgend ist die Ermittlung der für die Fahrzeugsimulation nötigen Daten erläutert. Generell wird zwischen allgemeinen Daten und hybridspezifischen Daten (HEV – Daten) unterschieden.

5.1.1 Allgemeine Daten

Zu den allgemeinen Daten zählen Fahrzeugdaten, welche im „VEH – File“ eingegeben werden, Motor- und Emissionskennfelder sind im „MAP – File“ hinterlegt und die Vollastkurve des Verbrennungsmotors im „FLD – File“. In **Abbildung 33** ist die Benutzeroberfläche von PHEM zur Eingabe dieser Daten ersichtlich.

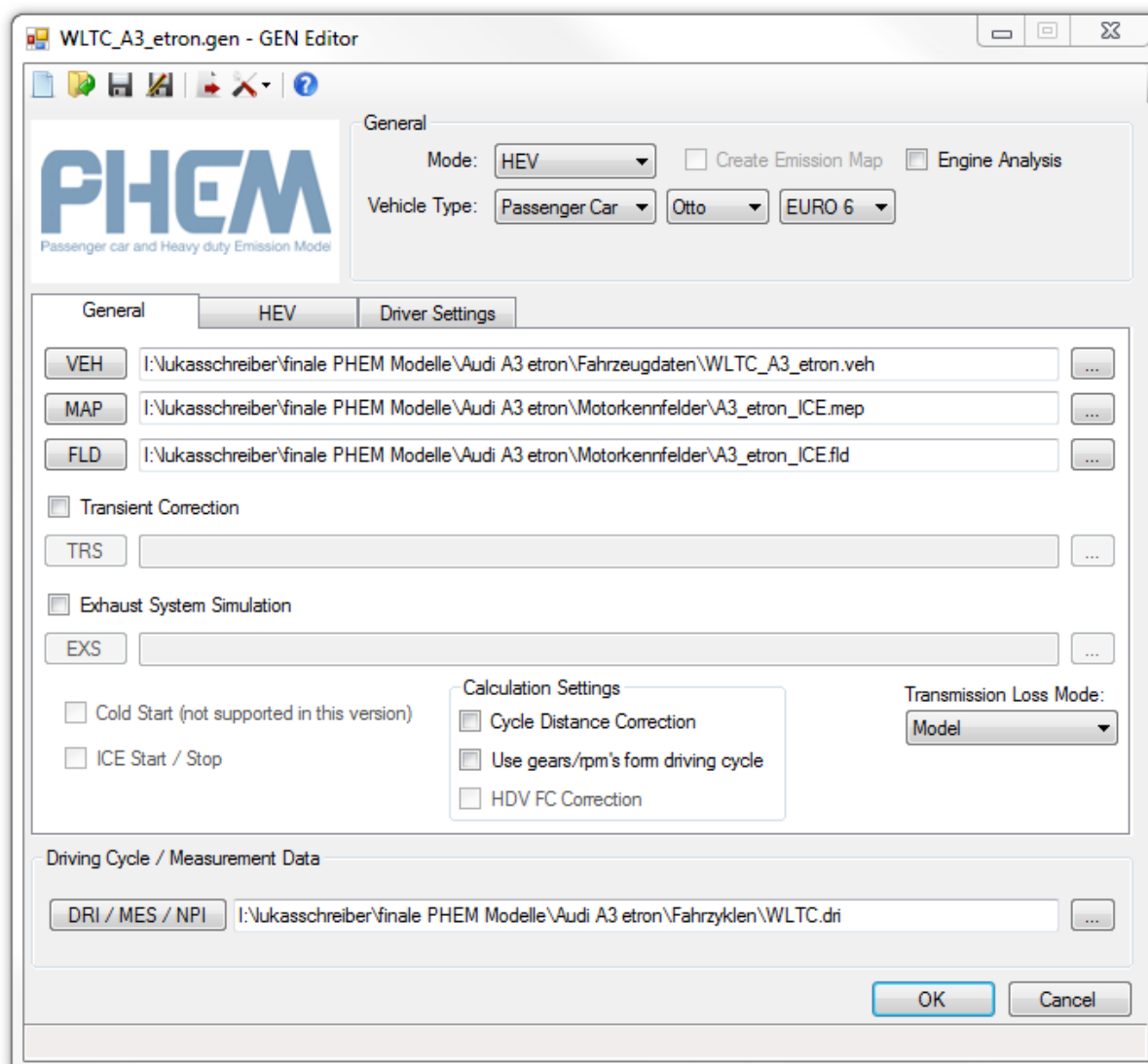


Abbildung 33: Benutzeroberfläche zur Eingabe von allgemeinen Fahrzeugdaten („General“)

5.1.1.1 VEH – File

Gear	Ratio	Efficiency Map
A	1	
01	13.125	
02	8	
03	5.343	
04	3.825	
05	2.951	
06	2.423	
07	0	
08	0	
09	0	
10	0	
11	0	

Abbildung 34: VEH – File des Audi A3 e-tron

Die Eingabeparameter für die Fahrzeugdaten im PHEM sind in **Abbildung 34** ersichtlich. Die Fahrzeugtestmasse für den NEDC errechnet sich aus DIN – Leermasse plus 100 kg, und ergab für den A3 e-tron 1640 kg. Für die Rollwiderstandskoeffizienten F_{r0} und F_{r1} wurden Default Werte von Reifenlabel B verwendet. Diese sind wesentlich plausibler als jene die beim Ausrollversuch mit Winterreifen ermittelt wurden, mit der Annahme, dass Hersteller Reifen mit möglichst geringem Rollwiderstand für die Verbrauchsermittlung verwenden.

Motor und Getriebedaten sind aus den Fahrzeugspezifikationen entnommen worden. Zu beachten war, dass in den Fahrzeugspezifikationen zwei Achsübersetzungen eingetragen waren. Der Grund dafür ist, dass das Doppelkupplungsgetriebe zwei Wellen mit Zahnradpaarungen besitzt, welche mit unterschiedlichen Übersetzungsverhältnissen mit der Abtriebswelle verbunden sind. Da im PHEM nur eine Achsübersetzung angegeben werden kann, sind die Übersetzungsverhältnisse der einzelnen Gänge auf die Achsübersetzung 1 umgerechnet worden.

Die Parameter für das Schaltmodell stammen aus der Bedienungsanleitung von PHEM. Dort sind Werte speziell für Doppelkupplungsgetriebe angegeben, welche in einem internen Projekt zur verbrauchsoptimalen Gangwahl ermittelt wurden.

5.1.1.2 MAP – File

Im „MAP – File“ sind Kennfelder für Verbrauch und Emissionen in tabellarischer Form hinterlegt. Für das PHEM Modell des Audi A3 e-tron wurde das „MAP – File“ aus den Rollenprüfstandsdaten generiert. Diese Möglichkeit bietet das PHEM durch die Funktion „create Emission Map“. Dafür müssen die sekundlichen Werte von Motordrehzahl und Abgasemissionen aus den gefahrenen Testzyklen am Rollenprüfstand vorgegeben werden. Wenn die abgegebene Motorleistung nicht mitgemessen wird, kann sie über ein separates generisches Kennfeld mittels CO_2 – Interpolation errechnet werden. Für die

Kennfelderzeugung des A3 e-tron wurde die CO₂ – Interpolationsmethode angewendet. Diese Methode hat den großen Vorteil, dass das Verbrauchskennfeld im gesamten Last- und Drehzahlbereich bedatet ist und keine unplausiblen Werte durch Extrapolation entstehen. Allerdings muss das Verbrauchskennfeld im Nachhinein kalibriert werden.

Für die Kalibrierung des Verbrauchskennfeldes wurden aus allen Rollenprüfstandsfahrten all jene Lastpunkte herausgefiltert, an denen nur der Verbrennungsmotor aktiv war. Anschließend wurde aus diesen Lastpunkten ein Fahrzyklus („NPI – File“) erstellt und im „engine only“ Modus nachsimuliert. Die gemessenen und simulierten Verbrauchswerte wurden im 10s – Mittel in einem Diagramm aufgezeichnet und eine Regressionsgerade durch die jeweils simulierten und gemessenen Werte gelegt (siehe **Abbildung 35**). Die Regressionsgeraden sind ähnlich den Willanslinien, mit dem Unterschied, dass eine Willanslinie nur für eine bestimmte Drehzahl angegeben wird. Aus dem Schnittpunkt der Willanslinie mit der negativen x-Achse kann die Reibleistung bei gegebener Drehzahl ermittelt werden.

Um die simulierten Verbrauchswerte auf das Niveau der Messungen zu bringen wurde eine Korrekturfunktion ermittelt. Diese resultiert aus dem Quotienten der beiden Regressionsgeraden (siehe **Abbildung 36**). Da die Korrekturfunktion für Werte zwischen 20 und 50 kW, wo die meisten Messpunkte liegen, nahezu konstant ist, wurde ein Korrekturfaktor für das gesamte Verbrauchskennfeld von 1,2 genommen.

Für eine exakte Kalibrierung des Verbrauchskennfeld müsste man die gleiche Prozedur zur Anpassung der Verbrauchswerte auch über der Drehzahl machen. Da die Simulationswerte nach der ersten Kalibrierung schon sehr gut waren, wurde auf die Kalibrierung über der Drehzahl verzichtet.

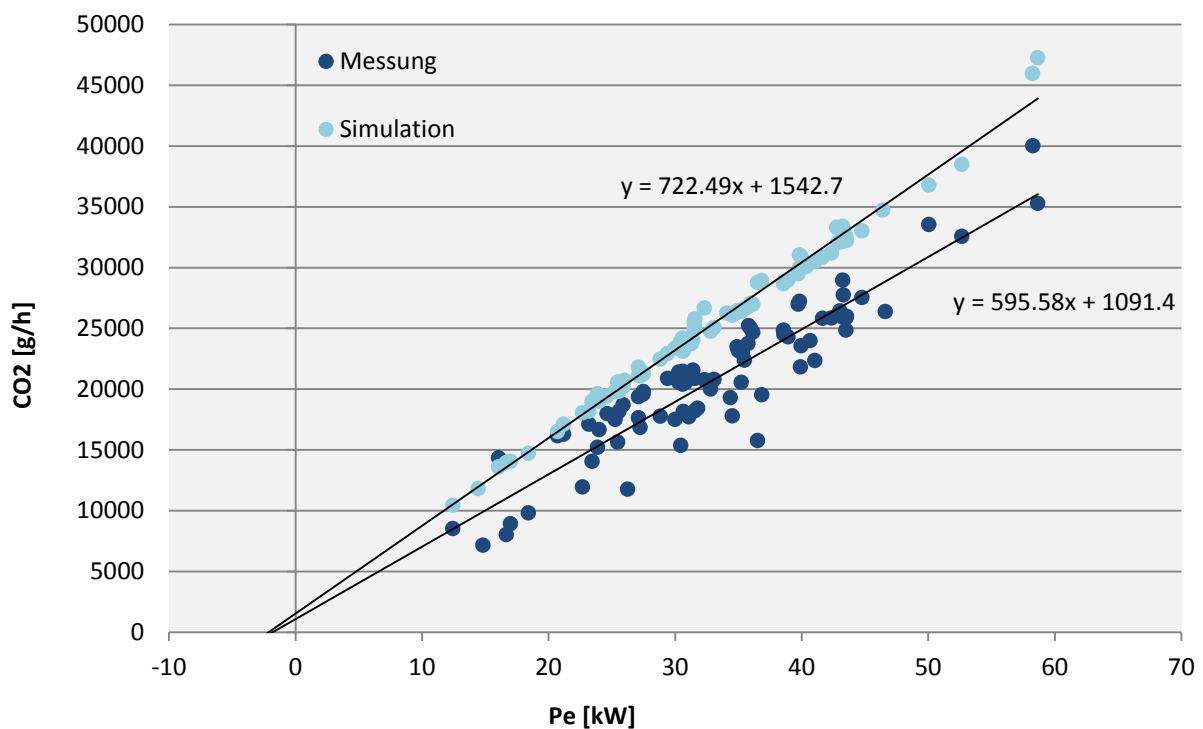


Abbildung 35: Grundlage zur Kalibrierung des generischen Motorkennfeldes durch Quotientenbildung von gemessenem zu simuliertem Verbrauch

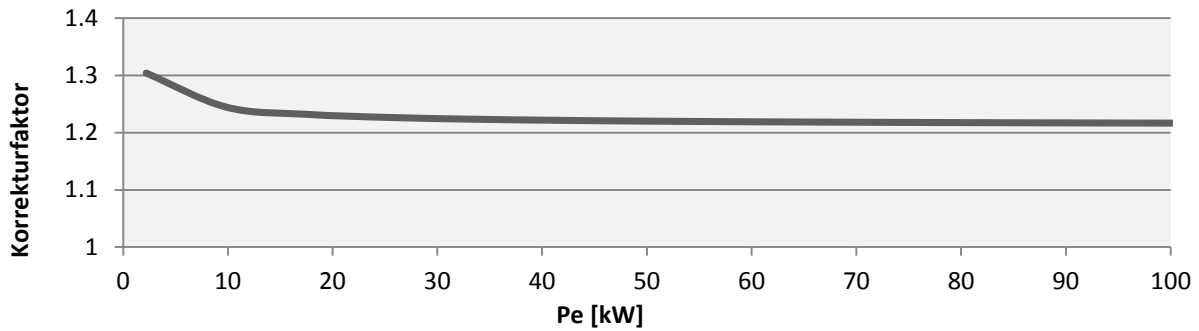


Abbildung 36: Korrekturfaktor

5.1.1.3 FLD – File

Durch die Vollastlinie ist die maximale Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl vorgegeben. Im „FLD – File“ ist zudem noch die Schleppkurve hinterlegt, welche die negative Schleppleistung bei Kraftstoffverbrauch null darstellt. Die Schleppkurve ist bei Simulationen von Hybridfahrzeugen nicht relevant, da der Verbrennungsmotor in Schubphasen vom Getriebe abgekoppelt wird um die maximal mögliche Rekuperationsleistung zu erreichen.

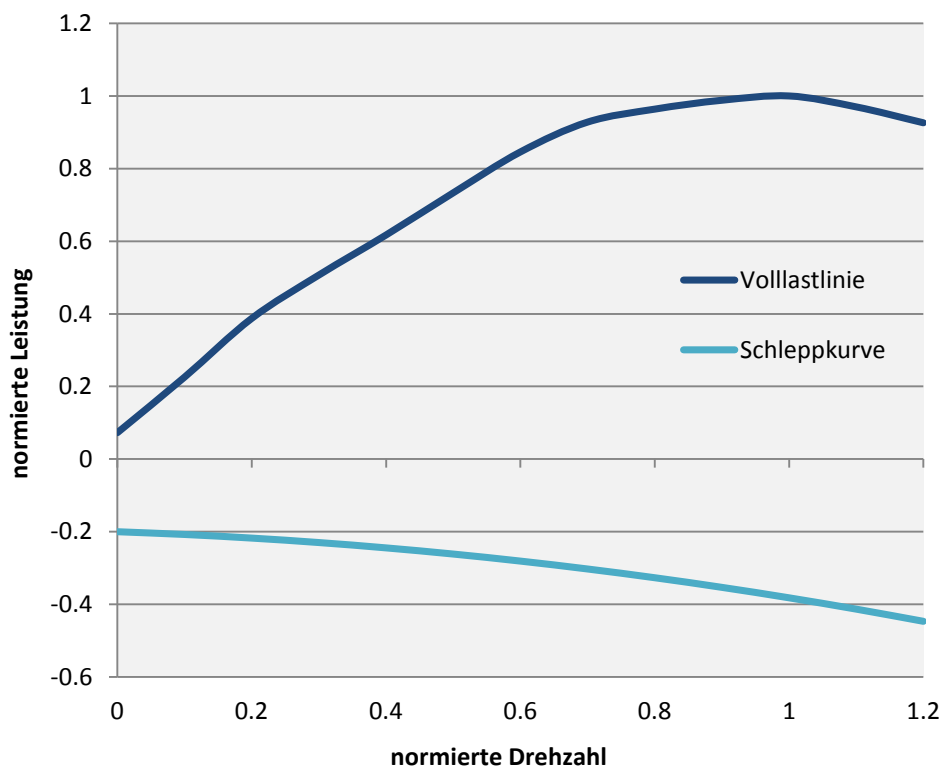


Abbildung 37: Vollastlinie und Schleppkurve

5.1.2 HEV – Daten

Zu den Hybridbausteinen im PHEM zählen das „BAT – File“, das „EMO – File“ und das „STE – File“. Mit diesen drei Elementen wird der Hybridantriebsstrang im PHEM parametrierbar. In **Abbildung 38** ist die Benutzeroberfläche zur Eingabe dieser Daten ersichtlich.

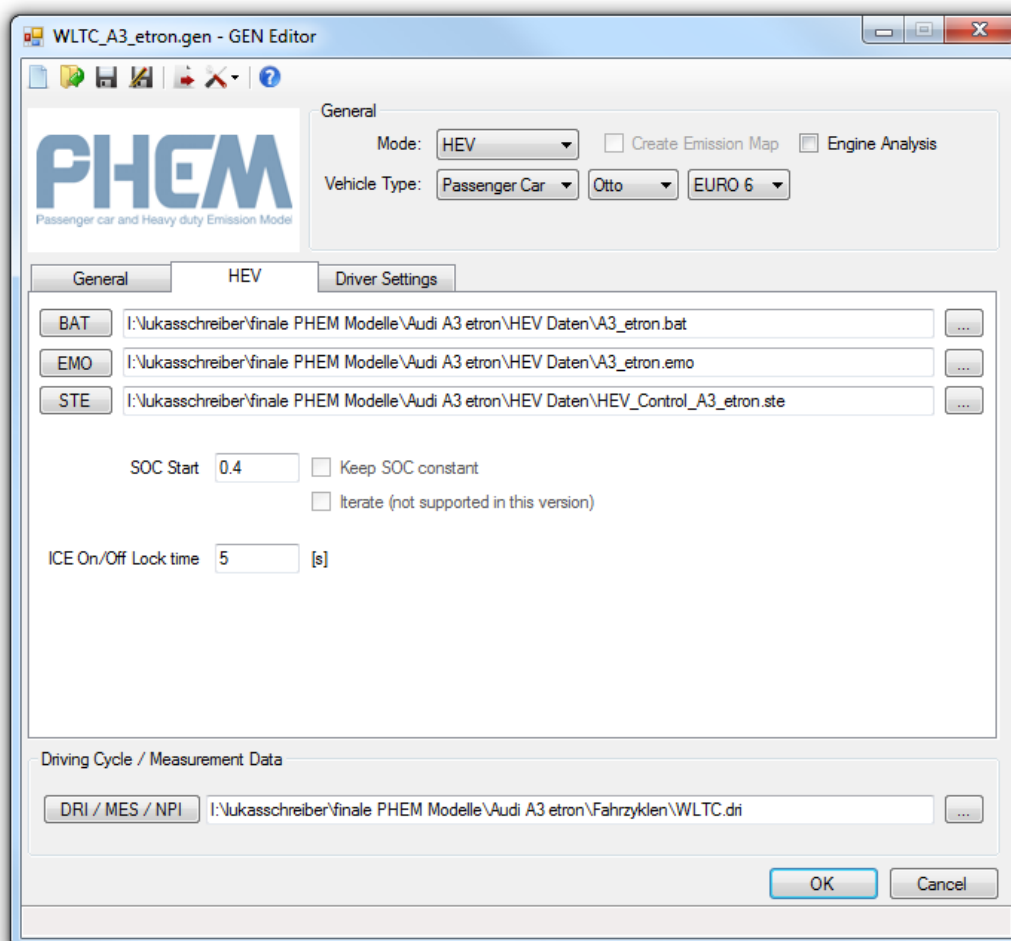


Abbildung 38: Benutzeroberfläche zur Eingabe von „HEV – Daten“

Außerdem kann der Batterieladezustand für den Beginn der Simulation in einem Eingabefeld vorgegeben werden. Um eine Anhäufung von Motorstarts zu vermeiden, wird eine minimale „ICE On/Off Lock time“ definiert.

5.1.2.1 BAT – File

Im „BAT – File“ sind Parameter der Batterie, wie Leerlaufspannungsverlauf, Innenwiderstand, minimale und maximale Ladegrenzen sowie die Gesamtkapazität angegeben. Der einzige vom Hersteller angegebene Wert ist die Kapazität der Batterie. Alle anderen Kenngrößen sind aus Messfahrten mit dem A3 e-tron ermittelt worden.

Die Parameterwerte für Leerlaufspannungsverlauf, Innenwiderstand und Ladegrenzen konnten aus der Fahrt zur Ermittlung der elektrischen Reichweite gewonnen werden. Dabei wurden Größen wie Spannung der Hochvoltbatterie, Stromstärken und Ladezustände bezogen

auf Netto- und Bruttokapazität über den OBD – Stecker des Fahrzeugs aufgezeichnet.

Für die Bestimmung des Innenwiderstandes wurden für verschiedene Ladezustände eine kleine Anzahl von Lastpunkten entnommen, für die in einem Diagramm die Klemmenspannung über der Stromstärke aufgetragen wurde (siehe **Abbildung 39**). So sieht man zum Beispiel bei der Punkteschaar mit „SOC 0,9“ Lastzustände mit positiven und negativen Stromstärken. Bei positiven Werten wurde angetrieben und bei negativen rekurert. Legt man nun eine Regressionsgerade durch diese Punkteschaar, ergibt die Steigung der Geradengleichung die Größe des Innenwiderstandes an. In unserem Batteriemodell im PHEM ist der Innenwiderstand folgendermaßen definiert:

$$R_i = \frac{\pm(U_0 - U_{Klemm})}{I} \quad (5-1)$$

±.....entladen / laden

U_0Leerlaufspannung [V]

U_{Klemm} Klemmenspannung [V]

Die Bestimmung des Innenwiderstandes wurde wie beschrieben für unterschiedliche Ladezustände durchgeführt und schließlich ein Mittelwert für das „BAT – File“ des A3 e-tron herangezogen.

Des Weiteren konnte der Leerlaufspannungsverlauf aus diesem Ansatz ermittelt werden. Die Leerlaufspannung ist definiert als jene Spannung, welche an den Klemmen anliegt, wenn keine Verbraucher angeschlossen sind, also wenn die Stromstärke gleich null ist. Damit ergibt sich aus Formel (5-1):

$$U_0 = U_{Klemm}(I = 0) \quad (5-2)$$

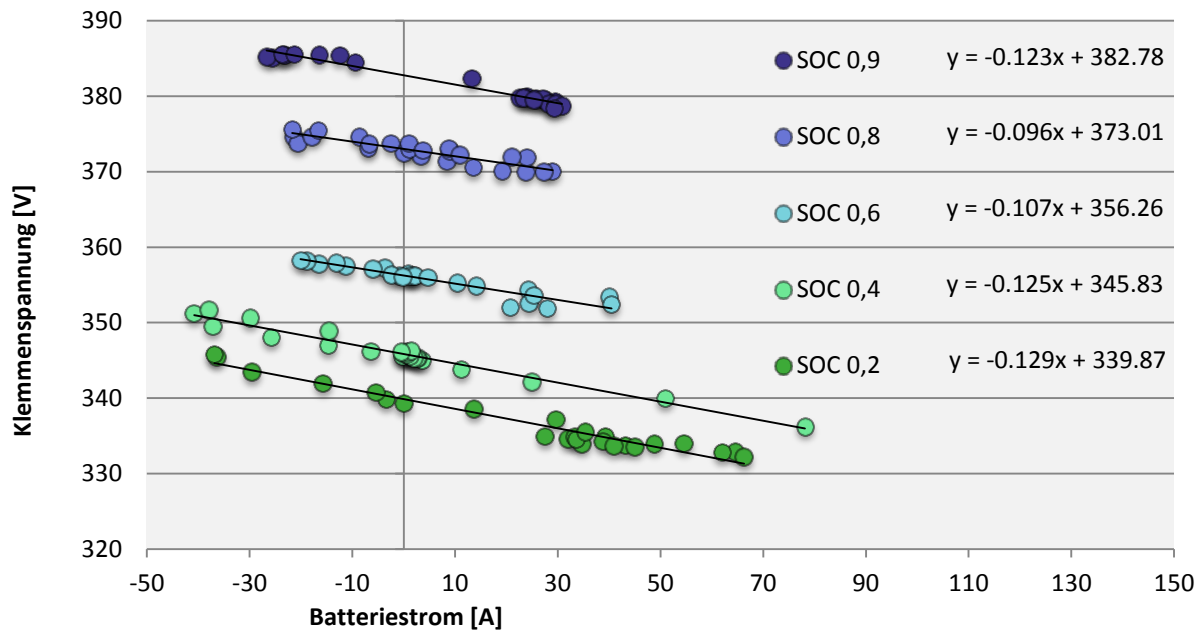


Abbildung 39: Ermittlung des Innenwiderstandes und Leerlaufspannung aus gemessenen Klemmenspannungen bei unterschiedlichem SOC

Aus dieser Erkenntnis ließen sich die Werte für die Leerlaufspannung in Abhängigkeit des Ladezustandes aus den Geradengleichungen in **Abbildung 39** bei $x=0$ (Stromstärke = 0) ermitteln. Die Bestimmung der Leerlaufspannung wurde für insgesamt acht Punkte durchgeführt (siehe **Abbildung 40**). Da die Punkte bei SOC=0, SOC=0,1 und SOC=1 außerhalb der nutzbaren Batterieladung liegen, wurden die Werte, in Anlehnung an den charakteristischen Spannungsverlauf von Lithium-Ionen Batterien, angenommen. Durch diese Punkte wurde ein Näherungspolynom 6. Ordnung gelegt, welches den Leerlaufspannungsverlauf im „BAT – File“ darstellt.

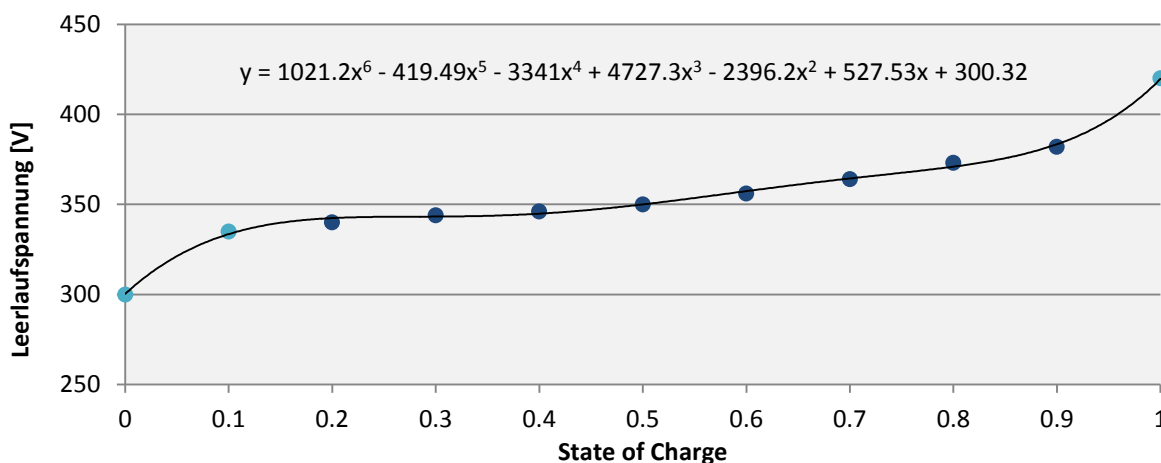


Abbildung 40: Leerlaufspannungsverlauf

Die Batterieladegrenzen liegen bei $SOC_{\min}=0,15$ und $SOC_{\max}=0,95$. Somit sind 80% von der Gesamtkapazität nutzbar, was ein guter Wert im Vergleich zu anderen Plug-In-Hybridfahrzeugen ist.

5.1.2.2 EMO – File

In diesem File sind die Parameter für die elektrische Maschine hinterlegt. Die Vollastlinie gibt die maximale Leistung in Bezug auf die Drehzahl an. Anders als bei Verbrennungsmotoren muss auch eine Vollastlinie für den negativen Leistungsbereich angegeben werden, was für die maximal rekuperierbare Leistung relevant ist. Außerdem ist das Wirkungsgradkennfeld des Elektromotors abgebildet, wo Wirkungsgrade in Abhängigkeit von Drehzahl und Leistung angegeben sind.

Als Erstbedatung des PHEM Modells wurde ein Wirkungsgradkennfeld eines früheren Hybridmodells übernommen und die Vollastlinien auf die Leistungsdaten des A3 e-tron angepasst. Dieses Kennfeld ist in **Abbildung 41** abgebildet. Der steile Abfall des Wirkungsgrades bei niedrigem Drehmoment und ein Maximum von 98% stellen un plausible Werte dar.

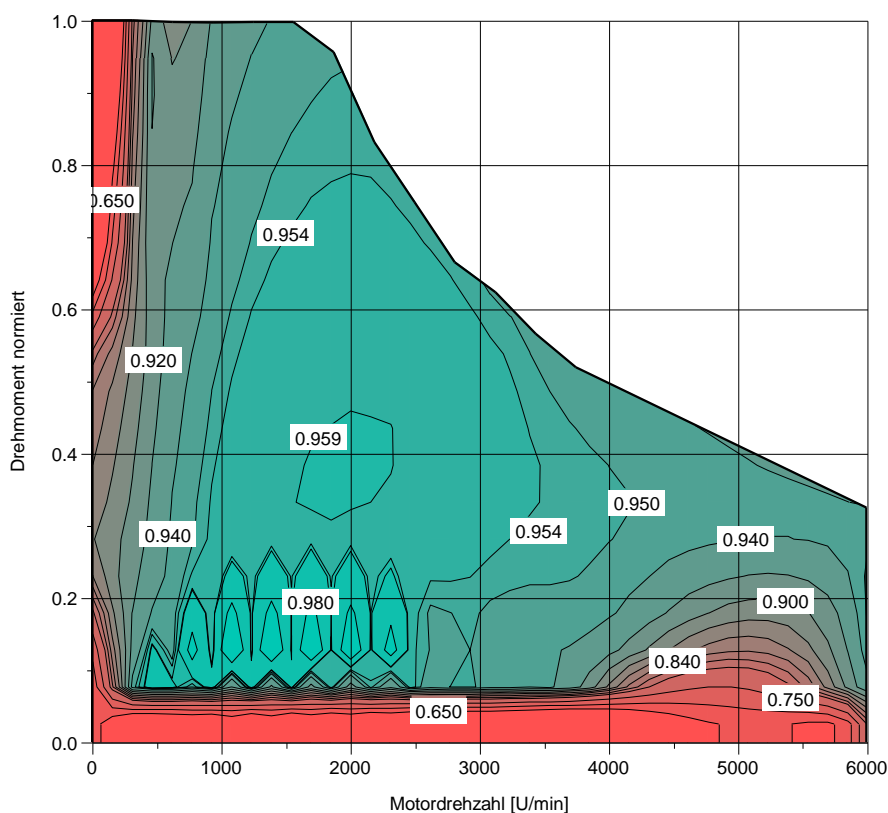


Abbildung 41: Elektromotor Wirkungsgradkennfeld Version_1

Wirkungsgradkennfelder sind schwer zu finden, da Hersteller diesbezüglich keine Daten preisgeben. Vom Institut für elektrische Antriebstechnik und Maschinen an der TU Graz erlangten wir ein Motorkennfeld eines Toyota Prius. Dessen Elektromotor ist ebenfalls eine permanenterrregte Synchronmaschine, was Voraussetzung für die Übernahme auf das „EMO – File“ des A3 e-tron war. Das Kennfeld wurde so aufskaliert, dass die maximale Leistung mit jener des A3 e-tron übereinstimmte. In der nachfolgenden Abbildung ist das Wirkungsgradkennfeld zu sehen.

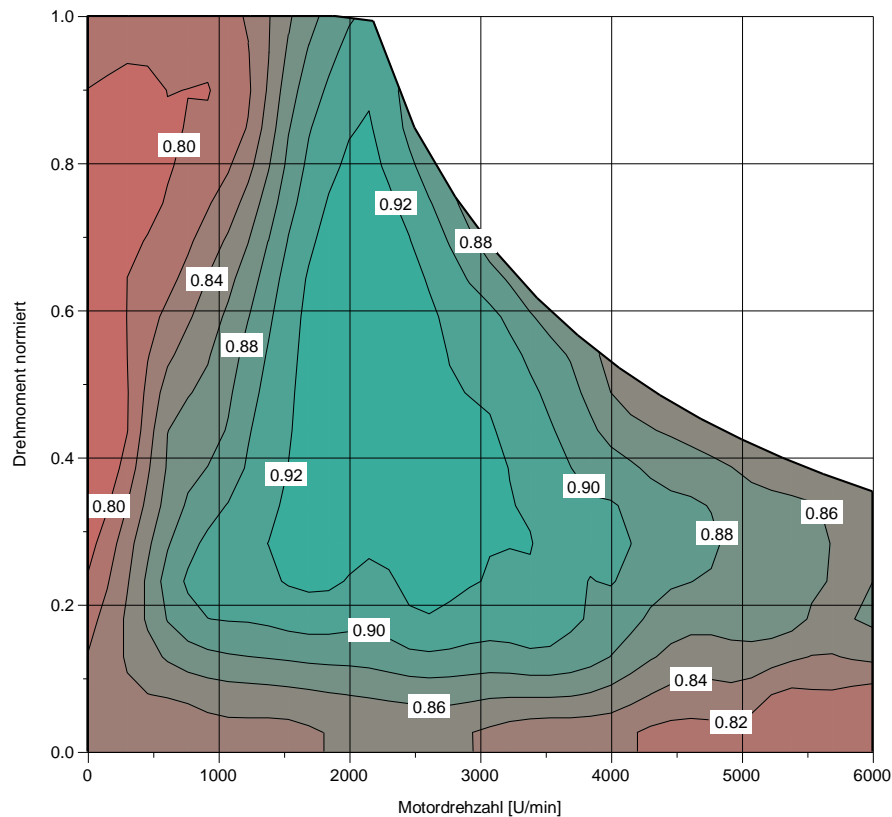


Abbildung 42: Elektromotor Wirkungsgradkennfeld Version_2

Da auf dem elektrischen Pfad zwischen Batterie und Elektromotor ein Umrichter zur Ansteuerung der Synchronmaschine existiert, muss dessen Wirkungsgrad in der Gesamtbetrachtung ebenfalls berücksichtigt werden. Der Wirkungsgrad des Umrichters weist eine Abhängigkeit von Drehzahl und Leistung auf, wobei die Abhängigkeit von der Leistung in unserem Modell vernachlässigt wurde. Der Wirkungsgradverlauf des Umrichters über der normierten Drehzahl ist in **Abbildung 43** dargestellt. Dieser ist über das gesamte Drehzahlband nahezu konstant und fällt bei niedriger Drehzahl ab.

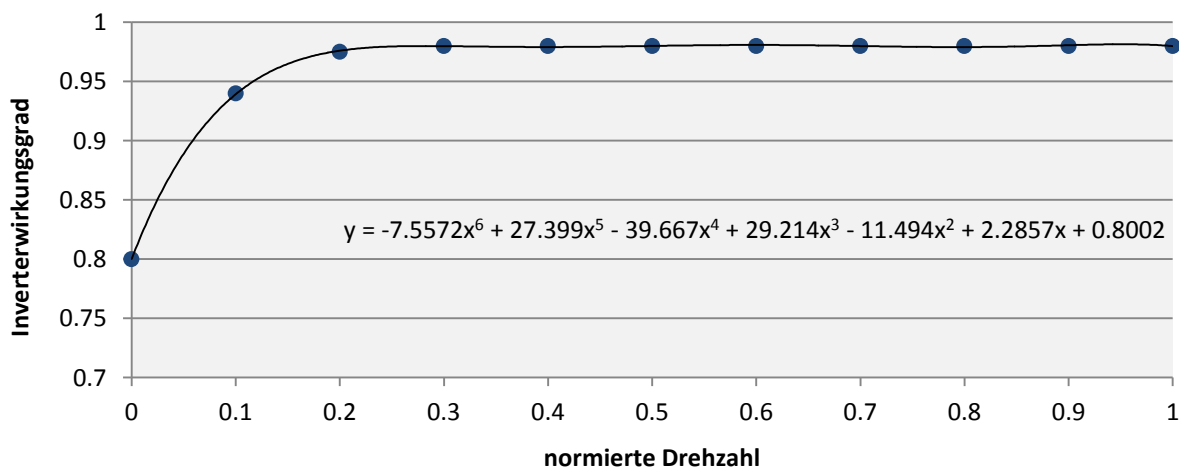


Abbildung 43: Wirkungsgradverlauf Umrichter [16]

Im PHEM muss der Umrichterwirkungsgrad im Wirkungsgradkennfeld des Elektromotors implementiert werden. Durch Multiplikation der jeweiligen Wirkungsgrade von Umrichter und Elektromotor resultierte das Kennfeld in **Abbildung 44**.

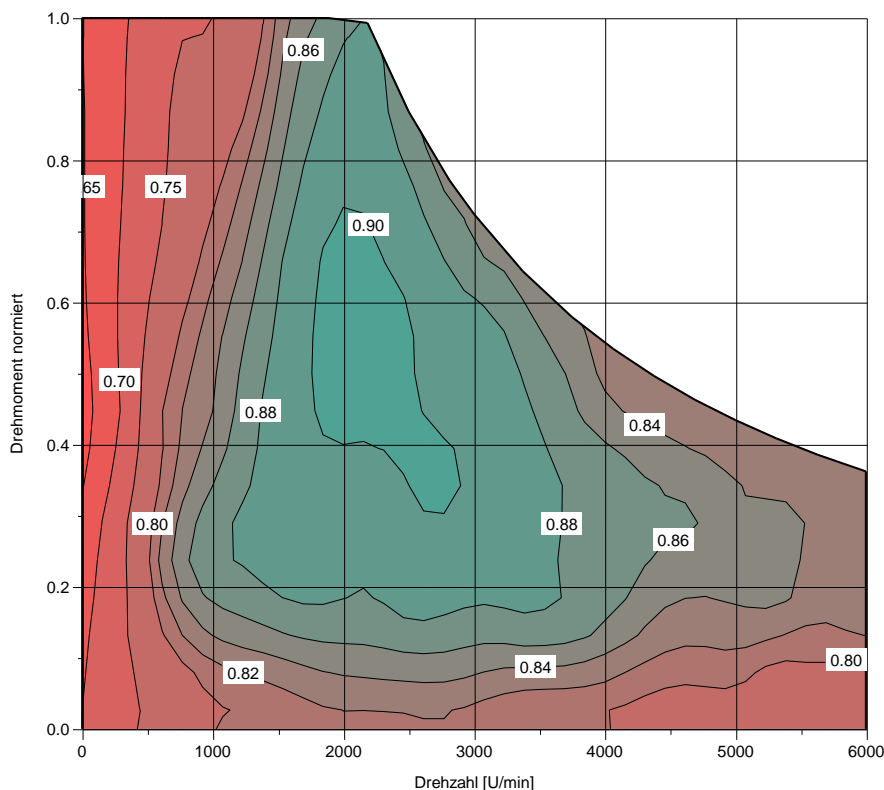


Abbildung 44: Elektromotor Wirkungsgradkennfeld Version_3

5.1.2.3 STE – File

Im „STE – File“ ist die Steuerkennlinie hinterlegt. Diese gibt die Hybridstrategie in Abhängigkeit des Ladezustandes vor. Da bei fast jedem Plug-In-Hybridfahrzeug ein Betriebsartschalter vorhanden ist, mit dem eine „charge-sustaining-operation“ oder „charge-depleting-operation“ gewählt werden kann, sind diese zwei Betriebsarten im PHEM über den Ladezustand der Batterie geregelt. Anhand der Steuerkennlinie in **Abbildung 45** soll die Betriebsstrategie in den eingezeichneten drei Bereichen erklärt werden. Als Wiederholung sei erwähnt, dass ein niedriger Wert des K_e – Faktors generieren zur Folge hat und ein hoher Wert assistieren. Plug-In-Hybridfahrzeuge sind für rein elektrische Fahrten beziehungsweise Fahrten bei denen die Batterieladung genutzt wird konzipiert, um an der Steckdose die verbrauchte elektrische Energie wieder aufzuladen. Diese Strategie wird im Bereich drei verfolgt, wo die Steuerkennlinie bei SOC_{max} ihren höchsten Wert erreicht um assistieren zu bevorzugen und die obere Ladegrenze nicht zu überschreiten. Die Höhe der Steuerkennlinie nimmt mit sinkendem Ladezustand ab und erreicht bei $SOC=0,5$ jenen Wert von Bereich zwei, der für den „charge-sustaining-mode“ ermittelt wurde. Die Ermittlung der Höhe der Steuerkennlinie für den Bereich zwei ist in **Abbildung 46** für den Audi A3 e-tron dargestellt. Hierfür wurde eine RDE – Fahrt als Fahrzyklus herangezogen. Im Bereich zwei wird also eine Strategie verfolgt, bei der die Batterieladung konstant gehalten wird. Um eine Unterschreitung des minimalen Ladezustandes zu vermeiden, sinkt die Steuerkennlinie im Bereich eins bei SOC_{min} auf ihr Minimum.

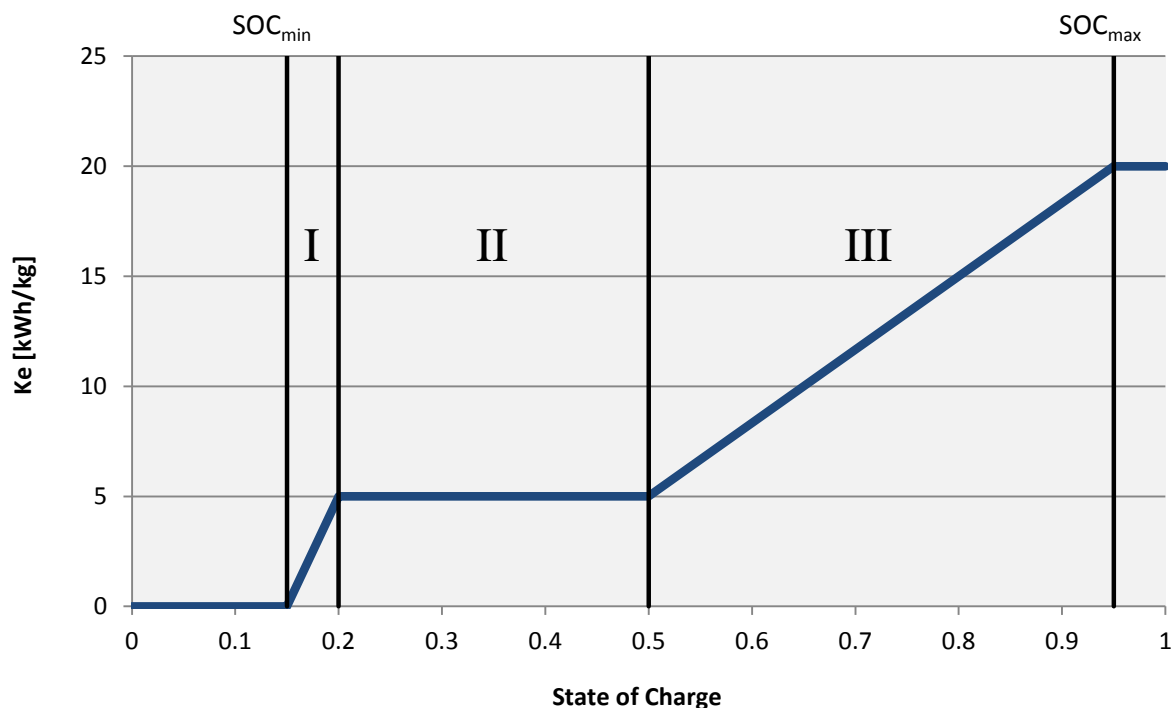


Abbildung 45: Wahl der Betriebsstrategie durch Steuerkennlinie

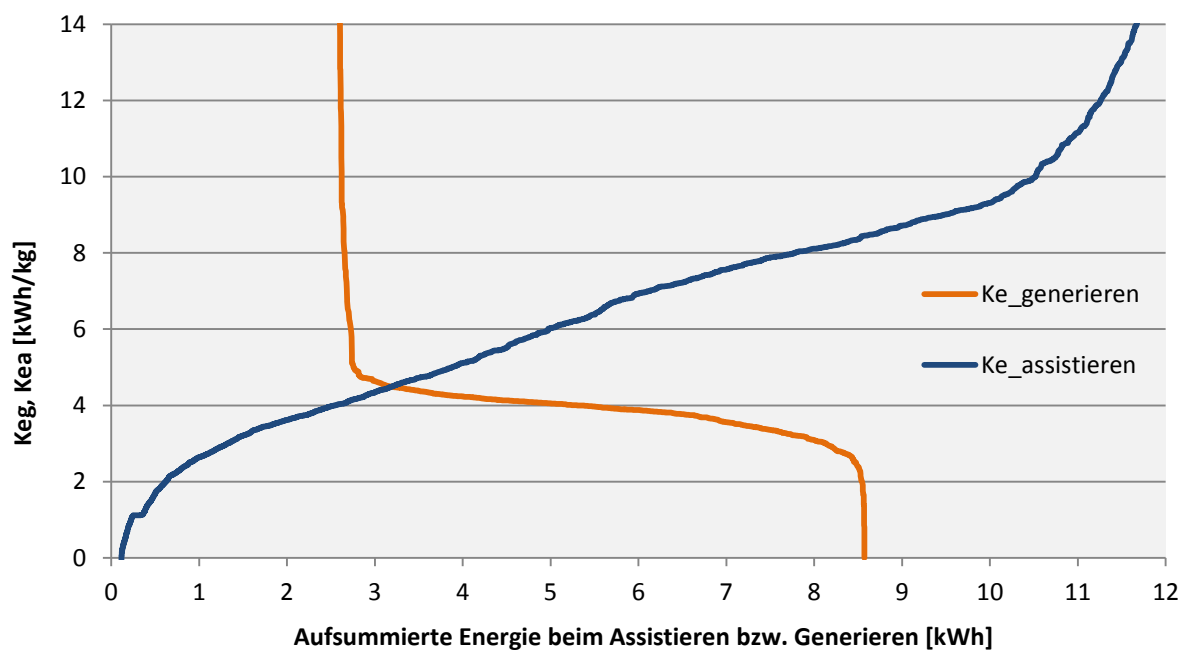


Abbildung 46: Ermittlung der Höhe der Steuerkennlinie

Im „STE – File“ werden außerdem Geschwindigkeitsbereiche definiert in denen unterschiedliche Antriebstrategien bevorzugt werden. So ist zum Beispiel beim Modell des A3 e-tron der Geschwindigkeitsbereich bis 30 km/h vorgegeben in dem primär elektrisch gefahren wird und der Bereich ab 100 km/h, wo der Verbrennungsmotor als Hauptantriebsquelle genutzt wird.

5.2 Ø – PHEV

Das Modell des durchschnittlichen Plug-In-Hybridfahrzeug im PHEM stellt ein fiktives Fahrzeug dar, das aus Zulassungsstatistiken und den Fahrzeugspezifikationen der jeweiligen Fahrzeuge erstellt wurde. Mit der PHEM Simulation dieses Fahrzeugs können die Verbrauchswerte der in Europa 2016 zugelassenen PHEVs für verschiedene Fahrzyklen ermittelt werden.

Die Anpassung dieses PHEM Modells erfolgte an den Daten die aus den Zulassungsstatistiken für das Ø – PHEV ermittelt wurden (siehe Kapitel 4).

5.2.1 Allgemeine Daten

5.2.1.1 VEH - File

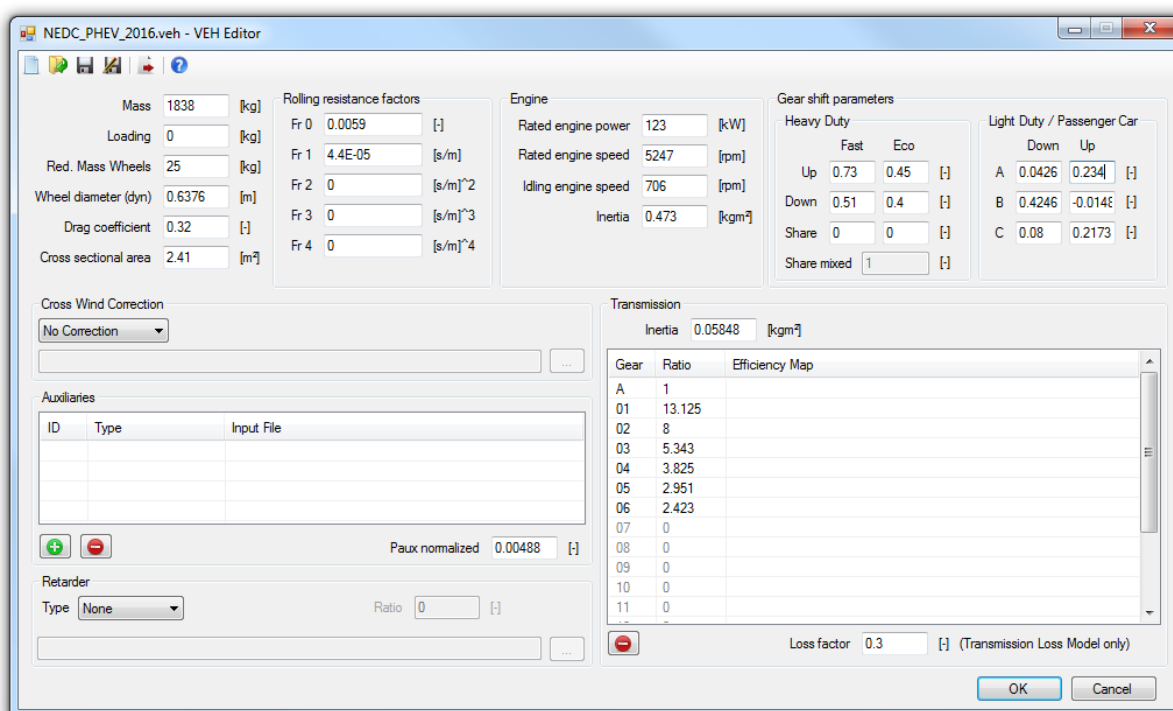


Abbildung 47: VEH – File des Ø – PHEV

In der oberen Abbildung sind die Eingabeparameter für das „VEH – File“ ersichtlich. Die Fahrzeugtestmasse für den NEDZ Zyklus berechnet sich aus der DIN Leermasse plus 100 kg. Für Simulationen mit dem WLTC musste die entsprechende Testmasse für den WLTP ermittelt werden. Die Berechnung dieser Testmasse ist nachfolgend anhand eines Auszugs aus dem Gesetzestext erläutert. Rollwiderstandskoeffizienten, sowie Getriebeübersetzungen und das Schaltmodell wurden vom Modell des A3 e-torn übernommen. Der Luftwiderstandsbeiwert c_w und die Querschnittsfläche A_q stammen aus institutsinternen Default Werten für das Fahrzeugsegment. Spezifikationen des Verbrennungsmotors stammen aus den Daten des Ø – PHEV.

Auszug aus dem Gesetzestext für WLTP zur Ermittlung der Fahrzeugtestmasse:

“Test mass of the vehicle means the sum of the actual mass of the vehicle, 25 kg and the mass representative of the vehicle load.

Actual mass of the vehicle means the mass in running order plus the mass of the fitted optional equipment to an individual vehicle.

Mass in running order means the mass of the vehicle, with its fuel tank(s) filled to at least 90 per cent of its or their capacity/capacities, including the mass of the driver, fuel and liquids, fitted with the standard equipment in accordance with the manufacturer’s specifications and, when they are fitted, the mass of the bodywork, the cabin, the coupling and the spare wheel(s) as well as the tools.

Mass of the driver means a mass rated at 75 kg located at the driver’s seating reference point.

Mass of the optional equipment means maximum mass of the combinations of optional equipment which may be fitted to the vehicle in addition to the standard equipment in accordance with the manufacturer's specifications.

Mass representative of the vehicle load means x per cent of the maximum vehicle load where x is 15 per cent for category 1 vehicles and 28 per cent for category 2 vehicles.

Maximum vehicle load means the technically permissible maximum laden mass minus the mass in running order, 25 kg and the mass of the optional equipment

Category 1 vehicle means a power driven vehicle with four or more wheels designed and constructed primarily for the carriage of one or more persons.

Category 2 vehicle means a power driven vehicle with four or more wheels designed and constructed primarily for the carriage of goods. This category shall also include:

(a) Tractive units;

(b) Chassis designed specifically to be equipped with special equipment.” [17]

Hieraus lässt sich folgende Formel ableiten:

$$\begin{aligned}
 & m_{\text{WLTP}} \\
 & = \text{actual mass of the vehicle (= mass in running order (= kerb mass} \\
 & + \text{mass of the driver) + mass of fitted optional equipment) + 25kg} \\
 & + \text{mass representative of vehicle load (0,15} \\
 & * \text{maximum vehicle load (maximum laden mass} \\
 & - \text{mass in running order - 25kg - mass of optional equipment)}
 \end{aligned}
 \tag{5-3}$$

Im nachfolgenden Baumdiagramm ist die Ermittlung der Fahrzeugtestmasse für den WLTC übersichtlich dargestellt. Als Vereinfachung wurde die Masse für die Zusatzausstattung nicht berücksichtigt.

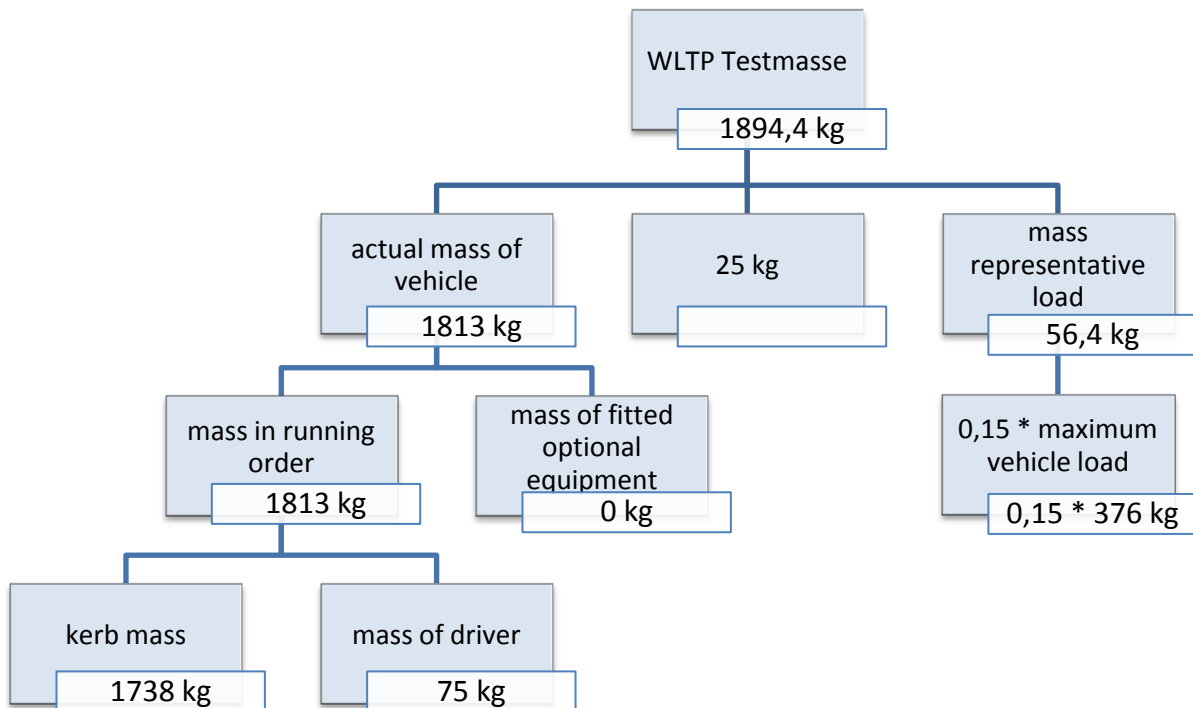


Abbildung 48: Baumdiagramm zur Ermittlung der WLTP – Testmasse

5.2.1.2 MAP - File

Bei Simulationen mit dem korrigierten „MAP – File“ des A3 e-tron sind zu geringe Verbrauchswerte ermittelt worden. Deshalb wurde für das Ø – PHEV das generische Motorkennfeld verwendet, welches als Basis für die Kennfeldanpassung des A3 e-tron herangezogen wurde. Dieses Kennfeld repräsentiert das durchschnittliche Ottomotorkennfeld einer Motorengeneration im Jahr 2013.

Die Emissionskennfelder für NO_x und CO wurden von einem Diplomanden übernommen, der Untersuchungen an Ottomotoren mit Direkteinspritzung durchführte und daraus ein Durchschnittsmodell eines Benzinfahrzeuges erstellte [18]. Die Verwendung von diesen durchschnittlichen Emissionskennfeldern bilden die Eigenschaften des durchschnittlichen PHEVs wesentlich besser ab als das Kennfeld des gemessenen Audi A3 e-tron.

5.2.1.3 FLD - File

Die Vollastkurve wurde vom Verbrennungsmotor des Audi A3 e-tron übernommen, da die meisten PHEVs ebenfalls einen aufgeladenen Ottomotor besitzen, und daher konzeptbedingt einen ähnlichen Verlauf der Vollastkurve aufweisen.

5.2.2 HEV – Daten

5.2.2.1 BAT – File

Die Nennspannung der Hochvoltbatterie ist beim A3 e-tron mit 330 Volt angegeben. Beim Ø – PHEV wurde eine Nennspannung von 314 Volt errechnet und liegt somit 16 Volt unter jener des A3 e-tron. Der ermittelte Leerlaufspannungsverlauf des A3 e-tron wurde für das Ø – PHEV um 16 Volt nach unten verschoben (siehe **Abbildung 49**). Beim Polynom 6. Ordnung zur Nachbildung des Leerlaufspannungsverlaufs ändert sich somit nur den Offset um 16 Volt.

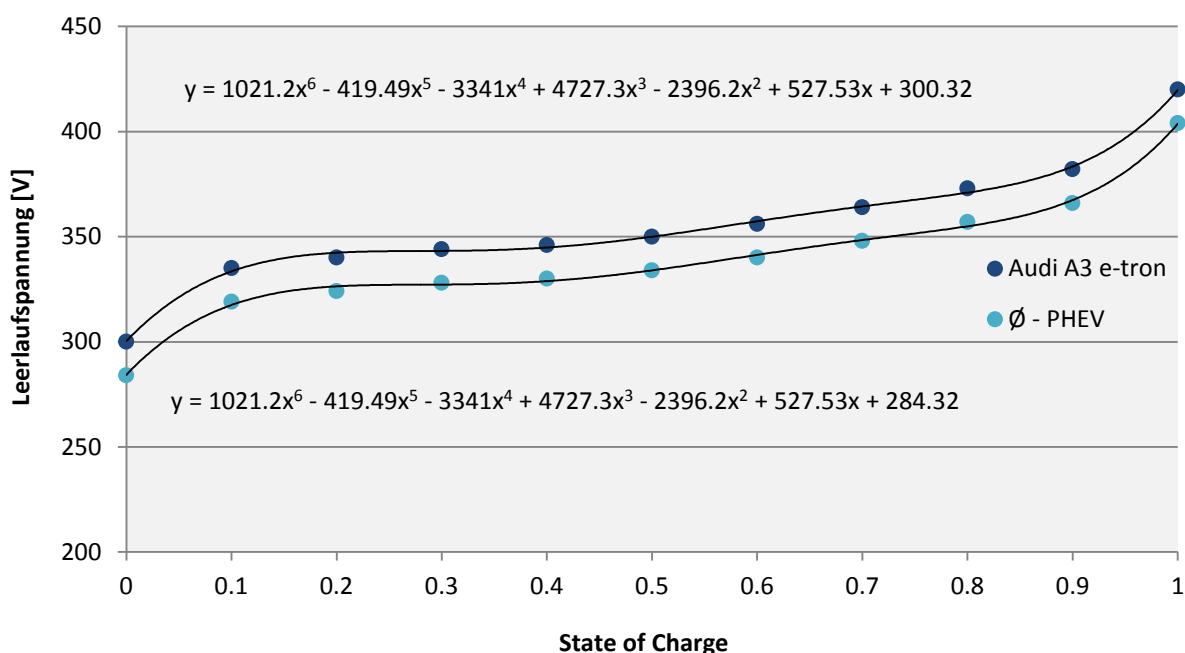


Abbildung 49: Leerlaufspannungsverlauf Audi A3 e-tron & Ø - PHEV

Außerdem musste im „BAT – File“ die Bruttokapazität der Batterie auf den Wert von 8,8 kWh bei gegebener Nennspannung abgeändert werden. Alle anderen Parameter wurden vom A3 e-tron übernommen.

5.2.2.2 EMO – File

Das Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Maschine mit inkludiertem Inverterwirkungsgrad des Ø – PHEV stammt ebenfalls aus dem PHEM Modell des A3 e-tron. Die Leistung wurde dafür auf den vorgegebenen Wert von 79 kW skaliert.

5.2.2.3 STE – File

Auch „STE – File“ konnte unverändert aus dem Modell des A3 e-tron übernommen werden.

6 Ergebnisse

Mit den erstellten PHEM - Modellen wurden verschiedenste Fahrzyklen simuliert, Messergebnisse mit simulierten Werten verglichen, sowie Untersuchungen zu den Emissionsfaktoren von Plug-In-Hybridfahrzeugen durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Masterarbeit war noch unklar wie der Normverbrauch eines PHEV im WLTP gesetzlich errechnet wird. Aus diesem Grund und damit die Ergebnisse besser verglichen werden konnten, wurde dieselbe Berechnungsformel zur Ermittlung des Normverbrauchs im WLTP herangezogen wie für die Prozedur im NEDC verwendet wurde.

6.1 PHEM – Simulation Audi A3 e-tron

Das Modell des Audi A3 e-tron wurde so angepasst, dass der vom Hersteller angegebene Normverbrauch im NEDC erreicht wurde. In die Berechnung des Normverbrauchs fließt auch die elektrische Reichweite mit ein. Deshalb war auch die Simulation der elektrischen Reichweite von Bedeutung.

Nachfolgend ist die Verbrauchsermittlung eines Hybridfahrzeuges im NEDC anhand von PHEM Simulationen dargestellt. Die Formel zur Verbrauchsermittlung wurde schon in Kapitel 1.4 beschrieben und wird hier zum besseren Verständnis nochmals angegeben. Es wurde für die Verbrauchsermittlung die Methode der „elektrischen Reichweite“ angewandt.

$$M = \frac{D_e \cdot M_{1e} + D_{av} \cdot M_2}{D_e + D_{av}} \quad (6-1)$$

MGesamtkraftstoffverbrauch [l/100km]

M_{1e}Kraftstoffverbrauch bei voller Batterie [l/100km]

M_2 Kraftstoffverbrauch bei leerer Batterie [l/100km]

D_eelektrische Reichweite [km]

D_{av} 25 km (willkürlich festgelegte Strecke zwischen zwei Batterieladungen)

Bei voller Batterie ist es dem A3 e-tron möglich die gesamte Strecke des NEDC rein elektrisch zurückzulegen, wodurch „ M_{1e} “ null ergibt. Aus Formel (6-1) leitet sich (6-2) ab.

$$M = \frac{D_{av} \cdot M_2}{D_e + D_{av}} \quad (6-2)$$

M_2 ist der Kraftstoffverbrauch bei leerer Batterie. In anderen Worten ist es jener Kraftstoffverbrauch bei dem nur die elektrische Energie zum Antrieb genutzt werden darf, welche während des Zyklus durch Rekuperation gewonnen wird. Die Differenz des Ladezustandes zwischen Anfang und Ende des Fahrzyklus muss null ergeben. Da bei der PHEM Simulation nur der Ladezustand zu Beginn der Simulation angegeben werden kann, behilft man sich der linearen Interpolation zur Ermittlung des Verbrauchswertes bei ausgeglichenem Ladezustand. Dafür werden mindestens zwei Simulationen mit unterschiedlichem „Start – SOC“ durchgeführt, wobei eine Simulation eine negative

Ladebilanz und die andere eine positive Ladebilanz ergeben muss. Zwischen diesen zwei Verbrauchswerten wird der Verbrauch bei „ $\Delta SOC = 0$ “ ermittelt, was den Wert für M_2 ergibt. In **Abbildung 50** wurde mithilfe einer linearen Trendlinie der Verbrauch bei „ $\Delta SOC = 0$ “ berechnet.

Üblicherweise wird der Kraftstoffverbrauch in Liter pro 100 Kilometer angegeben. Deshalb müssen die Ergebnisse aus der Simulation in „Gramm Benzin pro Kilometer“ anhand der Dichte des Kraftstoffs umgerechnet werden. Außerdem ist in der Gesetzgebung zur Ermittlung des Normverbrauchs ein Fahrzyklus mit Kaltstart vorgegeben. Im PHEM kann der Kaltstart und der damit verbundene Mehrverbrauch jedoch nicht simuliert werden. Deshalb wird der Verbrauchswert M_2 mit einem Kaltstartfaktor multipliziert. Dieser wurde am Institut für den NEDC empirisch ermittelt.

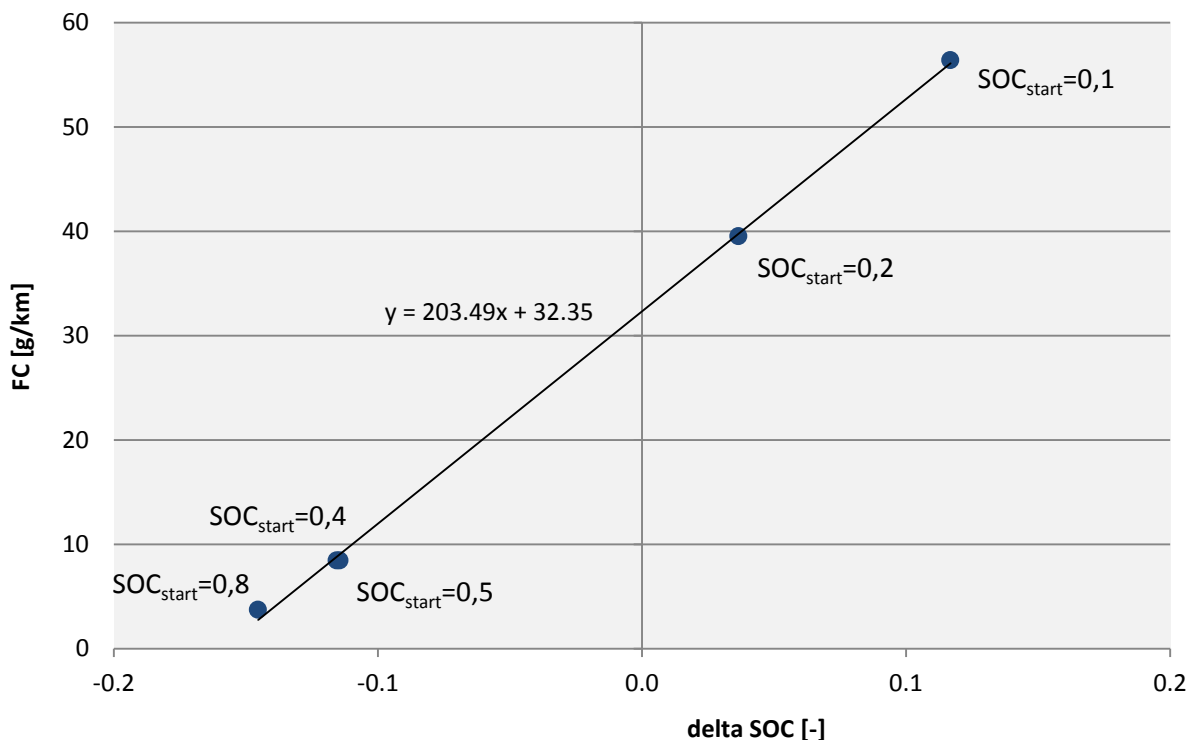


Abbildung 50: Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bei „ $\Delta SOC = 0$ “

Zur Bestimmung der elektrischen Reichweite wurde ein NEDC mit rein elektrischem Antrieb simuliert und der Verbrauch der elektrischen Energie pro Kilometer ermittelt. Wenn man die Nettobatteriekapazität mit dem elektrischen Energieverbrauch dividiert erhält man die elektrische Reichweite des Fahrzeugs.

$$D_e = \frac{E_{Bat} \cdot (SOC_{max} - SOC_{min})}{EC} \quad (6-3)$$

E_{Bat}Bruttokapazität der Batterie [kWh]

SOC_{max}maximale Ladegrenze

SOC_{min} minimale Ladegrenze

ECelektrischer Energieverbrauch bei rein elektrischem Antrieb [kWh/km]

Die Berechnungsformel für den Normverbrauch in „Liter pro 100 km“ lautet:

$$M = \frac{25 \cdot \frac{M_2}{\rho_{Benzin} \cdot 1000} \cdot 100 \cdot K_1}{D_e + 25} \quad (6-4)$$

ρ_{Benzin}Dichte von Benzin (=0,74 kg/m³)

K_1Kaltstartfaktor (=1,08)

Zum Vergleich sind die unterschiedlichen Simulationsergebnisse vom NEDC und WLTC dargestellt (siehe **Abbildung 51** und **Abbildung 52**). Im NEDC konnte eine elektrische Reichweite von 50,8 km ermittelt werden und weicht somit nur marginal von den 50 km der Herstellerangabe ab. Für den WLTC ist die simulierte Reichweite wesentlich geringer, was vor allem auf die höheren Geschwindigkeiten in diesem Zyklus zurückzuführen ist. Beim korrigierten Kraftstoffverbrauch, der eine ausgeglichene Ladebilanz darstellt, ist kaum ein Unterschied festzustellen. Der berechnete Normverbrauch ist im WLTC um 21% höher als im NEDC. Der Unterschied entsteht vorrangig aufgrund der niedrigeren elektrischen Reichweite, was sich entsprechend stark im Normverbrauch widerspiegelt.

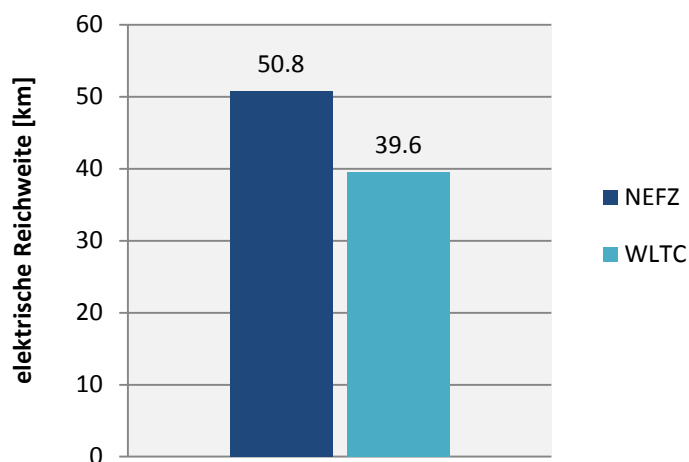


Abbildung 51: Vergleich der elektrischen Reichweite im NEDC und WLTC des A3 e-tron

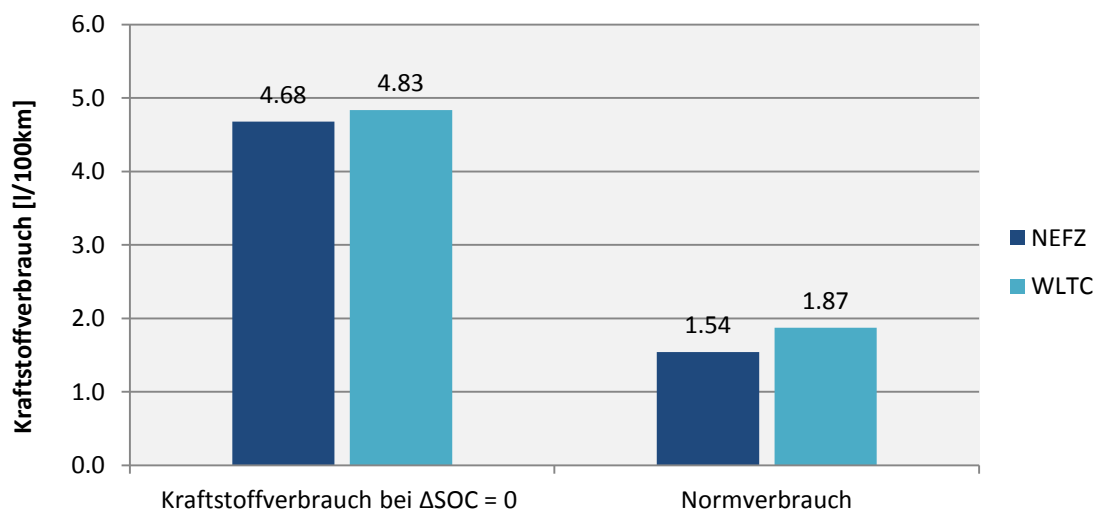


Abbildung 52: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs im NEDC und WLTC des A3 e-tron

Für die Messung von RDE wurde die Ries – Route von drei unterschiedlichen Fahrzeugkern und dementsprechend verschiedenen Fahrstilen gefahren. Obwohl die RDE - Fahrten im „charge-sustainable-mode“ gefahren wurden, war die Ladebilanz nicht exakt ausgeglichen. Der Abgebildete Kraftstoffverbrauch bei den Messergebnissen der Ries Routen wurde aus den gemessenen CO₂ – Emissionen errechnet, wobei für die Umrechnung auf den Kraftstoffverbrauch in l/100km ein Faktor von 3,153 und eine Dichte von Benzin mit 0,74 kg/dm³ verwendet wurde. Um einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten anstellen zu können, wurde der Verbrauchswert der Simulationen auf die Ladebilanz der RDE - Fahrten korrigiert.

Der Verbrauchswert der Simulationen wurde zuerst bei „ $\Delta\text{SOC}=0$ “ ermittelt und anschließend mit der Verbrauchsdifferenz in Abhängigkeit der Ladebilanz korrigiert. Diese Verbrauchsdifferenz wurde aus der Steigung der Geraden errechnet, welche aus der Geradengleichungen in **Abbildung 53** entnommen wurde.

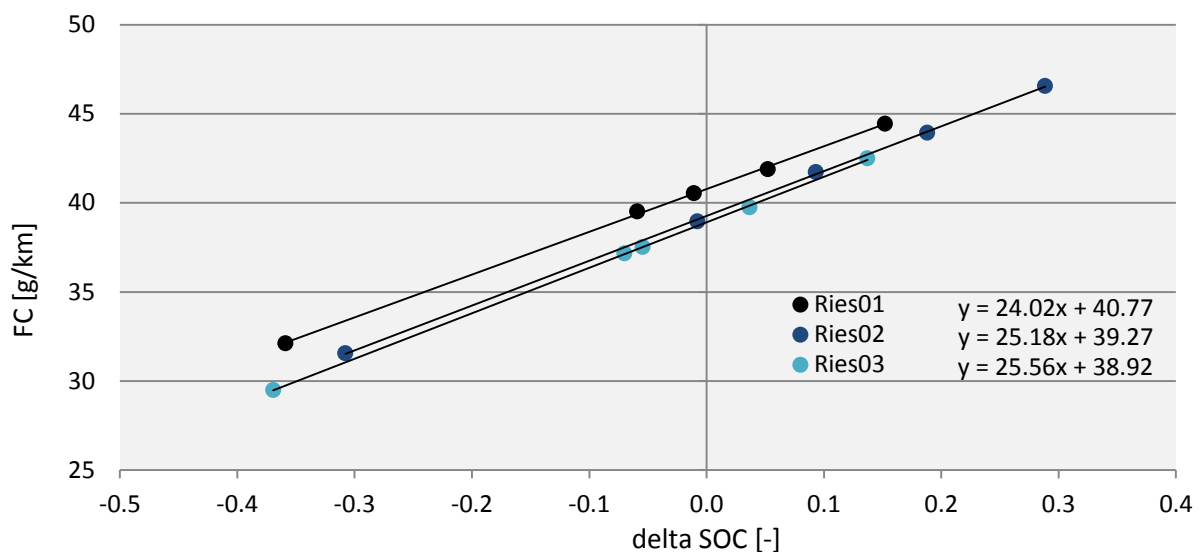


Abbildung 53: Simulationsergebnisse der Ries – Routen mit unterschiedlichem Start – SOC

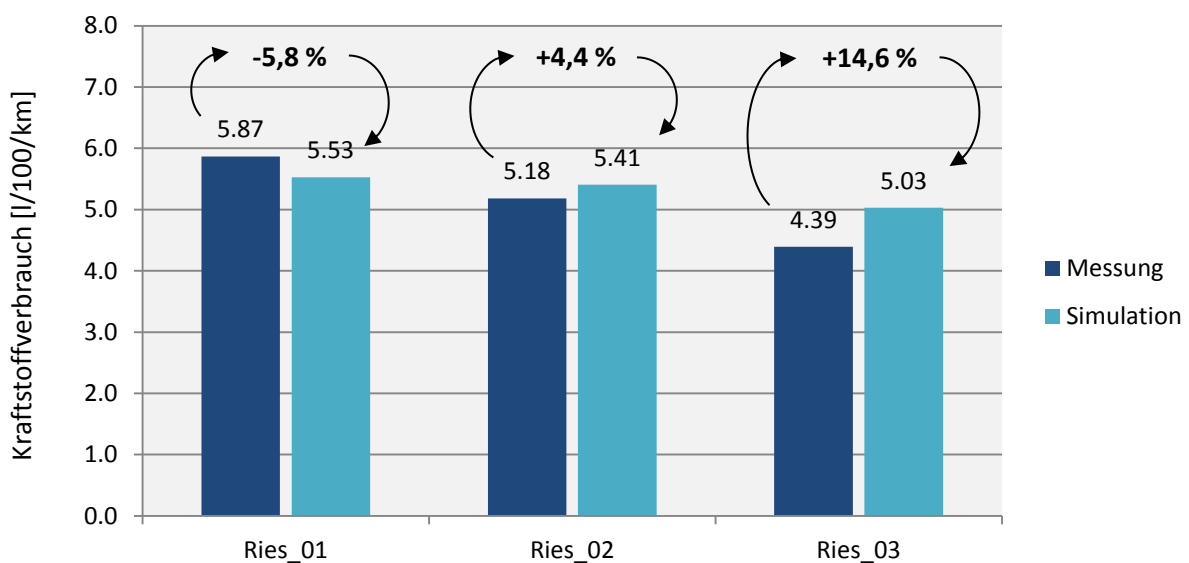


Abbildung 54: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von Messung und Simulation der RDE – Fahrten

Die Abweichungen von Messung und Simulation sind auf Unsicherheiten der Randbedingungen zurückzuführen. Zum Beispiel haben Wind und Temperatur einen Einfluss auf die Ergebnisse der RDE – Fahrten, welche bei den Simulationen nicht berücksichtigt werden können. Außerdem bringen das Schaltmodell sowie die Hybridstrategien Unsicherheiten mit sich.

6.2 PHEM – Simulation \emptyset – PHEV

Mit dem \emptyset – PHEV Fahrzeug wurden zuerst die Fahrzyklen simuliert, welche zur Bestimmung des Normverbrauchs von Bedeutung waren. Simulationen von RDE – Fahrten wurden nicht durchgeführt, da keine Vergleiche mit Messdaten dieses fiktiven Fahrzeugs herangezogen werden konnten. Verbrauchssimulationen von realen Fahrsituationen mit realistischen elektrischem Fahranteil werden im Unterkapitel 6.2.1 näher untersucht.

Die Bestimmung des Normverbrauchs wurde mit derselben Vorgehensweise wie beim A3 e-tron Modell durchgeführt. Aus den Simulationen mit rein elektrischem Antrieb wurden die elektrischen Reichweiten für NEDC und WLTC berechnet. Wie auch beim A3 e-tron ist die elektrische Reichweite (siehe **Abbildung 55**) im WLTC deutlich niedriger, was auf denselben Grund zurückzuführen ist. Der korrigierte Kraftstoffverbrauch, bezogen auf „ $\Delta\text{SOC}=0$ “, ist im WLTC um 12% höher, was ungefähr den allgemeinen Prognosen des Mehrverbrauchs im Vergleich zum NEDC entspricht. Der Unterschied im berechneten Normverbrauch ist mit 29% deutlich größer. Hier spielt wiederum die wesentlich geringere Reichweite im WLTC eine Rolle.

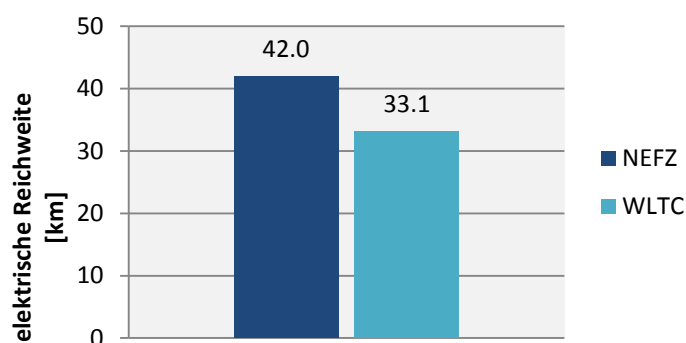


Abbildung 55: Vergleich der elektrischen Reichweite im NEDC und WLTC des \emptyset – PHEV

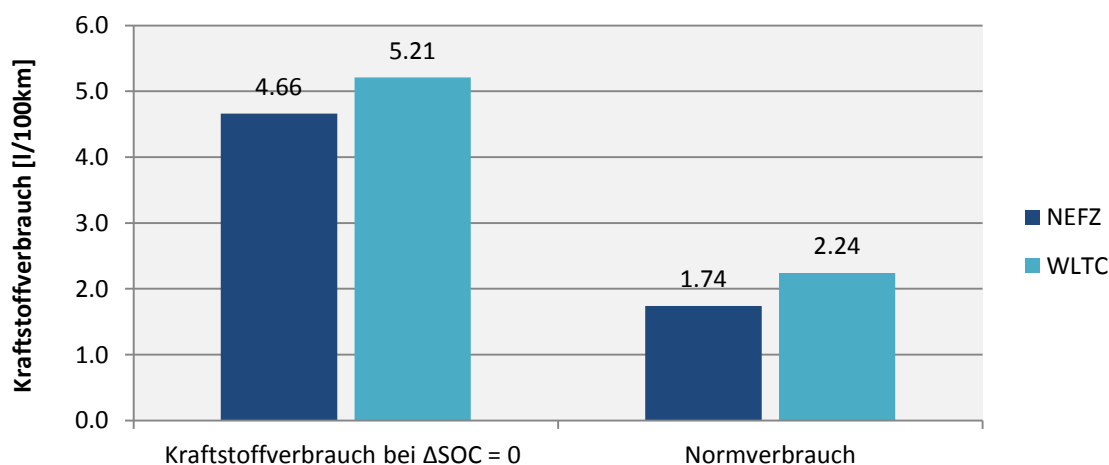


Abbildung 56: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs im NEDC und WLTC des \emptyset – PHEV

In den folgenden Diagrammen soll dargestellt werden wie effizient die jeweiligen Antriebsarten (VKM, Elektromotor) mit der eingesetzten Energie (Kraftstoffenergie, elektrische Energie) umgehen. Dazu wird das \emptyset – PHEV als rein VKM betriebenes Fahrzeug und als EV in einem Fahrzyklus mit Geschwindigkeitsstufen simuliert. Abgebildet sind die anteiligen Verluste durch Energieumwandlung, im Verbrennungsmotor und Elektromotor, sowie Verluste im gesamten Antriebstrang und die Fahrwiderstände. Diese aus der PHEM Simulation erhaltenen Werte sind über der Geschwindigkeit aufgetragen, wobei die Fahrgeschwindigkeit jeweils eine Konstantfahrt darstellt. Die Leistung der Nebenaggregate wird nicht dargestellt.

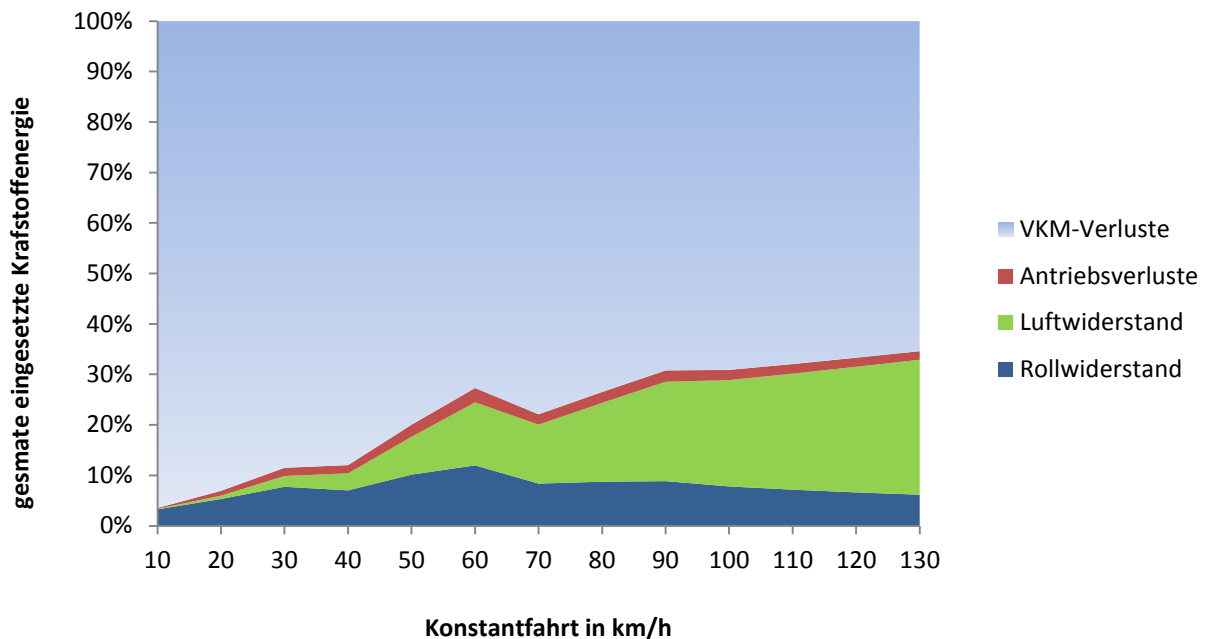


Abbildung 57: PHEM – Simulation des \emptyset -PHEV mit reinem VKM – Betrieb in Konstantfahrten bei ebener Fahrbahn

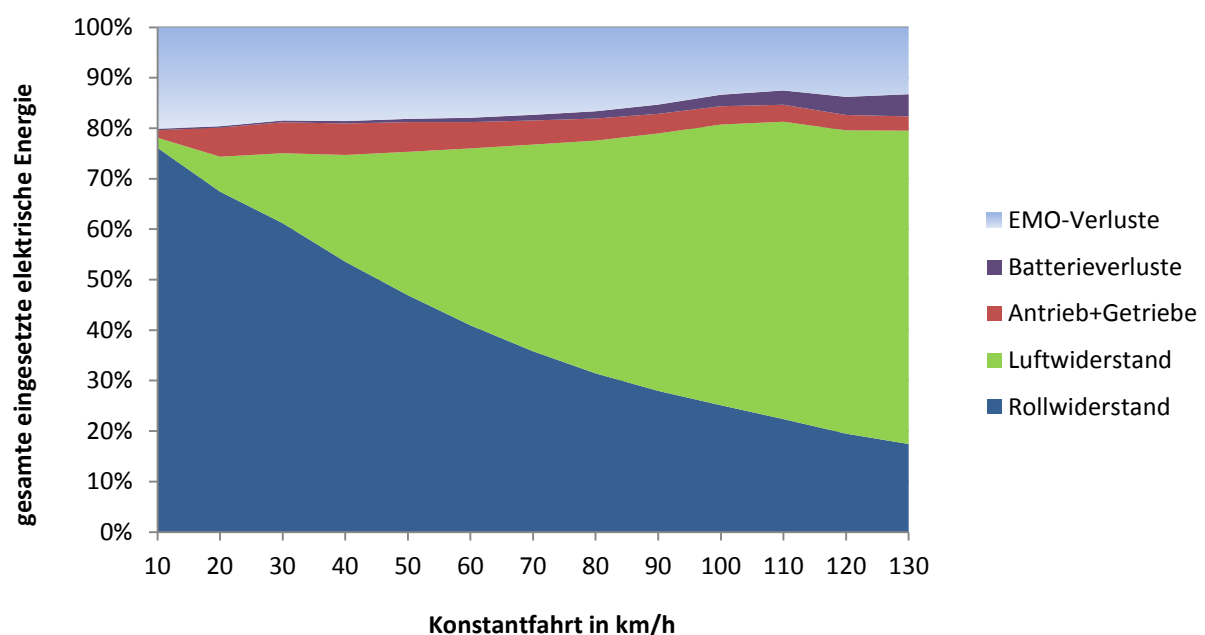


Abbildung 58: PHEM – Simulation des \emptyset -PHEV im EV Modus in Konstantfahrten bei ebener Fahrbahn

Betrachtet man nur die „tank-to-wheel“ Effizienz ist unverkennbar, dass das EV in **Abbildung 58** wesentlich effizienter mit der eingesetzten Energie umgeht als das Fahrzeug mit herkömmlichen Antrieb in **Abbildung 57**. Natürlich muss für die Gesamtbetrachtung auch der „well-to-tank“ Wirkungsgrad für die Herstellung der jeweiligen Antriebsenergie berücksichtigt werden.

Für den Kraftstoff Benzin kann ein „well-to-tank“ Wirkungsgrad von 82% angenommen werden. Dieser Wert wird sich in Zukunft noch weiter verschlechtern beispielsweise durch die Gewinnung von Schweröl aus Ölsand was mit einem wesentlich höheren Energieeinsatz verbunden ist oder den steigenden Energiebedarf bei der Raffinerie durch höhere Anforderungen an die Kraftstoffqualität (schwefelarme Kraftstoffe).

Bei der Erzeugung von elektrischer Energie ist das Herstellungsverfahren entscheidend. So erreichen moderne GuD (Gas und Dampf) Kraftwerke einen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60%. Für die Stromerzeugung aus regenerativen Quellen wird keine Primärenergie benötigt. Es muss lediglich der Energieaufwand für die Erstellung der Anlagen beachtet werden.

Der elektrische Antrieb macht vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten, wie zum Beispiel im Stadtverkehr, Sinn, wo herkömmlich angetriebene Fahrzeuge ihren schlechtesten Wirkungsgrad aufweisen.

6.2.1 HBEFA

HBEFA (Handbook of Emission Factors for Road Transport) wurde ursprünglich von Umweltschutzorganisationen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz gegründet. Mittlerweile sind weitere Länder wie Schweden, Norwegen und Frankreich involviert. Dieses Tool stellt Emissionsfaktoren für unterschiedliche Fahrzeugkategorien, Emissionsklassen etc. zur Verfügung. Die Emissionsfaktoren in Gramm je Kilometer sind für eine Vielzahl von Verkehrssituationen berechnet worden. Die Berechnung der Faktoren erfolgt in Simulationsprogrammen wie PHEM. Die aktuelle HBEFA Version 3.3 wurde im April 2017 veröffentlicht, in der eine Anpassung der Emissionsfaktoren für NO_x erfolgte. Die Implementierung von Plug-In-Hybridfahrzeugen wird voraussichtlich mit dem Update auf die Version 4.1 im ersten Halbjahr 2018 erfolgen. Das Programm gibt die gewünschten Emissionsfaktoren entweder als gewichtete Emissionsfaktoren pro Fahrzeugkategorie oder als Emissionsfaktoren pro Konzept aus. Die Faktoren beziehen sich immer auf „heiße“ Emissionen. Kaltstartemissionen in g/Start können als Zusatzemissionen angezeigt werden.

Für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für das \emptyset – PHEV wurden eine Vielzahl von vorgegebenen Fahrzyklen simuliert. Jedem Fahrzyklus ist ein Gewichtungsfaktor zugeteilt, der die Simulationsergebnisse des jeweiligen Fahrzyklus entsprechend wertet um eine reale Verteilung von Fahrsituationen darzustellen. Die große Unbekannte bei Plug-In-Hybridfahrzeugen ist der elektrische Fahranteil, sprich wie oft man den Akku an der Steckdose nachlädt. Informationen hierzu gibt es nur spärlich. In einem Bericht eines Forschungsprojekts [19] wird ein Wert von 60% elektrischem Fahranteil genannt. Allerdings ist das ein Prognosewert für das Jahr 2020, mit der Annahme einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur. Für das Jahr 2016 wird in dieser Masterarbeit, für die Ermittlung der well-to-wheel Emissionen, ein elektrischer Fahranteil von 35% angenommen.

Die Punkte in den nachfolgenden Diagrammen stellen die CO₂ – Emissionen eines Zyklus über der durchschnittlichen Zyklusgeschwindigkeit dar. Insgesamt sind 257 Fahrzyklen mit Fahrbahnneigungen von -6% bis +6% simuliert worden.

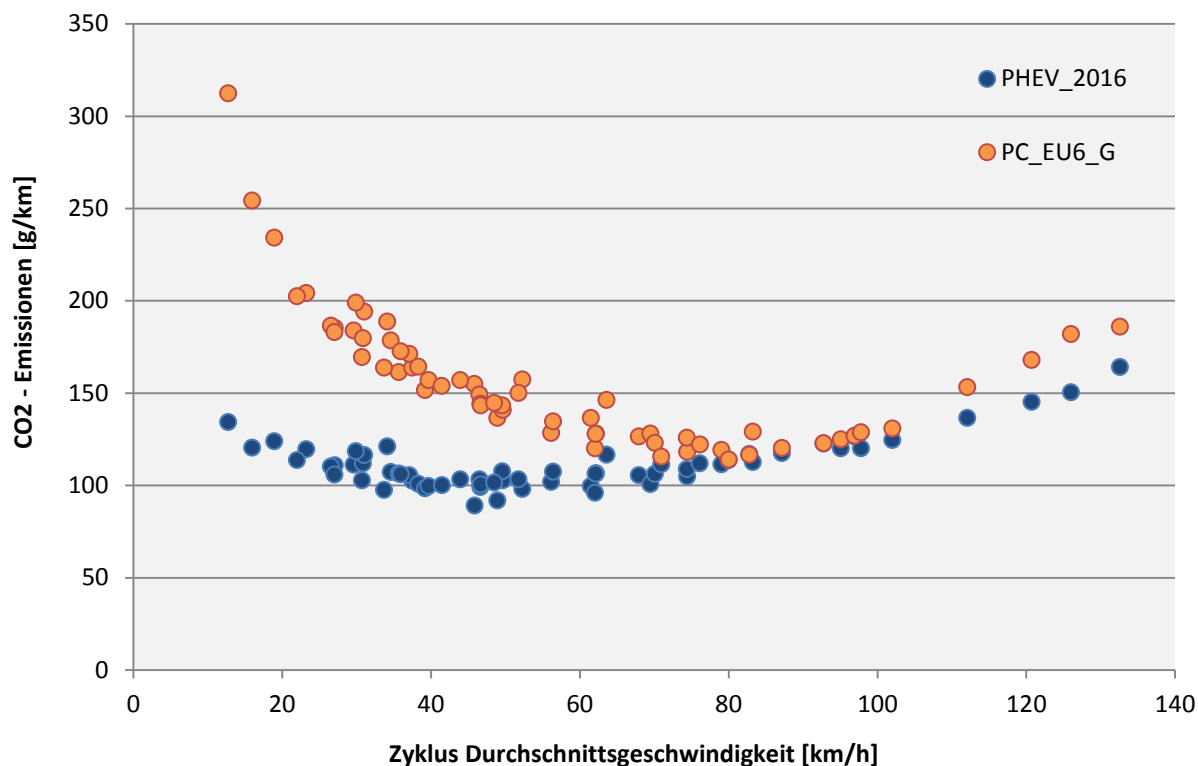


Abbildung 59: Vergleich der CO₂ – Emissionen vom PHEV und PC_EU6_G (der EURO 6 Benzin-PKW entspricht der Version aus HBEFA 3.2 aus dem Jahr 2012 und basiert auf nur einem gemessenen Kfz)

In **Abbildung 59** sind die CO₂ – Emissionen vom PHEV_2016 und PC_EU6_G dargestellt, wobei nur die Fahrzyklen mit 0% Steigung herausgefiltert wurden. Die Verbrauchswerte des Hybridfahrzeugs beziehen sich, für eine bessere Vergleichbarkeit, auf eine ausgeglichene Ladebilanz. Der elektrische Fahranteil ist also 0%, was bedeutet, dass keine elektrische Energie aus der Steckdose für den Antrieb genutzt wird. Das abgebildete Hybridmodell entspricht in diesem Fall einem Voll – Hybridfahrzeug. Als Vergleichsfahrzeug wurde ein bestehendes PHEM Benzinfahrzeug herangezogen, das die Emissionsklasse EU6 und eine Motorengeneration von 2012 repräsentiert. Somit ist der Kraftstoffverbrauch dieses Fahrzeugs nicht mit aktuellen Fahrzeugen mit modernster Motortechnologie vergleichbar. Dies muss beim den folgenden Vergleichen im Hinterkopf behalten werden.

Die Verbrauchsvorteile des Hybridfahrzeugs liegen bei Fahrzyklen mit niedriger Durchschnittsgeschwindigkeit, die auch als Stadtzyklen angesehen werden können. Das Einsparungspotential bei diesen Zyklen von über 50%, ist auf die Rekuperation von elektrischer Bremsenergie und der effiziente Einsatz dieser gewonnenen Energie in Beschleunigungsphasen zurückzuführen. Bei Zyklen mit mittleren bis hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten und weniger dynamischeren Fahrprofilen, schwindet dieser Vorteil, weshalb sich die Verbräuche beider Fahrzeugkategorien annähern.

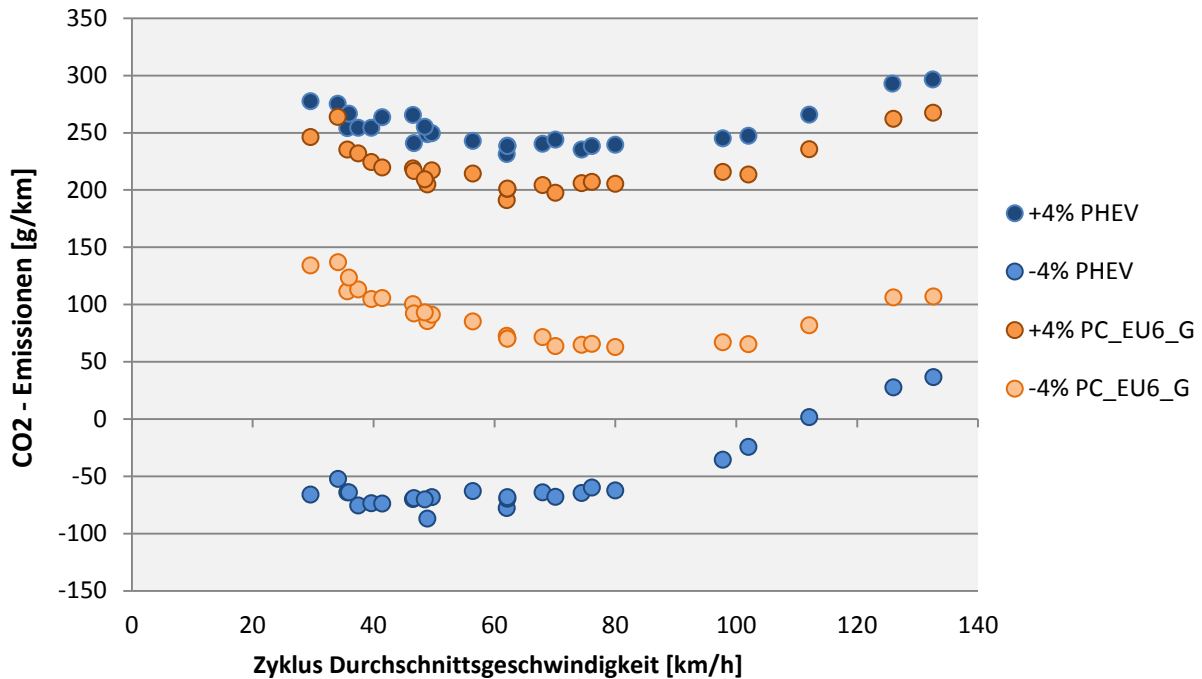


Abbildung 60: Vergleich der TTW Emissionen mit unterschiedlichen Fahrbahnneigungen

Des Weiteren wurden die tank-to-wheel Emissionen der beiden Fahrzeugkategorien für Fahrzyklen mit Fahrbahnneigungen von +4% und -4% verglichen. Die CO₂ – Emissionen des PHEV sind auch in **Abbildung 60** auf eine ausgeglichene Ladebilanz bezogen.

Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bei „ $\Delta\text{SOC}=0$ “ durch Variation des „Start-SOC“, wie sie am Anfang des Kapitels erläutert wurde, wäre für diese Anzahl an Fahrzyklen zu aufwändig. Deshalb behalf man sich mit einer Formel zur Berechnung des korrigierten Kraftstoffverbrauchs bei „ $\Delta\text{SOC}=0$ “. Die Formel errechnet aus der Ladebilanz (ΔSOC) und dem Batteriewirkungsgrad eines Zyklus ein Kraftstoffäquivalent. Das berechnete Kraftstoffäquivalent wird dem simulierten Kraftstoffverbrauch, abhängig von einer positiven oder negativen Batteriebilanz, dazu addiert oder subtrahiert.

$$FC_{corr} = FC + \Delta FC \quad (6-5)$$

FC_{corr} korrigierte Kraftstoffverbrauch, bezogen auf $\Delta\text{SOC}=0$ [g/km]

FC Kraftstoffverbrauch aus PEHM Simulationsergebnis [g/km]

ΔFC Korrekturwert des Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit des simulierten ΔSOC [g/km]

$$\Delta FC = \frac{\Delta E_{i_Bat} \cdot 220 \left[\frac{g}{kWh} \right]}{\eta_{Laden} \cdot s} \quad (6-6)$$

ΔE_{i_Bat} Differenz der Energiemenge vor und nach dem Fahrzyklus [kWh]

η_{Laden} Ladewirkungsgrad [-]

s Zykluslänge [km]

Der Faktor 220 g/kWh wurde aus Simulationenwerten dieses Fahrzeuges ermittelt, indem die sekundlichen Werte von Kraftstoffverbrauch und Leistung in einem Diagramm abgebildet wurden. Aus der Steigung einer Regressionsgeraden folgt dieser Faktor in g/kWh.

Bei Fahrzyklen mit negativer Fahrbahnneigung wird beim Hybridfahrzeug Bremsenergie rekuperiert, wodurch die Batterie geladen wird und eine positive Ladebilanz über den Zyklus entsteht. Bei der Berechnung des korrigierten Kraftstoffverbrauchs kann deshalb ein negativer Kraftstoffverbrauch errechnet werden. Diese negativen Werte müssen als Energieäquivalent angesehen werden und dürfen nicht auf null korrigiert werden, da für die Berechnung der tank-to-wheel oder well-to-wheel Emissionen dieser Fahrzeugkategorie die rekuperierte Energie in Form der negativen Verbrauchswerte berücksichtigt werden muss.

Durch die höhere Masse des PHEVs sind die Verbrauchswerte bei einer Steigung von +4% über den Werten des PC_EU6_G. Durch Rekuperation bei negativer Fahrbahnneigung wird dieser Verbrauchsnaheile jedoch wieder egalisiert. Die große Differenz des Kraftstoffverbrauchs bei negativem Gefälle kann damit begründet werden, dass bei herkömmlichen Fahrzeugen der Verbrennungsmotor geschleppt wird und abhängig von der Größe der Schleppeistung immer noch ein Kraftstoffverbrauch vorliegt. Bei Hybridfahrzeugen hingegen wird der Verbrennungsmotor in keiner Fahrsituation geschleppt, sondern ausgekuppelt und abgestellt und die überschüssige Energie rekuperiert.

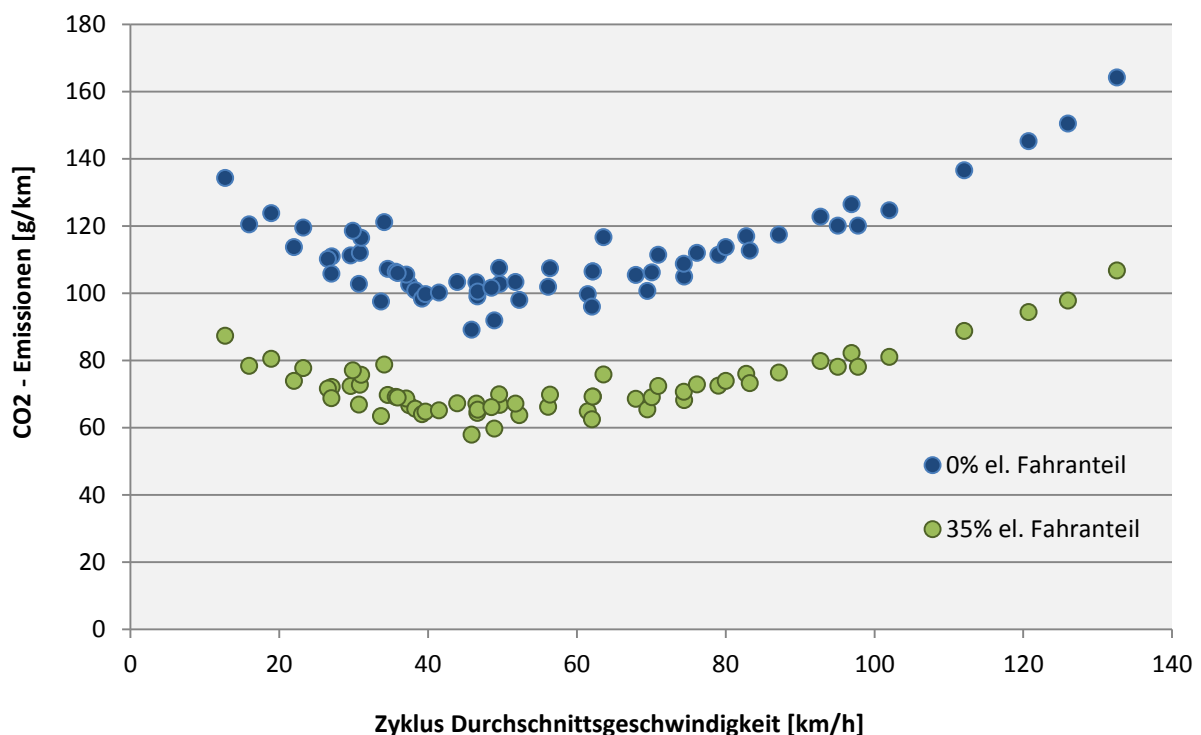


Abbildung 61: CO₂ Emissionen durch Einbeziehen des elektrischen Fahranteils

In der oberen Abbildung werden die Verbrauchswerte des PHEV bei 0% Fahrbahnneigung und unterschiedlichen elektrischen Fahranteilen dargestellt. Die tank-to-wheel Emissionen unter Berücksichtigung des elektrischen Fahranteils berechnen sich wie folgt:

$$CO_{2_TTW} = \left(\frac{K_{EF}}{100} \cdot FC_{el} + \left(1 - \frac{K_{EF}}{100} \right) \cdot FC_{ICE} \right) \cdot 3,153 \quad (6-7)$$

CO_{2_TTW} Kohlendioxid – Emissionen [g/km]

K_{EF} elektrischer Fahranteil [%]

FC_{el} Kraftstoffverbrauch bei elektrischem Antrieb = 0 [g/km]

FC_{ICE} Kraftstoffverbrauch bei herkömmlichem Antrieb [g/km]

Der Faktor 3,153 dient zur Umrechnung der Kraftstoffmasse Benzin auf Masse CO₂ und kann über das Molmassenverhältnis und den Kohlenstoffanteil im Benzin hergeleitet werden.

Für die Berechnung der well-to-wheel Emissionen müssen auch die Emissionen bei der Herstellung der jeweiligen Energie berücksichtigt werden. Beim PHEV muss dafür der elektrische Energieverbrauch bekannt sein. Hierfür wurde das PHEV für alle Fahrzyklen im elektrischen Modus simuliert und der elektrische Verbrauch eines Zyklus in Kilowattstunden pro km ermittelt. Die well-to-wheel Emissionen berechnen sich unter Berücksichtigung des elektrischen Fahranteils folgendermaßen:

$$CO_{2_WTW} = \frac{K_{EF}}{100} \cdot EC \cdot K_{CO_2} + \left(\left(1 - \frac{K_{EF}}{100} \right) \cdot \frac{FC_{ICE}}{\eta_{Benzin}} \right) \cdot 3,153 \quad (6-8)$$

EC elektrischer Verbrauch [kWh/km]

K_{CO_2} Emissionsfaktor für den Strommix in Europa [gCO₂/kWh]

η_{Benzin} Herstellungswirkungsgrad von Benzin [%]

	Einheit	Wert
Emissionsfaktor Strommix Europa	[g/kWh]	480
Herstellungswirkungsgrad Benzin [20]	[%]	82

Tabelle 10: Kennwerte zur Berechnung der WTW Emissionen

Als Ergebnis sind die tank-to-wheel und well-to-wheel Emissionen des PHEV mit unterschiedlichen elektrischen Fahranteilen im Vergleich zum PC_EU6_G dargestellt (siehe **Tabelle 11**).

	tank-to-wheel		well-to-wheel
	gCO ₂ /km	l/100km	gCO ₂ /km
PC_EU6_G	158.9	6.82	193.8
PHEV_2016 0% el. Fahranteil	117.6	5.05	143.4
PHEV_2016 35% el. Fahranteil	76.4	3.28	122.2

Tabelle 11: Simulierte Emissionswerte von WTW, TTW

Auch ohne das PHEV an der Steckdose aufzuladen können die tank-to-wheel Emissionen im Vergleich zum herkömmlichen Euro 6 Benzinfahrzeug um 26% reduziert werden. Beim Vergleich der well-to-wheel Emissionen des PHEV mit 35% elektrischem Fahranteil und dem herkömmlichen Benzinfahrzeug ist die CO₂ Belastung um 37% geringer.

Mit steigendem elektrischem Fahranteil und sinkendem Wert des Emissionsfaktors für die Stromerzeugung, steigen die Emissionsvorteile des Plug-In-Hybridfahrzeugs.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem erstellten Modell des durchschnittlichen Plug-In-Hybridfahrzeugs konnten anhand von Simulationen die Vor- und Nachteile von PHEVs in Bezug auf Kraftstoffverbrauch aufgezeigt werden. Vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten und im städtischen Bereich wo viele Brems- und Beschleunigungsphasen auftreten, kommen die Vorteile der Hybridisierung zum Tragen. Begründet durch den höheren Wirkungsgrad der elektrischen Antriebsstrecke im Vergleich zum herkömmlichen Antrieb und der Bremsenergieerückgewinnung in Bremsphasen. Für Langstrecken auf denen die Batterie des PHEV nicht aufgeladen wird, sind die Verbrauchseinsparungen der komplexen Antriebseinheit sehr gering. Deshalb haben herkömmliche Fahrzeuge für Fahrten auf Langstrecken immer noch ihre Berechtigung.

Der Realverbrauch eines PHEV ist bekanntlich stark vom elektrischen Fahranteil abhängig. In Zukunft wird die öffentliche Ladeinfrastruktur vermutlich stark wachsen, wodurch der elektrische Fahranteil von Plug-In-Hybridfahrzeugen im realen Straßenverkehr deutlich steigen und der Kraftstoffverbrauch sinken könnte. Bei der Berechnungsformel des Normverbrauchs resultiert der elektrische Fahranteil aus der elektrischen Reichweite des Fahrzeugs. Am Beispiel des A3 e-tron mit 50 km elektrischer Reichweite geht ein elektrischer Fahranteil von $50/(25+50)=2/3$ aus der Berechnungsformel hervor. Beim Q7 mit 56 km elektrischer Reichweite sind es sogar $56/(25+56)=7/10$. Die Nutzung der elektrischen Fortbewegung hängt aber auch vom Leistungsgewicht der elektrischen Maschine bezogen auf die Fahrzeugmasse ab. Als Beispiel können die beiden Plug-In-Hybridfahrzeuge von Audi verglichen werden. Der A3 e-tron besitzt eine elektrische Maschine mit 75 kW Spitzenleistung und 330 Nm Drehmoment und eine Fahrzeugleermasse von 1540 kg. Beim Q7 sind es 94 kW und 350 Nm auf 2545 kg. Mit dem A3 e-tron ist eine durchaus dynamische Fahrweise im reinen Elektromodus möglich, wohingegen die elektrische Maschine des Q7 mit der hohen Leermasse zu kämpfen hat und das Fahrzeug sich eher träge bewegen lässt. Da versteht es sich von selbst, dass der elektrische Fahranteil beim Q7, aufgrund des niedrigeren Leistungsgewichts, geringer ausfallen wird als beim A3. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Potential zur Kraftstoffeinsparung durch elektrisches Fahren auch von der Höhe der elektrischen Leistung abhängt.

Für die ökologische Bewertung eines Plug-In-Hybridfahrzeugs muss die Gesamt-CO₂-Bilanz inklusive Herstellung betrachtet werden. Bekanntlich ist die Herstellung von Akkumulatoren sehr energieaufwendig, weshalb Elektrofahrzeuge im Allgemeinen eine höhere CO₂ Belastung bei der Herstellung aufweisen als herkömmliche Fahrzeuge. Da PHEVs die Technik und Komponenten der beiden Fahrzeugkonzepte vereinen, ist es fraglich ob die Kraftstoffeinsparungen während des Betriebs den höheren Energieaufwand zur Herstellung des Fahrzeugs ausgleichen können. Dies hängt wieder davon ab, wie häufig die Batterie am Stromnetz geladen wird bzw. wie hoch der elektrische Fahranteil damit ist. Mit steigenden Stückzahlen und dem Einsatz von erneuerbaren Energiequellen zur Batterieproduktion wird die CO₂ Belastung bei der Herstellung von PHEVs jedoch weiter sinken. Um den CO₂ Ausstoß während des Betriebs zu minimieren, sollte möglichst oft der elektrische Fahrmodus gewählt werden und das Nachladen der Batterie aus erneuerbaren Energien erfolgen. Unter diesen Umständen ist eine Verbesserung der CO₂ Bilanz eines PHEV im Vergleich zu herkömmlichen PKWs möglich.

Die aktuellen Diskussionen um „Dieselverbote“ in deutschen Städten und oder das Verbot von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, wie es Frankreich für das Jahr 2040 ausgesprochen hat, lassen die Elektrifizierung als sehr wahrscheinlich erscheinen. Auch England, Deutschland und weitere Länder planen eine Verbrennungsmotor-freie Zukunft. Bis es soweit

kommt werden aber mithilfe von Hybridisierung und Elektrifizierung die Emissionen herkömmlicher Fahrzeuge wo weit als möglich reduziert.

Die **Abbildung 62** zeigt wie die Zusammensetzung der weltweiten Neuzulassungen aussehen könnte. In der Grafik wird die Verteilung der Antriebstechnologien für 2050 von Brennstoffzelle, Elektromotor und Plug-In-Hybrid zu gleichen Teilen prognostiziert.

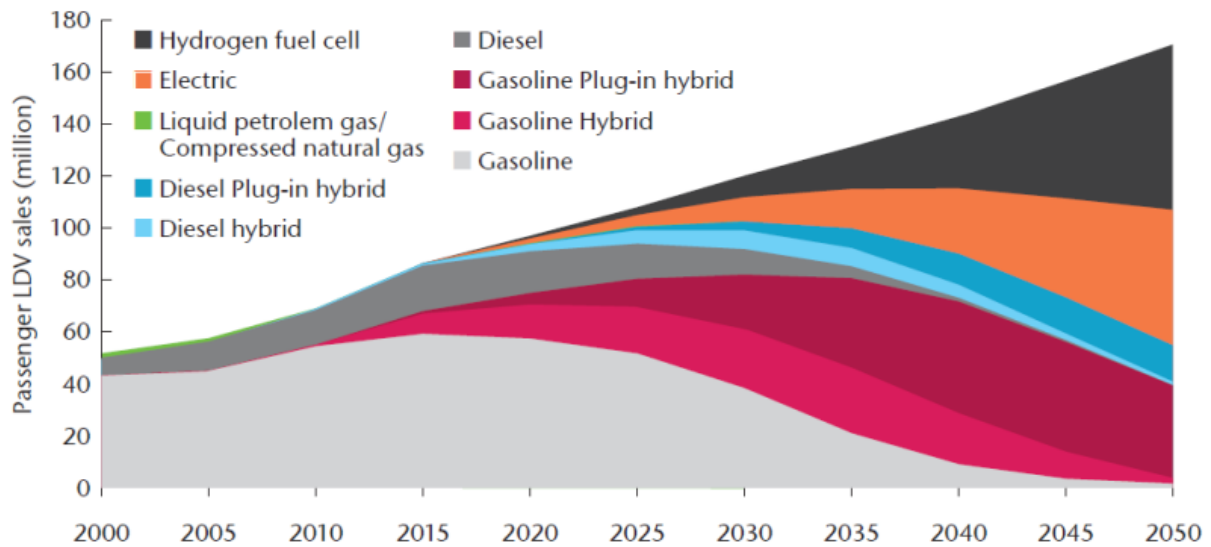


Abbildung 62: Prognose der weltweiten Flottenzusammensetzung von Neuzulassungen [11]

8 Literaturverzeichnis

- [1] „Abgasnorm“, *Wikipedia*. 18-Mai-2017.
- [2] Delphi, Hrsg., „Worldwide Emissions Standards, Passenger Cars and Light Duty Vehicles“. 2018-2017.
- [3] Peter Hofmann, *Hybridfahrzeuge*, 2. Aufl. Wien: Springer, 2010.
- [4] Klaus Mollenhauer und Helmut Tschöke, *Handbuch Dieselmotoren*, 3. Aufl. 2007.
- [5] Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Theodor Sams, „Skriptum TU Graz, Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil I“. 10-Nov-2010.
- [6] Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Stefan Hausberger, „Skriptum TU Graz, Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I“. 08-März-2015.
- [7] „Neue Prüfnorm ISO 16890“, 03-Aug-2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.recknagel-online.de/aktuell/produkte/03-08-2016-neue-pruefnorm-iso-16890-wer-feinstaubfilter-sagt-sollte-auch-pm1-partikel-meinen/>. [Zugegriffen: 12-Juli-2017].
- [8] Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende, Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss, und Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, *15. Internationales Stuttgarter Symposium*. Springer Vieweg, 2015.
- [9] Stephan Smode, „Diplomarbeit an der TU Graz, Simulation und Messung eines Hybrid-PKW in Bezug auf ökonomischen Fahrstil“. 2013.
- [10] Silke Lipp, „Gesetzliche Randbedingungen für RDE (Real Driving Emissions)“. 2017.
- [11] „IEA Technology Roadmap Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles“, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/publikationen/iea-technology-roadmap-electric-and-plug-in-hybrid-electric-vehicles-2011.php>. [Zugegriffen: 23-Aug-2017].
- [12] Raphael Luz, Stefan Hausberger, und Martin Rexeis, „Endbericht Hero, Optimisation tool for Hybrid Electric Recuperation and Operation Strategies“. 2011.
- [13] „EAFO, European Alternative Fuels Observatory“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eafo.eu/vehicle-statistics/m1>. [Zugegriffen: 29-Mai-2017].
- [14] „Audi A3 e-tron, Elektroauto Blog. Verfügbar unter: <http://www.goingelectric.de/elektroautos/audi-a3-e-tron/>“, 2017. .
- [15] „Audi Digital Illustrated - Audi illustrated Digital Magazine“. [Online]. Verfügbar unter: <https://audi-illustrated.com/de>. [Zugegriffen: 01-Aug-2017].
- [16] Dipl.-Ing. Eberhard Wunsch, Dr.-Ing. Hailong Gao, und Dr.-Ing. Heinz Schäfer, „Elektromotoren in der mobilen Anwendung, VDI-Fachkonferenz Elektromobilität Automobilindustrie trifft Energiewirtschaft, hofer powertrain“. 2010.
- [17] „Proposal for amendments to ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2016/3, Draft global technical regulation on Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedures (WLTP)“. 2016.
- [18] Maximilian Wurm, „Diplomarbeit an der TU Graz, Messung und Simulation von Emissionen von PKW mit Ottomotoren“. 2017.
- [19] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und Karlsruher Institut für Technologie, „LADEN2020 Schlussbericht“. 15-Dez-2016.
- [20] „Well-to-Tank“, *Wikipedia*. 05-Juni-2017.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: zeitlicher Verlauf der Emissionsstandards für PKW [2]	2
Abbildung 2: Zusammensetzung der Rohemissionen [4]	4
Abbildung 3: Verlauf der CO ₂ – Konzentration [3].....	4
Abbildung 4: Lungengängigkeit in Abhängigkeit der Partikelgröße [7]	6
Abbildung 5: NEDC – Fahrzyklus.....	8
Abbildung 6: WLTP – Fahrzyklus.....	9
Abbildung 7: CADC - Fahrzyklus	10
Abbildung 8: ERMES V8 – Fahrzyklus	10
Abbildung 9: Strukturen von Hybridantrieben [3].....	15
Abbildung 10: Übersicht Funktionen, Charakteristika und ausgeführte Beispiele unterschiedlicher Hybridisierungsgrade [3]	17
Abbildung 11: Bauarten elektrischer Maschinen [3]	19
Abbildung 12: idealisiertes M/n Kennfeld eines PMSM [3]	20
Abbildung 13: Aufbau eines Akkumulators [3].....	21
Abbildung 14: typischer Verlauf der Batteriespannung in Abhängigkeit des SOC [3].....	21
Abbildung 15: Wirkungsgrad eines Lade-Entlade-Zyklus [3].....	22
Abbildung 16: Batterietechnologien im Vergleich [11]	23
Abbildung 17: Schema des Emissionsmodells auf Basis von Motorkennfelder [6].....	25
Abbildung 18: vereinfachtes Schema des Batteriemodells [12]	28
Abbildung 19: Steuerkennlinie in Abhängigkeit des Ladezustandes	31
Abbildung 20: Bestimmung der Lage der Steuerkennlinie.....	31
Abbildung 21: Ablaufdiagramm Modellbildung und Simulation.....	32
Abbildung 22: Hybridantriebsstrang des Audi A3 e-tron [14]	35
Abbildung 23: Hochvoltbatterie des Audi A3 e-tron [14]	36
Abbildung 24: Schema PKW – Rollenprüfstand mit CVS – Anlage [6].....	39
Abbildung 25: FTIR Messgerät und Pumpeinheit	40
Abbildung 26: Strom- und Spannungsmessung.....	41
Abbildung 27: Messtechnik im Audi A3 e-tron (1/2).....	42
Abbildung 28: Messtechnik im Audi A3 e-tron (2/2).....	42
Abbildung 29: Geschwindigkeitsverlauf eines Ausrollversuchs	43
Abbildung 30: Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit aus Ausrollversuchen für den Audi A3 e-tron	44
Abbildung 31: Kraftmesseinrichtung.....	45
Abbildung 32: Ries – Route zur RDE Messung	46
Abbildung 33: Benutzeroberfläche zur Eingabe von allgemeinen Fahrzeugdaten („General“)	

.....	49
Abbildung 34: VEH – File des Audi A3 e-tron	50
Abbildung 35: Grundlage zur Kalibrierung des generischen Motorkennfeldes durch Quotienten Bildung von gemessenem zu simuliertem Verbrauch	51
Abbildung 36: Korrekturfaktor	52
Abbildung 37: Vollastlinie und Schleppkurve.....	52
Abbildung 38: Benutzeroberfläche zur Eingabe von „HEV – Daten“	53
Abbildung 39: Ermittlung des Innenwiderstandes und Leerlaufspannung aus gemessenen Klemmenspannungen bei unterschiedlichem SOC	55
Abbildung 40: Leerlaufspannungsverlauf.....	55
Abbildung 41: Elektromotor Wirkungsgradkennfeld Version_1	56
Abbildung 42: Elektromotor Wirkungsgradkennfeld Version_2	57
Abbildung 43: Wirkungsgradverlauf Umrichter [16].....	57
Abbildung 44: Elektromotor Wirkungsgradkennfeld Version_3	58
Abbildung 45: Wahl der Betriebsstrategie durch Steuerkennlinie	59
Abbildung 46: Ermittlung der Höhe der Steuerkennlinie	59
Abbildung 47: VEH – File des Ø – PHEV	60
Abbildung 48: Baumdiagramm zur Ermittlung der WLTP – Testmasse	62
Abbildung 49: Leerlaufspannungsverlauf Audi A3 e-tron & Ø - PHEV	63
Abbildung 50: Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bei „ Δ SOC = 0“	65
Abbildung 51: Vergleich der elektrischen Reichweite im NEDC und WLTC des A3 e-tron	66
Abbildung 52: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs im NEDC und WLTC des A3 e-tron.....	66
Abbildung 53: Simulationsergebnisse der Ries – Routen mit unterschiedlichem Start – SOC	67
Abbildung 54: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs von Messung und Simulation der RDE – Fahrten.....	67
Abbildung 55: Vergleich der elektrischen Reichweite im NEDC und WLTC des Ø – PHEV	68
Abbildung 56: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs im NEDC und WLTC des Ø – PHEV... ..	68
Abbildung 57: PHEM – Simulation des Ø-PHEV mit reinem VKM – Betrieb in Konstantfahrten bei ebener Fahrbahn	69
Abbildung 58: PHEM – Simulation des Ø-PHEV im EV Modus in Konstantfahrten bei ebener Fahrbahn	69
Abbildung 59: Vergleich der CO ₂ – Emissionen vom PHEV und PC_EU6_G (der EURO 6 Benzin-PKW entspricht der Version aus HBEFA 3.2 aus dem Jahr 2012 und basiert auf nur einem gemessenen Kfz)	71
Abbildung 60: Vergleich der TTW Emissionen mit unterschiedlichen Fahrbahnneigungen.	72
Abbildung 61: CO ₂ Emissionen durch Einbeziehen des elektrischen Fahranteils	73
Abbildung 62: Prognose der weltweiten Flottenzusammensetzung von Neuzulassungen [11]	

..... 77

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: RDE Anforderungen für PKWs [10].....	11
Tabelle 2: Stellung Betriebsartschalter für Prüfung nach Zustand A und B [3]	13
Tabelle 3: Allgemeine Eingabeparameter in PHEM.....	25
Tabelle 4: Hybrid Eingabeparameter in PHEM	26
Tabelle 5: Zulassungsstatistik der 10 meistverkauften PHEVs in Europa [13]	34
Tabelle 6: Spezifikationen des Ø – PHEV	34
Tabelle 7: Technische Daten Audi A3 e-tron 2014 [15].....	37
Tabelle 8: ermittelte Fahrwiderstände Audi A3 e-tron (Ausrollversuche wurden mit Winterreifen gefahren).....	45
Tabelle 9: Messergebnisse der RDE – Fahrten	47
Tabelle 10: Kennwerte zur Berechnung der WTW Emissionen	74
Tabelle 11: Simulierte Emissionswerte von WTW, TTW	75
Tabelle 12: WLTC_hot_Testnummer_7492	82
Tabelle 13: CADC_hot_1/3 mix_Testnummer_7493_7494_7495	82
Tabelle 14: ERMES_V8_hot_Testnummer_7496_charge-depleting	83
Tabelle 15: CADC_cold_1/3 mix_Testnummer_7497_7498_7499	83
Tabelle 16: ERMES_V8_hot_Testnummer_7500	83
Tabelle 17: CADC_hot_1/3 mix_Testnummer_7501_7502_7503_charge-depleting	84
Tabelle 18: WLTC_cold_Testnummer_7507	84
Tabelle 19: WLTC_hot_Testnummer_7508_charge-depleting	84

11 Anhang

Nachfolgend sind die Messergebnisse aller Rollentests abgebildet. Es wurde der Großteil der Tests im charge-sustaining-mode durchgeführt. Jene die im charge-depleting-mode ausgeführt wurden sind entsprechend markiert. Die Messdaten des FTIR Messgeräts sind nicht abgebildet, da die ausgewerteten Daten bei der Verfassung der Arbeit noch nicht zur Verfügung standen.

g/km	CVS	MOVE
CO2	125.1	131.7
CO	0.008	0.052
NOx	0.008	0.013
NO	0.008	0.008
PN #/km	8.33E+11	1.12E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-5%	
CO	-532%	
NOx	-58%	
NO	-5%	
PN #/km	-35%	

Tabelle 12: WLTC_hot_Testnummer_7492

g/km	CVS	MOVE
CO2	150.7	158.0
CO	0.118	0.175
NOx	0.042	0.046
NO	0.040	0.039
PN #/km	1.11E+12	1.47E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-5%	
CO	-48%	
NOx	-10%	
NO	1%	
PN #/km	-32%	

Tabelle 13: CADC_hot_1/3 mix_Testnummer_7493_7494_7495

g/km	CVS	MOVE
CO2	111.0	115.4
CO	1.355	1.314
NOx	0.033	0.033
NO	0.031	0.029
PN #/km	1.49E+12	1.58E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-4%	
CO	3%	
NOx	-1%	
NO	8%	
PN #/km	-6%	

Tabelle 14: ERMES_V8_hot_Testnummer_7496_charge-depleting

g/km	CVS	MOVE
CO2	152.6	156.7
CO	0.162	0.189
NOx	0.025	0.024
NO	0.022	0.025
PN #/km	2.00E+12	2.44E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-3%	
CO	-17%	
NOx	3%	
NO	-10%	
PN #/km	-22%	

Tabelle 15: CADC_cold_1/3 mix_Testnummer_7497_7498_7499

g/km	CVS	MOVE
CO2	161.5	169.1
CO	1.794	1.915
NOx	0.018	0.014
NO	0.017	0.013
PN #/km	1.69E+12	2.07E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-5%	
CO	-7%	
NOx	24%	
NO	25%	
PN #/km	-23%	

Tabelle 16: ERMES_V8_hot_Testnummer_7500

g/km	CVS	MOVE
CO2	74.9	77.9
CO	0.071	0.084
NOx	0.012	0.010
NO	0.012	0.009
PN #/km	7.96E+11	1.02E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-4%	
CO	-18%	
NOx	13%	
NO	20%	
PN #/km	-29%	

Tabelle 17: CADC_hot_1/3 mix_Testnummer_7501_7502_7503_charge-depleting

g/km	CVS	MOVE
CO2	122.9	127.9
CO	0.170	0.213
NOx	0.008	0.010
NO	0.003	0.008
PN #/km	1.29E+12	1.58E+12
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	-4%	
CO	-25%	
NOx	-29%	
NO	-127%	
PN #/km	-22%	

Tabelle 18: WLTC_cold_Testnummer_7507

g/km	CVS	MOVE
CO2	55.5	49.0
CO	0.034	0.049
NOx	0.002	0.004
NO	-0.001	0.002
PN #/km	4.90E+11	5.31E+11
Abweichung	(CVS-MOVE)/CVS	
CO2	12%	
CO	-45%	
NOx	-77%	
NO	484%	
PN #/km	-8%	

Tabelle 19: WLTC_hot_Testnummer_7508_charge-depleting