



Dipl.-Ing. Silke Lipp, BSc

Real World Emissionen elektrifizierter Antriebe und Effekte der RDE-Gesetzgebung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

1. Gutachter

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

2. Gutachter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Beidl
Institut für Verbrennungsmotoren und Fahrzeugantriebe
Technische Universität Darmstadt

Graz, Jänner 2021



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

Vorwort

„Ich weiß, dass ich nichts weiß“, sagte Sokrates in einer Unterhaltung mit Plato, um seinem Gegenüber zu veranschaulichen, dass, wenn man auch nichts weiß, aber sich dessen durchaus bewusst ist, man oft mehr weiß als die vermeintlich Wissenden. Ich denke, dass wir viel zu oft annehmen, Dinge und Zusammenhänge zu verstehen, diese im Grunde aber nicht genauer und hintergründiger betrachten.

Wenn ich etwas in den letzten Jahren gelernt habe, dann ist es die Tatsache, dass niemand allwissend ist und dass diejenigen, die sich das eingestehen, diejenigen, die Fragen stellen und vor allem aber auch kritisch Dinge hinterfragen, jene sind, von denen wir lernen können.

In diesem Zusammenhang fand ich mich immer wieder in Situationen, in denen mir von Herrn Prof. Stefan Hausberger klargemacht wurde, wie einfach man doch Fragen stellen kann, um Zusammenhänge zu plausibilisieren und zu prüfen. Einfache Fragen, an die man als kompliziert denkende Studentin oft gar nicht erst denkt. Danke dafür, Stefan. Deine jahrelange Erfahrung lehrte dich, wie simpel es oftmals sein kann, Zusammenhänge und Annahmen zu prüfen und so die Entscheidung zu treffen, Ansätze entweder zu verwerfen oder ihnen nachzugehen.

Diese Dissertation entstand im Zuge meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin der FVT (Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik) an der Technischen Universität Graz.

Eine positive Bewerbung für eine Ausschreibung der FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft) mit dem Namen „Mobilität der Zukunft“ diente als Förderungsgrundlage für die Erstellung dieser Dissertation. Sämtliche Arbeiten und Tätigkeiten nach dem Förderungszeitraum wurden aus Projektmitteln finanziert. Ich bin sehr dankbar, die Möglichkeit zur Erstellung einer Dissertation am IVT (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik) erhalten zu haben, weshalb ich mich beim Institutsleiter, Herrn Prof. Helmut Eichlseder, besonders bedanken möchte. Ein herzliches Dankeschön möchte ich auch an alle Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des IVT und der FVT, mit denen ich während meiner Arbeitstätigkeit in Kontakt getreten bin, richten – für die fachliche, aber vor allem die menschliche Kompetenz.

Für die Zweitbegutachtung meiner Arbeit möchte ich mich noch ganz herzlich bei Herrn Prof. Christian Beidl für seine Zeit und seine Mühe bedanken.

Der größte Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern. Ihr seid meine Vorbilder.

Tausend Dank gilt meiner Schwester. Kerstin, du warst meine Wohnungskollegin während des Studiums, meine persönliche Lektorin für Bachelor-, Master- und nun Doktorarbeit. An dieser Stelle ist nun Schluss, das verspreche ich dir – und vor allem aber bist du meine große Schwester und ich bin unendlich froh, dass es dich gibt.

Danke auch meinen Zwillingen. Ihr habt mir Raum gelassen und Nähe geboten.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	VI
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VII
KURZFASSUNG	XI
ABSTRACT	XII
1 EINLEITUNG	1
2 HINTERGRUND DER ARBEIT	3
3 EMISSIONSGESETZGEBUNG EUROPA	4
3.1 SCHADSTOFFBILDUNG	4
3.2 SCHADSTOFFE	5
3.2.1 Kohlenstoffmonoxid CO	5
3.2.2 Stickoxide NO _x	5
3.2.3 Partikel bzw. Ruß	5
3.3 SCHADSTOFFREDUKTION	6
3.4 GESETZLICHE LIMITIERUNG VON SCHADSTOFFEN	6
3.5 ZERTIFIZIERUNG VON PKW UND LNF IN EUROPA	8
3.5.1 Emissionsmessung am Pkw -Rollenprüfstand	10
3.5.1.1 Fahrwiderstände für Messungen am Pkw-Rollenprüfstand	12
3.5.1.2 Schadstoffmessung am Pkw-Rollenprüfstand	15
3.5.2 Emissionsmessung auf der Straße	16
3.5.2.1 Messaufbau PEMS	16
3.5.2.2 Messgrößen und Messverfahren PEMS	17
3.6 RDE-GESETZGEBUNG	18
3.6.1 RDE-Randbedingungen	19
3.6.2 RDE-Routen Findung	23
3.6.3 RDE-Herausforderungen	25
3.6.4 RDE-Emissionsgrenzwerte	25
3.6.5 RDE-korrigierte Emissionen	26
4 HBEFA	30
4.1 METHODE FÜR HBEFA	30
4.2 DATENBASIS FÜR HBEFA 4.1	31
4.2.1 CO ₂ -Monitoring	31
4.2.2 Spritmonitor.de	31
4.2.3 ERMES Datenbank	32
4.2.4 Messungen für HBEFA	32
4.2.4.1 Messprogramm Pkw-Rolle	32
4.2.4.2 Messprogramm RDE	35
4.2.4.3 Zusammenfassung Messergebnisse NO _x für EURO 6d Temp Pkw	36
5 PHEM	38
5.1 STANDARD SIMULATIONSMETHODE IN PHEM	38
5.1.1 Abgasnachbehandlung in PHEM	39
5.2 PHEM-SIMULATIONSMETHODE FÜR PHEV, HEV UND BEV	39
5.2.1 Batterie	40
5.2.2 Hybridsteuerung	41
5.2.3 Elektromotor	44
6 SIMULATIONEN BEV, HEV UND PHEV FÜRS HBEFA	47
6.1 ALLGEMEINES ZU BEV, HEV UND PHEV	47
6.2 MASSENABSCHÄTZUNG BEV, HEV UND PHEV FÜRS HBEFA	49
6.2.1 Parameterabschätzung Fahrzeugkomponenten	50
6.3 SIMULATION BEV FÜR HBEFA	51
6.3.1 VW e Golf Vermessung für Kennfeld-Validierung BEV	52
6.3.2 Tesla Model S Vermessung für Kennfeld-Validierung	54
6.3.2.1 Ermittlung der Fahrwiderstände vom Tesla Model S	54

6.3.2.2	Simulation Tesla Model S mit PHEM	56
6.3.3	<i>Kennfeld BEV</i>	56
6.4	ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN ZU BEV	57
6.4.1	<i>Ergänzende Messungen von Elektrofahrzeugen zur Kennfeld-Validierung</i>	57
6.4.2	<i>Ladeverluste BEV</i>	60
6.5	KENNFELD-KALIBRIERUNG	61
6.5.1	<i>PHEM-Simulation VW e Golf</i>	63
6.5.2	<i>PHEM-Simulation Tesla Model S</i>	66
6.5.3	<i>PHEM-Simulation Renault Zoe</i>	68
6.5.4	<i>PHEM-Simulation BMW i3</i>	70
6.5.5	<i>Zusammenfassung Kalibrierung Elektromotor-Kennfeld</i>	72
6.6	SIMULATION PHEV FÜR HBEFA	73
6.6.1	<i>Konstanter elektrischer Fahranteil mit Strom vom Netz Variante 1</i>	75
6.6.2	<i>Variabler elektrischer Fahranteil Variante 2</i>	77
6.6.3	<i>Variabler elektrischer Fahranteil Variante 3</i>	78
7	ERGEBNISSE EMISSIONSFAKTOREN	83
7.1	ERGEBNISSE BEV FÜRS HBEFA 4.1	83
7.1.1	<i>BEV EURO 6b Basisvariante</i>	84
7.1.2	<i>BEV EURO 6b HBEFA 4.1 Variante (BEV 2019)</i>	86
7.2	ERGEBNISSE PHEV FÜRS HBEFA 4.1	89
7.3	ERGEBNISSE HEV FÜRS HBEFA 4.1	92
8	ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN VON VERBRAUCH UND NO_x-EMISSIONEN VON PHEV- UND HEV-DIESEL-PKW	95
8.1	GEWICHTUNG PHEV- UND HEV-EMISSIONEN FÜR WLTC UND RWC	95
8.1.1	<i>PHEV- und HEV-Emissionsergebnisse WLTC und RWC</i>	95
8.2	FAHRZEUGDATEN PHEV, HEV UND DIESEL-PKW FÜR ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN	98
8.2.1	<i>PHEM-Simulationen</i>	99
8.2.1.1	Berechnung des WLTC-Utility-Faktors.....	99
8.2.1.2	PHEM-Ergebnisse EURO 6b-Simulation.....	101
8.2.1.3	Ergebnisse EURO 6d Temp-Simulation	106
8.2.1.4	PHEM Ergebnisse EURO 6d-Simulation	109
8.3	REDUKTIONSPOTENTIAL VERBRAUCH UND NO _x -EMISSIONEN FÜR EU 6D TEMP D-PHEV UND -HEV .	112
8.3.1	<i>NO_x-Reduktion durch fahrzeugspezifisches Motorkennfeld V1</i>	113
8.3.2	<i>NO_x-Reduktion durch Vermeidung der Lastanhebung auf Vollast V2</i>	116
8.4	RDE-MESSUNGEN PKW D-PHEV UND PKW D	120
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	123
	LITERATUR.....	125
	ANHANG.....	128
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	139
	TABELLENVERZEICHNIS	142

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 Dissertation 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 dissertation.

Silke Lipp

Graz, Datum

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

a	m/s ²	Beschleunigung
A_{quer}	m ²	Querschnittsfläche des Fahrzeugs
a_{pos}	m/s ²	Positive Beschleunigung (>0,1 m/s ²)
c_{gas}	ppm	Abgaskonzentration
C_j	-	j-ter Koeffizient
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
d_i	km	Gefahrenre Strecke bis zum Ende der Phase i
d_n	km	Normalisierte Strecke
E_{Bat}	Wh/kg	Energiedichte der Batterie
EV_{Fahren}	kWh	Energieverbrauch beim Fahren
EV_{Laden}	kWh	Energieverbrauch beim Laden
E_i	ppm	Emissionskonzentration
Em_i	g/s	Massenemission
FW	N	Fahrwiderstandskraft
K_e	kWh/kg	Effizienzfaktor
K_{eA}	kWh/kg	Effizienzfaktor für Assistieren
K_{eG}	kWh/kg	Effizienzfaktor für Generieren
K_{EV}	%	Elektrischer Fahranteil
\dot{m}	g/s, kg/s	Massenstrom
m	kg	Masse
$m_{äqui_rot}$	kg	Äquivalente rotatorische Masse
m_{KFZ}	kg	Masse des Kraftfahrzeugs
M_i	g/mol	Molmasse eines Moleküls „i“
$M_{i,weighted}$	g/km	Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung i
$M_{i,CD,j}$	g/km	Emissionsmasse der Phase j bei Entladung
$M_{i,CS,j}$	g/km	Emissionsmasse des gesamten WLTC bei Ladungserhaltung
M_{RDE}	mg/km, g/km, #/km	Gewichtete Emissionen RDE
n	U/min	Motordrehzahl
n_{idle}	U/min	Leerlaufdrehzahl
n_{norm}	-	Normierte Motordrehzahl
n_{rated}	U/min	Nenn Drehzahl des Motors
P	kW, W	Motorleistung
P_e	kW	Effektive Leistung des Motors
P_{nenn}	kW, W	Nennleistung des Motors
P_{norm}	-	Normierte Leistung
P_R	W	Rollwiderstand
P_{rated}	kW	Nennleistung des Motors
q_{mew}	kg/h	Abgasmassenstrom
R_0	N	v-unabhängiger Koeffizient im Fahrwiderstandspolynom
R_1	Nm/s	v-proportionaler Koeffizient im Fahrwiderstandspolynom
R_2	Nm ² /s ²	v ² proportionaler Koeffizient im Fahrwiderstandspolynom / Luftwiderstand
T_{nenn}	Nm	Nenn Drehmoment des Motors an der Kurbelwelle
U	V	Elektrische Spannung
UF_j	-	Nutzfaktor der Phase j
v	km/h, m/s	Geschwindigkeit

$W_{electric}$	kWh	Elektrische Energie
$W_{electric_stored}$	kWh	Elektrische Energie in die Batterie gespeichert
$W_{electric_taken}$	kWh	Elektrische Energie aus der Batterie entnommen
ρ	kg/m ³ , kg/dm ³	Dichte

Operatoren

Δ	Delta	Differenz zwischen zwei Werten
----------	-------	--------------------------------

Konstanten

$g = 9,806$	N/kg	Gravitationsfeldstärke
-------------	------	------------------------

Indizes

i	Bezeichnung der gasförmigen Verbindung i , Phasennummer
j	Nummer der betrachteten Phase / des betrachteten Fensters
k	Anzahl der gefahrenen Phasen bis zum Ende des Übergangszyklus

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
Akku	Akkumulator
ASM	Asynchron Maschine
Bat	Batterie
BEV	Battery Electrical Vehicle
BMW	Bayrische Motoren Werke
Bzw.	Beziehungsweise
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CD	Charge Depleting / Ladungsnutzung
CF	Conformity Faktor / Konformitätsfaktor
CH ₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COS	Kohlenoxidsulfid
CPC	Condensation Particle Counter, Kondensationspartikelzähler
CR	Rollwiderstandsbeiwert
CS	Charge Sustaining / Ladungserhaltung
CVS	Constant Volume Sampling
DIN	Deutsches Institut für Normierung
Durch.	Durchschnittlich
EC	Electrical Consumption / Elektrischer Verbrauch
EFM	Exhaust Flow Meter
EHS	Extra High Speed
el.	Elektrisch
EM	Elektromotor
EO	Engine Out
ERMES	European Research for Mobile Emission Sources
Et al.	Et aliae / Et alia / und alle
etc	Et cetera
EU	Europäische Union

FC	Fuel Consumption / Kraftstoffverbrauch
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
Geschw.	Geschwindigkeit
GPS	Global Positioning System
HA	Herstellerangabe
H ₂ O	Wasser
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport / Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Kohlenwasserstoffe
HEV	Hybrid Electrical Vehicle
HNCO	Isocyanensäure
HS	High Speed
HV	Hoch Volt
ICCT	International Council on Clean Transportation
ICE	Internal Combustion Engine
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IG-L	Immissionsschutzgesetz-Luft
IUFC	Inrets Urbain Fluide Court
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KF	Kennfeld
Kfz	Kraftfahrzeug
Kum.	Kumuliert
Li-Ion	Lithium Ionen
LNf	Leichtes Nutzfahrzeug
LS	Low Speed
Max	Maximum
MeOH	Methanol
Min	Mindestens
Mod.	Modifiziert
N ₂ O	Distickstoffoxid
NDIR	Nichtdispersiver-Infrarot-Analysator
NEDC	New European Driving Cycle
NH ₃	Ammoniak
NMHC	Non Methan Hydrocarbons / Nichtmethankohlenwasserstoffe
NO ₂	Stickstoffdioxid
NOVC	Not Off Vehicle Charging
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstofftechnologie
NO _x	Stickoxid
NTE	Not To Exceed
OVC	Off Vehicle Charging
PEMS	Portable Emission Measurement System
Perz	Perzentil
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PHEV	Plug In Hybrid Electrical Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Particel Number / Partikelanzahl
PSM	Permanent Erregte Synchronmaschine
RDE	Real Driving Emissions

RF _k	Result Evaluation Faktor
RPA	Relative Positive Acceleration / Relative positive Beschleunigung
RRC	Rolling Resistance Coefficient / Rollwiderstandsbeiwert
RW	Reichweite
RWC	Real World Cycle
SCR	Selective Catalytic Reduction
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SO ₂	Schwefeldioxid
SOC	State Of Charge
StVO	Straßenverkehrsordnung
SUV	Sport Utility Vehicle
Temp	Temporär
THC	Total Hydrocarbons / gesamte Kohlenwasserstoffe
TP	Tail Pipe
TTW	Tank To Wheel
TU	Technische Universität
UBA D	Umweltbundesamt Deutschland
UF	Utility Faktor
USA	United States of America
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VW	Volkswagen
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WTW	Well To Wheel
Zw.	Zwischen

Kurzfassung

Der Schwerpunkt der hier vorliegenden Dissertation sind Messungen und Simulationen von Emissionen von Pkw (Personenkraftwagen) und LNf (leichte Nutzfahrzeuge) mit dem Ziel, repräsentative Emissionsniveaus für reale Verkehrssituationen zu bestimmen. Die Entwicklung der Emissionsgesetzgebung und die Entstehung von Schadstoffen wird im nachfolgenden Kapitel kurz beschrieben. Der Prozess der Zertifizierung von Pkws hat sich in den letzten Jahren, durch die Einführung von der Messung der Emissionen auch im Realfahrbetrieb wesentlich verändert und daher ergaben sich für Automobil-Hersteller neue Anforderungen, um die Grenzwerte für die gesetzlich limitierten Schadstoffe einzuhalten. Diese Arbeit beschreibt sowohl den Findungsprozess der neuen Gesetzgebung für die Pkw-Zertifizierung, bei dem ich in Teilen der Entwicklung der Gesetzgebung mitwirken durfte, als auch die Umsetzung der Messung von Schadstoffen im Realfahrbetrieb unter Einhaltung aller vorgegebenen Randbedingungen.

Da die Messung von Emissionen immer mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden ist, bedient man sich für die Abschätzung des Emissionsverhaltens immer öfters der Simulation. Auch für das sogenannte HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) wurden die Emissionsniveaus simuliert. Das HBEFA gibt Auskunft über das reale Emissionsverhalten aller relevanten Fahrzeugklassen bei unterschiedlichsten Verkehrssituationen je nach Land und Flottenzusammensetzung. Ein wesentliches Ziel der Dissertation war die Entwicklung eines Simulationsverfahrens, um moderne Hybrid, Plug-in-Hybrid und Elektrofahrzeuge erstmals im HBEFA abbilden zu können. Die Modell-Bedatung sollte auf übliche Rollen- und RDE-Tests zurückgreifen können und die wesentlichsten Eigenschaften dieser Antriebe berücksichtigen. Dieses Ziel wurde erreicht und die Ergebnisse der Arbeiten wurden für das Handbuch 4.1-Update (2019) verwendet.

Dementsprechend wird das HBEFA in dieser Arbeit genauer beschrieben. Ebenfalls wurden zahlreiche Emissionsmessungen am Prüfstand und auf der Straße für die Sammlung einer soliden Datengrundlage für diese Simulationen im Zuge dieser Dissertation durchgeführt.

Schlagwörter:

Pkw, LNf, RDE, PHEV, BEV, HEV, EURO 6, HBEFA

Abstract

The focus of this doctoral thesis is on measurements and simulations of emissions from PC (passenger cars) and LCV (light commercial vehicles) with the aim of determining representative emission levels for real traffic situations. The development of emission legislation and the generation of pollutants is briefly described in the following chapter. The process of certification of passenger cars has changed significantly in the last few years, due to the introduction of the measurement of emissions also in real driving situations. Therefore, new requirements for car manufacturers to comply with the legally limited pollutant limits have arisen. This thesis describes both, the process of finding the new legislation for passenger car certification, in which I was allowed to participate in parts of the development of the legislation, and the implementation of the measurement of pollutants in real driving conditions while observing all given boundary conditions.

Since the measurement of emissions is always associated with considerable effort, simulation is increasingly used to estimate the emission behavior. Emission levels are also simulated for the so called HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Traffic). The HBEFA provides information about the real emission behavior of all relevant vehicle classes in different traffic situations depending on country and fleet composition. A major goal of the dissertation was the development of a simulation method to enable modern hybrid, plug-in-hybrid and electric vehicles to be simulated in the HBEFA for the first time. The model-dataset should be able to fall back on usual roller and RDE-tests and consider the most essential characteristics of these drives. This goal was achieved and the results of the work were used for the handbook 4.1-update (2019).

Accordingly, HBEFA is described in more detail in this work. Likewise, numerous emission measurements on the test bench and on the road were carried out to collect a solid data base for these simulations in the course of this thesis.

Keywords:

Passenger cars, light commercial vehicles, RDE, PHEV, BEV, HEV, EURO 6, HBEFA

1 Einleitung

Das Wort „Mobilität“ stammt vom lateinischen Wort „mobilitas“ ab und hat unterschiedliche Bedeutungen. Einerseits beschreibt es die Fortbewegung zu Fuß oder mit Fahrzeugen, was wohl von den meisten Menschen unter dem Begriff verstanden wird, andererseits beschreibt es auch die geistige Beweglichkeit und die Fähigkeit, sich auf Neues einzustellen. Unsere Art der Fortbewegung befindet sich seit einigen Jahren in einem Wandel, wodurch das Thema Mobilität sehr in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt ist. Die Tatsache, dass der Mensch seit jeher den Drang hat, sich individuell fortzubewegen, erklärt auch das große Interesse der Öffentlichkeit am Thema Mobilität.

Klares Ziel ist es, die Belastung der Umwelt durch den Verkehr so gering wie möglich zu halten und neue Maßnahmen zu schaffen, die dies garantieren. Diese Maßnahmen können eben einerseits durch neue Antriebstechnologien, die weniger Schadstoffe erzeugen, sowie durch Ansätze, wie beispielsweise Dieselfahrverbote in Städten, realisiert werden. Weder der eine noch der andere Ansatz wird jedoch die Lösung für jegliche Schadstoffprobleme in allen Gebieten sein. Der Dieselantrieb wurde in den letzten Jahren v. a. wegen Abgasskandalen, die medial sehr präsent waren, in ein schlechtes Licht gerückt. Die Tatsache, dass der Dieselmotor verglichen mit dem Benzinmotor aufgrund des anderen Verbrennungskonzepts den besseren Wirkungsgrad und somit die niedrigeren Verbräuche bei gleicher Leistung aufweist, wird aber nur selten erwähnt.

Im Verkehrssektor haben sich in den letzten Jahren viele neue Regelungen zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte der emittierten Schadstoffe eines Fahrzeugs entwickelt. Diese Neuerungen in der Gesetzgebung haben wiederum Auswirkungen auf die Fahrzeughersteller bzw. die Fahrzeugentwicklung. Auch hinsichtlich der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte eines Fahrzeugherstellers hat sich durch den vermehrten Einsatz elektrifizierter Antriebe einiges getan. Bis vor einigen Jahren wies die Fahrzeugflotte eines Automobilherstellers fast ausschließlich konventionell betriebene Fahrzeuge mit Diesel- oder Benzinmotoren auf. Derzeitige bzw. zukünftige Flottenzusammensetzungen werden immer mehr Hybridfahrzeuge, Plug-in-Hybridfahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge und auch Elektrofahrzeuge aufweisen, um die Thematik der entstehenden Schadstoffe, speziell aber auch die Anforderungen aus den CO₂-Limits im Betrieb von Motoren mit fossilen Brennstoffen, zu entschärfen. Abhängig vom Einsatzgebiet und den Anforderungen an das Antriebskonzept weisen diverse Fahrzeugtechnologien ihre Vor- und Nachteile auf.

So kann zum Beispiel die Luftqualität im städtischen Bereich, wo die notwendige Infrastruktur für den Betrieb von Elektrofahrzeugen gegeben ist (Ladestationen, Car Sharing etc.) und die zurückgelegten Wegstrecken eher gering sind, durch vermehrten Einsatz dieses Fahrzeugkonzepts verbessert werden. Die eingeschränkte Reichweite rein elektrisch betriebener Fahrzeuge kann in ländlichen Gebieten den Einsatz jedoch verhindern. Für die Erzeugung des notwendigen Stroms und dessen Bereitstellung für den Antrieb von Elektrofahrzeugen entstehen ebenfalls Schadstoffe, und je nach Produktionsart (Kohlekraftwerk, Atomkraftwerk etc.) müssen diese auch berücksichtigt werden, auch wenn das elektrische Fahren auf der Straße emissionsfrei erfolgt.

Brennstoffzellenfahrzeuge weisen ähnliche Reichweiten auf wie konventionell betriebene Fahrzeuge, haben aber den Nachteil der noch fehlenden Dichte an Tankstellen. In Österreich gibt es derzeit zwei Wasserstofftankstellen, was den Einsatz solcher Fahrzeuge einschränkt. Auch die sehr energieaufwendige Produktion des Wasserstoffs darf für eine gesamtheitliche Energiebetrachtung nicht außer Acht gelassen werden.

Beleuchtet man also die Thematik der Mobilität unserer Zukunft, lässt sich erkennen, dass es die eine Fahrzeuglösung, die jegliche Schadstoffproblematik löst, derzeit nicht gibt, und dass jedes Fahrzeugkonzept seine Vor- und Nachteile aufweist, je nachdem, welche Anforderungen

daran gestellt werden.

Die Herausforderung der zukünftigen Mobilität wird darin bestehen, dass unterschiedliche Fahrzeugkonzepte so miteinander kombiniert werden, dass sie für den jeweils eingesetzten Bereich die höchste Effizienz bei möglichst niedriger Umweltbelastung aufweisen.

2 Hintergrund der Arbeit

Neufahrzeuge müssen vor deren Markteinführung nachweisen, dass die im Betrieb emittierten Schadstoffe gesetzlich definierte Grenzwerte einhalten. Dieser Nachweis dient zur Sicherstellung der Luftqualität und wird mithilfe eines vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Prozesses geprüft. Bislang wurden die Emissionsmessungen zur Überprüfung der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte von Pkw (Personenkraftwagen) und LNF (Leichten Nutzfahrzeugen) ausschließlich im Labor auf einem Prüfstand gemessen. Mit September 2017 (Einführung der Emissionsnorm EURO 6d Temp) gab es eine Änderung des Zertifizierungsprozesses, welcher seither auch die Emissionsmessung im Realfahrbetrieb auf der Straße inkludiert. Für Fahrzeuge muss nun im Laborbetrieb und auch im Realbetrieb die Einhaltung von Grenzwerten emittierter Schadstoffkomponenten nachgewiesen werden. Die gemessenen Emissionen im Straßenverkehr werden mit RDE (Real Driving Emissions) bezeichnet.

Diese Dissertation diente unter anderem als Hilfe für die Ausarbeitung der RDE-Gesetzgebung und der Darstellung der Herausforderungen an die Automobilhersteller, die sich aufgrund der neuen Gesetzgebung ergeben.

Folgende Ziele wurden zu Beginn der Dissertation formuliert:

- Erfassung des Ist-Standes der Gesetzgebung für EURO 6 und für die zukünftig ange-dachte neue RDE-Gesetzgebung
- Leisten von Entwicklungsarbeit hinsichtlich der RDE-Gesetzgebung in Zusammenar-beit mit der EU-Kommission und den Automobilherstellern
- Lieferung von Vorschlägen für zukünftige Randbedingungen für die Ermittlung von RDE und Grenzwerten
- Aufzeigen konzeptspezifischer Vor- und Nachteile von Fahrzeugen hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens
- Betrachtung des Einflusses von Randbedingungen im realen Verkehr auf die Emissio-nen und Vorschläge für eine „gerechte Beurteilung“ dieser
- Abschätzung des Emissionsverhaltens von Fahrzeugen mit zukünftiger Abgasnachbe-handlungstechnologie mithilfe der Simulation
- Vergleich des Emissionsverhaltens eines Fahrzeugs mit konventionellem Antrieb und Hybridantrieb

Im September 2019 gab es ein Update des HBEFAs (Handbook Emission Factors for Road Transport), welches Emissionsfaktoren für Emissionsklassen je Fahrzeugkategorie für unter-schiedliche Verkehrssituationen abschätzt. Als passende Erweiterung der o. a. Themen wurden in dieser Dissertation für dieses Update auch erstmals Emissionsfaktoren der elektrifizierten Antriebsstränge (Elektrofahrzeug, Plug-in-Hybridfahrzeug und Hybridfahrzeug) für die Fahr-zeugkategorien Pkw und LNF simuliert.

Diese Dissertation beschreibt die praktischen Messungen und Untersuchungen von Pkw und LNF im Rahmen der Ausgestaltung der RDE-Gesetzgebung und für den Aufbau einer Datenba-sis für die Abschätzung von Emissionsfaktoren. Für die Simulation von Plug-in-Hybridfahr-zeugen im bestehenden Fahrzeugemissionsmodell der TU Graz musste eine neue Methode ent-wickelt werden, die ebenfalls in dieser Arbeit beschrieben wird.

3 Emissionsgesetzgebung Europa

Seit 1970 gelten Richtlinien zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten für Pkw in der Europäischen Gemeinschaft. Damals wurden Grenzwerte für CO (Kohlenmonoxid)- und HC (Kohlenwasserstoff)-Emissionen festgelegt, um die Luftbelastung durch den Verkehr zu reduzieren. Im folgenden Kapitel werden die gesetzlich limitierten Schadstoffe und deren Entstehung beim Verbrennungsprozess von Diesel- und Benzinkraftstoffen in der VKM (Verbrennungskraftmaschine) sowie die Gesetzgebung zur Einhaltung bestimmter Grenzwerte dieser Emissionen beschrieben.[5]

3.1 Schadstoffbildung

Bei einer vollständigen Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigen Substanzen (C_xH_y -Brennstoffe) würde das Abgas aus O_2 (Sauerstoff), N_2 (Stickstoff), CO_2 (Kohlendioxid) und H_2O (Wasserdampf) bestehen. Bei der realen Verbrennung von Diesel oder Benzin kommt es allerdings zur Bildung von CO (Kohlenmonoxid), nicht verbrannten HCs (Kohlenwasserstoffen) und den Nebenprodukten NO_x (Stickoxide) und Partikeln. Diese Schadstoffe sind schädlich für Umwelt und Mensch, weshalb sehr viel Entwicklungsarbeit zur Reduktion der Schadstoffbildung bei der Verbrennung selbst sowie für die Nachbehandlung der bereits gebildeten Schadstoffe nach der Verbrennung stattfindet. Die Reduktion von Schadstoffen bedingt oftmals Einbußen bei anderen Entwicklungszielen, wie hohe Leistung und hoher Wirkungsgrad der VKM. Für die Optimierung beider Prozesse wären rein experimentelle Untersuchungen sehr aufwendig und teuer. Durch eine Abschätzung der Schadstoffbildung mithilfe der Simulation kann der Entwicklungsprozess vereinfacht werden. [5]

Abbildung 1 zeigt die Zusammensetzung der Rohemissionen für einen Dieselmotor und einen Ottomotor. Der Benzinmotor wird oft als Ottomotor bezeichnet, nach seinem Erfinder Nikolaus August Otto.

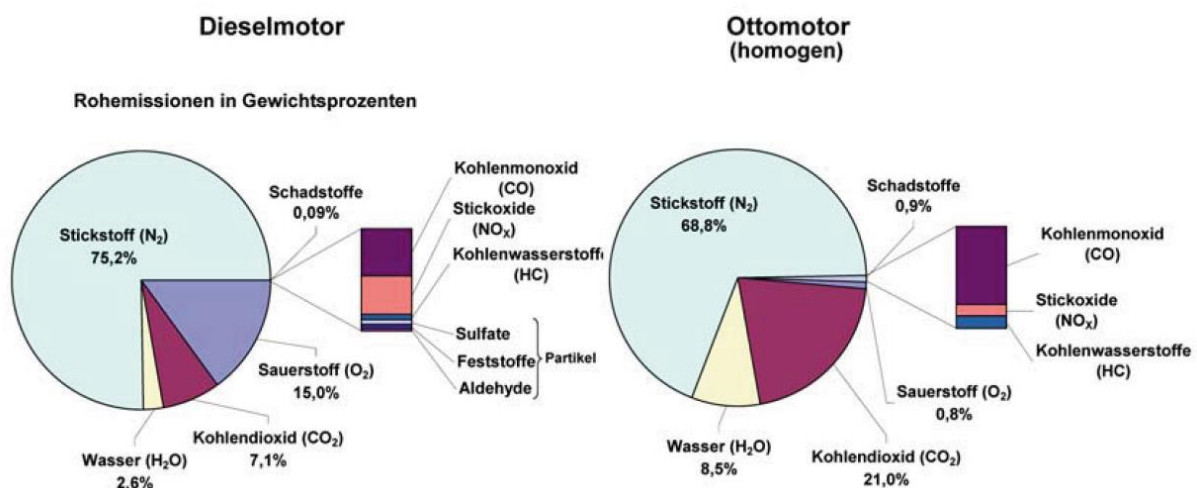


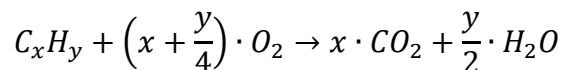
Abbildung 1: Zusammensetzung der Rohemissionen eines Ottomotors und Dieselmotors [23]

Der Anteil der Schadstoffe beim Ottomotor liegt um eine Zehnerpotenz höher als jener des Dieselmotors. Die Begründung dafür liegt im unterschiedlichen Brennverfahren beider Motoren. Beim Ottomotor erfolgt die Verbrennung bei stöchiometrischen Bedingungen, was so viel bedeutet, als dass genau so viel Sauerstoff vorhanden ist, wie für die Verbrennung benötigt wird. Bei der Verbrennung von Diesel herrscht hingegen im Regelfall Luftüberschuss, wodurch

die Schadstoffe leichter auf oxidiert werden. [23]

Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in der Luft ergibt sich die nachfolgend gezeigte Reaktionsgleichung. [28]

3-1



mit:

$C_xH_y...$	Kohlenwasserstoffe
$x...$	Anteil Kohlenstoff (C)
$y...$	Anteil Wasserstoff (H)
$CO_2...$	Kohlendioxid
$O_2...$	Sauerstoff
$H_2O...$	Wasser

Bei der vollständigen Verbrennung, welche den Idealfall einer Verbrennung darstellt, entstehen durch die Oxidation des Kohlenstoffs CO_2 und H_2O . Die Gleichung zeigt, dass CO_2 auch bei vollständiger Verbrennung entsteht und daher nicht ein Produkt der unvollständigen Verbrennung ist, wie die im Weiteren beschriebenen Schadstoffe. Kohlendioxid ist ein Treibhausgas und im Wesentlichen mitverantwortlich für die globale Erderwärmung. Kohlenstoffdioxid ist farb- und geruchlos und nicht giftig.

CO_2 wird als Flottenverbrauchswert für die Automobilhersteller begrenzt. Bis Jänner 2020 galt es einen Flottendurchschnittswert von 130 g/km CO_2 einzuhalten. Seit Jänner 2020 ist ein Flottendurchschnittswert von 95 g/km für CO_2 vorgeschrieben. [28]

3.2 Schadstoffe

Welche Schadstoffe bei der unvollständigen Verbrennung gebildet werden, wurde bereits erläutert. Es folgt eine kurze Beschreibung dieser und ihrer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt.

3.2.1 Kohlenstoffmonoxid CO

CO ist ein farb-, geruch-, und geschmacksloses Atemgift. Es weist eine große Ähnlichkeit mit dem Hämoglobin des menschlichen Blutes auf, weshalb es bereits in geringen Dosen giftig ist und zur Erstickung führen kann. CO-Emissionen treten vor allem bei Luftmangel auf. [28]

3.2.2 Stickoxide NO_x

Stickoxide sind durch diverse Abgasskandale der letzten Jahre die wohl bekanntesten gasförmigen Schadstoffe, die beim Verbrennungsprozess in der VKM entstehen. NO_x entsteht vor allem bei hoher Temperatur und gleichzeitigem Luftüberschuss und somit bei beiden Brennverfahren (Diesel und Otto).

Stickoxid, vor allem das NO_2 , ist für die menschlichen Atmungsorgane schädlich und kann bei zu hoher Konzentration in der Luft negative Auswirkungen auf die Lungenfunktion haben. [28]

3.2.3 Partikel bzw. Ruß

Als Partikel werden jene Schadstoffe bezeichnet, die einen festen Kohlenstoffkern besitzen, an

den sich feste, aber auch flüssige Stoffe anhaften. Partikel entstehen vor allem bei hohen Temperaturen und örtlichem Luftmangel. Bei hohen Temperaturen und Luftüberschuss brennt allerdings ein großer Teil des gebildeten Rußes wieder ab, bevor er den Brennraum verlässt. Somit ergibt sich ein „Trade off“-Verhalten zwischen Partikeln und NO_x , welche ebenso bei hohen Temperaturen, aber lokalem Luftüberschuss gebildet werden. Gesundheitlich betrachtet ist vor allem die Partikelgröße relevant, da abhängig von dieser Partikel bis in die Lunge und somit bis in den Blutkreislauf des Menschen gelangen können. [23]

In der Gesetzgebung werden PM (Partikelmasse) und PN (Partikelanzahl) limitiert.

3.3 Schadstoffreduktion

Grundsätzlich lautet das Ziel, die emittierten Schadstoffe von Fahrzeugen so gering wie möglich zu halten. Eine Reduktion dieser kann innermotorisch, also beim Entstehungsprozess bei der Verbrennung im Motor, und außermotorisch, also im bereits vorhandenen Abgas des Motors, durchgeführt werden. Heutige Fahrzeugtechnologien arbeiten mit einer Kombination aus beiden Ansätzen, um die Schadstoffe zu minimieren.

Als Abgasnachbehandlungssysteme werden Katalysatoren und Filter eingesetzt, über die das Abgas aus dem Motor geführt wird, bevor es in die Umgebung abgegeben wird. Innermotorisch wird bereits verbranntes Abgas rückgeführt (AGR-Abgasrückführung), um den Anteil des Inertgases im Brennraum der VKM zu erhöhen und somit die lokale Verbrennungstemperatur zu senken. Durch eine niedrigere Temperatur im Brennraum können die NO_x -Emissionen gesenkt werden, die Bildung von Ruß (eingeschränkter Abbrand bei kühlerer Umgebung) wird dadurch jedoch begünstigt.

Eine genaue Beschreibung der unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssysteme und ihrer Funktionsweisen wird an dieser Stelle nicht gemacht und ist aus entsprechender Literatur zu entnehmen. [28]

3.4 Gesetzliche Limitierung von Schadstoffen

Um die Belastung der Umwelt aufgrund des Verkehrssektors möglichst gering zu halten, wird der zulässige Schadstoffausstoß von Fahrzeugen gesetzlich limitiert.

Nachfolgende Tabellen zeigen eine Übersicht der Grenzwerte je Schadstoffkomponente und die Einführungsjahre ab der Emissionsnorm EURO 1 in der Europäischen Union für Diesel- und Otto-Pkw.

Tabelle 1: Übersicht Emissionsnormen Diesel-Pkw [3]

Diesel-Pkw								
Emissionsnorm	Einführungsdatum	CO g/km	HC g/km	NMHC g/km	HC + NO _x g/km	NO _x g/km	PM g/km	PN #/km
EURO 1	Juli 1992	2,72	-	-	0,97-	-	0,14	
EURO 2	Jänner 1996	1	-	-	0,7	-	0,08	
EURO 3	Jänner 2000	0,64	-	-	0,56	0,5	0,05	
EURO 4	Jänner 2005	0,5	-	-	0,3	0,25	0,025	
EURO 5	September 2009	0,5	-	-	0,23	0,18	0,005	6*E11
EURO 6	September 2014	0,5	-	-	0,17	0,08	0,005	6*E11

Tabelle 2: Übersicht Emissionsnormen Benzin-Pkw [3]

Otto- Pkw								
Emissionsnorm	Einführungsdatum	CO g/km	HC g/km	NMHC g/km	HC + NO _x g/km	NO _x g/km	PM g/km	PN #/km
EURO 1	Juli 1992	2,72	-	-	0,97-	-	-	-
EURO 2	Jänner 1996	2,2	-	-	0,5	-	-	-
EURO 3	Jänner 2000	2,3	0,2	-	-	0,15	-	-
EURO 4	Jänner 2005	1	0,1	-	-	0,08	-	-
EURO 5	September 2009	1	0,1	0,068	-	0,06	0,005	-
EURO 6	September 2014	1	0,1	0,068	-	0,06	0,005 ^[1]	-

^[1] Einführung eines PN-Limits ab EURO 6c für direkteinspritzende Ottomotoren

Aus den Tabellen geht hervor, dass die Grenzwerte der Emissionen kontinuierlich verringert werden. Die Einhaltung dieser muss in einem standardisierten Prüfverfahren nachgewiesen werden, bevor ein Fahrzeug auf den Markt gebracht werden darf. Derzeitiger Stand ist die Emissionsnorm EURO 6d Temp. Abbildung 2 zeigt den Zeitplan für die Einführung zukünftiger Emissionsnormen für Europa, die USA, Japan und China. Seit September 2017 müssen neue Fahrzeugtypen nach der Emissionsnorm EURO 6d Temp zertifiziert werden, ab 2018 gilt

diese Norm dann für alle neuen Fahrzeuge. [3]

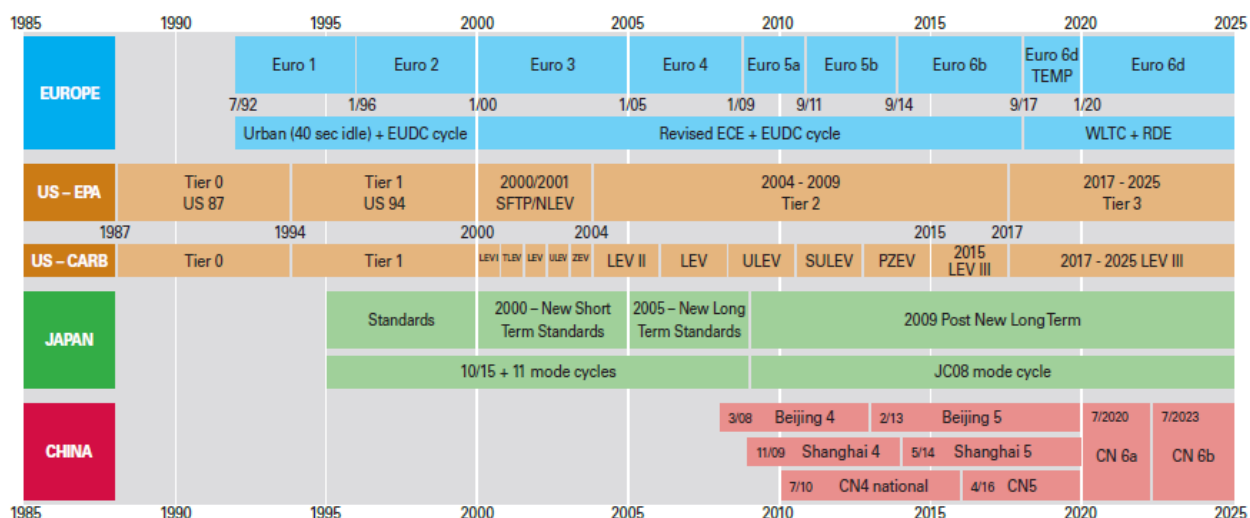


Abbildung 2: Zeitplan Emissionsstandards für Pkw EU, USA, Japan und China [3]

Die finale Version der Emissionsnorm EURO 6, die EURO 6d, wird ab Jänner 2020 für neue Fahrzeugtypen und ab Jänner 2021, also ein Jahr später, für alle neuen Fahrzeuge in Europa geltend gemacht werden. [3]

Tabelle 3 zeigt die gesetzlich limitierten Grenzwerte für Otto- und Diesel-Pkw der Emissionsnorm EURO 6, die bei der Emissionsmessung des Fahrzeugs im Labor am Prüfstand eingehalten werden müssen.

Tabelle 3: Grenzwerte für Otto- und Diesel-Pkw EURO 6 [3]

EURO 6b, 6c, 6d Temp, 6d	THC	NMHC	NO _x	HC + NO _x	CO	PM	PN
	mg/km						#/km
Diesel-Pkw	-	-	80	170	500	4.5	6*10 ¹¹
Otto-Pkw	100	68	60	-	1000	4.5	6*10 ¹¹

3.5 Zertifizierung von Pkw und LNF in Europa

Das bis September 2017 angewandte Prüfverfahren für den Nachweis zur Einhaltung der gesetzlich limitierten Schadstoffe von Pkw und LNF umfasste die Emissionsmessung des Fahrzeugs in einem gesetzlich vorgegebenen Fahrzyklus auf dem Rollenprüfstand im Labor. Der verwendete Prüfzyklus seit 1992 heißt NEDC (New European Driving Cycle) und sein Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit ist in Abbildung 3 dargestellt.

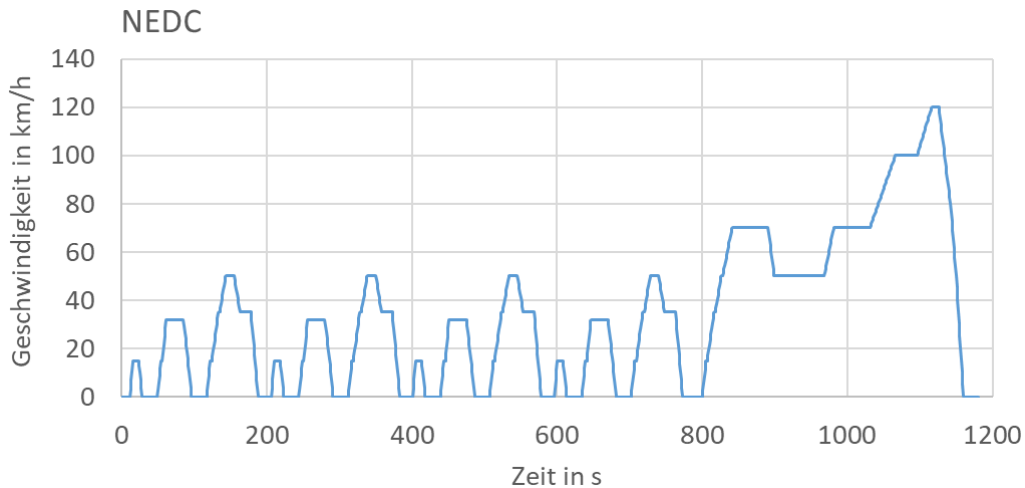


Abbildung 3: Geschwindigkeitsverlauf NEDC

Der NEDC besteht aus vier Stadtzyklen und einem Überlandanteil. Seit September 2017 wird der NEDC durch den WLTC (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Cycle) ersetzt, welcher durch seinen dynamischeren Geschwindigkeitsverlauf, siehe Abbildung 4, das reale Fahren besser darstellen soll.

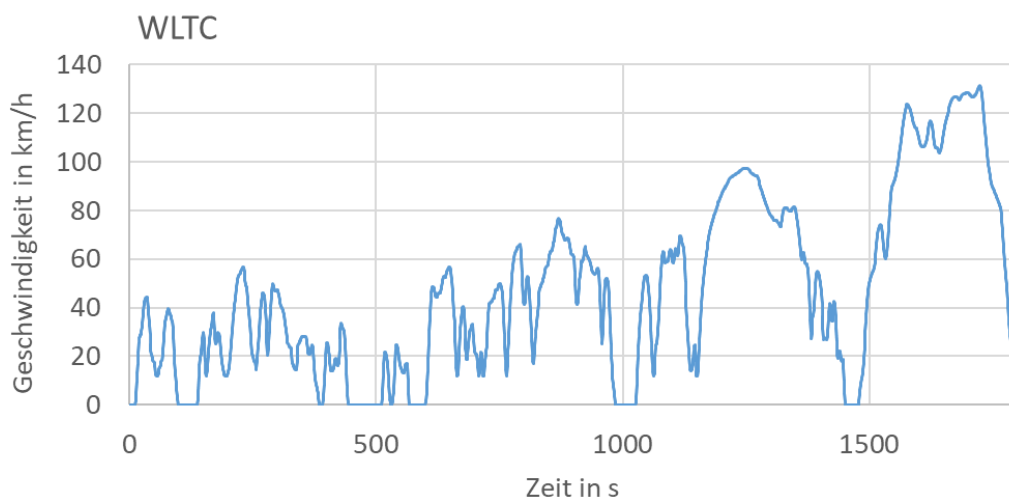


Abbildung 4: Geschwindigkeitsverlauf WLTC [3]

Der WLTC besteht aus insgesamt vier Phasen, der Low, Middle, High und Extra-High Phase. Seine Durchschnittsgeschwindigkeit ist gegenüber jener im NEDC höher und der WLTC zeigt eine höhere Dynamik. Die Schaltpunkte im WLTC werden für jedes Fahrzeug individuell, also abhängig von den Fahrzeugspezifikationen (Masse, Leistung, Getriebeübersetzungen etc.), ermittelt. Im NEDC schaltet jedes Fahrzeug mit derselben Anzahl an Gängen gleich.

Das bisherige Prüfverfahren für die Zertifizierung bekommt neben dem Tausch des Fahrzyklus am Rollenprüfstand noch die Ergänzung, dass Emissionsgrenzwerte des Fahrzeuges auch im Realfahrbetrieb überprüft werden. Diese Emissionen werden als RDE bezeichnet. Das gesamte neue Prüfverfahren, bestehend aus Emissionsmessungen auf der Rolle und im Realbetrieb, wird mit WLTP (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedure) bezeichnet. [3]

In den nachfolgenden beiden Unterkapiteln werden die Emissionsmessung am Pkw-Rollenprüfstand und die RDE-Messung auf der Straße genauer beschrieben.

3.5.1 Emissionsmessung am Pkw -Rollenprüfstand

Wie bereits erwähnt, müssen neue Fahrzeuge für die Zulassung einen Nachweis über die Einhaltung der gesetzlich festgelegten Grenzwerte bestimmter Schadstoffe am Pkw-Rollenprüfstand und im Realfahrbetrieb nachweisen. Am Pkw-Rollenprüfstand wird ein genormter Fahrzyklus unter Laborbedingungen nachgefahren und dabei werden die emittierten Schadstoffe gemessen. Dabei muss der Fahrwiderstand auf der Rolle so nachsimuliert werden, als würde das Fahrzeug auf der realen Straße bewegt werden. Abbildung 5 zeigt ein Funktionsschema des Pkw-Rollenprüfstands der TU Graz. Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus einer Rolle, auf welcher die angetriebene Achse des zu vermessenden Fahrzeugs platziert wird, dem Fahrerleitgerät, wo der zu fahrende Zyklus für den Prüfstandsfahrer angezeigt wird, und der Abgasmessung. [33]

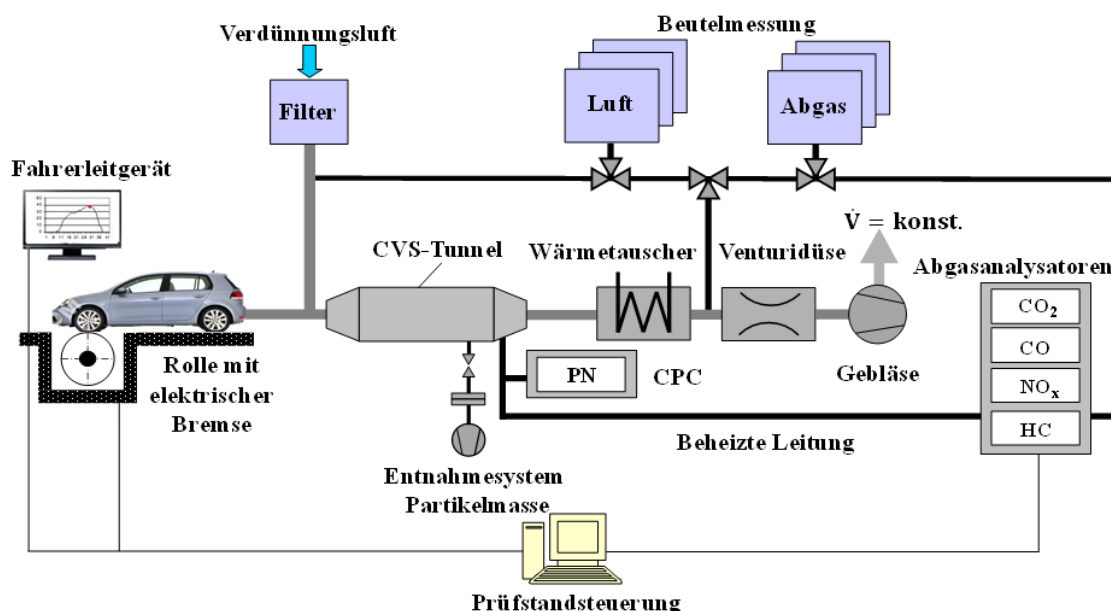


Abbildung 5: Funktionsschema Pkw-Rollenprüfstand [33]

Die Rolle des Prüfstands wird mittels Elektromaschine angetrieben bzw. gebremst. Die Steuerung der Rolle regelt die Fahrwiderstandskraft, welche geschwindigkeitsabhängig auf die Rolle aufgebracht wird, so, dass sie den realen Fahrwiderständen des Fahrzeugs beim Fahren auf der Straße entspricht. [5]

Die Leistung, die zur Überwindung der Fahrwiderstände des Kfz (Kraftfahrzeugs) auf der Straße benötigt wird, setzt sich dabei aus den folgenden Leistungen zusammen: [5]

3-2

$$P = P_{\text{Roll}} + P_{\text{Luft}} + P_{\text{Beschl.}} + P_{\text{Steigung}} + P_{\text{Schlupf}} + P_{\text{Getriebe}} + P_{\text{Nebenaggregate}}$$

mit

P_{\dots} Erforderliche Antriebsleistung an der Kurbelwelle in W

$P_{\text{Roll}\dots}$ Erforderliche Leistung zur Überwindung des Rollwiderstands in W

$P_{\text{Luft}\dots}$ Erforderliche Leistung zur Überwindung des Luftwiderstands in W

$P_{Beschl}...$	Beschleunigungsleistung in W
$P_{Steigung}...$	erforderliche Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands in W
$P_{Schlupf}...$	Verlustleistung durch Schlupf am Rad in W
$P_{Getriebe}...$	Verlustleistung im Getriebe in W
$P_{Nebenaggregate}...$	Leistung der Nebenaggregate in W

Die Komponenten der Leistungen für Schlupf, Getriebe und Nebenaggregate müssen nicht vom Prüfstand simuliert werden, da diese am Kfz am Prüfstand genauso wirken wie beim realen Fahren. Die Auflage zwischen Reifen und Rolle am Prüfstand kann von jener zwischen Reifen und Straße abweichen, weshalb die Komponente $P_{Schlupf}$ zwischen Labormessung und Realfahrt unterschiedlich sein kann. Der Effekt hat bei normalen Fahrzyklen auf die gesamte Antriebsleistung nur einen geringen Einfluss und kann daher vernachlässigt werden.

Die erforderliche Leistung zur Überwindung von Roll-, Luft- und Steigungswiderstand des Fahrzeugs muss vom Prüfstand simuliert werden. Die nachfolgenden Formeln zeigen die Gleichungen der einzelnen Leistungskomponenten, die für jedes Fahrzeug vor den Messungen am Pkw-Rollenprüfstand ermittelt werden.

3-3

$$P_{Roll} = m * g + (f_{r0} + f_{r1} * v) * v$$

mit:

$m...$	Masse von Fahrzeug und Beladung in kg
$g...$	Erdbeschleunigung in m/s^2
$f_{r0}...$	Statischer Rollwiderstandsbeiwert dimensionslos
$f_{r1}...$	Linearer Rollwiderstandsbeiwert in s/m
$v...$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs in m/s

3-4

$$P_{Luft} = \frac{1}{2} * c_w * A_{quer} * \rho_{Luft} * v^2$$

mit:

$c_w...$	Luftwiderstandsbeiwert dimensionslos
$A_{quer}...$	Querschnittsfläche des Fahrzeugs in m^2
$\rho_{Luft}...$	Dichte der Luft in kg/m^3

3-5

$$P_{Steigung} = m * g * Stg * 0,01 * v$$

mit:

$Stg...$	Steigung der Fahrbahn in %
----------	----------------------------

Die beiden möglichen Methoden zur Bestimmung der Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte werden im nächsten Kapitel genauer beschrieben. [5]

3.5.1.1 Fahrwiderstände für Messungen am Pkw-Rollenprüfstand

Für Messungen am Rollenprüfstand ist es wichtig, das Fahrzeug möglichst real abzubilden. Das bedeutet, dass der Widerstand den das Fahrzeug beim Fahren auf der Straße hat, am Prüfstand nachgebildet werden muss. Fahrwiderstände sind fahrzeugspezifisch und müssen für jedes Fahrzeug vor den Messungen im Labor am Prüfstand ermittelt werden. Eine Möglichkeit dafür ist die versuchstechnische Erfassung der Fahrwiderstandswerte mithilfe von Ausrollversuchen auf der Straße. Diese Ausrollversuche bedeuten einen hohen Aufwand, da das Fahrzeug mehrmals auf der Straße ausgerollt werden muss, um die Rollwiderstandskoeffizienten zu bestimmen. Als zweite Methode zur Bestimmung der Fahrwiderstände geht man von Standardwerten je Reifenlabel aus und bestimmt daraus, abhängig von der jeweiligen Fahrzeugmasse, die Rollwiderstandsbeiwerte. Die Bestimmung der Fahrwiderstände mithilfe des Reifenlabels stellt die einfachere Methode dar. Beide Methoden werden im Folgenden nun genauer beschrieben.

3.5.1.1.1 Bestimmung der Fahrwiderstände mittels Ausrollversuch

Bewegt sich ein Fahrzeug auf einer Fahrbahn, so wirken Kräfte der Bewegungsrichtung entgegen. Diese Kräfte werden in Summe als Fahrwiderstandskräfte bezeichnet und sie setzen sich aus Rollwiderstand, Luftwiderstand, Steigungswiderstand und den zu überwindenden Massenträgheiten der beschleunigten Fahrt zusammen. Um die wirkenden Kräfte am Fahrzeug ermitteln zu können, wird ein sogenannter Ausrollversuch auf einer möglichst ebenen, trockenen Fahrbahn bei Windstille durchgeführt. Beim Ausrollversuch wird das Fahrzeug auf ca. 120 km/h beschleunigt und dann in der Getriebestellung „Neutralgang“ bzw. Leerlauf auf ca. 20 km/h ausgerollt. Die Verzögerung findet durch die Fahrwiderstandskraft, die auf das Fahrzeug wirkt, statt. Wird nun der Geschwindigkeitsverlauf beim Ausrollversuch aufgezeichnet, kann durch den Ansatz des Kräftegleichgewichts auf das Fahrzeug die Fahrwiderstandskraft ermittelt werden, wie in der Formel 3-6 gezeigt wird. [33]

Folgendes Kräftegleichgewicht der äußeren Kräfte kann dabei angesetzt werden: [33]

3-6

$$FW = (f_{R0} + f_{R1} * v) + cw * \frac{\rho_{Luft}}{2} * A_{quer} * v^2 = m * a$$

mit:

$FW...$	Fahrwiderstandskraft in N
$(f_{R0} + f_{R1} * v)...$	Rollwiderstand FW_{Roll} in N
$cw * \frac{\rho}{2} * A * v^2 ...$	Luftwiderstand FW_{Luft} in N
$m * a...$	Massenträgheit bei der Beschleunigung in N
$m...$	$m_{äqui_rot} + m_{KFZ}$ (mit $m_{äqui_rot} \sim 4/100 * m_{KFZ}$) in kg
$a...$	Beschleunigung in m/s^2

Somit kann die Fahrwiderstandskraft als Polynom 2. Ordnung als Funktion von der Geschwindigkeit wie folgt angeschrieben werden: [33]

3-7

$$FW = R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 = m * a$$

Mit:

$R_0...$	Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstand in N
----------	--

$R_1 \dots$	Geschwindigkeitsabhängiger Widerstandsbeiwert in Nm/s
$R_2 \dots$	Quadratisch von v abhängiger Widerstandsbeiwert in Nm^2/s^2

Aus den zeitlichen Geschwindigkeitsverläufen der Ausrollversuche können somit die Fahrwiderstandswerte bestimmt werden. [33]

Ein Ausrollversuch ist relativ zeitaufwendig und teuer, weshalb oftmals die Bestimmung der Fahrwiderstandswerte mithilfe des Reifenlabels angewandt wird (für Typprüfungen allerdings nicht zulässig). Diese Methode wird im Folgenden nun genauer beschrieben.

3.5.1.1.2 Bestimmung die Fahrwiderstände mithilfe des Reifenlabels

Als Standardmethode wurden in dieser Arbeit die Fahrwiderstände eines Fahrzeugs über das Reifenlabel bestimmt. Je nach Bereifung – Winter- oder Sommerreifen – lässt sich das Reifenlabel des Reifens bestimmen. Seit dem 1. November 2012 müssen alle Reifen für Pkw und LNF innerhalb der EU mit einem Reifenlabel gekennzeichnet werden. Dieses Reifenlabel, wie in Abbildung 6 gezeigt, gibt drei umwelt- und sicherheitsrelevante Eigenschaften eines Reifens an: den Rollwiderstand, die Nasshaftung und das Rollgeräusch des Reifens. Im Zusammenhang mit dem Rollwiderstand steht der Kraftstoffverbrauch, weshalb diese Skala (links in der Abbildung) mit Reifen und Zapfsäule gekennzeichnet ist. Je geringer der Rollwiderstand des Reifens, desto weniger Kraftstoffverbrauch durch den Reifen ist gegeben. [32]

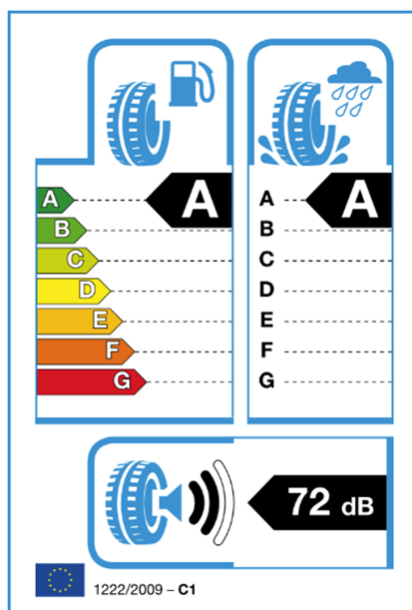


Abbildung 6: Beispielhaftes EU-Reifenlabel [32]

Der Buchstabe A in der Farbe Grün bedeutet die beste Bewertung. Der Buchstabe G in Rot kennzeichnet die schlechteste Bewertung. Der Verbrauch verschlechtert sich um 0,1 l/100 km je Buchstabe, wobei der Buchstabe D nicht belegt ist.

In der Verordnung Nr.1222/2009 des Europäischen Parlaments über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter [32] wird, abhängig vom Rollwiderstandsbeiwert (mit CR bezeichnet), eine Kraftstoffeffizienzklasse angegeben, wie in Abbildung 7 gezeigt.

Reifen der Klasse C1		Reifen der Klasse C2		Reifen der Klasse C3	
CR in kg/t	Energieeffizienzklasse	CR in kg/t	Energieeffizienzklasse	CR in kg/t	Energieeffizienzklasse
$CR \leq 6,5$	A	$CR \leq 5,5$	A	$CR \leq 4,0$	A
$6,6 \leq CR \leq 7,7$	B	$5,6 \leq CR \leq 6,7$	B	$4,1 \leq CR \leq 5,0$	B
$7,8 \leq CR \leq 9,0$	C	$6,8 \leq CR \leq 8,0$	C	$5,1 \leq CR \leq 6,0$	C
Leer	D	Leer	D	$6,1 \leq CR \leq 7,0$	D
$9,1 \leq CR \leq 10,5$	E	$8,1 \leq CR \leq 9,2$	E	$7,1 \leq CR \leq 8,0$	E
$10,6 \leq CR \leq 12,0$	F	$9,3 \leq CR \leq 10,5$	F	$CR \geq 8,1$	F
$CR \geq 12,1$	G	$CR \geq 10,6$	G	Leer	G

Abbildung 7: Kraftstoffeffizienzklassen [32]

Die angegebenen Rollwiderstandswerte der Tabelle beziehen sich auf eine Geschwindigkeit von 80 km/h.

Abbildung 8 zeigt anhand eines beispielhaften Fahrzeugs (Diesel-Pkw, EURO 6) die Fahrwiderstandskraft, ermittelt nach beiden Methoden, aufgetragen über der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Für die orange Kurve (Methode über Reifenlabel) wurde ein Luftwiderstandsbeiwert aus der Literatur für ein Fahrzeug dieses Segments gewählt.

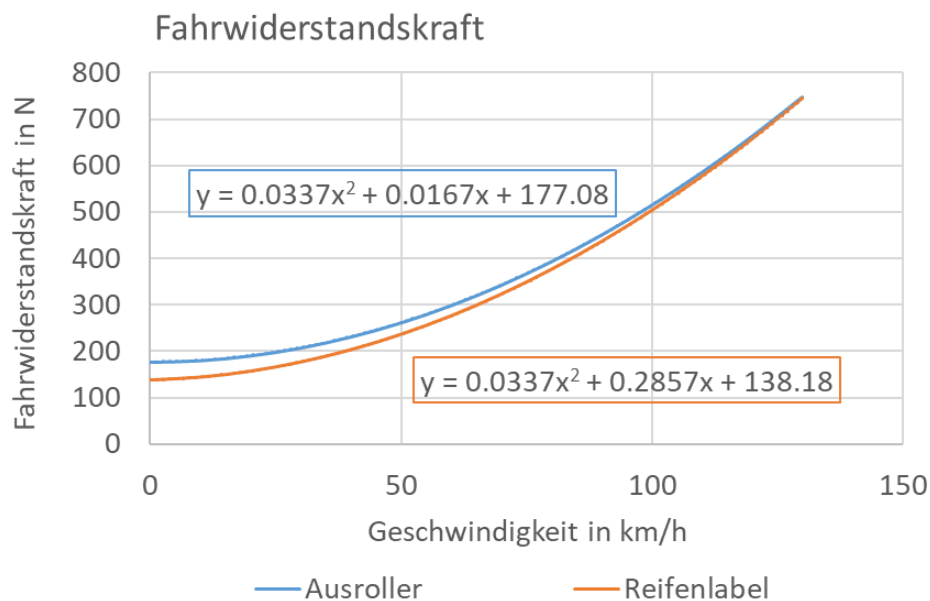


Abbildung 8: Fahrwiderstandspolynome Diesel-Pkw EURO 6

Die beiden Fahrwiderstandspolynome, mittels Ausrollversuch und über das Reifenlabel ermittelt, weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Im Ausrollversuch ergab sich offensichtlich ein höherer Rollwiderstandsbeiwert f_{r0} , dafür ein geringerer Luftwiderstand. Da im realen Betrieb Roll- und Luftwiderstand durch Wetter (Seitenwind, Temperatur, Regen etc.), Straße und Fahrzeug (Nachrüstreifen, Reifendruck Aufbauten etc.) stark variieren [19], ist die ungefähre Bestimmung der Fahrwiderstände mit Reifenlabel und Default-Luftwiderstandsbeiwerten als Basis für

reale Emissionsdaten gerechtfertigt. Die Typprüfdaten zu den Fahrwiderständen stehen i.a. nicht zur Verfügung und sind meist nur für optimale Bedingungen repräsentativ. Ausrollversuche sind, wie schon erwähnt, teuer und können wetterbedingt auch nicht immer sinnvoll durchgeführt werden.

3.5.1.2 Schadstoffmessung am Pkw-Rollenprüfstand

Die Schadstoffmessung wird meist mittels CVS-Verfahren („Constant Volume Sampling“-Verfahren) durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird das vom Fahrzeug emittierte Abgas mit gereinigter Umgebungsluft verdünnt, um Kondensation zu vermeiden. Ein Gebläse saugt das Abgas über drei Teilströme ab, die dann unterschiedlichen Messpfaden zugeteilt werden. Teilstrom 1 dient der Partikelmassenmessung und wird über ein Filterplättchen geleitet. Teilstrom 2 wird zu den Abgasanalysatoren für die Messung der Konzentrationen von CO₂, CO, HC und NO_x geleitet. Teilstrom 3 wird in sogenannte Beutel geleitet. Jeder Fahrzyklus besteht aus Phasen, die eine bestimmte Zeitdauer kennzeichnen, und je Phase wird ein Beutel mit Abgas befüllt. Ein weiterer Beutel wird parallel dazu mit Umgebungsluft gefüllt, um eine Korrektur der Hintergrundemissionen der Umgebungsluft durchführen zu können. Nach Testende wird der Beutelinhalt über die Abgasanalysatoren zur Messung geleitet und man erhält einen Emissionssummenwert für den gefahrenen Fahrzyklus. [33]

Für die Messung von CO₂ und CO kommt ein NDIR (Nichtdispersiver-Infrarot-Analysator) zum Einsatz. Das Messprinzip beruht auf der Absorption bestimmter Wellenlängen der infraroten Strahlung durch mehratomige Gase, welche charakteristisch für die einzelnen Gase ist, womit man sie dem jeweiligen Gas zuordnen kann. Das Messprinzip beruht im Wesentlichen darauf, dass die Absorption dieser Gase gemessen wird.

Die Messung der HC-Emissionen erfolgt mit einem FID (Flammenionisationsdetektor). Dabei wird das Abgas einer Wasserstoffflamme zugeführt, wo ein weit höherer Ionisationsstrom als bei den Inertgasen CO₂, CO u. a. gemessen werden kann. Der gemessene Ionisationsstrom ist somit ein Maß für die HC-Emissionen.

Die Stickoxide werden mit einem Chemilumineszenz-Analysator gemessen. Dieses Messprinzip bedient sich der Messung einer Lichtemission, die von NO₂ abgegeben wird, wenn es von einem angeregten Elektronenzustand in den Ursprungszustand fällt. Die Intensität der Strahlung ist somit ein Maß für die Konzentration des Gases.

Die Partikelanzahl wird ebenfalls gemessen. Dazu wird ein CPC (Condensation Particle Counter – Kondensationskernzähler) eingesetzt. Dabei werden die Partikel durch einen Messpfad geleitet, in dem sich gesättigter Alkohol (Butanol) befindet. Der Alkohol legt sich an den Partikelkern an und vergrößert ihn somit, was die Partikel mittels optischen Detektors zählbar macht. Dieses Messverfahren erfasst je nach Temperatur im Kondensator Partikel mit unterschiedlichem Mindestdurchmesser. Derzeit sind Partikel ab einem aerodynamischen Durchmesser von 23 nm limitiert. [33]

Der aerodynamische Durchmesser wird für Partikel mit unregelmäßiger Form angegeben. Er entspricht dem Durchmesser einer Kugel mit einer Dichte von 1 g/cm³, deren Sinkgeschwindigkeit in Luft dieselbe ist wie die des Partikels. [24]

Generell werden mit den Analysatoren am Prüfstand und auch bei den RDE-Fahrten immer die

Konzentrationen in ppm oder % der jeweiligen Schadstoffkomponente gemessen. Für die Umrechnung in eine Massenemission in g/s müssen der Abgasmassenstrom und der Anteil der Messgaskomponente im Massenstrom bekannt sein. Formel 3-8 zeigt den Zusammenhang zwischen Konzentration und Massenemission. [33]

Bestimmung der Massenemissionen Pkw-Rollenprüfstand: [33]

3-8

$$Em_i = \frac{\dot{m}}{\rho_{Norm}} * \frac{E_i * 10^{-6}}{22.4 * 10^{-3}} * M_i$$

mit:

$Em_i...$	Massenemission in g/s
$\frac{\dot{m}}{\rho_{Norm}}...$	Normvolumenstrom (Normbedingungen 0°C und 1013 mbar) in m ³ /s
22.4...	Molvolumen unter Normbedingungen in dm ³ /mol
$E_i...$	Emissionskonzentration in ppm
$M_i...$	Molmasse in g/mol

Am Pkw-Rollenprüfstand kommt neben der CVS-Anlage je nach Bedarf noch ein weiteres Emissionsmessgerät zum Einsatz, ein sogenanntes FTIR (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer). Das FTIR bestimmt die Größen der Schadstoffkomponenten aus dem nicht verdünnten Abgas und wird auch für die Messung von nicht limitierten Schadstoffkomponenten herangezogen. Die Funktionsweise des FTIRs basiert auf der Berechnung eines Spektrums mithilfe der Fourier-Transformation aus der gemessenen Überlagerung oder Interferenz von Wellen. Bei Messungen in dieser Arbeit wurde ein FTIR der Firma IAG verwendet (FITR Analyse System versa06).

3.5.2 Emissionsmessung auf der Straße

Die Emissionsmessung auf der Straße im realen Betrieb des Fahrzeugs wird mithilfe eines mobilen Messsystems, PEMS (Portable Emission Measurement System), durchgeführt. Ein PEMS besteht aus den Analysatoren zur Messung der gasförmigen Schadstoffe, einem GPS (Global Positioning System) zur Erfassung der Geschwindigkeit und der Seehöhe, einer Wetterstation für Feuchte- und Temperaturmessung, einem Partikelanzahl-Messgerät und einem Abgasmassenstrom-Messgerät. Die Stromversorgung des Messsystems erfolgt durch Akkus, also extern. Eine Stromversorgung aus dem Bordnetz des Fahrzeugs ist nicht erlaubt, da es den Bedarf an Leistung für Nebenverbraucher erhöhen und somit die Emissionen des Fahrzeugs beeinflussen würde.

3.5.2.1 Messaufbau PEMS

Abbildung 9 zeigt einen beispielhaften Aufbau der mobilen Messtechnik in einem Fahrzeug. Wenn genug Platz vorhanden ist, wird die Messtechnik in den Innenraum des Fahrzeugs platziert, um Verschmutzungen des Messsystems während der Fahrt zu vermeiden. Alternativ kann das gesamte Messsystem auf die Anhängerkupplung mithilfe einer passenden Vorrichtung dafür montiert werden und befindet sich dann außerhalb des Fahrzeugs.

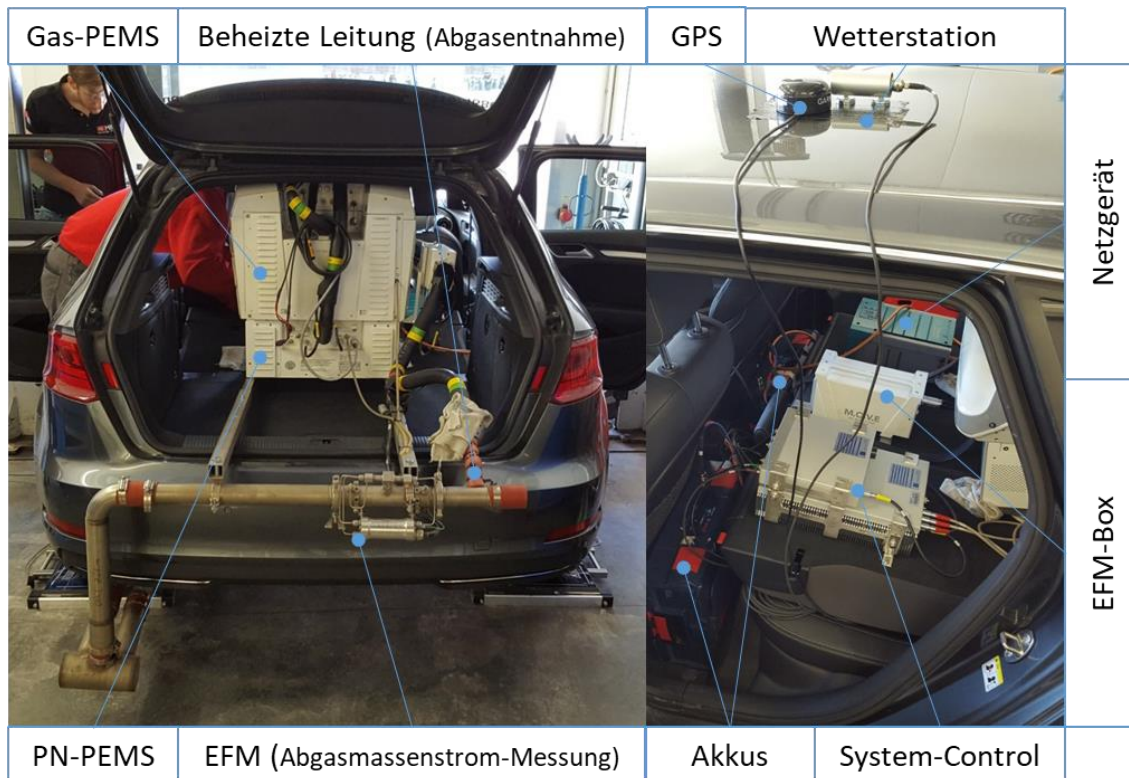


Abbildung 9: PEMS im Fahrzeug eingebaut

Vor Messbeginn müssen die Analysatoren kalibriert werden. Es werden zwei Punkte, der Nullpunkt und der Messgas-Endpunkt des jeweiligen Analysators, kalibriert. Zwischen diesen beiden Punkten geht man davon aus, dass der Analysator linear arbeitet. Eine Linearisierung der Analysatoren wird in regelmäßigen Abständen (alle 1000 Betriebsstunden) vom Hersteller vorgeschrieben bzw. muss diese nach eventuellen Reparaturarbeiten oder nach Austausch einzelner Komponenten des Analysators gemacht werden. Der Prozess zur Kalibrierung läuft nach Anschließen von Null- und Messgasen automatisch ab. Zuerst werden alle Leitungen des Messsystems gespült, um diese von eventuell vorhandenem Restgas zu befreien, danach werden Null- und Endpunkt für jeden Analysator überprüft. Nach der Kalibrierung kann mit der Messung begonnen werden.

3.5.2.2 Messgrößen und Messverfahren PEMS

Die Messverfahren für die gasförmigen Analysatoren unterscheiden sich nicht wesentlich von jenen am Pkw-Rollenprüfstand. HC-Emissionen werden bislang bei Pkw und LNF auf RDE-Fahrten noch nicht mitgemessen, da die Mitnahme von Wasserstoff als Brenngas für den FID ein Sicherheitsrisiko darstellt und die HC-Emissionen in der RDE-Gesetzgebung keine Limitierung haben.

Die Messung der Partikelanzahl erfolgt on-board anders als am Prüfstand. Die PN-Messung (PN – Partikelanzahl) für RDE basiert auf dem Prinzip eines Elektrometers.

Wie bereits erwähnt, werden von den Analysatoren immer Konzentrationen der jeweiligen Schadstoffkomponente gemessen. Die Umrechnung auf die Massenemission wird mit folgendem Zusammenhang gemacht.

Bestimmung der Massenemissionen RDE-Fahrten: [31]

$$m_{gas} = u_{gas} * c_{gas} * q_{mew}$$

mit:

m_{gas} ...	Massenemission der jeweiligen Schadstoffkomponente in g/s
u_{gas} ...	Verhältnis zwischen Anteil „Gas“ zum gesamten Abgas in g Gas/mg Abgas
C_{gas} ...	gemessenen Abgaskonzentration in ppm
q_{mew} ...	Abgasmassenstrom in kg/s

Der u_{gas} -Faktor ist aus einer Tabelle einer EU-Verordnung für den jeweilig eingesetzten Kraftstoff zu entnehmen. Abbildung 10 zeigt die Tabelle aus der entsprechenden Verordnung für die u_{gas} -Werte diverser Kraftstoffe.

u -Werte des Rohabgases als Darstellung des Verhältnisses zwischen der Dichte des Abgasbestandteils oder Schadstoffs i [kg/m^3] und der Dichte des Abgases [kg/m^3] (*)

Kraftstoff	ρ_a [kg/m^3]	Bestandteil oder Schadstoff i					
		NO _x	CO	HC	CO ₂	O ₂	CH ₄
		ρ_{gas} [kg/m^3]					
		2,053	1,250	(¹)	1,9636	1,4277	0,716
u_{gas} (²), (³)							
Diesel (B7)	1,2943	0,001586	0,000966	0,000482	0,001517	0,001103	0,000553
Ethanol (ED95)	1,2768	0,001609	0,000980	0,000780	0,001539	0,001119	0,000561
CNG (⁴)	1,2661	0,001621	0,000987	0,000528 (⁴)	0,001551	0,001128	0,000565
Propan	1,2805	0,001603	0,000976	0,000512	0,001533	0,001115	0,000559
Butan	1,2832	0,001600	0,000974	0,000505	0,001530	0,001113	0,000558
LPG (⁵)	1,2811	0,001602	0,000976	0,000510	0,001533	0,001115	0,000559
Benzin (E10)	1,2931	0,001587	0,000966	0,000499	0,001518	0,001104	0,000553
Ethanol (E85)	1,2797	0,001604	0,000977	0,000730	0,001534	0,001116	0,000559

(¹) Kraftstoffabhängig

(²) bei $\lambda = 2$, trockener Luft, 273 K und 101,3 kPa

(³) Genauigkeit der u -Werte innerhalb von 0,2 % bei einer Massenverteilung von: C - 66 - 76 %; H - 22 - 25 %; N - 0 - 12 %

(⁴) NMHC auf der Grundlage von CH₂,₃ (für THC ist der u_{gas} -Faktor für CH₄ zu verwenden)

(⁵) Genauigkeit der u -Werte \pm 0,2 % für folgende Massenverteilung: C₃ - 70 - 90 %; C₄ - 10 - 30 %

(⁶) u_{gas} ist ein Parameter ohne Einheit; die u_{gas} -Werte schließen Einheitsumrechnungen ein, um sicherzustellen, dass die momentanen Emissionen in der angegebenen physikalischen Einheit, etwa g/s, ermittelt werden.

Abbildung 10: Tabelle der u_{gas} -Werte für diverse Kraftstoffe [31]

3.6 RDE-Gesetzgebung

RDE bezeichnet jene Emissionen, die im Realfahrbetrieb eines Fahrzeugs auf der Straße gemessen werden. Für die Messung dieser Emissionen wurde in den letzten Jahren eine Gesetzgebung ausgearbeitet, in die die TU Graz, vor allem der Fachbereich „Emissionen“ am IVT, maßgebend involviert war.

Eine große Herausforderung hinsichtlich der Ausarbeitung einer neuen Gesetzgebung für Emissionsmessungen auf der Straße ist einerseits die Sicherstellung der Vergleichbarkeit durchgeführter Tests und andererseits die gerechte Beurteilung dieser. Am Rollenprüfstand im Labor können Randbedingungen einfacher eingehalten werden und von unterschiedlichen Laboren nachgebildet werden. Beim Fahren auf der Straße gibt es eine Vielzahl an Parametern, die variieren und nur schwer beeinflusst werden können. Die Ausarbeitung sinnvoller Parameter, um die Gültigkeit einer RDE-Fahrt festzulegen, sowie die Findung geeigneter Grenzwerte dieser

stellte einen erheblichen Forschungsaufwand dar. Es wurden dafür eine Vielzahl an RDE-Messungen durchgeführt und die Messdaten im Anschluss entsprechend aufbereitet, um eine Datenbasis zur Ausarbeitung der RDE-Gesetzgebung zu schaffen.

3.6.1 RDE-Randbedingungen

Wie bereits erwähnt, können Messungen im Labor auf dem Pkw-Rollenprüfstand einfach unter denselben Bedingungen (gleiche Temperatur, gleicher Messzyklus, Nebenverbraucher-Einstellungen usw.) durchgeführt werden. Daher sind auch Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit gegeben. RDE-Messungen auf der Straße hingegen können von sehr vielen Faktoren beeinflusst werden. Ein paar Beispiele dafür sind:

- Temperatur
- Seehöhe
- Verkehrsaufkommen
- Wettersituation
- Fahrstil
- Nebenverbraucher (Klima, Sitzheizung, Licht, Radio etc.)

Ziel der RDE-Tests ist es, alle relevanten realen Fahrbedingungen abzubilden, ohne dass der Hersteller den genauen Testablauf kennt und seine Emissionsminderungskonzepte genau auf den Testfall hin optimieren kann. Damit müssen Komponenten und deren Regelungen allgemein gültig ausgelegt sein. Allerdings sollen extreme Testzustände ausgeschlossen werden, so dass die Technologien nicht auf nahezu nie auftretende „Worst-Case-Situationen“ ausgelegt werden müssen, was zu teuren Lösungen führen könnte.

Um nun extreme Fahrzustände in RDE-Messungen ausschließen und Messergebnisse gerecht beurteilen zu können, hat die Gesetzgebung die in Tabelle 4 gezeigten Tripparameter zur Einhaltung einer gültigen RDE-Fahrt festgelegt. Grundsätzlich gibt es laut RDE-Gesetzgebung drei Straßenkategorien, die je nach gefahrener Geschwindigkeit unterschieden werden. Fährt das Fahrzeug weniger als 60 km/h, werden sämtliche Messgrößen für diese Zeitspanne der Kategorie „Stadt“ zugeteilt. Die Messdaten beim Fahren größer gleich 60 km/h und kleiner gleich 90 km/h zählen zur Kategorie „Überland“. Alles über 90 km/h wird der Kategorie „Autobahn“ zugeordnet. Die Parameter der Randbedingungen können je Kategorie unterschiedliche Grenzwerte haben oder auch für den gesamten RDE-Trip gelten, wie in den nachfolgenden Tabellen gezeigt wird.

Tabelle 4: Randbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt [3]

RDE-Randbedingungen für einen gültigen RDE-Test			
Parameter	Stadt	Überland	Autobahn
	$v \leq 60 \text{ km/h}$	$60 \geq v \leq 90 \text{ km/h}$	$90 \text{ km/h} < v$
Mindeststrecke	16 km		
Streckenbasierter Anteil	29 – 44%	23 – 43%	23 – 43%
Fahrdauer gesamt	90 – 120 min		
Durchsch. Geschw. (inkl. Stopps)	$15 < v < 40 \text{ km/h}$	-	
Gesamte Stillstands Zeit ($v < 1 \text{ km/h}$)	6 – 30% vom Stadtanteil	-	-
Einzelne Stoppzeit	$\leq 300 \text{ sec}$	-	-
$v > 100 \text{ km/h}$	-	-	$\geq 5 \text{ min}$
$v > 145 \text{ km/h}$	-	-	< 3% der Autobahnzeit
Kum. positive Höhenmeter	< 1200 m/100 km		
Höhendifferenz zw. Start- und Endpunkt	$\leq 100 \text{ m}$		

Neben diesen allgemeinen Tripparametern gibt es auch Vorgaben für die Dynamik einer RDE-Fahrt. RDE-Fahrten sollten weder mit übertrieben hoher noch mit unzureichender Fahrdynamik gefahren werden, um den Einfluss des Fahrstils zu limitieren. Daher wurden für die Überprüfung der Fahrdynamik zwei Parameter eingeführt, die in Tabelle 5 gezeigt werden. Der 95-Perzentil-Wert von $v \cdot a_{\text{pos}}$ dient zur Begrenzung der Dynamik nach oben hin, während die RPA (Relative Positive Acceleration) die Mindestdynamik nach unten hin begrenzt. Unter a_{pos} versteht man Beschleunigungswerte größer 0.1 m/s^2 .

Tabelle 5: Dynamikparameter für eine gültige RDE-Fahrt [3]

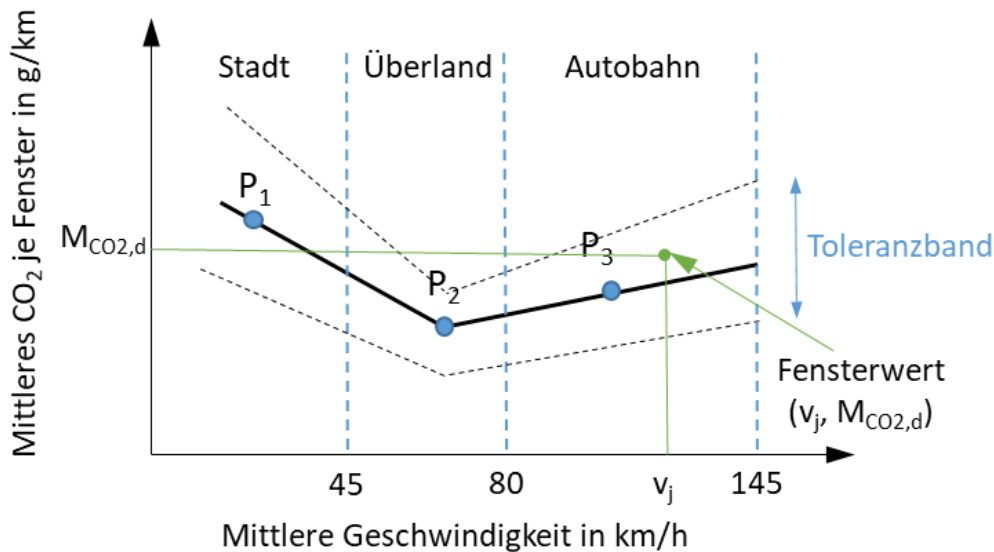
RDE-Dynamikparameter für einen gültigen RDE-Test		
Max	$v \leq 74.6 \text{ km/h}$	$v > 74.6 \text{ km/h}$
95 Perz $v \cdot a_{\text{pos}}$	$\max (v \cdot a_{\text{pos}}) = 0.136 \cdot v + 14.44$	$\max (v \cdot a_{\text{pos}}) = 0.0742 \cdot v + 18.966$
Min	$v \leq 94.05 \text{ km/h}$	$v > 94.05 \text{ km/h}$
Relative Positive Acceleration	$\min (\text{RPA}) = -0.0016 \cdot v + 0.1755$	$\min (\text{RPA}) = 0.025$

Neben den beiden Dynamikparametern wird noch eine weitere Methode zur Verifizierung der Trip-Dynamik angewandt. Diese Methode der gleitenden Mittelungsfenster summiert die Emissionen im praktischen Fahrbetrieb so lange auf, bis ein bestimmter Maßstab erreicht wird. Der Maßstab ist die halbe CO_2 Masse, die für das jeweilige Fahrzeug im WLTC am Prüfstand gemessen wurde. Für jedes dieser Fenster werden die mittlere Geschwindigkeit und das mittlere CO_2 gebildet und in eine CO_2 -charakteristische-Kurve des Fahrzeugs eingetragen. Tabelle 6 zeigt die Referenzpunkte, die für jedes Fahrzeug individuell aus dem gemessenen WLTC im Labor ermittelt werden.

Tabelle 6: Punkte der CO_2 -charakteristischen Kurve für das Fahrzeug [3]

CO_2 -charakteristische-Kurve des Fahrzeugs			
WLTC Phase	Low Speed (LS)	High Speed (HS)	Extra-High Speed (EHS)
Referenzpunkt	P1	P2	P3
Geschw. [km/h]	18.882	56.664	91.997
CO_2 [g/km]	$\text{CO}_2_{\text{LS-WLTC}}$	$\text{CO}_2_{\text{HS-WLTC}}$	$\text{CO}_2_{\text{EHS-WLTC}}$

Daraus ergibt sich dann die CO_2 -charakteristische Kurve, wie in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 11: CO₂-charakteristische-Kurve [3]

Die gesamte RDE-Fahrt wird in Stadt-, Überland- und Autobahnanteile eingeteilt, abhängig von der mittleren Geschwindigkeit je Fenster. In Tabelle 7 sind die Parameter für diese Methode sowie die Grenzwerte der Mindestfensteranzahl je Kategorie (Stadt, Überland und Autobahn) zusammengefasst.

Tabelle 7: Parameter für die Methode der gleitenden Mittelungsfenster [3]

	Stadt	Überland	Autobahn
Fenster-Schwellenwert	$v < 45 \text{ km/h}$	$45 \leq v < 80 \text{ km/h}$	$80 \text{ km/h} \leq v < 145 \text{ km/h}$
Toleranzen bezogen auf die CO ₂ -charakteristische-Kurve			
Obere Toleranz	+ 45%	+ 40%	
Untere Toleranz	-25% für ICE und NOVC-HEV, -100% für OVC-HEV		
% der Fenster innerhalb des Toleranzbandes			
Gültige RDE-Fahrt	$\geq 50\%$	$\geq 50\%$	$\geq 50\%$

Eine RDE-Fahrt ist also nur dann gültig, wenn je Kategorie mind. 50% der Mittelungsfenster innerhalb des Toleranzbandes der CO₂-charakteristischen Kurve des Fahrzeugs liegen.

Auch für die Umgebungsbedingungen gibt es Gültigkeitsbereiche für die Seehöhe und die Umgebungstemperatur. Außerdem werden Bereiche festgelegt, die als erschwerte Bedingungen gelten, in deren Zeitschritten die gemessenen Emissionen durch den Faktor 1,6 dividiert werden. Tabelle 8 zeigt die Gültigkeitsbereiche für Temperatur und Seehöhe sowie die Grenzen zwischen moderaten und erschwerten Bedingungen bei RDE-Fahrten an.

Tabelle 8: Umgebungsbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt [3]

Umgebungsbedingungen für einen gültigen RDE-Test		
Umgebungsbedingungen	Moderate Bedingungen	Erschwerte Bedingungen
Emissionskorrekturfaktoren	1	1/1,6
Temperatur	$0 \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$	$-7 \leq T < 0^{\circ}\text{C}; 30 < T \leq 35^{\circ}\text{C}$
Ausnahmeregelung bis Jänner 2020	$3 \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$	$-2 \leq T > 3^{\circ}\text{C}; 30 < T \leq 35^{\circ}\text{C}$
Seehöhe	$\leq 700 \text{ m}$	$700 < \text{Seehöhe} \leq 1300 \text{ m}$

3.6.2 RDE-Routen Findung

Wie in Tabelle 4 gezeigt, gibt es eine Vielzahl an Tripparametern für RDE-Fahrten. Zur Einhaltung dieser muss im ersten Schritt eine passende Route gefunden werden. Ausgehend von der TU Graz wurden drei RDE-Fahrstrecken gefunden, welche unter Einhaltung der StVO (Straßenverkehrsordnung) und bei normalem Verkehrsaufkommen die Randbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt erfüllen. Die drei Routen unterscheiden sich im Wesentlichen bezüglich ihrer kumulierten Höhenmetern je 100 km. Tabelle 9 fasst die wesentlichen Eckdaten der drei RDE-Routen der TU Graz zusammen. Als Standardroute wurde die Ries-Route gewählt. Die Ries-Route erfüllt bei normalen Verkehrsaufkommen die Randbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt gut und enthält keine Tunnel oder Unterführungen, sodass es zu keinem Ausfall des GPS-Signals während der Fahrt kommt. Die Arzberg-Route ist jene Route, wo am meisten Höhenmeter zurückgelegt werden und dient daher für Untersuchungen des Einflusses von erschwerenden Bedingungen auf das Emissionsverhalten.

Tabelle 9: Routen-Daten RDE-Routen TU Graz

RDE-Routen der TU Graz					
Bezeichnung	Kum. Höhenmeter	Stadtanteil	Überlandanteil	Autobahnanteil	Fahrstrecke
[-]	[m/100 km]	[% streckenbasiert]			[km]
Ries	690	32	32	36	85
Köflach	350	34	34	32	100
Arzberg	1150	33	34	33	105

Da die Ries-Route zur Standard-RDE-Route der TU Graz wurde, ist im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit der Bezeichnung RWC (Real World Cycle) immer die Ries-Route gemeint. In Abbildung 12 sieht man den Geschwindigkeits- und Steigungs-Verlauf einer Ries-Route. Die Geschwindigkeit ist in Blau, die Steigung in Orange dargestellt.

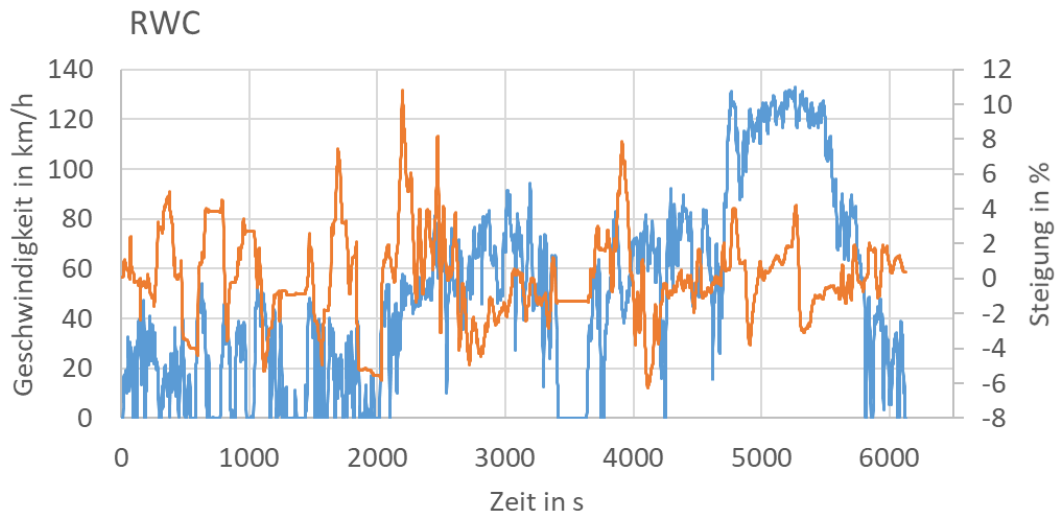


Abbildung 12: Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf der Ries-Route

Vergleicht man die Geschwindigkeitsverläufe RWC und WLTC (Abbildung 4) miteinander, dann ist erkennbar, dass Realfahrten mehr Geschwindigkeitswechsel aufweisen können und es daher zu einer höheren Fahrdynamik kommen kann, als dies bei Messungen am Pkw-Rollenprüfstand im definiertem Fahrzyklus der Fall ist. Mit steigender Fahrdynamik kann es auch zu steigenden Emissionen kommen, was die Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte bei Realfahrten erschwert.

Abbildung 13 zeigt den Fahrdynamikparameter 95 Perz $v \cdot a_{\text{pos}}$ (in der Abbildung in Form der blauen Balken dargestellt) und das gemessene CO_2 (in der Abbildung als orange Punkte dargestellt) eines EURO 6c Dieselfahrzeugs (140 kW Nennleistung, E-Segment) für sechs Arzberg- und sechs Ries-Routen, gemessen auf der Straße, sowie für die Pkw-Rollenzyklen NEDC und WLTC, gemessen am Pkw-Rollenprüfstand.

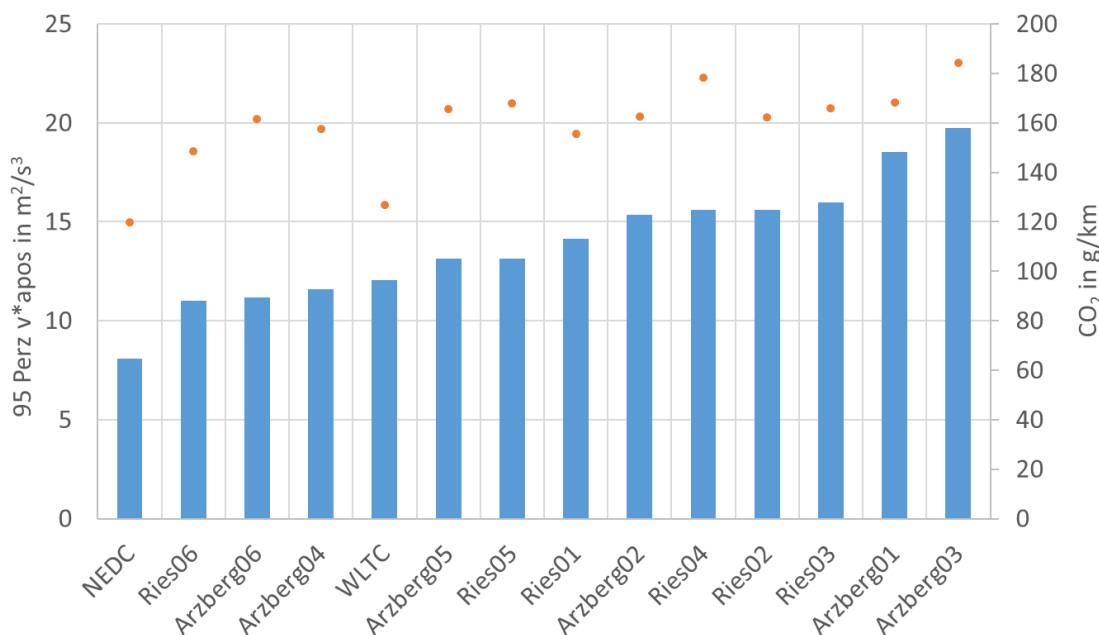


Abbildung 13: Gemessene Fahrdynamik und CO_2 eines EURO 6c Dieselfahrzeugs für Realfahrten und Rollenzyklen

Der NEDC weist die geringste Fahrdynamik und auch den geringsten CO₂-Ausstoß auf. Die Fahrdynamik des WLTC liegt im Bereich jener der RDE-Fahrten. Die gemessenen CO₂-Emissionen für NEDC und WLTC liegen deutlich unterhalb der RDE-Messwerte.

3.6.3 RDE-Herausforderungen

Wie bereits erwähnt, wird durch das neue Prüfverfahren für die Zulassung von Pkw und LNF ein größerer Bereich des Motorkennfelds hinsichtlich der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte erfasst. Abgasnachbehandlungssysteme sind somit in einem weiten Feld an Betriebspunkten des Motors in ihrer Effizienz gefordert, um die Emissionen, vom Motor kommend, zu reduzieren. Abbildung 14 zeigt die Leistung am Rad aufgetragen über der Motordrehzahl eines Diesel-Pkws (Nennleistung 140 kW bei 4000 U/min, EURO 6b) für den WLTC, NEDC und drei RDE-Fahrten. Bei den drei RDE-Fahrten wurde versucht, unterschiedliche Fahrstile anzuwenden, soweit das die Verkehrssituation erlaubt hat. Es wurde versucht, aggressiv (agg), normal (norm) und ökonomisch (eco) zu fahren. Abbildung 14 veranschaulicht die unterschiedlich angefahrenen Betriebspunkte für die betrachteten Zyklen innerhalb des Motorkennfelds dieses Fahrzeugs, indem die Volllast- und die Schleppkurve, dargestellt in Grün und Blau, eingezeichnet wurden.

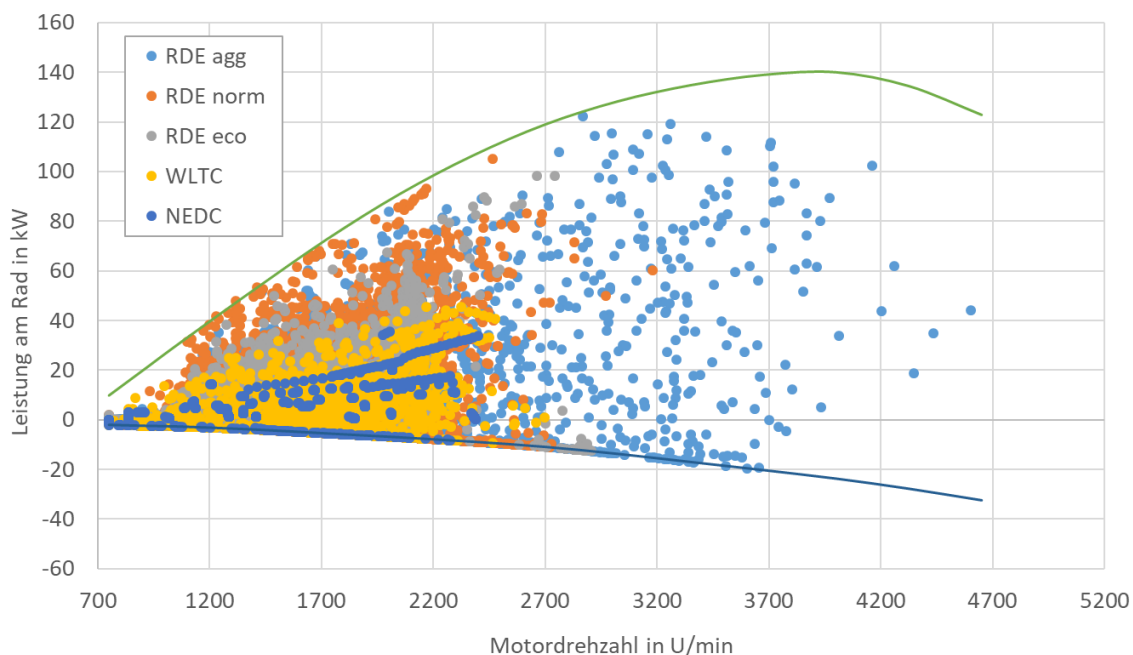


Abbildung 14: Leistung am Rad über Drehzahl für WLTC, NEDC und RDE (1 Punkt entspricht 1 Sek. Messung)

Unschwer lässt sich erkennen, dass im NEDC nur das linke untere Eck des gesamten Motorkennfelds genutzt wird, währenddessen eine aggressive RDE-Fahrt einen weiten Bereich des Kennfelds abdeckt und die dort angefahrenen Lastpunkte auch an die Volllast gehen. Der WLTC deckt im Vergleich zum NEDC ebenfalls einen größeren Bereich im Kennfeld des Motors ab.

3.6.4 RDE-Emissionsgrenzwerte

Die Grenzwerte für die gemessenen Emissionen während einer RDE-Fahrt sind nicht dieselben wie am Pkw-Rollenprüfstand im Labor. Die gemessenen Emissionen während einer RDE-Fahrt werden noch in einem Post Processing nach der Messung, abhängig von den gemessenen CO₂-

Emissionen des jeweiligen Fahrzeugs im WLTC, korrigiert (eine genauere Beschreibung erfolgt in Kap. 3.6.5). Diese korrigierten Emissionen für den Stadtanteil und für den gesamten RDE-Trip müssen kleiner als die sogenannten NTE (Not To Exceed) -Limits sein. [3]

3-10

$$NTE_{Schadstoff} = CF_{Schadstoff} * EURO\ 6\ Grenzwert$$

mit:

$NTE_{Schadstoff}...$ Not To Exceed Limit in mg/km oder #/km

$CF_{Schadstoff}...$ Konformitätsfaktor für den jeweiligen Schadstoff

Die NTE-Limits errechnen sich aus den Konformitätsfaktoren des jeweiligen Schadstoffs und dem dazugehörigen Grenzwert der Schadstoffkomponente, der im WLTC auf der Pkw-Rolle gilt. Tabelle 10 zeigt die Konformitätsfaktoren für die gemessenen Stickoxide und die Partikelanzahl. Die Kohlenmonoxid-Emissionen werden bei RDE-Fahrten mitgemessen, sind aber nicht limitiert. [3]

Tabelle 10: Konformitätsfaktoren für EURO 6d RDE [3]

Konformitätsfaktoren für EURO 6d RDE			
$CF_{pollutant}$	NO_x	PN	CO
EURO 6d Temp	2.1	1 + Margin PN mit Margin PN = 0.5	-
EURO 6d	1 + Margin NO_x mit Margin NO_x = 0.43	1+ Margin PN mit Margin PN = 0.5	-

Der Begriff „Margin“ soll die Unsicherheiten des PEMS berücksichtigen. Der Wert soll jährlich überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Aus der Tabelle wird der Unterschied zwischen EURO 6d und EURO 6d Temp ersichtlich. Für die EURO 6d Temp gilt der temporäre Konformitätsfaktor, für NO_x mit 2,1 festgelegt. In der finalen Emissionsstufe EURO 6d wird dieser auf 1,43 gesenkt und die emittierten NO_x -Emissionen bei RDE-Fahrten dürfen nur 1,43-mal so hoch sein wie jene am Pkw-Rollenprüfstand.

Nimmt man als Beispiel ein Diesel-Fahrzeug an, dann würden die NTE_{NO_x} für EURO 6d Temp 168 mg/km und die NTE_{NO_x} für EURO 6d 114,4 mg/km betragen.

3.6.5 RDE-korrigierte Emissionen

Die gemessenen Emissionen einer RDE-Fahrt werden nicht direkt, wie beim WLTC, mit den Grenzwerten verglichen, sondern es werden korrigierte Emissionen berechnet. Für die Ermittlung der korrigierten Emissionen gab es im Zuge der Findung der RDE-Gesetzgebung unterschiedliche Ansätze. Auch im Zuge dieser Dissertation wurde eine Methode dafür entwickelt. Für die derzeit offizielle RDE-Gesetzgebung wurden ursprünglich angedachte Methoden verworfen, weshalb diese hier nicht mehr näher beschrieben werden.¹ Die aktuell gültige Methode zur Bestimmung der korrigierten Emissionen bei Messungen auf der Straße wird nun nachfolgend genauer beschrieben.

¹ Bis zum RDE-Paket 4 (gültig seit September 2019) wurden die „Power-Binning-Methode“ (PBM der TU Graz) und die EMROAD-Methode zur Ermittlung der korrigierten Emissionen verwendet. Die PBM und im Speziellen die Gültigkeitsbereiche dieser wurden im Laufe dieser Dissertation entwickelt. Beide Methoden werden in der Verordnung EG 692/2008 vom Juli 2008 genauer beschrieben.

Für die gesamte RDE-Fahrt und den Stadtanteil werden die gewichteten Emissionen wie folgt berechnet: [3]

3-11

$$M_{RDE,k} = m_{RDE,k} * RF_k$$

mit:

$M_{RDE,k}$... gewichtete streckenspezifische Masse der gasförmigen Emissionen in mg/km oder der Partikelanzahl in #/km

$m_{RDE,k}$... gemessene gasförmige Emissionen in mg/km oder Partikelanzahl in #/km für den RDE-Trip für die jeweilige Kategorie

RF_k ... Result Evaluation Faktor für den RDE-Trip dimensionslos

k ... $k = t$ für den gesamten RDE-Trip und u für den Stadtanteil des RDE-Trips

Abbildung 15 zeigt die Ermittlung des Result Evaluation Faktors. Abhängig vom CO₂-Verhältnis, gemessen bei der RDE-Fahrt und im WLTC auf der Pkw -Rolle, ergibt sich somit der Faktor für die Ermittlung der korrigierten Emissionen. Ab Jänner 2020 wird eine andere Funktion angewandt wie bisher. Beide Funktionen sind in Abbildung 15 dargestellt.

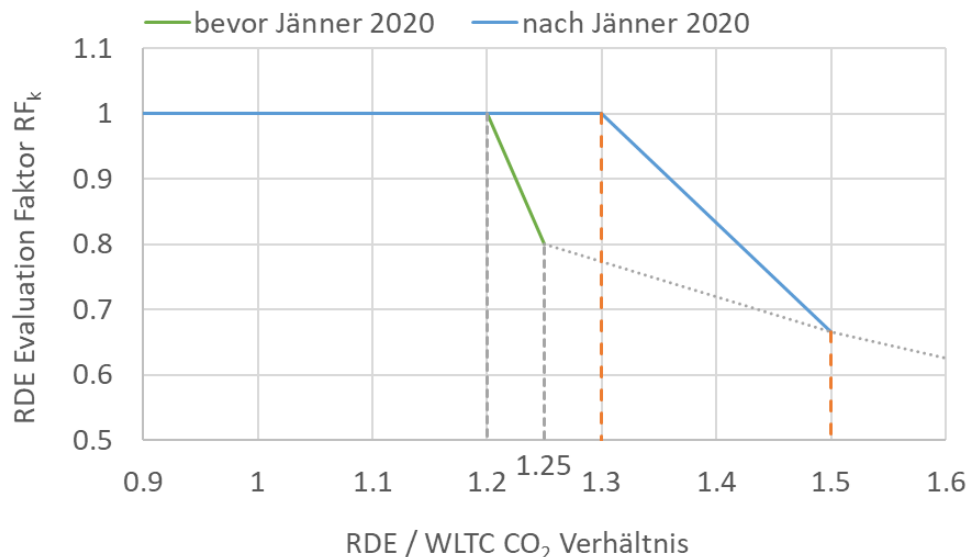


Abbildung 15: Result Evaluation Faktor über das CO₂-Verhältnis RDE/WLTC [3]

Die gewichteten Emissionen für den gesamten RDE-Trip und den Stadtanteil werden dann schließlich mit den NTE-Grenzwerten verglichen, was in der folgenden Formel dargestellt ist. [3]

3-12

$$M_{RDE,u} \text{ und } M_{RDE,t} < NTE_{\text{pollutant}}$$

Das relevante CO₂ im WLTC wird je nach Antriebskonzept des Fahrzeugs unterschieden. Tabelle 11 zeigt welche Phasen des WLTC für welche Kategorie verwendet werden.

Tabelle 11: Relevantes CO₂ im WLTC für die Gewichtung [3]

Relevante Phasen des WLTC für $M_{CO_2, WLTC, k}$		
k	Stadtanteil	Gesamter RDE-Trip
ICE	„Low + medium“-Phase	Gesamter WLTC
NOVC-HEV	Gesamter WLTC	
OVC-HEV	Gesamter WLTC im Ladungserhaltungsmodus	

mit:

ICE... Internal Combustion Engine, also rein konventionell betriebene Fahrzeuge

NOVC-HEV... Not Off Vehicle Charging – Hybrid Electric Vehicle, also Hybridfahrzeuge, die nicht extern aufgeladen werden können

OVC-HEV... Off Vehicle Charging – Hybrid Electric Vehicle, also Plug-in-Hybridfahrzeuge, die auch extern geladen werden können

Für ICE und NOVC-HEV gilt:

3-13

$$r_k = \frac{M_{CO_2, RDE, k}}{M_{CO_2, WLTC, k}}$$

mit:

r_k ... Result Evaluation Faktor RF_k dimensionslos

$M_{CO_2, RDE, k}$... Gemessenes CO₂ bei der RDE-Fahrt für den gesamten Trip bzw. den Stadtanteil des RDE-Trips in g/km

$M_{CO_2, WTC, k}$... Relevantes CO₂ im WLTC in g/km

Für OVC-HEV gilt:

3-14

$$r_k = \frac{M_{CO_2,RDE,k}}{M_{CO_2,WLTC-CS,k}} * \frac{0.85}{IC_k}$$

mit:

3-15

$$IC_k = \frac{\text{Distanz gefahren mit dem ICE (gesamter RDE – Trip bzw. Stadtanteil)}}{\text{Gesamte RDE – Strecke bzw. gesamte Strecke Stadt}}$$

Die Result Evaluation Faktors werden von der Europäischen Kommission überprüft und gegebenenfalls aufgrund technischen Fortschritts überarbeitet [3]

4 HBEFA

Im Rahmen des Updates des HBEFAs im Jahr 2019 (Version: HBEFA 4.1) wurden im Rahmen der Dissertation erstmals auch repräsentative Emissions- und Energieverbrauchswerte von BEV, HEV und PHEV simuliert. Dabei wurden die Daten für Fahrzeuge und Motoren analog zur bestehenden Methode bei konventionellen Kfz für durchschnittliche Kfz ermittelt. Für Elektromotoren wurde ein eigenes, normiertes Kennfeldformat eingeführt und eine generische Hybrid-Betriebsstrategie angewandt, um die Fahrzeuge in allen Verkehrszuständen des HBEFAs simulieren zu können. Nachfolgend sind zuerst das HBEFA und die grundlegenden Methoden beschrieben, danach die speziellen Themen für die elektrifizierten Antriebe.

Das HBEFA enthält Emissionsfaktoren für alle relevanten Fahrzeugtypen für eine Vielzahl an Verkehrssituationen. Diese reichen vom „Stop-and-go“-Betrieb bis hin zum Fahren auf der Autobahn ohne Geschwindigkeitsbegrenzung. Die Emissionsfaktoren des HBEFAs basieren dabei auf Emissionsmessungen am Rollenprüfstand sowie im realen Betrieb auf der Straße. Am Rollenprüfstand sind dabei jeweils reale Fahrzyklen gemessen worden. Die Emissionsfaktoren werden für alle Kombinationen von Fahrzeugsegmenten und Verkehrssituationen simuliert. Fahrzeugsegmente sind dabei jeweils Gruppen gleicher Kfz-Kategorie, Antriebsart und Abgasklasse, wie z. B. EURO 6d Diesel-Pkw. Das Simulationsmodell PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model), welches in Kapitel 5 beschrieben wird, liefert die Emissionsfaktoren für den warmen Betriebszustand der Fahrzeuge. Kaltstart- und Verdampfungsemissionen werden gesondert berücksichtigt und werden hier nicht weiter beschrieben. [22]

Um eine hohe Repräsentativität der Emissionsfaktoren zu gewährleisten, werden regelmäßige Updates des HBEFAs gemacht in denen die zugrunde liegende Datenbank und auch das Simulationsmodell aktualisiert werden. Das letzte Update (HBEFA 4.1) fand 2019 statt. Für dieses Update wurden im Zuge dieser Dissertation die Simulationen der Kraftstoffverbräuche von Pkw-HEV und Pkw-BEV und LNF-PHEV, LNF-HEV, LNF-BEV durchgeführt, welche im Weiteren genauer beschrieben werden.

4.1 Methode für HBEFA

Die Fahrzeugeingabedaten sind ausschlaggebend für die Simulation der Emissionsfaktoren. Die Erstellung dieser wurde für alle Fahrzeugsegmente gleich durchgeführt. Folgende Vorgehensweise wurde dafür gewählt:

- Fahrzeugsegmente wurden definiert, die, wie oben erwähnt, Fahrzeuge mit ähnlichem Emissionsverhalten darstellen. Die Einteilung erfolgte nach den folgenden Kriterien: [22]
 - Fahrzeugkategorien (Pkw, LNF, Zweiräder, SNf (Schwere Nutzfahrzeuge))
 - Unterkategorie (z. B. Stadtbus, Reisebus)
 - Größenklassen (Hubraum für Zweiräder, technisch höchstzulässiges Gesamtgewicht für LNF und SNf)
 - Antriebskonzepte (Diesel, Benzin, Gas, Elektrisch, Hybrid)
 - EURO-Klassen für die Emissionsgrenzwerte
- Für jedes Fahrzeugsegment wurden die Inputdaten für das Simulationsprogramm PHEM erstellt. Die Datensätze der durchschnittlichen Fahrzeuge werden je nach Anteil der Neuzulassungen gewichtet.
 - Die Fahrzeugmasse im fahrbereiten Zustand, die Nennleistung des Motors und der Hubraum wurden aus Statistiken zur CO₂-Überwachung gewonnen.

- Reifendimensionen und Getriebeübersetzungen wurden von Fahrzeugen genommen, welche ähnliche Masse und Leistung aufweisen.
- Luftwiderstand, Rollwiderstand und Energiebedarf der Nebenverbraucher wurden auf den realen Kraftstoffverbrauch hin kalibriert.
- Werte für Kraftstoffdurchfluss wurden den Ergebnissen von Motorentests entnommen.
- Für jedes Fahrzeug, für das Realfahrtemissionen verfügbar waren, wurde ein Emissionskennfeld erstellt. Die Motorkennfelder wurden mit Messdaten bei warmem Motorbetrieb und Umgebungstemperaturen von etwa 20°C und 30°C erstellt. Temperatureffekte wurden ebenfalls berücksichtigt.
- Das durchschnittliche Emissionskennfeld für jedes Segment wurde als – nach Flottenanteilen der Marken und Typen – gewichteter Durchschnitt aus den Emissionskennfeldern der einzelnen Fahrzeuge berechnet.

Im Laufe dieser Dissertation wurde das HBEFA von der Version 3.3 auf die Version 4.1 aktualisiert. [22]

4.2 Datenbasis für HBEFA 4.1

Für das HBEFA 4.1 wurde folgende Datenbasis verwendet:

- CO₂-Monitoring zur Gewichtung der einzelnen Emissionskennfelder je nach Zulassungsanzahl
- Spritmonitor.de für die Kalibrierung der Fahrzeugdatensätze im Simulationstool PHEM (nähere Beschreibung des Simulationsprogramms erfolgt im nachfolgenden Kapitel)
- ERMES-Datenbank (European Research for Mobile Emission Sources), die sämtliche Messdaten für die Erstellung, Kalibrierung und Validierung der Emissionskennfelder beinhaltet

4.2.1 CO₂-Monitoring

Die CO₂-Monitoring Datenbank wird auch EU28 (nach den 28 Mitgliedsstaaten der EU) genannt und beinhaltet die Neuzulassungen von Fahrzeugmodellen im Zeitraum von 2013 bis 2017. Das ist jener Zeitraum, indem die Emissionsklasse EURO 6b für Pkw eingeführt wurde. Die Abgasnormen werden in der EU28 nicht klassifiziert und somit wurde die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge mit der Emissionsklasse EURO 6b abgeschätzt. Die Anmeldungen für 2018 und 2019 konnten für das HBEFA 4.1-Update nicht berücksichtigt werden.

Die Anzahl der Zulassungen je Fahrzeug ist die Basis für die Gewichtung der einzelnen Emissionskennfelder für die durchschnittlichen Kennfelder für die Simulation in PHEM. Es wurde für alle Modellvarianten eines Fahrzeugmodells (z. B. Audi A4 als Limousine oder als Avant) dasselbe NO_x-Emissionsverhalten angenommen. Diese Annahme ist eine Vereinfachung, führt aber im Vergleich zu einer einfachen Mittelung ohne Gewichtung zu repräsentativeren Ergebnissen. [22]

4.2.2 Spritmonitor.de

Spritmonitor.de gibt den von Autobesitzern gelieferten Kraftstoffverbrauch in Deutschland an. Für das HBEFA konnten aus diesen Angaben ca. 550.000 Fahrzeuge der Modelljahre 2001 bis 2016 zur HBEFA-Datenbank hinzugefügt werden. Da diese Kraftstoffverbräuche realen Daten entsprechen, konnten diese Daten zur Kalibrierung der Simulationsdatensätze verwendet werden, um somit Einflüsse wie Seitenwind, Fahren mit Anhänger, Fahren mit Dachbox, nasse

Fahrbahnoberfläche usw. in der Simulation mitabzubilden. Die Daten von Spritmonitor.de wurden vom ICCT (Internal Council on Clean Transportation) in einem Projekt des UBA-D (Umweltbundesamts Deutschland) ausgewertet. [23]

4.2.3 ERMES Datenbank

Emissionsdaten von Realfahrten auf der Straße bilden die wichtigste Grundlage für die Abschätzung repräsentativer Emissionsfaktoren, wie dies im HBEFA passiert. Für diese Datenbank, die von der TU Graz und INFRAS organisiert wird, haben einige Labore Messdaten zur Verfügung gestellt. Insgesamt konnten Messdaten von mehr als 4000 Pkw (EURO 0 bis EURO 6d Temp) für die ERMES-Datenbank gesammelt werden. Für mehr als 1500 Fahrzeuge wurden reale Messungen auf der Straße durchgeführt. Diese bilden die wichtigste Grundlage für die Erstellung der Emissionskennfelder in PHEM und deren Kalibrierung. Durch die verschiedenen Umgebungstemperaturen, bei denen die Tests durchgeführt wurden, war die Messdatenauswertung aufwendiger. Die Aufbereitung der Messdaten ist genauer in [22] beschrieben. Bei PEMS-Messungen auf der Straße werden bei Pkw und LNF die Emissionskomponenten NO_x, CO₂, CO und PN mitgemessen. Alle anderen Emissionskomponenten werden nur bei Labormessungen erfasst. Auch die Messgenauigkeit von PEMS-Messgeräten ist im Vergleich zu jenen im Labor geringer, was sich natürlich auf die Messergebnisse auswirkt [22]

4.2.4 Messungen für HBEFA

Im Zuge dieser Dissertation wurde im Auftrag des UBA-D eine Messkampagne an insgesamt 23 Pkw und 2 LNF durchgeführt. Die Messungen beinhalteten Messungen am Rollenprüfstand sowie RDE-Messungen auf der Straße. Für 5 Fahrzeuge wurden die Fahrwiderstandsbeiwerte für die Messungen am Prüfstand durch Ausrollversuche messtechnisch ermittelt, für die übrigen wurden die Fahrwiderstände nach der Standardmethode bestimmt (siehe Kap. 3.5.1.1). Von den insgesamt 25 Fahrzeugen wurden 12 Diesel-Pkw, 2 Diesel-LNF, 10 Benzin-Pkw und ein Elektrofahrzeug vermessen. Die Messdaten bilden eine wichtige Grundlage für die Erstellung von Motorkennfeldern für zukünftige HBEFA-Updates. Für das HBEFA-Update 4.1 wurden diese Daten noch nicht in vollem Umfang, aber teilweise verwendet, da alle Messungen erst im Anschluss an die HBEFA-Arbeiten abgeschlossen waren.

Detaillierte Messergebnisse je Fahrzeug sind in Berichten an das UBA-D zusammengefasst. [18]

Tabelle 12 zeigt eine Übersicht der vermessenen Fahrzeuge nach Antriebsart und Emissionsklasse.

Tabelle 12: Übersicht Messungen für HBEFA der TU Graz

Diesel				Benzin		Elektro
EU 5	EU 6b	EU 6c	EU 6d Temp	EU 6c	EU 6d Temp	-
1 LNF	1 LNF	1 Pkw	11 Pkw	2 Pkw	8 Pkw	1 Pkw

4.2.4.1 Messprogramm Pkw-Rolle

Am Rollenprüfstand wurden neben den gesetzlich definierten Fahrzyklen, wie NEDC und WLTC, auch Fahrzyklen, die das reale Fahren realistischer darstellen sollten, aber keine gesetzliche Definition haben, vermessen. Diese Fahrzyklen heißen IUFC (Inrets Urbain Fluide Court), ERMES und CADC (Common Artemis Driving Cycle) und werden nun im Weiteren

genauer beschrieben. NEDC und WLTC wurden bereits in Kapitel 3.5 beschrieben.

IUFC-Fahrzyklus:

Zur Untersuchung des Kaltstartverhaltens von Fahrzeugen wird der IUFC für Rollenmessungen verwendet. Er stellt den „Stop-and-go“-Betrieb in der Stadt dar, welcher durch seinen in Abbildung 16 gezeigten Geschwindigkeitsverlauf nachgestellt wird.

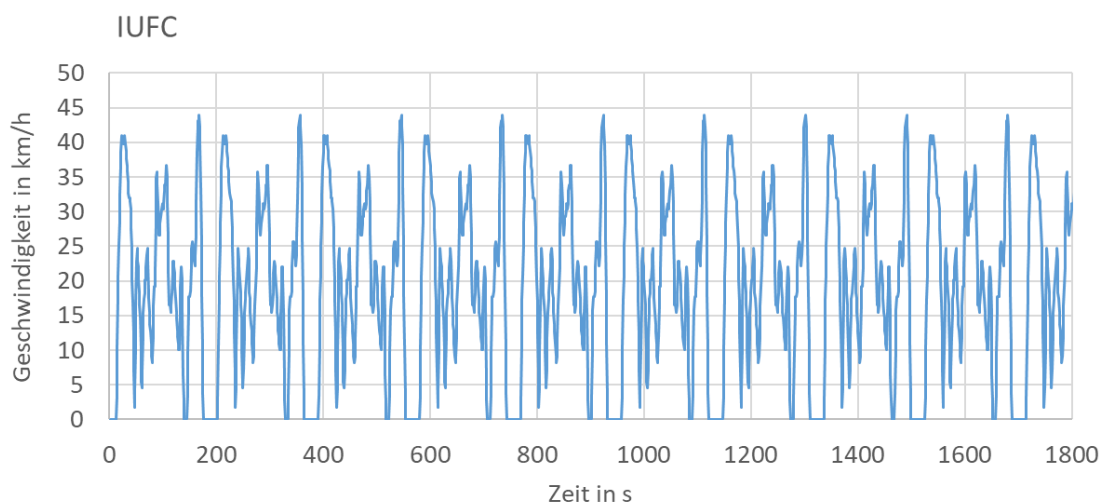


Abbildung 16: Geschwindigkeitsverlauf IUFC

Die durchschnittliche Geschwindigkeit des 1890 s langen Fahrzyklus liegt bei ca. 19 km/h, die Maximalgeschwindigkeit bei 44 km/h. Wie man im Verlauf erkennt, wird ein ständiges Stehenbleiben und Wiederanfahren mit diesem Fahrzyklus nachgebildet. Vor allem von Interesse ist diese Betriebsart für kalte Fahrzeuge mit Abgasmachbehandlungsanlagen, die meist erst ab einer bestimmten Temperatur ihre volle Funktionalität und damit eine gute Reduktion bestimmter Abgaskomponenten aufweisen.

ERMES-Fahrzyklus:

Der ERMES-Zyklus wurde so ausgelegt, dass ein kurzer Zyklus genug Daten zum Befüllen des gesamten Motorkennfelds eines Fahrzeugs liefert. Wie man in Abbildung 17 am Geschwindigkeitsverlauf sehen kann, besteht er in den ca. ersten 300 sec eher aus einem Niederlastteil, der eine Vorkonditionierung durch das Fahren im städtischen Bereich abdeckt, ab Sekunde 300 beginnt der Innerortstestteil, gefolgt vom Außerortsteil und Autobahnteil. Der ERMES-Fahrzyklus umfasst Beschleunigungsrampen unter Vollast. Für die Simulation von Emissionsfaktoren ist der ERMS-Zyklus somit geeignet, da er ein reales Fahren durchaus darstellt.

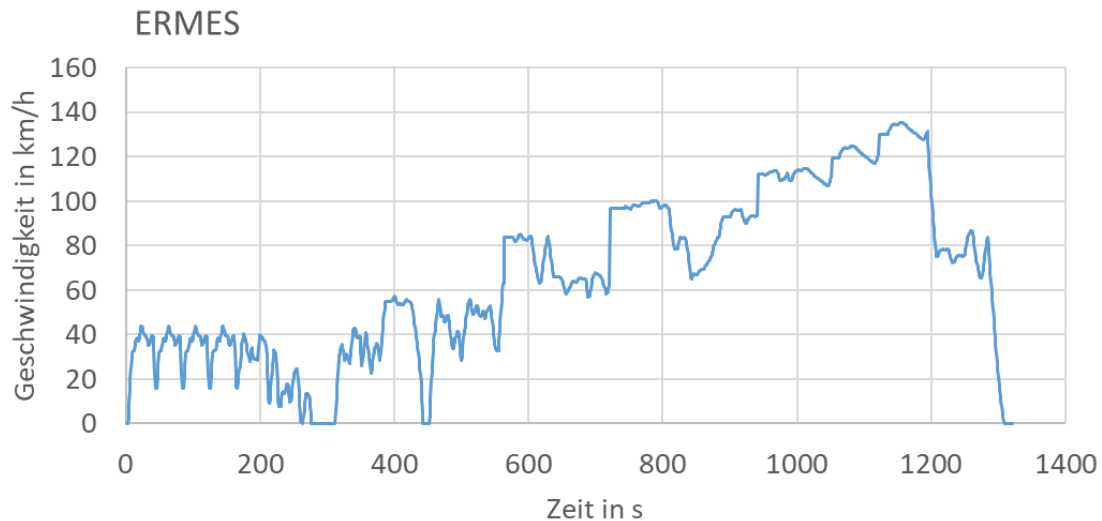


Abbildung 17: Geschwindigkeitsverlauf ERMES

Der ERMES-Fahrzyklus ist insgesamt 1320 s lang, seine Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei etwa 66 km/h und die Maximalgeschwindigkeit bei ca. 135 km/h.

CADC-Fahrzyklus:

Der CADC besteht aus drei Teilzyklen, dem CADC urban, rural und motorway, die das Fahren in der Stadt, auf Landstraßen und auf der Autobahn darstellen. Der CADC urban dauert 993 s, der CADC rural 1082 s und der CADC motorway 1068 s.

Abbildung 18 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf des gesamten CADC, welcher zuerst ein Fahren in der Stadt, gefolgt von einem Fahren auf Landstraßen mit anschließendem Fahren auf der Autobahn darstellt.

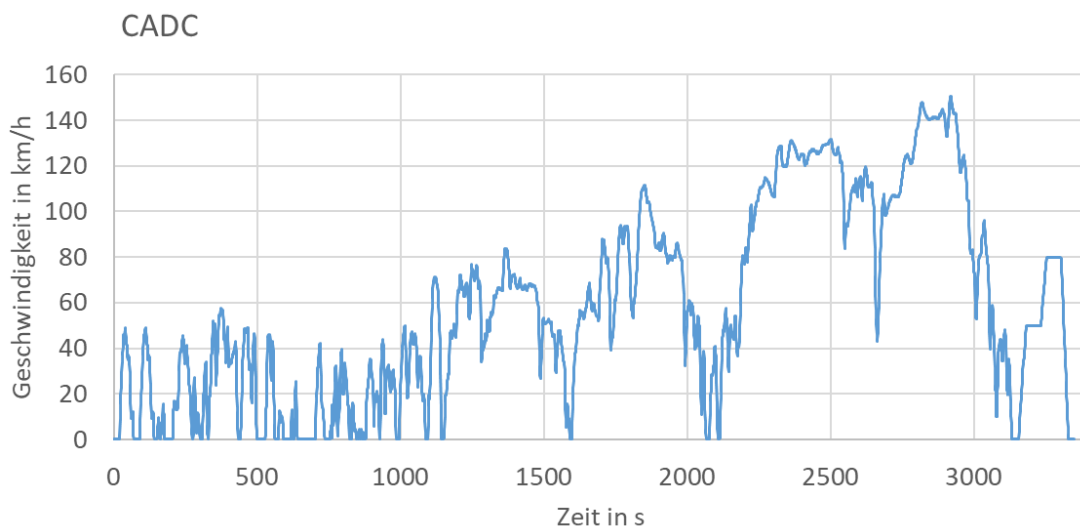


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverlauf CADC

Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der vermessenen Fahrzyklen auf der Pkw-Rolle und deren Randbedingungen. Die Umgebungstemperatur beim Messen am Rollenprüfstand ist für NEDC

und WLTC genormt, für die anderen Zyklen gibt es keine Vorschrift. Einige ERMES- und IUFC-Messungen wurden daher bei 5°C Umgebungstemperatur durchgeführt, um einen Temperatureinfluss auf die Emissionen abbilden zu können. Alle anderen Messungen wurden bei einer Umgebungstemperatur von ca. 20°C – 25°C durchgeführt.

Tabelle 13: Messprogramm Pkw -Rolle

Fahrzyklus	Startbedingungen	Dauer in s	Solltemperatur
NEDC	kalt	1180	20°C – 30°C
WLTC	kalt / warm	1800	23°C +/- 5°C
ERMES	warm	1110	-
CADC urban	warm	921	-
CADC rural	warm	981	-
CADC motorway	warm	736	-
IUFC	kalt	1890	-

Messgrößen Pkw-Rolle

Die Messung der Emissionen (CO₂, CO, HC, NO_x und CH₄) wurde mittels CVS-Anlage je Phase (Beutelwerte) und auch zeitlich aufgelöst in Modalwerten gemacht. Die Partikelmasse wurde über die Wiegung der Filterblättchen vor und nach der Messung bestimmt. Auch die Partikelanzahl wurde mitgemessen. Mit dem FTIR wurden folgende Abgaskomponenten gemessen: NO_x, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, Benzol, H₂CO, H₂O, Formaldehyde, CO₂, CO, Propylen, Ethylen, Ethan, Acetylen, HNO₂, MeOH, Ameisensäure, SO₂, 1,3 Butadien, Acetaldehyde, COS, H₂SO₄ und SO₂.

4.2.4.2 Messprogramm RDE

Das Messprogramm auf der Straße inkludierte mindestens drei RDE-Messungen je Fahrzeug auf der Standardroute der TU Graz, der Ries-Route, welche in Kapitel 3.6.1 beschrieben wurde. Bei den Messfahrten wurden die Beladung und die Fahrdynamik variiert, um den Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Emissionen zu untersuchen. Mindestens eine Fahrt wurde mit kaltem Fahrzeug gestartet, um den Kaltstart mitzumessen. Die Emissionen wurden für den gesamten RDE-Trip, sowie für die drei Kategorien Stadt, Überland und Autobahn ausgewertet. Tabelle 14 zeigt eine Übersicht der Messgrößen anhand der Auswertung der RDE-Messfahrten für ein beispielhaftes Fahrzeug (EURO 6d Dieselfahrzeug, C-Segment) für die Kategorie Stadt.

Tabelle 14: Beispielhafte Emissionsmessdaten der RDE für die Kategorie Stadt

Messgröße	Einheit	Ries01	Ries02	Ries03
CO ₂	[g/km]	153,45	178,31	180,83
CO	[g/km]	0,027	0,153	0,072

NO _x	[mg/km]	53	51	60
Verbrauch	[l/100km]	5,84	6,79	6,88
PN	[g/km]	2,49E+09	6,66E+10	4,36E+09
Streckenanteil	[%]	32,7	32,4	31,5

Für den gesamten RDE-Trip sowie für einen kalt vermessenen WLTC auf der Pkw-Rolle sind die Messergebnisse in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Beispielhafte Emissionsmessdaten für gesamten RDE-Trip und WLTC

Messgröße	Einheit	Ries01	Ries02	Ries03	WLTC
CO ₂	[g/km]	154,79	140,70	142,67	132,23
CO	[g/km]	0,190	0,094	0,042	0,067
NO _x	[mg/km]	134	21	22	45
Verbrauch	[l/100km]	5,0	5,36	5,43	5,04
PN	[g/km]	2,04E+11	2,24E+10	2,56E+09	3,35E+10

Neben den gezeigten Messgrößen wurden auch alle relevanten Trip- und Dynamik-Parameter, die zur Überprüfung der Gültigkeit einer RDE-Messfahrt herangezogen werden, je Straßenkategorie bestimmt.

Messgrößen RDE

Bei den RDE-Fahrten werden die gasförmigen Schadstoffkomponenten CO₂, CO, NO₂ und NO mittels der Abgasanalysatoren (AVL M.O.V.E) erfasst. Die Partikelanzahl wird über ein eigenes PN-Messgerät gemessen (AVL PN PEMS). Eine Wetterstation und eine GPS-Anlage am Fahrzeugdach liefern die Messgrößen Temperatur, Luftfeuchte, Geschwindigkeit und Seehöhe während der RDE-Fahrten.

4.2.4.3 Zusammenfassung Messergebnisse NO_x für EURO 6d Temp Pkw

Die beiden Abbildungen (Abbildung 19 und Abbildung 20) zeigen die gemessenen NO_x-Emissionen der insgesamt 19 EURO 6d Temp Fahrzeuge über der durchschnittlichen Geschwindigkeit im jeweiligen Fahrzyklus, gemessen auf der Pkw-Rolle, bzw. bei den RDE-Fahrten je Pkw aufgetragen. Abbildung 19 zeigt das Bild für die 11 EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge, in Abbildung 20 sind die Messergebnisse der 8 Benzinfahrzeuge gezeigt.

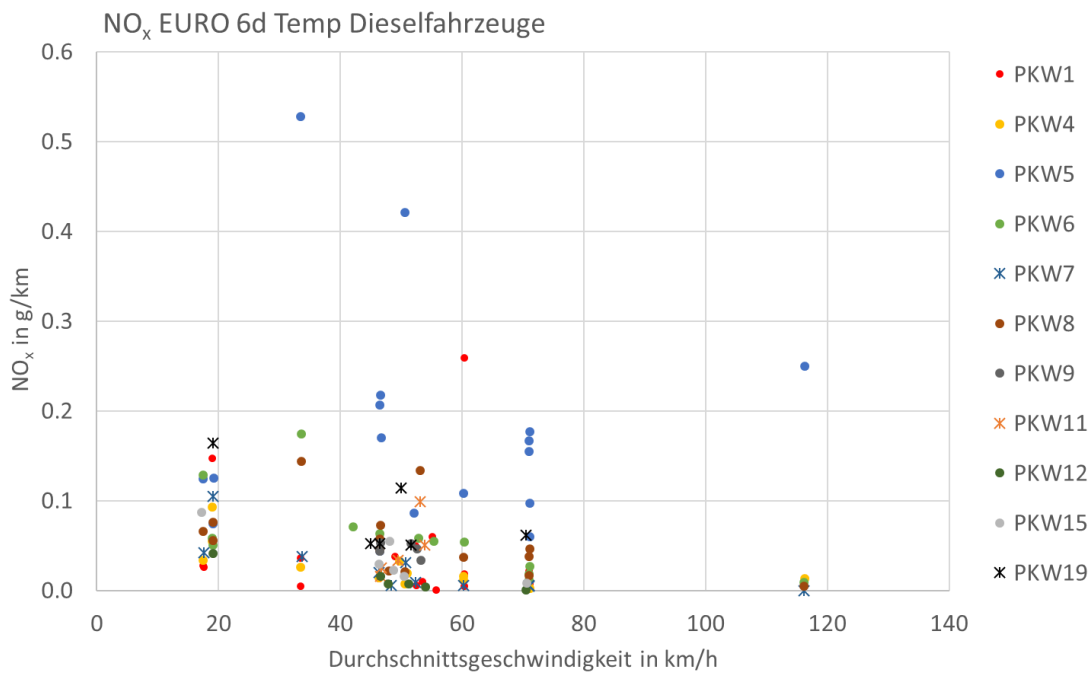


Abbildung 19: Gemessenes NO_x EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge

Der Mittelwert der gemessenen NO_x-Emissionen für die Dieselfahrzeuge bei den Pkw-Rollenmessungen liegt bei etwa 57 mg/km. Auch bei den RDE-Fahrten wurden im Mittel 57 mg/km NO_x bei den Dieselfahrzeugen gemessen.

Für die Benzinfahrzeuge liegt der Mittelwert der NO_x-Emissionen bei den Pkw -Rollenmessungen bei etwa 22 mg/km und bei den RDE-Fahrten bei ca. 30 mg/km.

Das gemessene CO₂ für Diesel- und Benzinfahrzeuge liegt für die Messungen im Labor, sowie für die Messungen auf der Straße im Mittel bei ca. 145 g/km.

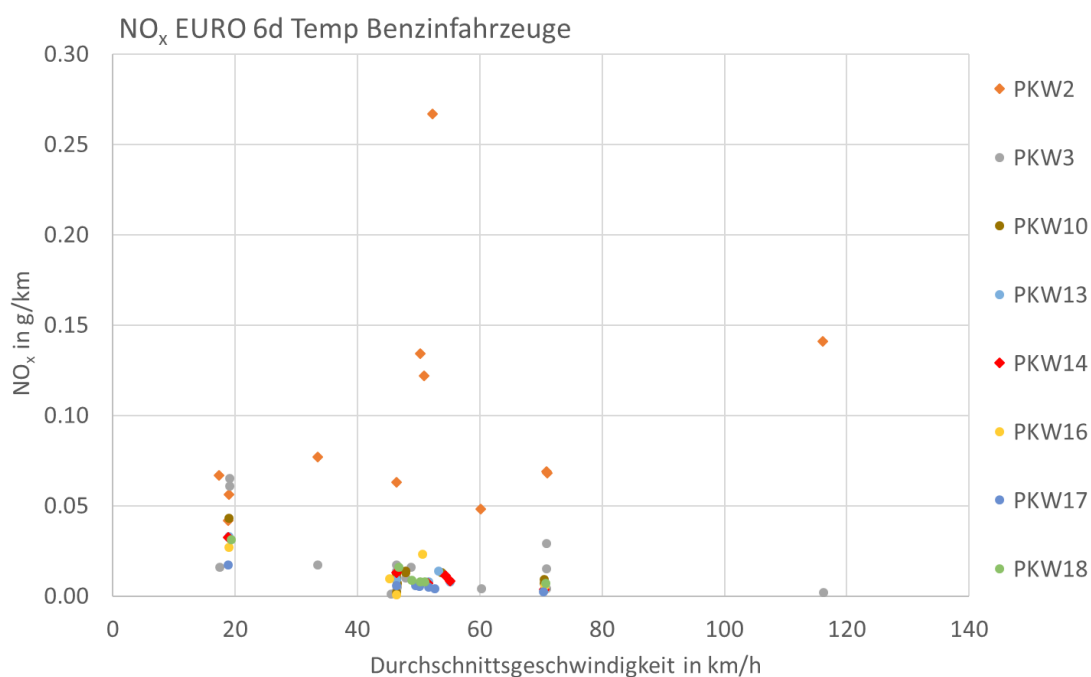


Abbildung 20: Gemessenes NO_x EURO 6d Temp Benzinfahrzeuge

5 PHEM

PHEM ist ein Emissions-Simulationsmodell, das am IVT der TU Graz entwickelt wurde. Die Simulationemethode in PHEM wird ständig weiterentwickelt, um auch neue Fahrzeugtechnologien abbilden zu können.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Standard-Simulationemethode in PHEM, wie sie für konventionell betriebene Fahrzeuge verwendet wird, sowie die Simulationemethode für Hybrid- (PHEV und HEV) und Elektrofahrzeuge genauer erklärt.

5.1 Standard Simulationemethode in PHEM

PHEM ist ein Längsdynamikmodell, welches Emissionen und Kraftstoffverbrauch für Straßenfahrzeuge in 1 Hz für einen vorgegebenen Fahrzyklus berechnet. Vorgegeben werden neben den Fahrzeugdaten Emissionskennfelder und je nach Fahrzeugantriebskonzept noch weitere Inputdaten, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Abbildung 21 zeigt das Berechnungsschema für die Simulationen mit PHEM.

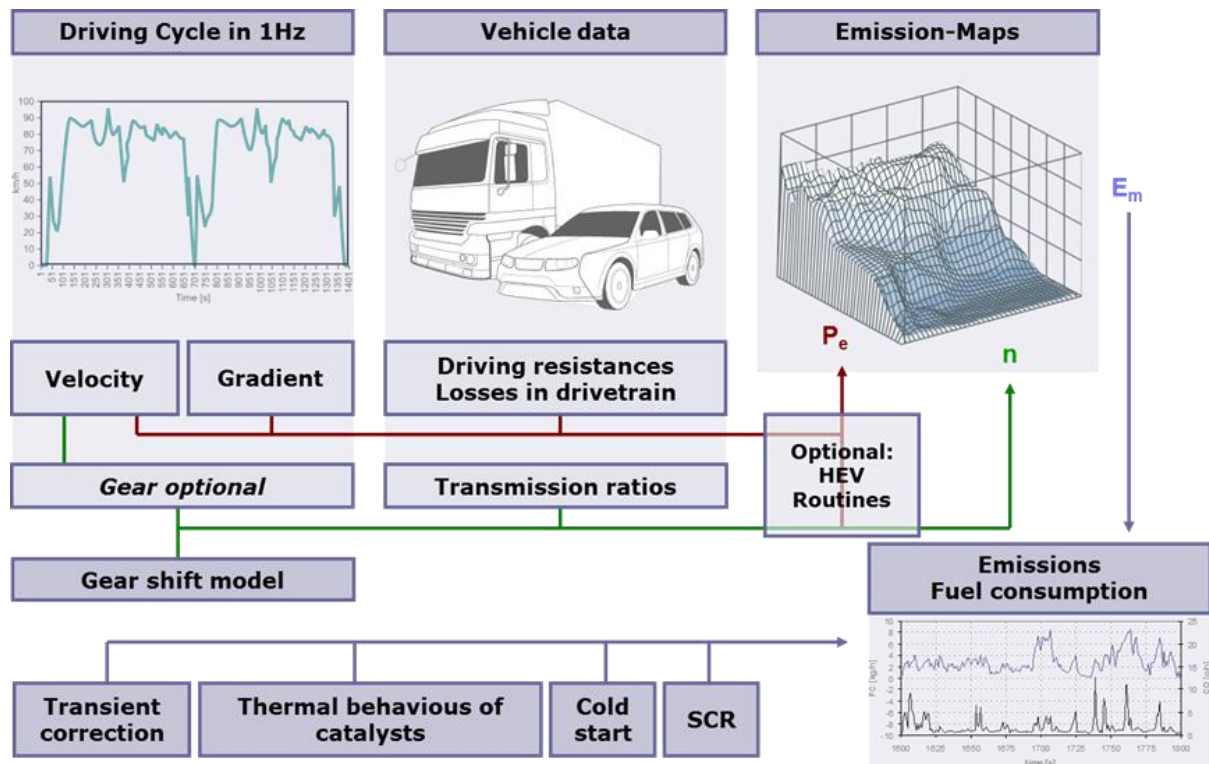


Abbildung 21: Schema PHEM-Modell [21]

Die benötigte Motorleistung für das Nachfahren des vorgegebenen Fahrzyklus wird aus den Fahrwiderständen des Fahrzeugs, den Verlusten im Antriebsstrang und dem Leistungsbedarf der Nebenverbraucher berechnet. Die Motordrehzahl wird über den Reifendurchmesser und den eingelegten Gang mit der dazugehörigen Übersetzung im PHEM-Schaltmodell simuliert. Somit können abhängig vom Betriebspunkt (Motorleistung und Motordrehzahl) Kraftstoffverbrauch und Emissionen aus vorgegebenen Motorkennfeldern interpoliert werden. Um die Genauigkeit der simulierten Emissionen aus stationären Kennfelddaten zu erhöhen, wurden transiente Korrekturfaktoren eingeführt, um das unterschiedliche Emissionsverhalten bei transienten Motorlasten zu berücksichtigen. Auch Modelle für Abgasnachbehandlungssysteme kommen zum

Einsatz, um diese ebenfalls in der Simulation zu berücksichtigen.

Da Motorleistung und Motordrehzahl aus physikalischen Zusammenhängen berechnet werden, kann mit diesem Ansatz jeder erdenkliche Fahrzustand veranschaulicht werden. Simulation unterschiedlicher Nutzlasten von Fahrzeugen in Kombination mit Straßenlängsneigungen und variablen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen kann somit vom Modell abgedeckt werden. [21]

5.1.1 Abgasnachbehandlung in PHEM

Abgasnachbehandlungssysteme, wie sie in modernen Fahrzeugen zu finden sind, können ebenfalls in der Simulation mit PHEM abgebildet werden. Seit der Einführung der Emissionsklasse EURO 6 kommen in Dieselfahrzeugen unter anderem SCR-Katalysatoren (Selective Catalytic Reduction) zum Einsatz, um die Stickoxide aus dem Verbrennungsprozess zu minimieren. Ausschlaggebend für eine hohe Konvertierung der NO_x -Emissionen im SCR sind die Abgastemperatur und der Abgasmassenstrom, da die Konvertierungsrate im SCR-System als Funktion dieser beiden Parameter in Kennfeldern definiert wird. Eine genaue Beschreibung zur Simulation mit Abgasnachbehandlung in PHEM wird in [21] angegeben.

5.2 PHEM-Simulationsmethode für PHEV, HEV und BEV

Die zuvor beschriebene Standardsimulationsmethode in PHEM wird auch für die Simulation von PHEV, HEV und BEV verwendet, allerdings unter Berücksichtigung des zusätzlichen elektrischen Antriebsstrangs dieser Fahrzeugvarianten. Der elektrische Pfad im Fahrzeug wird mithilfe von zusätzlichen Inputdaten in der Simulation abgebildet.

Abbildung 22 zeigt ausgehend von einem Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang (links oben) die zusätzlichen Komponenten für die Antriebsstränge von HEV, PHEV und BEV (im Uhrzeigersinn).

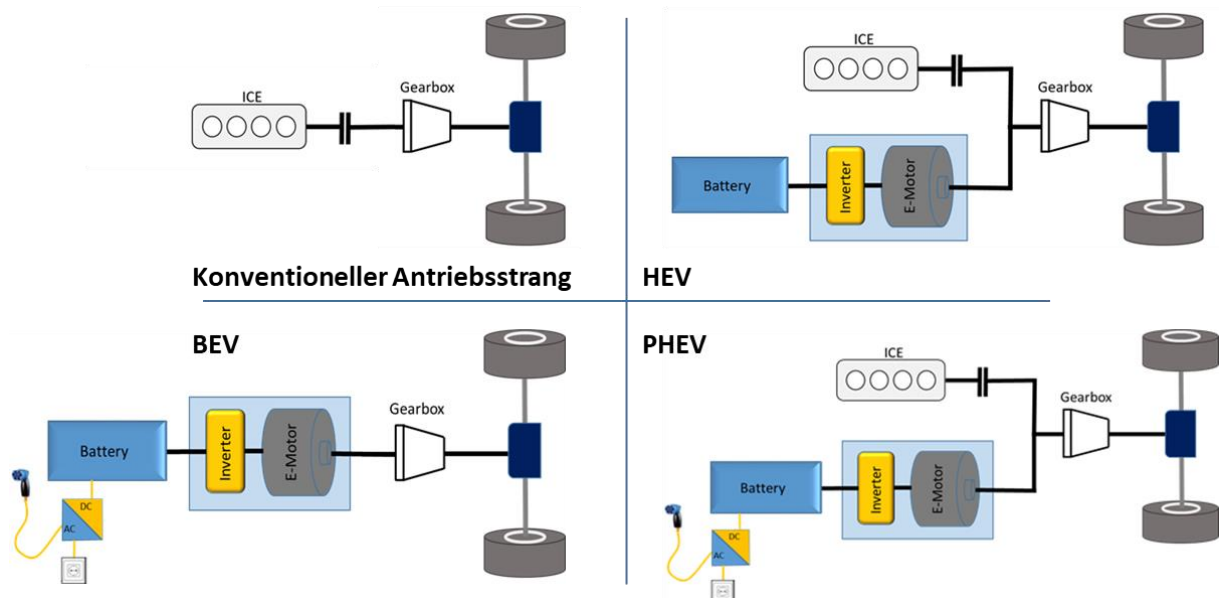


Abbildung 22: Schema der unterschiedlichen Antriebsstränge für PHEM [27]

Der Unterschied zwischen HEV und PHEV liegt darin, dass beim PHEV die Batterie extern, also an der Steckdose, geladen werden kann, während bei der HEV-Variante eine interne Regelungsstrategie des Fahrzeugs die Be- und Entladung der Batterie, abhängig von der jeweiligen

Fahrsituation, regelt. Die Batterie eines Hybridfahrzeugs kann nicht extern aufgeladen werden. Bei geringer Batterieladung regelt PHEM den Antrieb von PHEV analog zu HEVs.

Tabelle 16: Zusätzliche Inputdaten für PHEV-, HEV- und BEV-Simulation in PHEM

Zusätzliche Inputdaten PHEM für PHEV-, HEV- und BEV-Simulation			
Batteriedaten	SOC (State of Charge) Min in %	Anzahl der Zellen	Batteriekapazität in Ah
	SOC (State of Charge) Max in %	Innenwiderstand in Ω	Nennspannung in V
Elektromotordaten	Wirkungsgradkennfeld der E-Motors		
	Volllastkurve des E-Motors		
Hybridsteuerung	Steuerkennlinie für die Regelung der Hybridstrategie		

5.2.1 Batterie

Als Energiespeicher für elektrische Antriebe in Fahrzeugen werden Batterien verwendet. Abhängig vom Einsatzgebiet (BEV, HEV und PHEV) weisen diese unterschiedliche Eigenschaften auf. Heutzutage werden fast ausschließlich Energiespeicher auf Basis von Lithium-Ionen eingesetzt, da diese neben einer hohen Leistungsdichte (W/kg) auch eine gute Energiedichte (Wh/kg) aufweisen, womit möglichst hohe elektrische Reichweiten erzielt werden. Energie- und Leistungsdichte einer Batterie stehen in einem sogenannten „Trade-off“ zueinander. Nimmt die Energiedichte zu, fällt die Leistungsdichte ab und umgekehrt. Abbildung 23 zeigt diesen Zusammenhang für unterschiedliche Batterietechnologien.

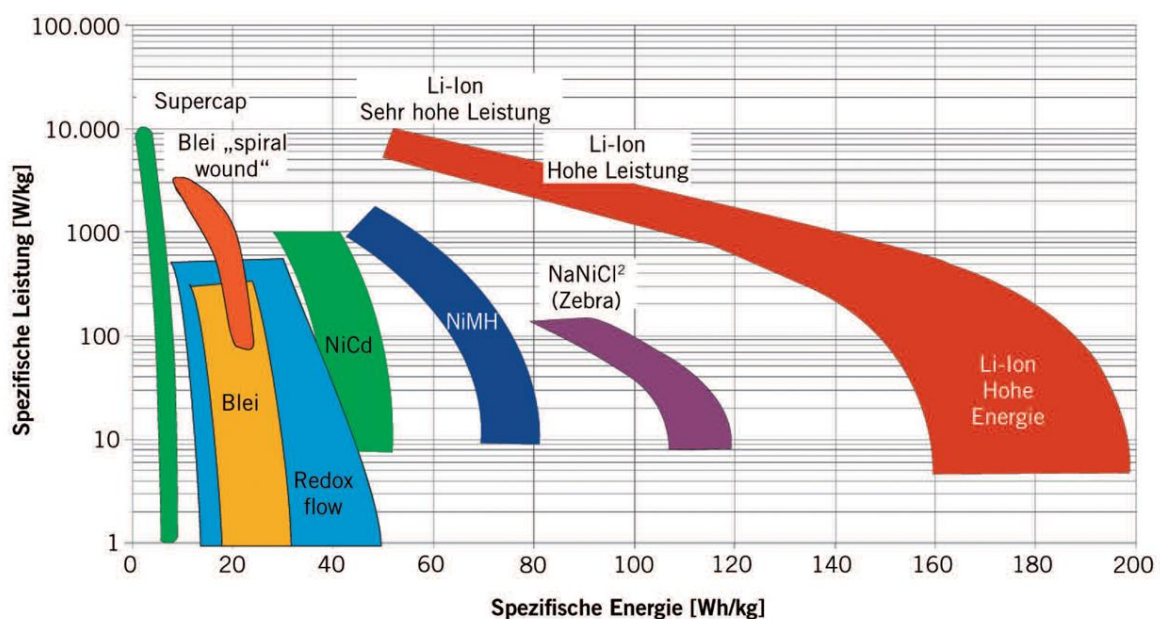


Abbildung 23: Energie- und Leistungsdichte verschiedener Batterietechnologien [29]

Je nach Einsatzgebiet der Batterie (BEV, HEV oder PHEV) können die beiden Größen für Energie- und Leistungsdichte variieren. Die Energiedichte in Wh/kg ist entscheidend für die elektrische Reichweite des Fahrzeugs. Die Leistungsdichte in W/kg gibt an, wie schnell Energie in die Batterie hinein gespeichert, bzw. herausgenommen werden kann. Für HEVs, wo es zu schnellen Spitzen der Energiebereitstellung für die Batterie kommen kann, wird daher auf eine hohe Leistungsdichte der Batterie geachtet. Für BEVs ist eine hohe Energiedichte wesentlicher, um eine höhere elektrische Reichweite des Fahrzeugs zu erreichen.

Das Batteriemodell in PHEM bildet die Leerlaufspannung als Polynom 5. Ordnung über den Ladezustand der Batterie ab. Batterieverluste entstehen beim Laden und Entladen der Batterie durch Spannungsverluste am Innenwiderstand der Batterie. Der nutzbare Bereich der Batterie liegt zwischen SOC Min. und SOC Max. und wird aus Gründen der Batterieschonung bei Hochleistungsbatterien weder über- noch unterschritten. Abbildung 24 zeigt den Spannungsverlauf der Batterie über den Ladezustand.

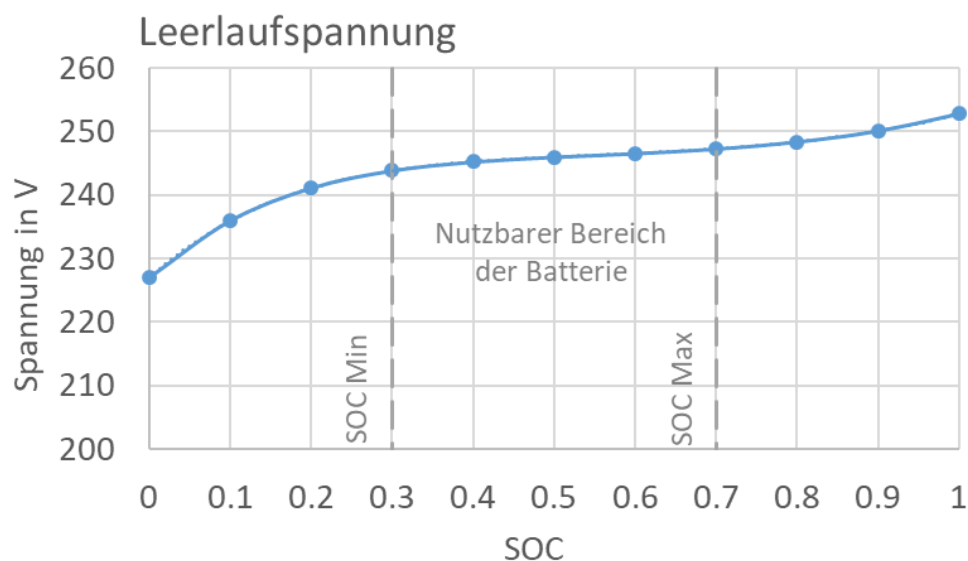


Abbildung 24: Batteriespannung über nutzbaren Bereich der Batterie

5.2.2 Hybridsteuerung

Die Hybridsteuerung beschreibt die Kontrollstrategie für Hybridfahrzeuge, also das Zusammenspiel zwischen Verbrennungskraftmotor und Elektromotor. Das Ziel der Hybridstrategie ist ein minimaler Kraftstoffverbrauch. Folgende Effekte werden simuliert:

- Die Batterieladung wird zwischen SOC Min und Max gehalten zur Schonung der Batterie
- Rekuperation der Bremsenergie bis zu SOC Max
- VKM aus bei null Leistungsbedarf so lange, bis SOC = SOC Min
- Elektrisches Fahren wird bei hohem SOC bevorzugt, um für Rekuperationsphasen genug Speicherplatz zur Verfügung zu haben
- Auswahl zwischen elektrischem Fahren, Assistieren und Fahren mit Verbrennungskraftmotor (Fahrmodus)
- Mindestzeit zwischen der Änderung der Fahrmodi

Für die Auswahl des Fahrmodus sind die beiden Wirkungsgradketten des elektrischen- und des

konventionellen Antriebsstrangs von Interesse. Für den elektrischen Pfad müssen die Verluste in Batterie, Umrichter, Elektromotor und Getriebe fürs Generieren und Assistieren berücksichtigt werden. Beim konventionellen Antriebsstrang sind die Wirkungsgrade der VKM und des Getriebes zu berücksichtigen. Die Steuergröße dafür ist ein zu jedem Zeitschritt berechneter Effizienzfaktor mit der Bezeichnung K_e . Für die Berechnung dieses Faktors wird folgende Formel herangezogen: [20]

5-1

$$K_e = \frac{W_{electric}}{\Delta m_{fuel}}$$

mit:

K_e ... Effizienzfaktor in kWh/kg

$W_{electric}$... Elektrische Energie kWh

Δm_{fuel} ... Einsparung an Kraftstoff gegenüber Betrieb mit Verbrennungskraftmotor in kg

Die Effizienzfaktoren fürs Assistieren und fürs Generieren werden mit den folgenden Formeln berechnet und miteinander verglichen.

5-2

$$K_{eA} = \frac{W_{electric_taken}}{\Delta m_{fuel}}$$

5-3

$$K_{eG} = \frac{W_{electric_stored}}{\Delta m_{fuel}}$$

mit:

K_{eA} ... Effizienzfaktor für den Betrieb „Assistieren“ in kWh/kg

K_{eG} ... Effizienzfaktor für den Betrieb „Generieren“ in kWh/kg

$W_{electric_taken}$... Elektrische Energie aus der Batterie entnommen in kWh

$W_{electric_stored}$... Elektrische Energie in die Batterie gespeichert in kWh

Der Entscheidungsprozess für den jeweiligen Fahrmodus findet anhand der Steuerkennlinie (in PHEM mit STE-Kurve bezeichnet) statt. Abbildung 25 zeigt schematisch die Steuerkennlinie, die für die Simulation von Hybridfahrzeugen in PHEM vorgegeben wird. Über den Ladezustand der Batterie wird eine Kurve für den Schwellenwert des Effizienzfaktors vorgegeben. [22]

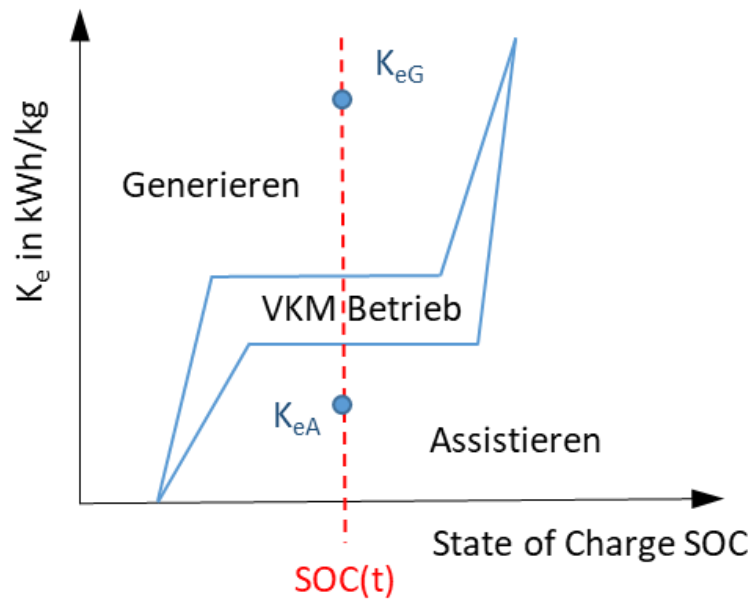


Abbildung 25: Steuerkennlinie für PHEM [20]

Assistieren wird nur dann angewandt, wenn der Wert für K_{eA} unterhalb der Steuerkennlinie liegt. Generiert wird nur für Werte von K_{eG} oberhalb der Steuerkennlinie. Der Grund für diese Regelung liegt darin, dass ansonsten über den Zyklus keine Effizienzsteigerung gegenüber dem reinen VKM-Betrieb gegeben wäre. Es muss also für den Modus „Generieren“ mehr erzeugte elektrische Energie je mehr verbrauchter Kraftstoffmasse erreicht werden als in der Steuerkennlinie für den aktuellen SOC definiert ist. Der Mehrverbrauch bezieht sich jeweils auf reinen VKM-Betrieb. Analog muss für die Betriebsart „Assistieren“ der elektrische Verbrauch je reduzierter Kraftstoffmasse unter dem Maximalwert der Steuerkennlinie liegen.

Die rote vertikale Linie in Abbildung 25 zeigt schematisch den Entscheidungsprozess für den Fahrmodus in der PHEM-Simulation an. In dem dargestellten Beispiel würde die Auswahl „Generieren“ getroffen werden, da der Abstand von K_{eG} zur Schwellenkurve hin größer ist als der Abstand von K_{eA} und daher dieser Fahrmodus die größere Effizienzsteigerung aufweist. Die Abhängigkeit der STE-Kurve vom SOC stellt sicher, dass in Richtung SOC Min Generieren bevorzugt wird und somit SOC Min nicht unterschritten wird. In Richtung SOC Max wird der rein elektrische Betrieb bevorzugt, um verfügbaren Speicherplatz in der Batterie zu gewährleisten für eine mögliche Rekuperation, die zum Beispiel bei Bremsvorgängen auftreten kann. Der Schwellenwert wurde durch die Simulation von Realfahrten gefunden. Dabei wurde jeweils ein Fahrzyklus mit einem HEV in drei Betriebsarten simuliert:

- Betrieb nur mit Verbrennungskraftmotor
- Reines Assistieren
- Reines Generieren

Die Betriebsart mit reinem VKM (Standardsimulationsmethode in PHEM) liefert den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs, der für die Berechnung von „ Δm_{fuel} “ im Effizienzfaktor (siehe Formel 5-1) benötigt wird. Die Betriebsarten „Reines Assistieren“ und „Reines Generieren“ wurden in der Simulation durch die vorgegebenen Steuerkennlinien abgebildet. Beim reinen Assistieren wird eine Steuerkennlinie mit konstant hohem Schwellenwert für den Effizienzfaktor über den gesamten SOC vorgegeben, damit nie ein Generieren in der Simulation auftritt. Für das reine Generieren liegt die Steuerkennlinie ganz niedrig über dem gesamten SOC, um ein Assistieren in der Simulation zu vermeiden.

Anschließend werden die Effizienzfaktoren fürs Assistieren und Generieren berechnet, der Größe nach sortiert und über die kumulierte elektrische Energie aufgetragen. Die Werte für das Assistieren werden dabei beginnend mit dem kleinsten Wert, die Werte fürs Generieren beginnend mit dem größten Wert aufsortiert. Der Schnittpunkt dieser beiden Kurven ergibt schließlich die Höhe der Steuerkennlinie. Die Lage des Schnittpunkts ist recht robust, auch bei Verwendung verschiedener Fahrzyklen für die Berechnung und kann daher für die Simulation von unterschiedlichen PHEVs und HEVs verwendet werden. Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Ermittlung des Schnittpunktes für die Bestimmung der horizontalen Lage der Steuerkennlinie. [20] Dabei ist zu sehen, dass etwa 2,6 kWh elektrische Energie aus der Rekuperation von Bremsenergie und somit mit null Zusatzkraftstoffverbrauch gewonnen werden. Eine Lastpunktanhebung des VKM ist hier nur bis zu einem Effizienzfaktor von ca. 4,5 kWh/kg sinnvoll, da darunter die Wirkungsgradkette aus Erzeugung, Speicherung und Verbrauch der elektrischen Energie zu einem Mehrverbrauch führen würde.

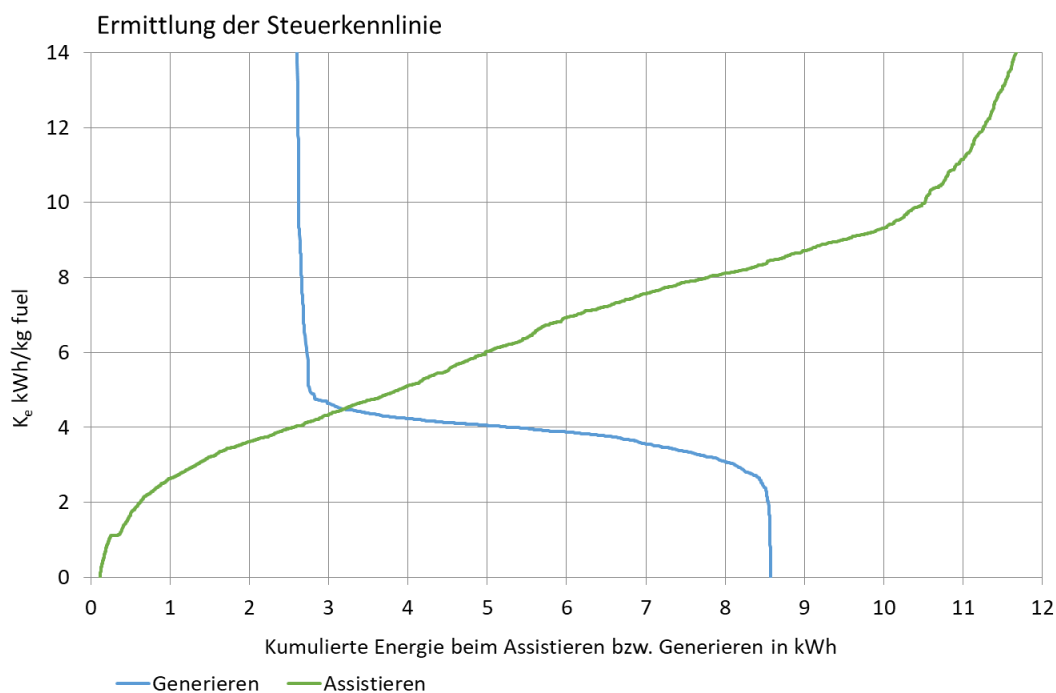


Abbildung 26: Ermittlung der Lage der Steuerkennlinie

5.2.3 Elektromotor

Der Elektromotor wird in der Simulation durch zwei Inputdateien abgebildet, dem Wirkungsgradkennfeld und der Volllastkurve des Elektromotors. Abbildung 27 zeigt ein Wirkungsgradkennfeld mit eingetragener Volllastkurve in Rot eines Elektromotors. Für die Simulation in PHEM wird das Motordrehmoment und die elektrische Leistung über der Motordrehzahl vorgegeben. Ebenfalls im Kennfeld eingetragen sind Isolinien, die den Wirkungsgrad des Elektromotors je Lastpunkt angeben. Das in Abbildung 27 dargestellte Kennfeld eines bestimmten Elektromotors zeigt Absolutwerte für Drehmoment und Drehzahl und ist somit nur für diesen spezifischen Elektromotor gültig.

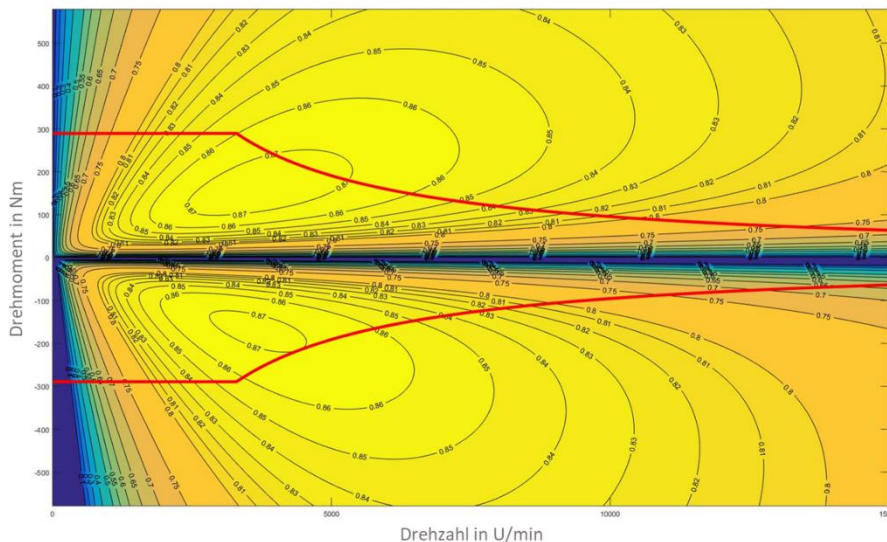


Abbildung 27: Wirkungsgradkennfeld Elektromotor

Ziel ist es, in der Simulation mit PHEM ein normiertes Elektromotor-Kennfeld vorzugeben, das Gültigkeit für unterschiedliche Motorleistungen aufweist. Eine Entnormierung auf die Absolutwerte je Elektromotor erfolgt mittels der spezifischen Leistungsdaten.

Folgende Zusammenhänge für die Normierung von Leistung und Drehzahl werden in PHEM angewandt: [21]

5-4

$$P_{norm} = \frac{P_e}{P_{rated}}$$

mit

- $P_{norm}...$ normierte Leistung dimensionslos
- $P_e...$ effektive Leistung des Motors in kW
- $P_{rated}...$ Nennleistung des Motors in kW

5-5

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}}$$

mit

- $n_{norm}...$ normierte Drehzahl dimensionslos
- $n_{idle}...$ Leerlaufdrehzahl des Motors in U/min
- $n_{rated}...$ Nenndrehzahl des Motors in U/min

Der Wechselrichter wird in der Simulation nicht gesondert abgebildet, somit fasst das Wirkungsgradkennfeld beide Komponenten zusammen.

Für den Wirkungsgrad kann folgender Zusammenhang angegeben werden:

5-6

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{Zu}} = \frac{P_{Zu} - P_V}{P_{Zu}} = 1 - \frac{P_V}{P_{Zu}}$$

mit:

η ...	Wirkungsgrad des Motors dimensionslos
P_{ab} ...	abgegebene mechanische Leistung des Motors in kW
P_{Zu} ...	zugeführte elektrische Leistung des Motors in kW
P_V ...	Verlustleistung des Motors in kW

Aufgrund dieser Definition des Wirkungsgrads kann dieser, selbst bei nicht vorhandener Verlustleistung, nicht größer als eins werden.

Der Betriebsbereich des Elektromotors wird durch eine Volllastkurve begrenzt, wie sie in Abbildung 28 zu sehen ist.

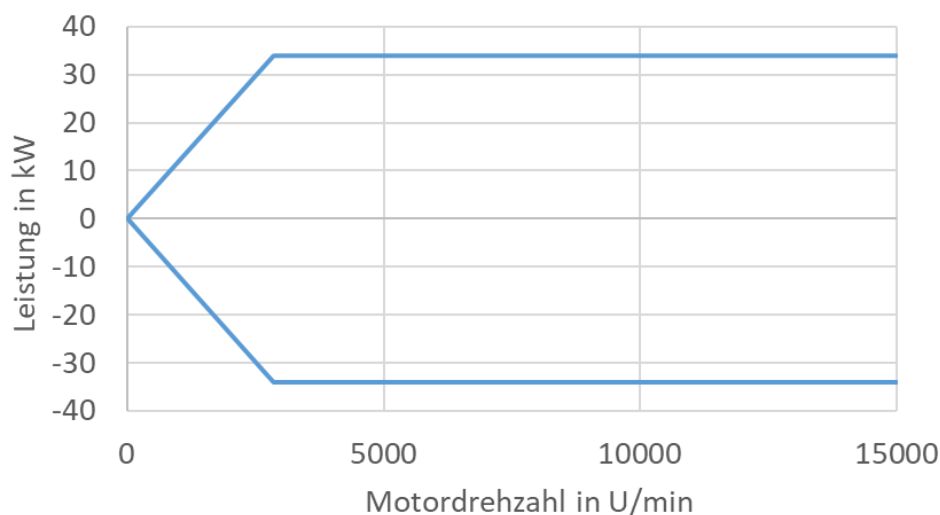


Abbildung 28: Volllastkurve Elektromotor

Die Volllastkurve begrenzt den motorischen Betriebsbereich des Elektromotors nach oben hin sowie den Bereich nach unten hin, wo der Elektromotor als Generator arbeitet. Die in Abbildung 28 dargestellte Volllastkurve hat einen symmetrischen Verlauf, dieser muss aber nicht zwangsläufig so aussehen. Die Charakteristik des Elektromotors kann auch so ausgelegt sein, dass er mehr Leistung abgeben und weniger rekuperieren kann. In PHEM würde dieser Fall durch eine unterschiedlich hohe Lage der beiden Kurven um den Nullpunkt vorgegeben werden.

6 Simulationen BEV, HEV und PHEV fürs HBEFA

Im Zuge dieser Dissertation wurde der Kraftstoffverbrauch bzw. der elektrische Energiebedarf von HEV, BEV und PHEV für das letzte Update des HBEFAs (HBEFA 4.1 2019) simuliert. Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise dazu für die drei genannten Fahrzeugkonzepte.

6.1 Allgemeines zu BEV, HEV und PHEV

Die Relevanz, den Verbrauch von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb – als Zusatz- oder Hauptantriebsstrang ausgeführt –, für die Abschätzung von Emissionsfaktoren einer Fahrzeugflotte miteinzubeziehen steigt, da die Anzahl der Neuzulassungen von Elektro-, Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeugen zunimmt. Abbildung 29 zeigt die Anzahl der in Österreich neu zugelassenen Elektrofahrzeuge für die Jahre 2008 bis 2018. Der Trend zur Elektromobilität geht weiterhin nach oben, womit der Anteil dieser Fahrzeugvariante in der Gesamtflotte steigt. Speziell für Szenarien-Berechnungen für die Zukunft muss somit der CO₂-Anteil für die Stromerzeugung als Beitrag zum Gesamtverbrauch der Flotte miteinbezogen werden, um realistische Aussagen über Verbräuche von Fahrzeugen für bestimmte Verkehrssituationen zu machen, wozu das HBEFA u. a. dient.

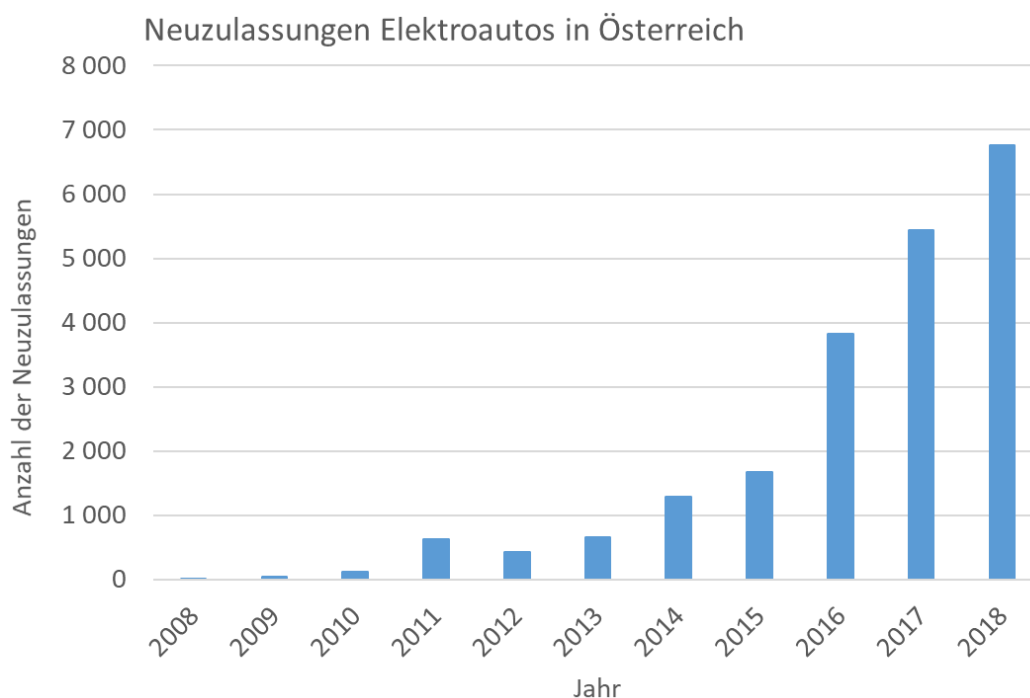


Abbildung 29: Anzahl der neu zugelassenen Elektrofahrzeuge in Österreich von 2008 bis 2018 [13]

Dieselbe Grafik für die Neuzulassungszahlen von Hybridfahrzeugen (inkl. Plug-in-Hybridfahrzeugen) ist in Abbildung 30 dargestellt. Auch hier lässt sich deutlich erkennen, dass immer mehr Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge zugelassen werden und CO₂ und Verbrauch dieser Fahrzeuge für das rein elektrische Fahren und das Fahren mit VKM in der Berechnung des Gesamtflottenverbrauchs miteinbezogen werden müssen.

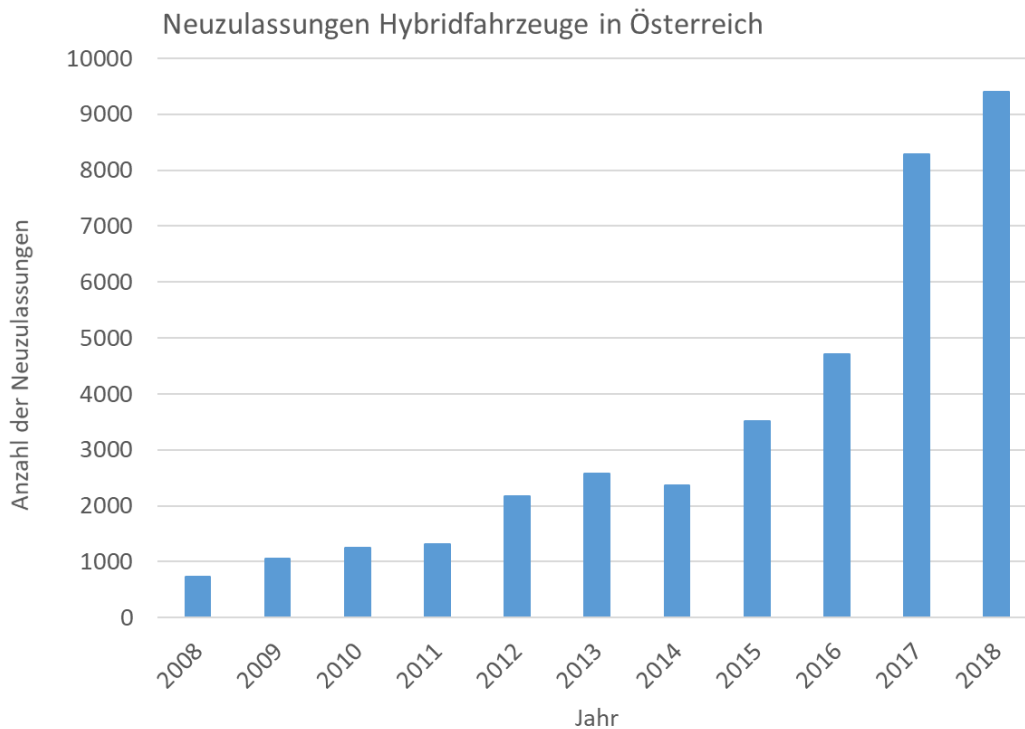


Abbildung 30: Anzahl der Neuzulassungen Hybridfahrzeuge und Plug-in-Hybridfahrzeuge in Österreich von 2008 bis 2018 [12]

Für die Simulation des elektrischen Antriebsstrangs ergibt sich kein Kraftstoffverbrauch in der Einheit l/km von Diesel oder Benzin bzw. umgerechnet von CO₂ in g/km, sondern ein spezifischer elektrischer Verbrauch in kWh/km. Für konventionelle Fahrzeuge wird unter dem Begriff Kraftstoffverbrauch standardmäßig jener verstanden, der vom Tank bis zur Umwandlung in die Bewegungsenergie am Rad des Fahrzeugs gebraucht wird. Würde man eine ganzheitliche Betrachtung der Emissionen anstellen, so müssten die Herstellung, der Transport, die Umwandlung und die Verteilung des jeweiligen Energieträgers ebenfalls berücksichtigt werden. Eine ganzheitliche Emissionsbetrachtung wird mit „Well-To-Wheel“ bezeichnet und inkludiert zwei Teilbetrachtungen, die TTW (Tank-To-Wheel) - und die WTT (Well-To-Tank) -Betrachtung. Abbildung 31 zeigt das Schema einer WTW-Betrachtung.

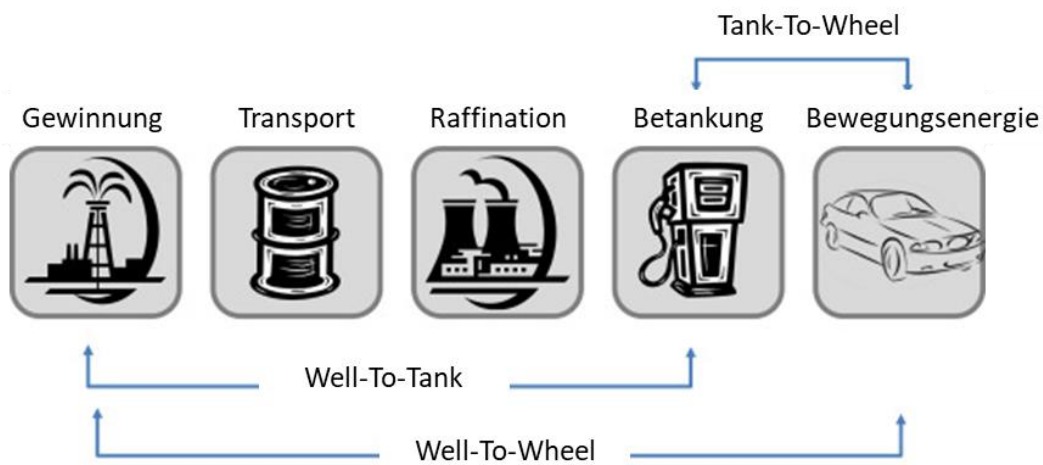


Abbildung 31: Schema der Well-To-Wheel-Betrachtung [10]

Um nun den Kraftstoffverbrauch von konventionellen Fahrzeugen mit BEV, HEV und PHEV vergleichen zu können, bedarf es einer Umrechnung der verbrauchten elektrischen Energie in CO₂-Emissionen, welche die Stromerzeugung berücksichtigen. Der Umrechnungsfaktor dafür ist länderspezifisch je nach Erzeugungsart des Stroms im jeweiligen Land unterschiedlich. Für das HBEFA 4.1 können je nach Land Eingangsdaten definiert werden, die dann für die Umrechnung herangezogen werden.

6.2 Massenabschätzung BEV, HEV und PHEV fürs HBEFA

Für die Abschätzung der Verbräuche von BEV, HEV und PHEV fürs HBEFA wurden ausgehend von der jeweiligen Basisfahrzeugvariante je Emissionsklasse (z. B. Durchschnittsfahrzeug EURO 6d Temp Diesel-Pkw) die Fahrzeugvarianten BEV, HEV und PHEV abgeleitet. Dazu mussten die Massen der zusätzlichen Komponenten für den elektrischen Antrieb abgeschätzt werden, um die Fahrzeugmasse für die Simulationen in PHEM angeben zu können. Tabelle 17 zeigt, ausgehend vom Basisfahrzeug EURO 6b Benzin-Pkw (HBEFA 4.1), die Berechnung der jeweiligen Fahrzeugmasse für die BEV-, HEV- und PHEV-Fahrzeugvariante.

Tabelle 17: Massenabschätzung BEV, HEV und PHEV für HBEFA-Simulation

Masse [kg]	BEV	HEV	PHEV
Basisfahrzeug EURO 6b G HBEFA 4.1	1237		
VKM	-165	0	0
Abgasnachbehandlungssystem	-15	0	0
Tankfüllung (90% für HBEFA 4.1)	-34		
Tank für flüssigen Kraftstoff	-15	0	
Starterbatterie	-15		
Elektromotor	+76	+48	+16
Spannungswandler	+5		
Inverter	+10	+7.5	
Batterie	+409	+124	+30
Ladekabel	+12		+12
Zusätzliche Verkabelung	+56		
Tankinhalt	0	+27	
Fahrzeugmasse HBEFA 4.1	1562	1483	1330

6.2.1 Parameterabschätzung Fahrzeugkomponenten

Das Gewicht der in Tabelle 17 gezeigten Komponenten wurde unter Zurhilfenahme von existierenden Studien, Fachliteratur und Herstellerangaben abgeschätzt. Nachfolgend werden die dafür verwendeten Ansätze genauer beschrieben.

Abschätzung Abgasnachbehandlungssystem:

Für die Abschätzung der BEV-Fahrzeugmasse fürs HBEFA 4.1, ausgehend vom konventionellem EURO 6b Benzinfahrzeug, wurde dessen Abgasnachbehandlungssystem mit 15 kg für die BEV-Variante abgezogen.

Für HEV und PHEV wurde für das Abgasnachbehandlungssystem nichts in Abzug gebracht, da diese für den Betrieb mit VKM dieselben Abgasnachbehandlungssysteme wie konventionelle Fahrzeuge benötigen.

Abschätzung Tankinhalt für flüssige Kraftstoffe:

Für die Basisfahrzeuge im HBEFA 4.1 wurde anhand der Definition der DIN-Leermasse (Masse des Fahrzeuges mit 90% der Betriebsflüssigkeiten) und der Annahme eines 60-l-Tanks für Diesel-Pkw und eines 50-l-Tanks für Benzin-Pkw das Gewicht des Tankinhalts abgeschätzt. Das Tankvolumen für die Benzinvariante von HEV und PHEV wurde mit 40 l angenommen, das der Dieselvarianten mit 50 l. Für die HBEFA 4.1-Simulationen wurde wiederum ein Tankinhalt von 90% angenommen. Die Berechnung des Gewichts der Tankfüllung erfolgt über die Dichte des jeweiligen Kraftstoffs. Die verwendeten Kraftstoffdaten sind im Anhang dieser Arbeit zu finden (Tabelle 71).

Abschätzung Masse des Elektromotors:

Um die Masse des Elektromotors abzuschätzen, wurde eine empirische Formel der TU Darmstadt angewandt, welche die Masse der E-Maschine abhängig von deren Nennleistung und Nenndrehmoment angibt. Abbildung 32 zeigt den empirischen Zusammenhang, der für die Massenabschätzung von ASM (Asynchronmaschine) und PSM (Permanent erregte Synchronmaschine) angewendet wird.

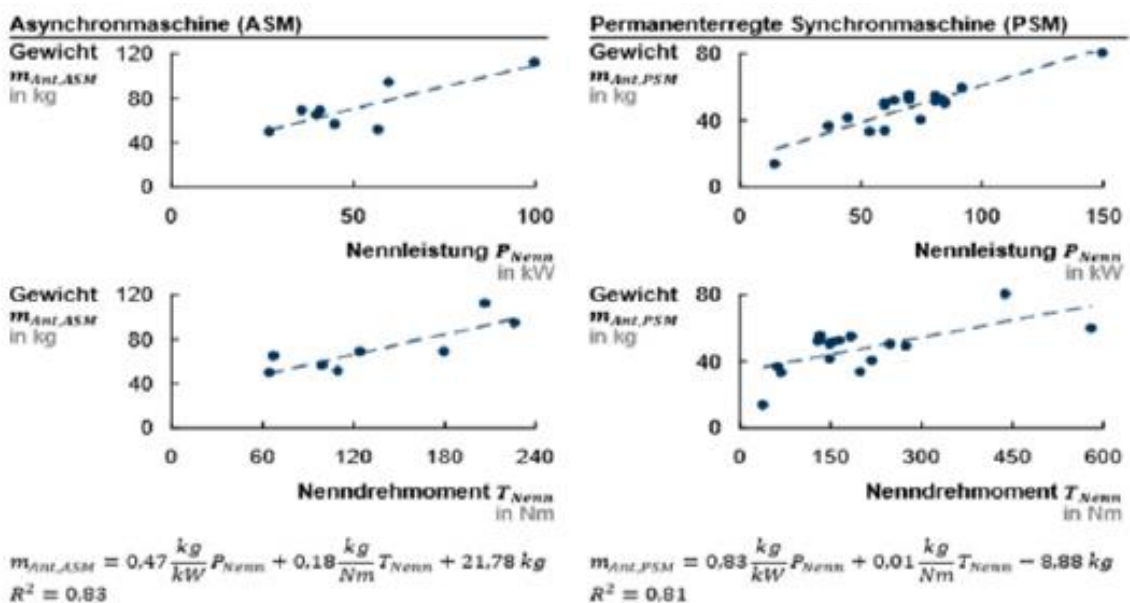


Abbildung 32: Massenabschätzung für E-Motor ASM oder PSM [2]

Für die HBEFA-Simulationen wurde eine PSM für den elektrischen Antrieb gewählt. Das Gewicht wurde nach Leistungsdaten der E-Maschine je Fahrzeugkonzept berechnet.

Abschätzung Masse Batterie:

Die Batterie, vor allem die Hochleistungsbatterie in BEVs, HEVs und PHEVs, ist für die Massenabschätzung der jeweiligen Fahrzeugvariante sehr ausschlaggebend, da sie einen wesentlichen Anteil an der gesamten Fahrzeugmasse ausmacht. In Kapitel 0 wurde bereits auf die beiden wesentlichen Parameter einer Batterie (Energie- und Leistungsdichte) hingewiesen. Für die Abschätzung der Batteriemasse je Fahrzeugkonzept werden diese beiden Größen abgeschätzt, um damit und mit der bekannten Batteriegröße die Masse des elektrischen Energiespeichers berechnen zu können. Die Größenordnungen für Batteriekapazität in Ah und Energiedichte in Wh/kg der Batterie wurden aufgrund der in der Praxis ausgeführten Fahrzeugbeispiele für BEV, HEV und PHEV abgeschätzt. Eine Übersicht der Parametergrößen je Fahrzeugvariante ist im Anhang angefügt (Tabelle 75 - Tabelle 79).

Formel 6-1 gibt die verwendete Berechnungsformel der Batterie-Masse bei gegebener Batteriekapazität, Energiedichte und Nominalspannung an. Dieser Zusammenhang wurde durch einen Einheitenvergleich selbst gefunden und somit zur Abschätzung der Batterie-Masse verwendet.

6-1

$$m_{Bat} = \frac{E_{Bat}}{Q_{Bat} * U_{Nominal}}$$

mit:

$m_{Bat}...$	Masse der Batterie in kg
$E_{Bat}...$	Energiedichte der Batterie in Wh/kg
$U_{Nominal}...$	Nominalspannung der Batterie in V
$Q_{Bat}...$	Maximale Ladung der Batterie in Ah

Für die Abschätzung der Massen von Umrichter, Spannungswandler und Ladegerät (nur für BEV und PHEV) wurden Herstellerangaben verwendet. Die Masse für die zusätzliche Verkabelung bei BEV, HEV und PHEV wurde durch eine Abschätzung der zusätzlichen Kabellänge mit 20 m Kupferdraht (Durchmesser 20 mm) auf 56 kg berechnet und für die jeweiligen Fahrzeugvarianten zur Basismasse addiert.

6.3 Simulation BEV für HBEFA

Wie bereits in Kapitel 5.2 beschrieben, müssen zusätzliche Eingabedaten für den elektrischen Antriebsstrang in der PHEM-Simulation vorgegeben werden. Besonders ausschlaggebend für die Simulation von BEV sind das Wirkungsgradkennfeld des Elektromotors sowie der Innenwiderstand und die Zellspannung der Batterie zur Berechnung der Ladeverluste. Daten dafür wurden im ersten Schritt aus Literatur von Zulieferern von Elektromotoren und Hochleistungsbatterien entnommen. Ein Elektromotor-Kennfeld, das am Institut bereits vorhanden war, wurde zunächst für die Simulation in PHEM verwendet. Zur Validierung der Datensätze wurden zwei Elektrofahrzeuge (VW e Golf und Tesla Model S) vermessen und in der Simulation dargestellt. Für den VW e Golf konnten Strom- und Spannungssignal bei den Messungen am Pkw-Rollenprüfstand und auch auf der Straße mitaufgezeichnet werden. Der Tesla wurde nicht am Pkw-Rollenprüfstand vermessen und für die durchgeführten Straßenmessungen konnte nur der vom Fahrzeug angezeigte Wert für den elektrischen Verbrauch aufgezeichnet werden. Der

Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen der beiden BEVs zeigte, dass eine Kalibrierung des verwendeten Kennfelds für den Elektromotor notwendig ist. Die ergänzenden Untersuchungen dazu sind in Kapitel 6.4 genauer beschrieben.

6.3.1 VW e Golf Vermessung für Kennfeld-Validierung BEV

Als erstes BEV wurde ein Pkw aus dem C-Segment (VW e Golf) am Pkw-Rollenprüfstand und auf der Straße vermessen und anschließend in PHEM als Simulationsmodell dargestellt. Die Fahrzeugdaten des VW e Golfs sind in Tabelle 18 gezeigt. Für die Bestimmung der Fahrwiderstände wurde die Standardmethode (Reifenlabel) angewandt.

Tabelle 18: Fahrzeugdaten VW e Golf

VW-e-Golf	
Leistung des E-Motors in kW	85
Leergewicht laut EU in kg ^[1]	1615
Batteriekapazität in kWh	24,2
Elektrische Reichweite (laut Hersteller) in km	231
NEDC-Verbrauch in kWh/km	0,132
WLTC-Verbrauch in kWh/km	0,158

^[1] Leergewicht laut EU entspricht dem DIN-Leergewicht (Masse des fahrbereiten Fahrzeugs) plus Fahrer (75 kg)

Mit dem VW e-Golf wurden am Pkw-Rollenprüfstand NEDC, ERMES, WLTC und ein RWC vermessen. NEDC und WLTC sind zwei Standardzyklen und gesetzlich genormt, sie wurden in Kapitel 3.5 dieser Arbeit bereits genauer erläutert. Beim ERMES handelt es sich um einen nicht gesetzlich genormten Zyklus, dessen Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 17 gezeigt wurde.

Während der Messungen am Rollenprüfstand konnten Strom und Spannung sekundlich mitaufgezeichnet werden. Anschließend wurde ein PHEM-Modell des Fahrzeugs erstellt und die Zyklen wurden mit einem aus der Literatur bekannten Kennfeld für den Elektromotor nachsimuliert. Bei den Messungen auf der Pkw-Rolle war keine Rekuperation möglich, weshalb nur die positiven Leistungswerte beurteilt werden konnten, also nur jene, die von der Batterie abgegeben wurden. Auch in der Simulation wurde das berücksichtigt. Tabelle 19 zeigt die Abweichung zwischen Messung und Simulation der Rollenzyklen für den VW e Golf.

Tabelle 19: Vergleich Messung und Simulation VW-e-Golf für Rollenzyklen

Fahrzyklus	Messung	Simulation	Abweichung
[-]	Energieverbrauch [kWh/km]		[%]
NEDC	0,126	0,145	8,7
WLTC	0,147	0,170	8,7
ERMES	0,155	0,163	4,9

Die Abweichungen bei den dynamischeren Zyklen (ERMES und RWC) sind relativ gering, für NEDC und WLTC betragen diese fast 9%. Das Kennfeld wurde im ersten Schritt nicht verändert und für die folgenden Simulationen verwendet.

Der VW e Golf wurde ebenfalls auf der Straße auf der RDE-Standardroute (Ries-Route) vermessen. Die Messfahrten wurden immer mit voller Batterie gestartet und es konnten Strom und Spannung während der Fahrt mittels OBD-Verbindung mitaufgezeichnet werden. Um die Ladeverluste für die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom ermitteln zu können, wurde für das Wiederaufladen der Batterie ein Energiekosten-Messgerät verwendet, welches den Energieverbrauch aus dem Stromnetz für das Aufladen gemessen hat (eine genauere Beschreibung des verwendeten Messgeräts ist im Anhang angeführt). Somit konnten aus Energieverbrauch beim Fahren und Energieverbrauch aus Stromnetz die Ladeverluste berechnet werden. Tabelle 20 zeigt die so ermittelten Ladeverluste für die drei durchgeführten RDE-Fahrten. Im Mittel betragen die Ladeverluste etwa 6.4%. Die Ladeverluste wurden laut Formel 6-2 berechnet.

6-2

$$\text{Ladeverlust in \%} = 1 - \frac{EV_{\text{Fahren}}}{EV_{\text{Laden}}} * 100$$

Mit:

EV_{Fahren} ... Energieverbrauch gemessen beim Fahren in kWh

EV_{Laden} ... Energieverbrauch gemessen beim Wiederaufladen der Batterie in kWh

Tabelle 20: Ladeverluste VW e Golf

RDE-Fahrt	Zusatzbeladung	Fahren	Laden	Ladeverluste
[-]	[kg]	Energieverbrauch [kWh]		[%]
Ries 01	90	13,48	14,37	6,16
Ries 02	180	13,99	15,02	6,87
Ries 03	250	14,10	15,02	6,12

6.3.2 Tesla Model S Vermessung für Kennfeld-Validierung

Als weiteres BEV wurde noch ein Tesla Model S auf der Straße vermessen und in PHEM nachsimuliert. Das Fahrzeug konnte aufgrund des Allradantriebs nicht auf der Pkw-Rolle vermessen werden und auch die Zugänglichkeit zur Mitaufzeichnung von Strom- und Spannung während der Fahrt war nicht gegeben. Als Werte für den Energieverbrauch beim Fahren wurden die vom Fahrzeug angegebenen Werte genommen. Tabelle 21 zeigt die Fahrzeugdaten des Tesla Model S.

Tabelle 21: Fahrzeugdaten Tesla Model S

Tesla Model S	
Leistung des E-Motors in kW	315
Leergewicht laut EU in kg	2183
Batteriekapazität in kWh	75
Elektrische Reichweite (laut Hersteller) in km	490
NEDC-Verbrauch in kW/h	0,186

Zur Ermittlung der Fahrwiderstände des Tesla Model S für die Simulation in PHEM wurden Ausrollversuche gemacht, deren Auswertung im nächsten Kapitel beschrieben wird.

6.3.2.1 Ermittlung der Fahrwiderstände vom Tesla Model S

Abbildung 33 zeigt drei beispielhafte Geschwindigkeitsverläufe über der Zeit beim Ausrollversuch mit dem Tesla Model S in Richtung Norden der Ausrollstrecke.

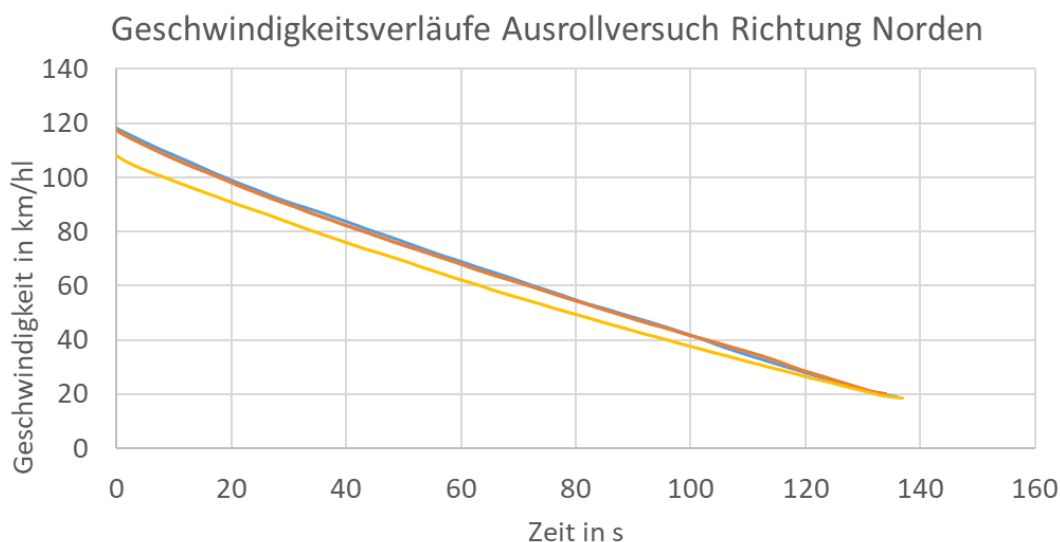


Abbildung 33: Beispielhafte Geschwindigkeitsverläufe von Ausrollversuchen mit dem Tesla Model S in Richtung Norden

Die Ausrollstrecke wird mehrere Male in beide Richtungen (Norden und Süden) ausgerollt, um daraus dann die Fahrwiderstandsbeiwerte des Fahrzeugs zu ermitteln. Abbildung 34 zeigt die

Fahrwiderstandspolynome 2. Grades, die mittels Ausrollversuch und der Standardmethode (Reifenlabel) ermittelt wurden. Beide Methoden wurden bereits in Kapitel 3.5.1.1 genauer beschrieben.

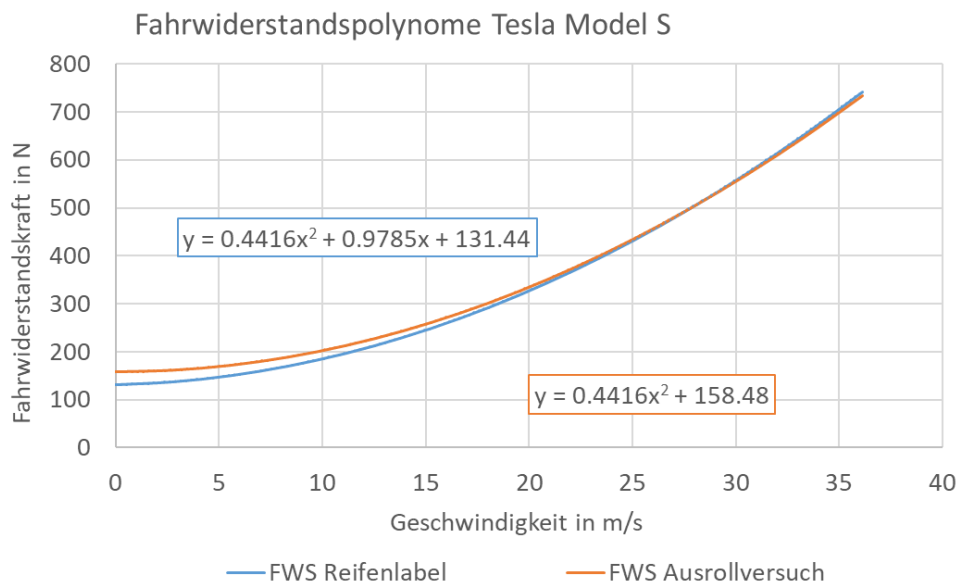


Abbildung 34: Fahrwiderstandspolynom für den Tesla Model S

Abbildung 34 zeigt, dass beide Methoden einen ähnlichen Verlauf des Polynoms aufweisen, weshalb natürlich auch die Koeffizienten der Polynomfunktionen, die die Fahrwiderstandsbeiwerte des Fahrzeugs darstellen, ähnliche Größen aufweisen.

Für den Ausrollversuch werden Normbedingungen laut Gesetzgebung vorgegeben. Normbedingung wären eine Umgebungstemperatur von 20°C und ein Umgebungsdruck von 1000 mbar. Die realen Bedingungen werden auf den Normzustand korrigiert, damit die Basis der Fahrwiderstände gleichbleibt und somit der Vergleich zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen gegeben ist. Die angewandten Korrekturen zur Ermittlung der Fahrwiderstände laut Normbedingungen sind in einer am Institut durchgeführten Masterarbeit [19] genauer beschrieben.

Tabelle 22 fasst die Randbedingungen und die Ergebnisse aus dem Ausrollversuch für den Tesla Model S zusammen.

Tabelle 22: Parameter beim Ausrollversuch mit dem Tesla Model S

Randbedingungen beim Ausrollversuch mit dem Tesla Model S	
Gesamtmasse des Fahrzeugs in kg (inkl. Fahrer und Beifahrer)	2266
Lufttemperatur in °C	26
Luftdruck in mbar	993,7
Luftdichte in kg/m ³	1,157
Strömungswiderstandskoeffizient c_w laut Hersteller	0,25

Strömungswiderstandskoeffizient c_w aus Versuch	0,26
Querschnittsfläche des Fahrzeugs in m^2	2,84
Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandsbeiwert R_0 in N	158,48
Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsbeiwert R_1 in Nm/s	0,00
Luftwiderstand R_2 in Ns^2/m^2	0,4416

6.3.2.2 Simulation Tesla Model S mit PHEM

Für den Tesla Model S wurde ein Simulationsmodell in PHEM mit den Fahrwiderständen aus dem Ausrollversuch erstellt. Als Kennfeld wurde das BEV-Kennfeld vom e Golf vorgegeben und es wurden die gemessene Realfahrt sowie die Rollenzyklen NEDC, WLTC und ERMES nachsimuliert. Für die Rollenzyklen gab es keinen Vergleichswert laut Messung, da der Tesla aufgrund seines Allradantriebs nicht am Rollenprüfstand vermessen wurde. Für den NEDC gibt es laut Hersteller eine Angabe zum elektrischen Verbrauch, welche mit dem simulierten elektrischen Verbrauch verglichen wurde. Tabelle 23 zeigt die simulierten Energieverbräuche mit PHEM sowie die Abweichung dieser zur Messung für die Ries-Route bzw. zur Herstellerangabe für den NEDC.

Tabelle 23: Vergleich Messung und Simulation Tesla Model S

Fahrzyklus	Messung/Herstellerangaben	Simulation	Abweichung
[-]	Energieverbrauch [kWh/km]		[%]
NEDC	0,186	0,236	27
WLTC	-	0,283	-
RWC	0,220	0,358	61

Die Rollenzyklen NEDC, WLTC und ERMES wurden ohne zusätzliche Nebenverbraucher und auch ohne Zusatzbeladung simuliert. Für den RWC wurde eine Leistung der Nebenverbraucher von 1.45 kW vorgegeben. Für konventionelle Fahrzeuge wird die Leistung der Nebenverbraucher für die HBEFA-Simulationen mit 1.2 kW angenommen, weshalb es naheliegt, dass diese bei Elektrofahrzeugen etwas höher liegen muss, da zum Beispiel Heizen und Kühlen rein elektrisch gemacht werden und die Abwärme der VKM nicht genutzt werden kann. Die Abweichungen zwischen Herstellerangaben bzw. Messung mit 27% für den NEDC und 61% für den RWC sind durchaus hoch, weshalb eine Kalibrierung des verwendeten Kennfelds im Weiteren gemacht wurde.

6.3.3 Kennfeld BEV

Wie bereits im vorigen Kapitel beschrieben, konnte mit der Vermessung des VW-e-Golfs am Rollenprüfstand und auf der Straße eine erste Validierung des Kennfelds (aus der Literatur) für den Elektromotor gemacht werden. Abbildung 35 zeigt das Kennfeld des Elektromotors, welches für die Simulationen der Fahrzeugkonzepte HEV, PHEV und BEV für das HBEFA 4.1-

Update verwendet wurde.

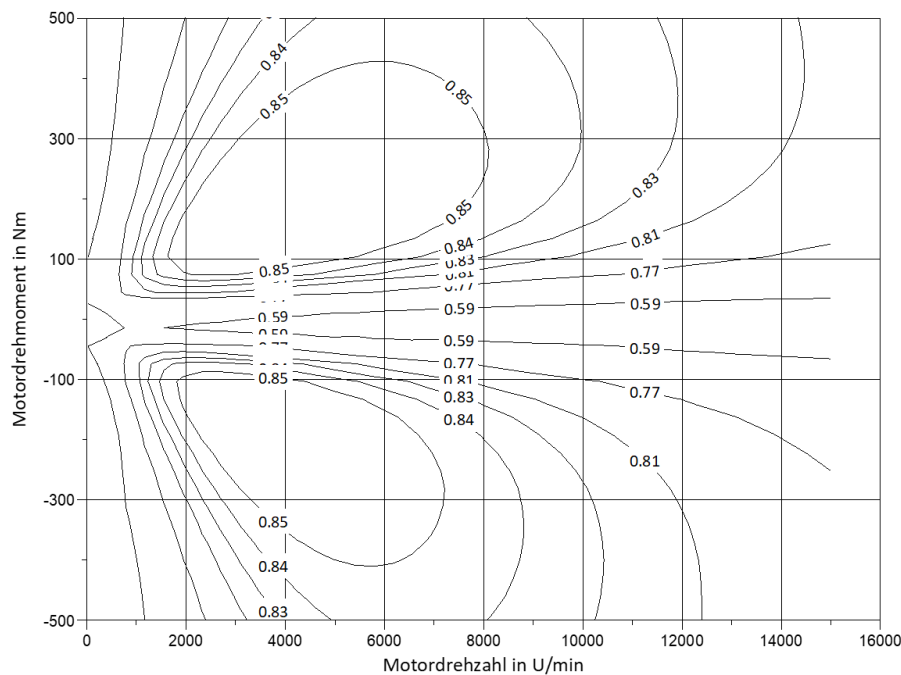


Abbildung 35: Kennfeld Elektromotor

Die Darstellung in Abbildung 35 zeigt die Isolinien des Wirkungsgrads des Elektromotors aufgetragen über die Motordrehzahl auf der x-Achse und dem Motordrehmoment auf der y-Achse. Ein Elektromotor weist über einen sehr großen Drehzahl-Drehmoment-Bereich einen guten Wirkungsgrad auf, was auch in diesem Kennfeld ersichtlich ist.

6.4 Ergänzende Untersuchungen zu BEV

Das in Abbildung 35 gezeigte Kennfeld eines Elektromotors wurde für die Simulationen für das HBEFA 4.1-Update verwendet. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde das Kennfeld lediglich mit einem vermessenen BEV, dem beschriebenen VW e Golf, validiert. Im Nachhinein wurden noch zwei weitere Elektrofahrzeuge vermessen, um genauere Untersuchungen bezüglich des Wirkungsgradkennfelds eines Elektromotors anstellen zu können. Diese werden in diesem Kapitel der Arbeit genauer beschrieben.

6.4.1 Ergänzende Messungen von Elektrofahrzeugen zur Kennfeld-Validierung

Um mehrere Messdaten für die Kennfeld-Kalibrierung des Elektromotors zu generieren, wurden zwei weitere Elektrofahrzeuge hinsichtlich ihres elektrischen Verbrauchs vermessen. Die Fahrzeugauswahl wurde nach Höhe des Marktanteils getroffen, weshalb ein Renault Zoe und ein BMW i3 ausgewählt wurden. Die beiden Elektrofahrzeuge wurden auf der Straße unter realen Fahrbedingungen vermessen. Da die Zugänglichkeit zur Messung von Strom und Spannung nicht gegeben war, wurde keines der Fahrzeuge am Pkw-Rollenprüfstand vermessen. Tabelle 24 zeigt die Fahrzeugspezifikationen der beiden vermessenen Elektrofahrzeuge.

Tabelle 24: Fahrzeugspezifikationen vermessener Elektrofahrzeuge

Fahrzeug	Leistung / Spitzenleistung	Leergewicht (DIN ¹)	Verbrauch laut Hersteller (NEDC)	Reichweite laut Hersteller (NEDC)	Batteriekapazität (Brutto/Netto)
[-]	[kW]	[kg]	[kWh/km]	[km]	[kWh]
BMW i3	75 / 125	1270	13,1	359	42,2 / 37,9
Renault Zoe	46 / 65	1468	14,6	210	25,9 / 23,3

¹ Leergewicht nach DIN = Masse im fahrbereiten Zustand – 75 kg (Fahrer); Masse im fahrbereiten Zustand = 90% aller Betriebsflüssigkeiten sind befüllt inkl. Fahrer

Als Route wurde die Standardroute der TU Graz (Ries-Route), welche bereits in Kapitel 3.6.1 beschrieben wurde gewählt. Es wurden pro Fahrzeug drei Messfahrten gemacht, wobei Beladung und Fahrmodus variiert wurden. Während der Fahrten wurden Geschwindigkeit, Höhe und Koordinaten mittels Datenlogger aufgezeichnet. Der Energieverbrauch wurde einerseits vom Fahrzeug selbst ausgegeben und andererseits mittels Stromzähler bzw. Schnellladesäule gemessen. Alle Fahrten wurden mit voll geladener Batterie gestartet. Die Klimaanlage des Fahrzeugs wurde auf 21°C (Automatik) gestellt und die Außentemperaturen bei den Messfahrten lagen in etwa bei 25 – 30°C. Die Randbedingungen der Messfahrten sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Randbedingungen Messfahrten BMW i3

Messfahrten BEV 1	Randbedingungen
Ries 01	Fahrer, keine Zusatzbeladung, IG-L ² 100 auf der Autobahn
Ries 02	Fahrer, 100 kg Zusatzbeladung, ECO-Fahrmodus
Ries 03	Fahrer, 200 kg Zusatzbeladung

² IG-L 100 bedeutet „Immissionsschutzgesetz-Luft“ und es gilt anstelle der maximal erlaubten 130 km/h eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h auf den gekennzeichneten Autobahnabschnitten.

Beim BMW i3 wurde das Wiederaufladen der Batterie mit Haushaltsstrom durchgeführt und dabei der Energieverbrauch mittels Stromzähler gemessen. Abbildung 36 zeigt die ermittelten elektrischen Energieverbräuche in kWh/km für die drei Messfahrten laut Stromzähler und laut Anzeige des Fahrzeugs. Es ist ersichtlich, dass der Stromzähler höhere Energieverbräuche ausgibt. Laut Stromzähler war der elektrische Energieverbrauch im Schnitt um etwa 18% höher als die Angabe laut Fahrzeug. Diese Abweichung kann aufgrund von Ladeverlusten beim Aufladen der Batterie erklärt werden.

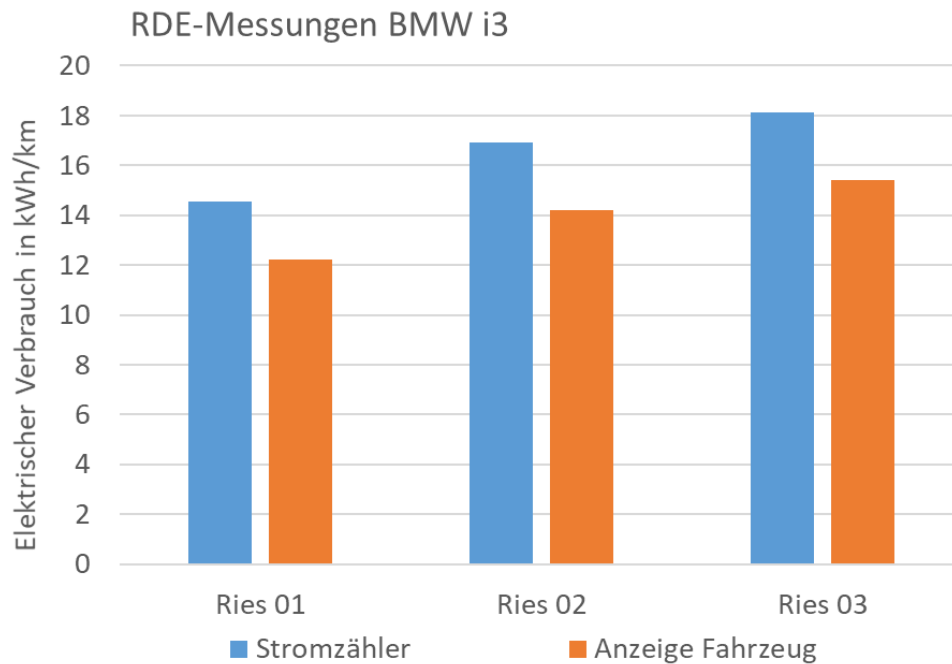


Abbildung 36: Messergebnisse BMW i3

Mit dem Renault Zoe wurden ebenso drei Messfahrten durchgeführt, deren Randbedingungen in Tabelle 26 zusammengefasst sind.

Tabelle 26: Randbedingungen Messfahrten Renault Zoe

Messfahrten BEV 2	Randbedingungen
Ries 01	Fahrer plus Beifahrer, keine Zusatzbeladung, IG-L 100 auf der Autobahn
Ries 02	Fahrer plus Beifahrer, 100 kg Zusatzbeladung
Ries 03	Fahrer, ECO-Fahrmodus, IG-L 100 auf der Autobahn

Der Renault Zoe wurde an einer Schnellladesäule wiederaufgeladen, an der auch der elektrische Verbrauch abgelesen werden konnte. In Abbildung 37 sind der elektrische Verbrauch laut Schnellladesäule und Anzeige im Fahrzeug für die drei Messfahrten aufgetragen. Die Abweichung beider Energieverbräuche hier beträgt im Mittel 3% und ist somit um einiges geringer als beim BMW i3.

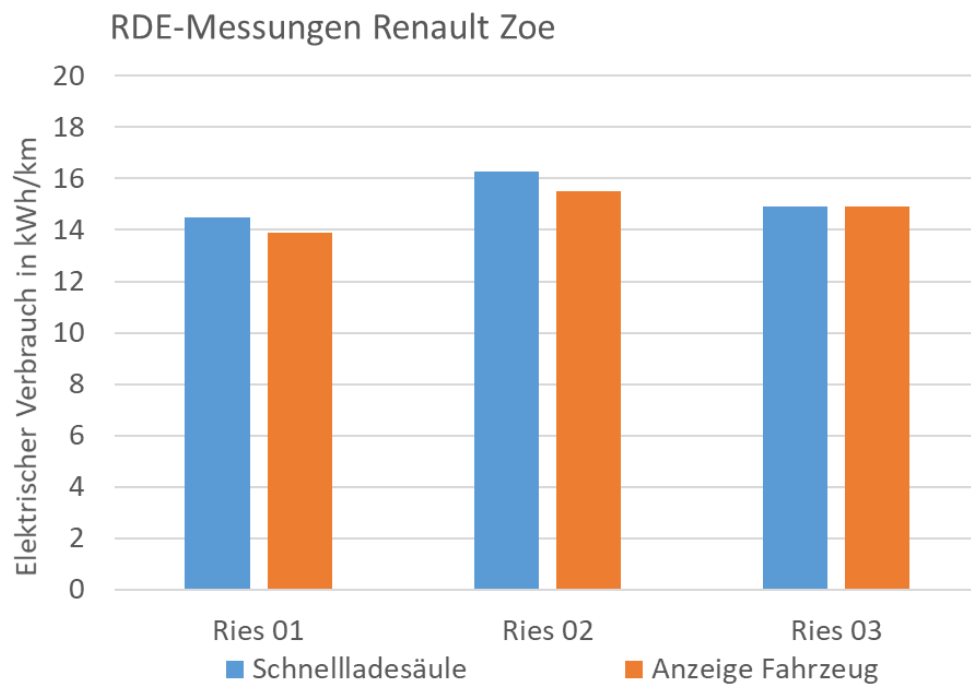


Abbildung 37: Messergebnisse Renault Zoe

6.4.2 Ladeverluste BEV

Der Anteil von Elektrofahrzeugen am Individualverkehr steigt seit den letzten Jahren kontinuierlich an. Dafür notwendig ist auch die Anpassung der Infrastruktur für das Wiederaufladen elektrisch betriebener Fahrzeuge. Die Ladestationen dafür sind nicht immer ident ausgeführt hinsichtlich der übertragenen Ladeleistung und der vorhandenen Stecker. Grundsätzlich kann ein Beladen des Elektrofahrzeugs mittels Gleich- und Wechselstrom gemacht werden. Die Batterie selbst wird mittels Gleichstrom betrieben, weshalb im Falle einer Beladung mittels Wechselstrom ein Gleichrichter benötigt wird. Je nach Ladetechnologie variieren die Ladeverluste. Generell ist der Begriff Ladeverlust nicht einheitlich definiert und kann daher von in der Literatur angegebenen 5 bis 40% variieren. Die größte Variable dabei bildet das Abstecken der Systemgrenzen, die man zur Bestimmung der Verluste beim Laden heranzieht. Abbildung 38 zeigt eine vereinfachte Betrachtung des Energieflusses ausgehend von der Steckdose bis zur Hochvoltbatterie für eine Ladevorgang mit Wechselstrom. Diese Darstellung wurde vom IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) Heidelberg im Zuge einer Studie (Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität [6]) erstellt.

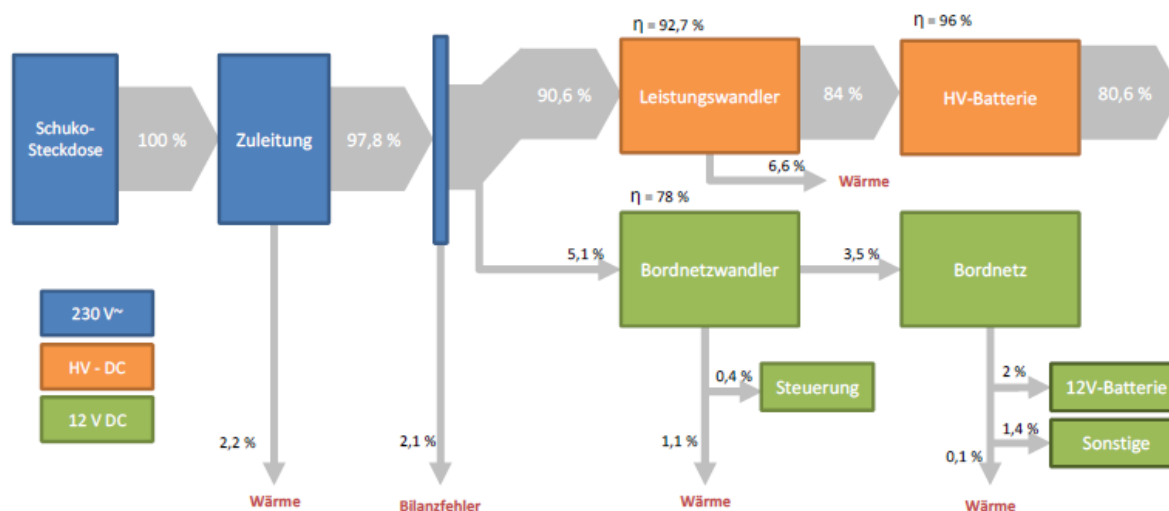


Abbildung 38: Vereinfachtes Energieflussdiagramm für das Laden mit Wechselstrom [6]

Die Darstellung zeigt, dass von der Gesamtenergie aus der Steckdose etwa 84% in der Hochvoltbatterie ankommen. Berücksichtigt werden Zuleitungsverluste und Verluste im Leistungswandler, die einen Großteil der Verluste ausmachen. Der Leistungswandler in diesem Schema, wo für das Laden Wechselstrom verwendet wird, stellt einen Inverter dar. Der Inverter richtet die Wechselspannung gleich, sodass an der HV-Batterie Gleichspannung fürs Laden anliegt. Liefert der Elektromotor eines Elektrofahrzeugs im Falle einer Rekuperation (Generatorbetrieb des Elektromotors) Wechselspannung, so muss auch diese fürs Laden der HV-Batterie vom Inverter gleichgerichtet werden.

Auch die Hochleistungsbatterie selbst ist bei der Stromabgabe an den Antrieb mit Verlusten behaftet, sodass ca. 81% der zum Laden bereitgestellten Energie schließlich am Antrieb landen. Die 81% stellen also somit die gesamte Wirkungsgradkette vom Laden und Entladen dar. [6]

Eine Abschätzung der Lade- und Entladeverluste bei elektrischen Antrieben ist deshalb wichtig, da diese für den Energieverbrauch während der Nutzungsphase solcher Fahrzeuge mitberücksichtigt werden müssen. In Kapitel 6 wurde bereits der Unterschied zwischen der TTW- und der WTW-Betrachtung für das verbrauchte CO₂ von Fahrzeugkonzepten erklärt, in der die Abschätzung von realen Lade- und Entladeverlusten bei elektrischen Antrieben miteinfließen. Ein Aufschlagfaktor für den Energieverbrauch während der Nutzungsphase berücksichtigt die Lade- und Entladeverluste für die gesamte Ökobilanz von diesen Fahrzeugen. Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstofftechnologie (NOW) mit Sitz in Deutschland hat für die Abschätzung der Lade- und Entladeverluste eine eigene Methodik entwickelt, aufbauend auf einem Datensatz von insgesamt 77 Fahrzeugen. Sie konnte damit zeigen, dass die bislang pauschal angenommene Größenordnung für die Ladeverluste mit etwa 20% in der Ökobilanz, zu hoch ist. Die realen Ladeverluste je Modell schwankten zwischen 9,9 bis 13,4%. [6]

6.5 Kennfeld-Kalibrierung

Von den insgesamt vier im Rahmen der Arbeit vermessenen Elektrofahrzeugen wurden Simulationsmodelle für PHEM erstellt und die RDE-Messfahrten sowie die Rollen-Zyklen nachsimuliert. Die Simulationsergebnisse der gesetzlich genormten Rollenzyklen (NEDC und WLTC) wurden mit den Werten laut Herstellerangabe verglichen. Dieser Vergleich diente vor allem zur Validierung des BEV-Kennfelds, da diese Zyklen bei Laborbedingungen gemessen werden und somit die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen gegeben ist. Bei Messungen im realen Straßenbetrieb gibt es immer variierende Randbedingungen, die das

Messergebnis beeinflussen können, womit die Reproduzierbarkeit dieser Messergebnisse nicht immer gegeben ist. Für die Abschätzung der Kennfeld-Qualität können dennoch RDE-Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Abweichungen zwischen Messung und Simulation können bei den RDE-Tests neben dem Kennfeld auch auf Umgebungseinflüsse (Wind, Fahrbahnzustand), Ungenauigkeiten im Höhenprofil sowie den Energieverbrauch der Nebenaggregate zurückzuführen sein. Für die Kalibrierung selbst wurde eher Wert daraufgelegt, dass der elektrische Verbrauch laut WLTC in der Simulation gut nachgebildet werden kann.

Im ersten Schritt wurde das bisher vorhandene E-Motor-Kennfeld (HBEFA 4.1-Update siehe Abbildung 35) für die Simulationen verwendet.

Ziel der Kennfeld-Kalibrierung war es, ein Elektromotor-Kennfeld für durchschnittliche Elektrofahrzeuge zu finden, das für zukünftige BEV-Simulationen in PHEM verwendet werden kann. Die Messdaten der vier Fahrzeuge dienten zur Anpassung des Kennfelds. Das Ausgangskennfeld wurde für die Anpassung des Wirkungsgrads in vier Teilbereiche gegliedert. Die Unterteilung wurde nach Lastbereichen durchgeführt. Abbildung 39 zeigt das neue Elektromotor-Kennfeld, welches sich nach der Kalibrierung mit den Messdaten der vier Elektrofahrzeuge ergeben hat.

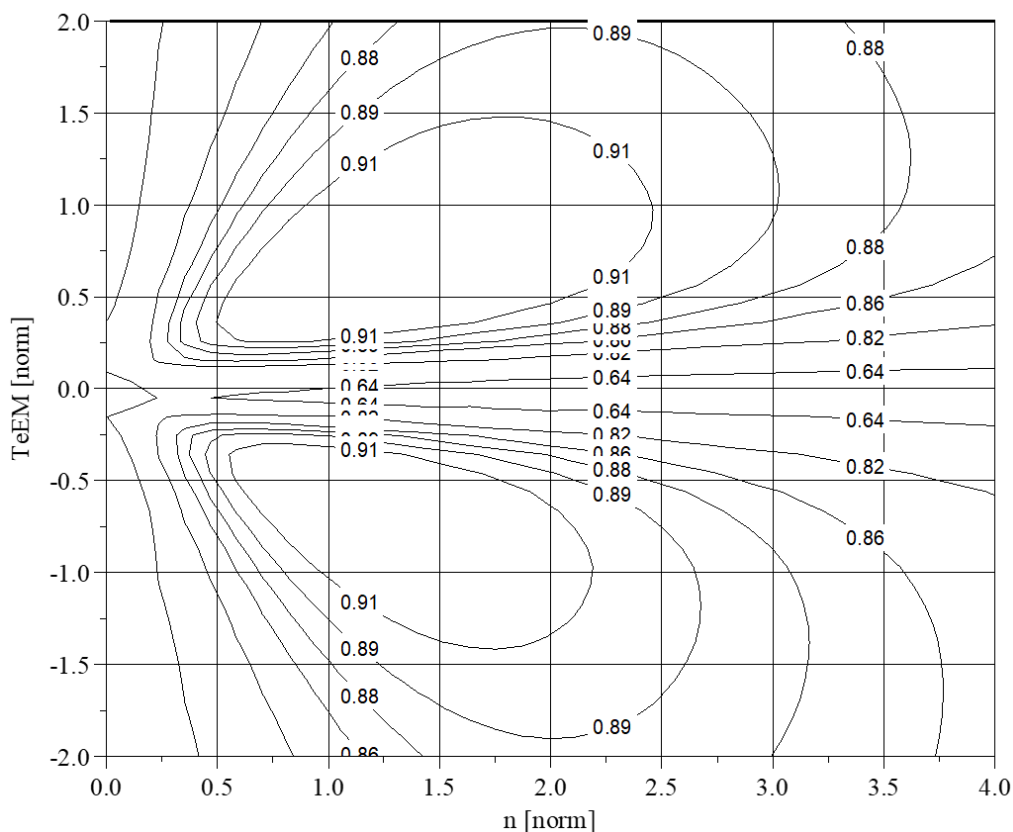


Abbildung 39: Neues Kennfeld nach Anpassung (KF V2)

Vergleicht man das kalibrierte Kennfeld (Abbildung 39) mit dem Ausgangskennfeld (Abbildung 35) dann ist erkennbar, dass der Wirkungsgrad des neuen Kennfelds im Hochlastbereich etwas schlechter, im niedrigerem Lastbereich aber besser wurde, als jener des Ausgangskennfelds.

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse der vier Elektrofahrzeuge mit altem und neuem

Kennfeld gezeigt. Die angegebene Abweichung in % für den Vergleich zwischen simuliertem elektrischem Verbrauch mit PHEM und Messwert bzw. Herstellerangabe wurde mit folgendem Zusammenhang bestimmt.

6-3

$$\text{Abweichung in \%} = \frac{EV_{PHEM} - EV_{\text{Messung/Herstellerangabe}}}{EV_{\text{Messung/Herstellerangabe}}} * 100$$

mit:

EV_{PHEM} ... Elektrischer Verbrauch mit PHEM simuliert in kWh/km

$EV_{\text{Messung/Herstellerangabe}}$... Elektrischer Verbrauch gemessen oder vom Hersteller angegeben in kWh/km

Für die Leistung der Nebenverbraucher gibt es je nach Fahrzeugsegment Standardwerte, die auch für die HBEFA-Simulationen der konventionellen Fahrzeuge verwendet wurden. In Tabelle 70 (im Anhang) sind diese Standardwerte für die Leistung der Nebenverbraucher für NEDC, WLTC und RWC für Diesel- und Benzinfahrzeuge nach Segmenten angegeben.

Für die Simulation von Elektrofahrzeugen sind diese Werte nicht repräsentativ, nachdem Heizen und Kühlen elektrisch erfolgt und die Abwärme des Verbrennungsmotors fürs Heizen nicht verwendet werden kann.

Für die nachfolgend gezeigten Simulationen der Elektrofahrzeuge wurden für die Leistung der Nebenverbraucher Werte laut einer Studie des IFEU im Jahr 2013, worin ein Flottenversuch zur Elektromobilität durchgeführt wurde, [16] übernommen. Tabelle 27 zeigt die ermittelten Durchschnittswerte für die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher beim elektrischen Fahren nach Fahrzeuggröße.

Tabelle 27: Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher [16]

Fahrzeuggröße	Elektrische Pkw	Konventionelle Pkw
Klein	800 W	400 W
Mittel	1000 W	500 W
Groß	1200 W	600 W

Der Leistungsbedarf kann je nach Jahreszeit (heißer Sommertag oder kalter Wintertag) variieren.

Für die PHEM-Simulationen der BEVs wurde der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher im NEDC auf null gesetzt, da der NEDC laut Gesetz ohne Klimaanlage und sonstigen Nebenverbrauchern gefahren werden darf. Für die Simulationen des WLTC und der RDE-Fahrten wurden je nach Fahrzeuggröße des betrachteten Elektrofahrzeugs die Werte laut Tabelle 27 herangezogen.

6.5.1 PHEM-Simulation VW e Golf

Die Fahrzeugdaten des VW e Golf wurden bereits in Tabelle 18 gezeigt. Die Fahrwiderstände für das Simulationsmodell in PHEM wurden nach der Standardmethode mittels Reifenlabel ermittelt. Tabelle 28 zeigt die Eingabeparameter des VW e Golfs für die Simulation der Zyklen in PHEM. Die Fahrzeugmasse wurde je nach Zyklus über die Beladung variiert. Der VW e Golf

ist ein Fahrzeug der Mittelklasse (C-Segment).

Der Energieverbrauch wurde jeweils als TTW Wert, also ohne Ladeverluste zwischen Netz und Batterie, simuliert.

Tabelle 28: Eingabedaten für die Simulation VW e Golf

Parameter	Einheit	WLTC	NEDC	RDE
Fahrzeugmasse (gewogen, ohne Insassen)	[kg]	1555		
Beladung	[kg]	122	100	123
R0	[N]	86,42	85,26	86,45
R ₁	[Nm/s]	0,64	0,63	0,64
R ₂	[Nm ² /s ²]	0,36	0,36	0,36
Getriebeübersetzung	[-]	9,72 (1-Gang-Automatik)		
Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	1	0	1
Leistung E-Motor	[kW]	85		
Nominalspannung	[V]	323		
Batteriekapazität	[Ah]	75		

Der VW e Golf wurde von uns mithilfe von Wiegezellen gewogen, weshalb das Fahrzeuggewicht nach DIN-Norm (ohne Fahrer) genau ermittelt werden konnte. Abbildung 40 zeigt den Vergleich der Simulations- und Messergebnisse, bzw. der Herstellerangaben für NEDC, WLTC und einer Ries-Fahrt simuliert mit dem Basiskennfeld HBEFA 4.1 und KF V2. Für NEDC und WLTC wurden die Herstellerangaben (in den nachfolgenden Tabellen mit HA in Klammer gekennzeichnet) mit den Simulationsergebnissen verglichen, für die RDE-Fahrt (Ries02) wurde der Vergleich Simulation zur Messung gemacht.

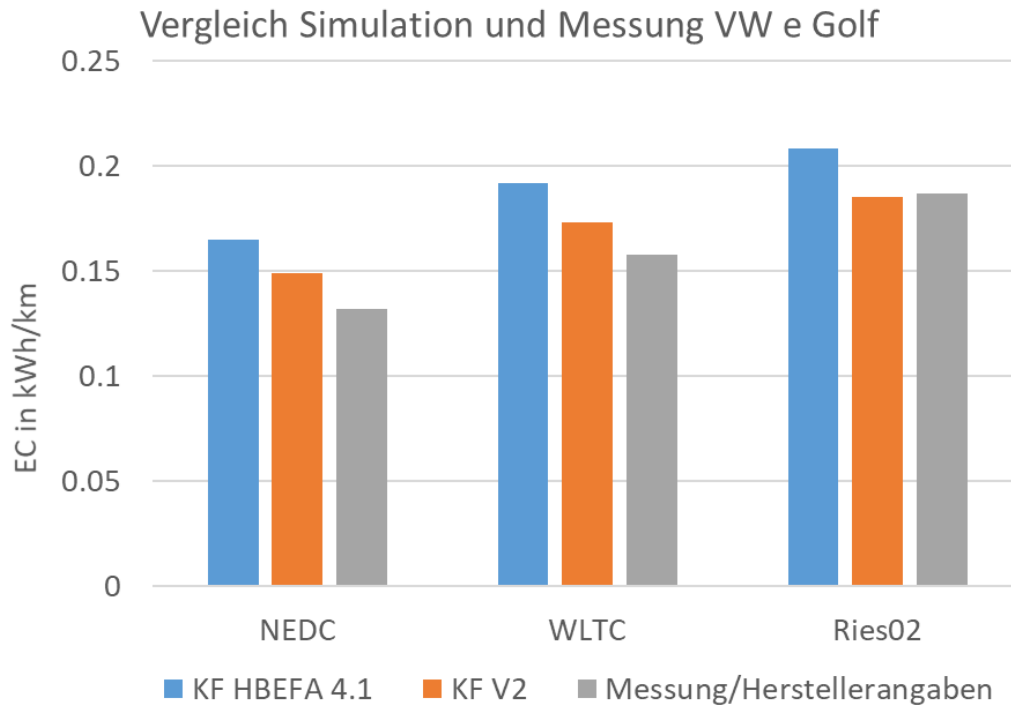


Abbildung 40: Vergleich Simulation und Messung VW e Golf

Mit dem Ausgangskennfeld (HBEFA 4.1) ergab die mittlere Abweichung zwischen Messung und Simulation 19%. Diese konnte mit dem neu kalibrierten Kennfeld (KF V2) auf einen Mittelwert von 7% reduziert werden. Der Verbrauch laut WLTC wird mit dem neuen Kennfeld um 10% überschätzt. Tabelle 29 fasst die Ergebnisse für die PHEM-Simulationen mit dem VW e Golf mit beiden Kennfeldvarianten zusammen.

Tabelle 29: Übersicht Simulationsergebnisse VW e Golf

Elektrischer Verbrauch in kWh/100km				Abweichung in %	
Zyklus	KF HBEFA 4.1	KF V2	Messung/ Herstellerangabe	KF HBEFA 4.1	KF V2
NEDC	16,51	14,90	13,2 (HA)	25%	13%
WLTC	19,20	17,33	15,8 (HA)	22%	10%
Ries02	20,84	18,49	18,7	11%	-1%
Mittelwert Abweichung in %				19%	7%

6.5.2 PHEM-Simulation Tesla Model S

Der Tesla wurde ebenfalls in PHEM als Modell erstellt, um WLTC, NEDC und eine gemessene RDE-Fahrt zu simulieren. Die Fahrwiderstände des Tesla wurden, wie bereits in Kapitel 6.3.2.1 beschrieben, mittels Ausrollversuch ermittelt. Für die hier gezeigten Simulationen wurden aber die Fahrwiderstände nach der Standardmethode (Reifenlabel) verwendet, um für alle vier Elektrofahrzeuge dieselbe Datengrundlage für die Simulation in PHEM zu schaffen. Tabelle 30 fasst die Eingabedaten für die PHEM-Simulation des Tesla zusammen. Der Tesla repräsentiert ein Elektrofahrzeug der Oberklasse.

Tabelle 30: Eingabedaten für die Simulation Tesla Model S

Parameter	Einheit	WLTC	NEDC	RDE
Fahrzeugmasse (gewogen, ohne Insassen)	[kg]	2121		
Beladung	[kg]	125	100	90
R ₀	[N]	153,49	128,83	128,25
R ₁	[Nm/s]	1,14	0,96	0,95
R ₂	[Nm ² /s ²]	0,43	0,43	0,43
Getriebeübersetzung	[-]	9,76 (1-Gang-Automatik)		
Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	1,2	0	1,2
Leistung E-Motor	[kW]	315		
Nominalspannung	[V]	400		
Batteriekapazität	[Ah]	187,5		

Das Gewicht des Tesla Model S wurde mittels Wiegezellen bestimmt und für die Simulation verwendet. Abbildung 41 zeigt den Vergleich von elektrischem Verbrauch für NEDC, WLTC und bei einer Ries-Fahrt zwischen Simulation und Messung bzw. Herstellerangaben für den NEDC. Für den WLTC konnte kein Verbrauchswert laut Hersteller für dieses Fahrzeug gefunden werden. Der simulierte Verbrauch im WLTC mit KF V2 ist um etwa 20% höher als jener im NEDC, was durchaus realistisch ist, wenn man die Herstellerangaben für den elektrischen Verbrauch von NEDC und WLTC anderer Elektrofahrzeugmodelle betrachtet. Die Simulationen mit KF V2 ergeben einen niedrigeren elektrischen Verbrauch und weisen somit eine geringere Abweichung zum jeweiligen Vergleichswert auf.

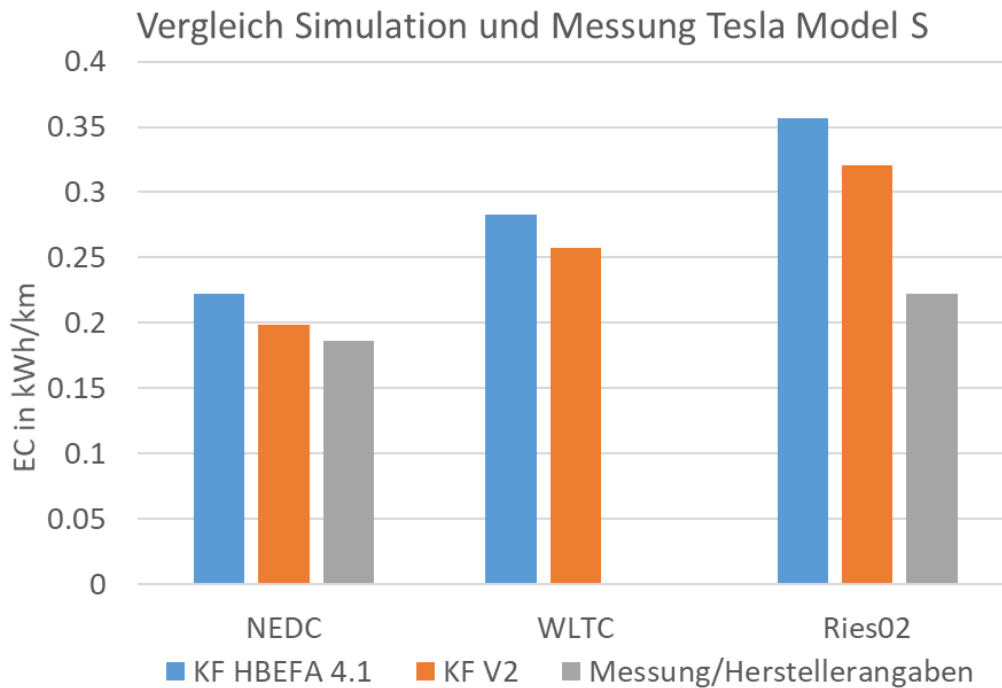


Abbildung 41: Vergleich Simulation und Messung Tesla Model S

Tabelle 31 zeigt eine Zusammenfassung der simulierten Ergebnisse für den simulierten elektrischen Verbrauch mit PHEM der drei betrachteten Fahrzyklen mit beiden Kennfeldern. Die prozentuelle Abweichung zwischen Simulation und Messung/Herstellerangaben für die Simulationen mit dem ursprünglichen Kennfeld beträgt 44% im Mittel. Durch die Vorgabe des neuen Kennfeldes in PHEM konnte die Abweichung um etwa 15% gesenkt werden.

Tabelle 31: Simulationsergebnisse Tesla Model S

Elektrischer Verbrauch in kWh/100km				Abweichung in %	
Zyklus	KF HBEFA 4.1	KF V2	Messung/Herstellerangabe	KF HBEFA 4.1	KF V2
NEDC	22,24	19,85	18,6 (HA)	20%	7%
WLTC	28,32	25,70	k.A.	-	-
Ries02	35,70	32,02	22,20	61%	44%
Mittelwert Abweichung in %				40%	25%

6.5.3 PHEM-Simulation Renault Zoe

Tabelle 32 zeigt die Fahrzeugdaten für die PHEM-Simulationen für den Renault Zoe. Die Beladung je Ries-Route wurde an das reale Gewicht bei der jeweiligen RDE-Messung angepasst. Die Fahrwiderstände für dieses Fahrzeug wurden ebenfalls mithilfe des Reifenlabels bestimmt für die Vorgabe in der PHEM-Simulation. Der Renault Zoe wurde als kleines Elektrofahrzeug eingestuft, weshalb für die Leistung der Nebenverbraucher für die WLTC- und die RDE-Simulationen 500 W angenommen wurden.

Tabelle 32: Eingabedaten für die Simulation Renault Zoe

Parameter	Einheit	WLTC	NEDC	Ries01	Ries02	Ries03
Fahrzeugmasse (DIN)	[kg]	1468				
Beladung	[kg]	134	100	150	250	75
R ₀	[N]	92,94	90,95	93,85	99,66	89,50
R ₁	[Nm/s]	0,69	0,68	0,7	0,74	0,67
R ₂	[Nm ² /s ²]	0,3997				
Getriebeübersetzung	[-]	9,76 (1-Gang-Automatik)				
Leistung der Nebenv.	[kW]	0,5	0	0,5	0,5	0,5
Leistung E-Motor	[kW]	46				
Nominalspannung	[V]	400				
Batteriekapazität	[Ah]	64,75				

Abbildung 42 zeigt den Vergleich des simulierten elektrischen Verbrauchs mit den Messwerten (für die RDE-Fahrten) bzw. den Herstellerangaben (für NEDC und WLTC) für die Fahrzyklen mit dem Renault Zoe. Die Simulationen wurden wiederum mit dem Kennfeld laut HBEFA 4.1 und dem neu kalibrierten Kennfeld (KF V2) für den Elektromotor gerechnet.

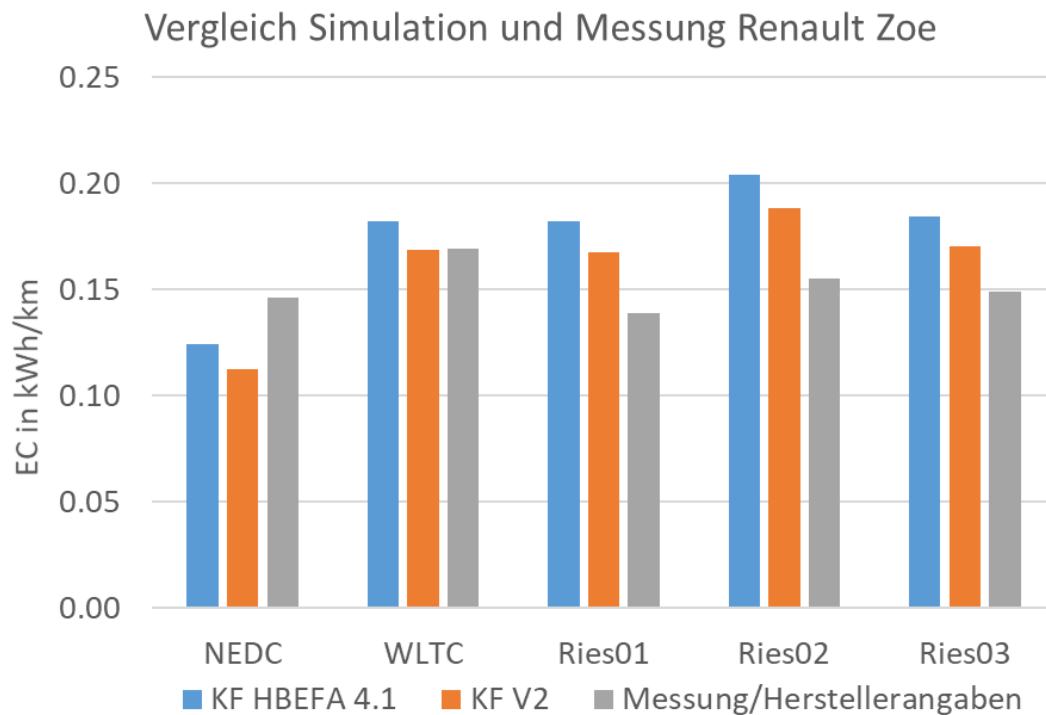


Abbildung 42: Vergleich Simulation und Messung/Herstellerangaben Renault Zoe

Die Abweichungen zwischen simuliertem elektrischem Verbrauch und Messungen bzw. den Angaben laut Hersteller für NEDC und WLTC konnten auch für dieses Fahrzeug mit der Vorgabe von KF V2 gesenkt werden. Tabelle 33 zeigt eine Zusammenfassung der simulierten und gemessenen elektrischen Verbräuche für die 5 betrachteten Fahrzyklen für den Renault Zoe. Die mittlere Abweichung zwischen Simulation und Messung bzw. Herstellerangaben für NEDC und WLTC konnte von mittleren 16% für die Simulationen mit dem ursprünglichen EM (Elektromotor)-Kennfeld durch die Vorgabe des neuen EM-Kennfelds auf 7% gesenkt werden.

Tabelle 33: Simulationsergebnisse Renault Zoe

Elektrischer Verbrauch in kWh/100km			Abweichung in %		
Zyklus	KF HBEFA 4.1	KF V2	Messung/Herstellerangabe	KF HBEFA 4.1	KF V2
NEDC	12,43	11,24	14,6 (HA)	-15%	-23%
WLTC	18,24	16,85	16,90 (HA)	8%	0%
Ries01	18,19	16,77	13,90	31%	21%
Ries02	20,38	18,81	15,50	31%	21%
Ries03	18,46	17,02	14,90	24%	14%
Mittelwert Abweichung in %				16%	7%

6.5.4 PHEM-Simulation BMW i3

Tabelle 34 fasst die Eingabedaten für die Simulation des BMW i3 in PHEM zusammen. Bei den RDE-Fahrten wurde die Beladung variiert, um den Einfluss des Gewichts auf den elektrischen Verbrauch darzustellen.

Tabelle 34: Eingabedaten für die Simulation BMW i3

Parameter	Einheit	WLTC	NEDC	Ries01	Ries02	Ries03
Fahrzeugmasse (DIN)	[kg]	1270				
Beladung	[kg]	134	100	150	250	75
R ₀	[N]	81,32	79,47	78,02	83,82	89,62
R ₁	[Nm/s]	0,61	0,59	0,58	0,62	0,67
R ₂	[Nm ² /s ²]	0,4756				
Getriebeübersetzung	[-]	9.67 (1-Gang-Automatik)				
Leistung der Nebenv.	[kW]	0,5	0	0,5	0,5	0,5
Leistung E-Motor	[kW]	75				
Nominalspannung	[V]	400				
Batteriekapazität	[Ah]	64,75				

Mit dem BMW i3 wurde ein Ausrollversuch für die Ermittlung der Fahrwiderstände gemacht. Die in Tabelle 34 angegebenen Fahrwiderstände sind aber jene nach dem Reifenlabel ermittelte Fahrwiderstände, um dieselbe Bezugsbasis zwischen den Fahrzeugen zu gewährleisten.

Abbildung 43 zeigt die simulierten Ergebnisse mit dem HBEFA 4.1 Basiskennfeld und dem neuen Kennfeld für den Elektromotor, sowie die Messergebnisse und Herstellerangaben für den BMW i3. Für NEDC und WLTC wurden wiederum Herstellerangaben für den Vergleich mit den simulierten Ergebnissen herangezogen, bei den RDE-Fahrten dienten die gemessenen Daten als Vergleichsbasis.

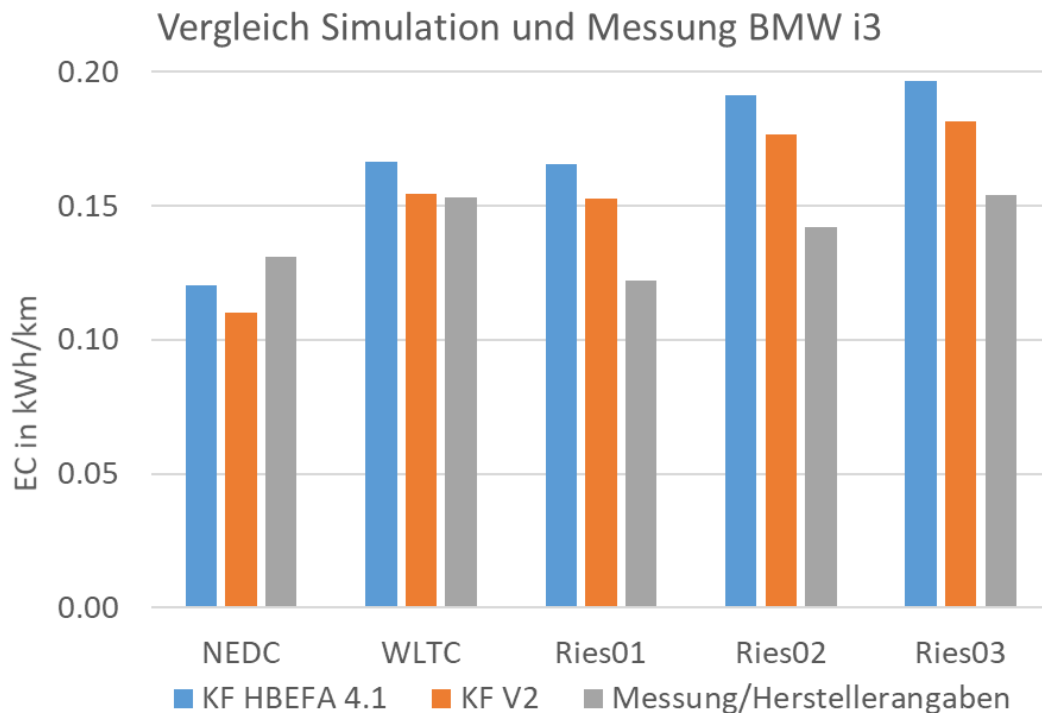


Abbildung 43: Vergleich Simulation und Messung/Herstellerangaben BMW i3

Tabelle 35 fasst die Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Ergebnissen zusammen. Die mittlere Abweichung wurde durch die Verwendung des neuen Kennfelds in PHEM halbiert.

Tabelle 35: Simulationsergebnisse BMW i3

Elektrischer Verbrauch in kWh/100km			Abweichung in %		
Zyklus	KF HBEFA 4.1	KF V2	Messung/Herstellerangabe	KF HBEFA 4.1	KF V2
NEDC	12,01	11,00	13,10	-8%	-16%
WLTC	16,63	15,43	15,30	9%	1%
Ries01	16,56	15,28	12,20	36%	25%
Ries02	19,12	17,66	14,20	35%	24%
Ries03	19,65	18,13	15,40	28%	18%
Mittelwert Abweichung in %				20%	10%

6.5.5 Zusammenfassung Kalibrierung Elektromotor-Kennfeld

Ein bisher am Institut verwendetes Kennfeld (KF HBEFA 4.1) eines Elektromotors für die Simulation von Elektrofahrzeugen in PHEM wurde als Basis für die Kennfeld-Kalibrierung herangezogen.

Die Kalibrierung wurde mit Mess- bzw. Herstellerangaben von vier Elektrofahrzeugen gemacht, deren Fahrzeuggrößen vom Kleinwagen bis zum Oberklasse-Fahrzeug reichen. Das Ziel war es, ein allgemein gültiges Kennfeld zu erzeugen, welches den elektrischen Verbrauch von kleinen wie auch großen Elektrofahrzeugen in der Simulation mit PHEM gut abbildet. Der Datensatz für die Kalibrierung beinhaltet sowohl die beiden Pkw-Rollenzyklen NEDC und WLTC als auch Realfahrten. Das ursprüngliche Kalibrierziel war es, eine möglichst geringe Abweichung des elektrischen Verbrauchs im WLTC zu erreichen. Tabelle 36 zeigt die mittlere prozentuelle Abweichung zwischen Mess- bzw. Herstellerdaten der 4 Elektrofahrzeuge für NEDC, WLTC und RDE, simuliert mit dem Basiskennfeld (HBEFA 4.1) und dem nach der Kalibrierung erhaltenen Kennfeld (KF V2) des Elektromotors.

Tabelle 36: Kalibrierergebnisse Elektromotor-Kennfeld

Zyklus	Mittlere Abweichung in %	
	KF HBEFA 4.1	KF V2
NEDC	4%	-6%
WLTC	5%	-5%
RDE	22%	10%

Der elektrische Verbrauch des derzeit gesetzlich gültigen Pkw-Rollenfahrzyklus (WLTC) wurde mit dem Basiskennfeld im Mittel um 5% überschätzt. Simulationen mit dem kalibrierten Kennfeld (KF V2) unterschätzen den WLTC-Verbrauch der Fahrzeuge im Mittel um 5%. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass eine Kalibrierung des Elektromotoren-Kennfelds keine Verbesserung für die simulierten Verbräuche mit sich brachte. Betrachtet man allerdings die Realfahrten, so werden die elektrischen Verbräuche dieser mit dem neuen Kennfeld im Vergleich zum Basiskennfeld besser simuliert. Zusammenfassend konnte das Basiskennfeld mit der Kalibrierung also so weit verbessert werden, dass die elektrischen Verbräuche im WLTC sowie jene der Realfahrten in der Simulation genauer abgebildet werden können. Das Kennfeld KF V2 wird somit als neues Basiskennfeld für Elektromotoren bei PHEM-Simulationen von Elektrofahrzeugen verwendet.

6.6 Simulation PHEV für HBEFA

Die Berechnung der Emissionsfaktoren von PHEVs stellt aufgrund der Tatsache, dass die Batterie dieser Fahrzeuge auch extern mit Strom aus dem Netz beladen werden kann, eine Besonderheit dar. Der in der Formel 6-4 gezeigte Zusammenhang für die Berechnung der Emissionsfaktoren von PHEVs weist eine unbekannte Größe auf, nämlich jenen Fahranteil im Fahrzyklus, der mit Strom aus dem Netz gefahren wird.

6-4

$$E_{PHEV} = \frac{K_{EV}}{100} \cdot E_{EV} + \left(1 - \frac{K_{EV}}{100}\right) \cdot E_{HEV}$$

mit:

E_{PHEV} ... Emissionsfaktor inklusive elektrischem Fahranteils mit Strom vom Netz in g/km

K_{EV} ... Elektrischer Fahranteil mit Strom vom Netz in %

E_{HEV} ... Emissionsfaktor im HEV-Ladungserhaltungsmodus in g/km

E_{EV} ... Emissionsfaktor für den elektrischen Betrieb in g/km

Fahrsituationen, in denen Energie aus der Rückgewinnung von Bremsenergie generiert wird, werden in PHEM im normalen Hybridmodell realistisch simuliert. Der elektrische Fahranteil mit Strom aus dem Netz ist aber abhängig vom Ladezustand der Batterie bei Fahrtantritt sowie von der Fahrtstreckenverteilung. Detaillierte Informationen darüber, wie oft Besitzer von Plug-in-Hybridfahrzeugen ihre Batterie aufladen und wie die Verteilung der Fahrtstrecken aussieht, gibt es bislang nicht. Daher wurden Untersuchungen für die Abschätzung dieses Anteils ange stellt, die nun in weiterer Folge beschrieben werden.

Für die gezeigten Analysen wurden die HBEFA-Zyklen, die die Verkehrssituation in Österreich darstellen, herangezogen. Insgesamt sind das 257 Zyklen mit Straßenneigungen von +/- 6%. Die Zyklen wurden in zwei Modi für das PHEV simuliert:

- Rein elektrischer Fahrmodus
- Ladungserhaltungsmodus als HEV ohne Ladung mit Strom vom Netz

Die Fahrzeugspezifikationen für das Simulationsmodell in PHEM wurden basierend auf der Zulassungsstatistik der meistverkauften PHEVs in Europa für das Jahr 2016 abgeleitet. Tabelle 37 zeigt die zehn meistverkauften PHEVs in Europa im Jahr 2016.

Tabelle 37: Statistik der zehn meistverkauften PHEVs in Europa im Jahr 2016 [9]

Rangliste	Marke	Modell	Anzahl der Zulassungen	Anteil in %
1	Mitsubishi	Outlander PHEV	21328	21,77
2	VW	Passat GTE	13248	13,52
3	VW	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	5,5
10	BMW	I3 Rex	5322	5,43
Summe			97970	100

Basierend auf den Fahrzeugdaten der in Tabelle 37 angeführten PHEVs und ihrer prozentuellen Anteile an der Gesamtanzahl wurde ein durchschnittliches PHEV mit den in Tabelle 38 gezeigten Fahrzeugspezifikationen für die Simulation in PHEM abgeleitet.

Tabelle 38: Fahrzeugspezifikationen durchschnittliches PHEV

Parameter	Einheit	Größe
Leermasse (DIN)	[kg]	1738
Verbrauch (Typprüfwert)	[l/100 km]	1,81
Leistung VKM	[kW]	123
Leistung E-Motor	[kW]	79
Batteriekapazität	[kWh]	8,8
Batteriespannung	[V]	314
Elektrische Reichweite	[km]	43

Die Simulation mit dem Durchschnitts-PHEV in PHEM in beiden Fahrmodi liefert die Emissionsfaktoren für das Fahren im rein elektrischen Betrieb (E_{EV}) und im ladungserhaltenden Betrieb als reines HEV (E_{HEV}). Für den elektrischen Fahranteil mit Strom aus dem Netz (K_{EV}) wurden drei Ansätze untersucht:

- Elektrischer Fahranteil mit Strom vom Netz unabhängig von der Straßenkategorie
- Elektrischer Fahranteil als Funktion von Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Basis einer Statistik für Deutschland
- Elektrischer Fahranteil als Funktion der Durchschnittsgeschwindigkeiten von simulierten Fahrzyklen

Diese drei unterschiedlichen Varianten werden nun genauer beschrieben.

6.6.1 Konstanter elektrischer Fahranteil mit Strom vom Netz Variante 1

Der erste Ansatz war, den elektrischen Fahranteil mit Strom vom Netz bei PHEV-Simulationen unabhängig von der gefahrenen Straßenkategorie als konstant anzunehmen, was vermutlich die Realität nicht wiedergibt (geringere elektrische Anteile in Richtung Autobahn erwartet), für Durchschnittswerte über die gesamte Kfz-Nutzung aber ausreichend genau sein sollte. Für eine Sensitivitätsanalyse wurden die CO₂-Emissionen der HBEFA-Zyklen für Österreich mit 0% und 35% elektrischem Fahranteil berechnet. Abbildung 44 zeigt die CO₂-Emissionen in g/km des durchschnittlichen PHEVs und eines durchschnittlichen Benzin-Pkws der Emissionsstufe EURO 6 aufgetragen über der Durchschnittsgeschwindigkeit für den jeweiligen Fahrzyklus. In der gezeigten Grafik wurden nur jene Fahrzyklen mit einer Steigung von 0% dargestellt.

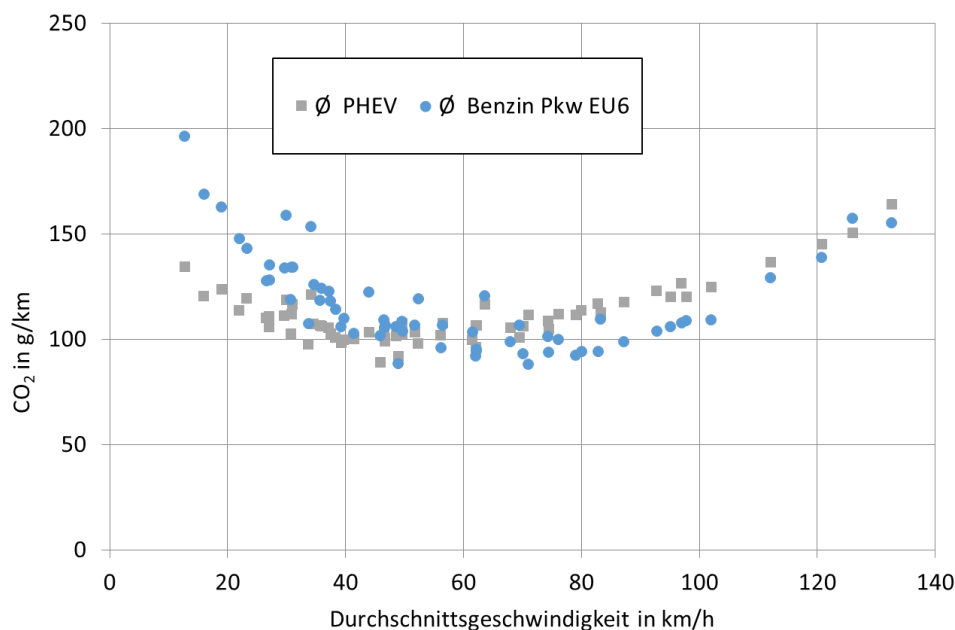


Abbildung 44: TTW-CO₂-Emissionen für Ø PHEV und Ø Benzin-Pkw EU6 bei $K_{EV}=0\%$

Abbildung 44 zeigt, dass bei 0% elektrischem Fahranteil mit Strom vom Netz, also wenn das PHEV nicht extern aufgeladen wird, ein Einsparungspotenzial von CO₂ gegenüber konventionell betriebenen Pkw für Fahrzyklen mit niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten, also jenen Zyklen, die das städtische Fahren darstellen, gegeben ist. In diesen Fahrzyklen ist die rückgewonnene Bremsenergie recht hoch und somit kann diese eingespeicherte Energie für das elektrische Fahren genutzt werden. Damit wird CO₂ eingespart.

Bei Zyklen mit höheren durchschnittlichen Geschwindigkeiten, die das Fahren auf Autobahnen darstellen, weist das PHEV gegenüber dem Benzin-Pkw kein Einsparungspotenzial mehr auf, da bei diesen Fahrten die Rückgewinnung an Bremsenergie im Regelfall geringer ist. Es muss an dieser Stelle auch erwähnt werden, dass das PHEV ein Leergewicht nach DIN von 1738 kg aufweist, während der Benzin-Pkw für diese Betrachtung nur 1308 kg schwer ist. Daraus ergibt sich somit eine Differenzmasse von fast 400 kg. Für den durchschnittlichen Benzin-Pkw wurden die Fahrzeugdaten nach HBEFA für das Jahr 2016 herangezogen. Das deutlich höhere Gewicht des PHEVs führt zu höherem Roll- und Beschleunigungswiderstand, welche sich negativ auf den Verbrauch auswirken. Aus dieser Gegenüberstellung ist erkennbar, dass die Vorteile eines PHEVs gegenüber einem konventionell betriebenen Fahrzeug bei Nichtaufladen der Batterie gering sind, da aufgrund des elektrischen Antriebsstrangs zusätzliche Masse im Fahrzeug

mitgeführt werden muss, welche sich wiederum ungünstig auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt.

Für einen elektrischen Fahranteil mit Strom vom Netz von 35% wurde dieselbe Gegenüberstellung gemacht, welche in Abbildung 45 gezeigt wird.

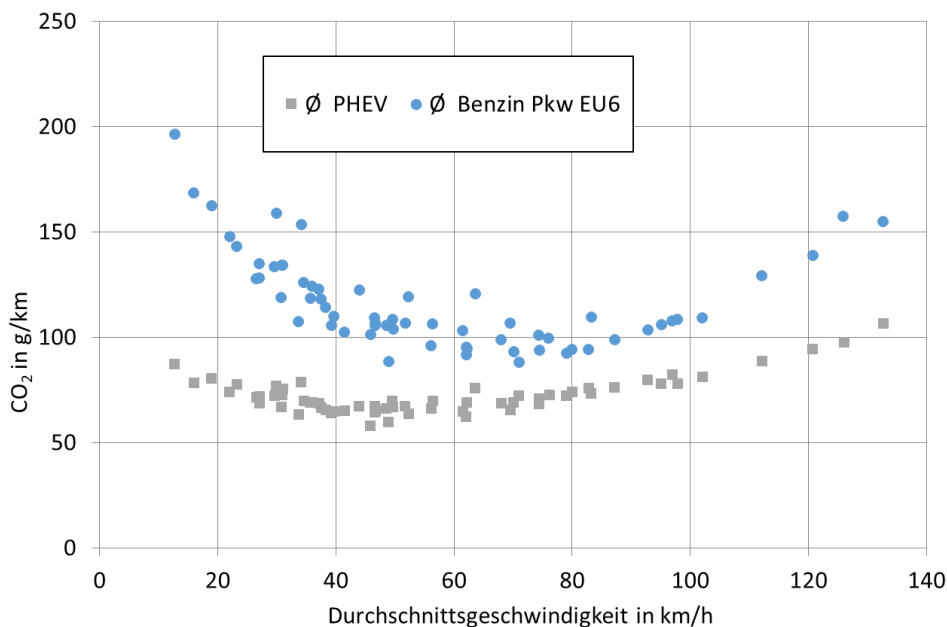


Abbildung 45: TTW CO₂-Emissionen für Ø PHEV und Ø Benzin- Pkw EU6 bei K_{EV}=35%

Würde der elektrische Fahranteil mit Strom vom Netz 35% in den simulierten Fahrzyklen beitragen, dann ist das Einsparungspotenzial des PHEVs gegenüber dem Benzin-Pkw für alle betrachteten Fahrsituationen durchaus hoch.

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen allerdings das TTW-CO₂ des PHEVs, was bedeutet, dass die CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung noch nicht mitberücksichtigt wurden. Um diese auch miteinzuberechnen wurde ein Emissionsfaktor für den österreichischen Strommix von 296 g/kWh berücksichtigt. Für die Herstellung von Benzin wurde ein CO₂-Aufschlag von 22% für die Kraftstoffherzeugung angenommen und somit ergeben sich die in Tabelle 39 dargestellten TTW- und WTW-CO₂-Emissionen für das durchschnittliche PHEV und den Benzin-Pkw EU6.

Tabelle 39: Simulierte TTW- und WTW-CO₂-Emissionen für konstanten K_{EV} Variante 1

Fahrzeug	TTW-CO ₂	WTW-CO ₂	Kraftstoffverbrauch
[-]	[g/km]		[l/100 km]
Ø EU6 Benzin-Pkw	123,45	150,55	5,30
Ø PHEV mit K _{EV} =0%	117,59	143,40	5,05
Ø PHEV mit K _{EV} =35%	76,43	122,20	3,28

Mit 35% Anteil des elektrischen Fahrens mit Strom vom Netz sind die TTW-Emissionen des PHEVs im Vergleich zum konventionellen Benzinfahrzeug um ca. 40% geringer, obwohl das PHEV ein größeres Fahrzeugsegment darstellt. Die WTW-Emissionen des PHEVs sind in dieser Betrachtung 20% geringer. Ein PHEV, das kaum aus dem Netz geladen wird, bietet aufgrund seines höheren Gewichts gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen nur eine geringe CO₂-Reduktion.

6.6.2 Variabler elektrischer Fahranteil Variante 2

Da die Emissionsfaktoren im HBEFA getrennt nach Verkehrssituationen von Stop-and-go bis Autobahn ohne Tempolimit bestimmt werden, sind eventuell deutlich unterschiedliche Anteile elektrischen Fahrens für die Ergebnisse der einzelnen Verkehrssituationen relevant.

Für die Variante 2 wurde daher der elektrische Fahranteil mit Strom vom Netz als Funktion der Durchschnittsgeschwindigkeit aus einem Abschlussbericht [4], basierend auf einem Datensatz des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), berechnet. Der Datensatz stellt eine Matrix dar, in der die elektrische Reichweite in % je Entfernungsklasse gegeben ist. Mit der Annahme einer elektrischen Reichweite von 40 km für das durchschnittliche PHEV und einer Abschätzung der mittleren Geschwindigkeit je Entfernungsklasse, konnte schließlich ein linearer Zusammenhang zwischen dem elektrischen Fahranteil und der Durchschnittsgeschwindigkeit gefunden werden. In Abbildung 46 wird dieser Zusammenhang grafisch gezeigt.

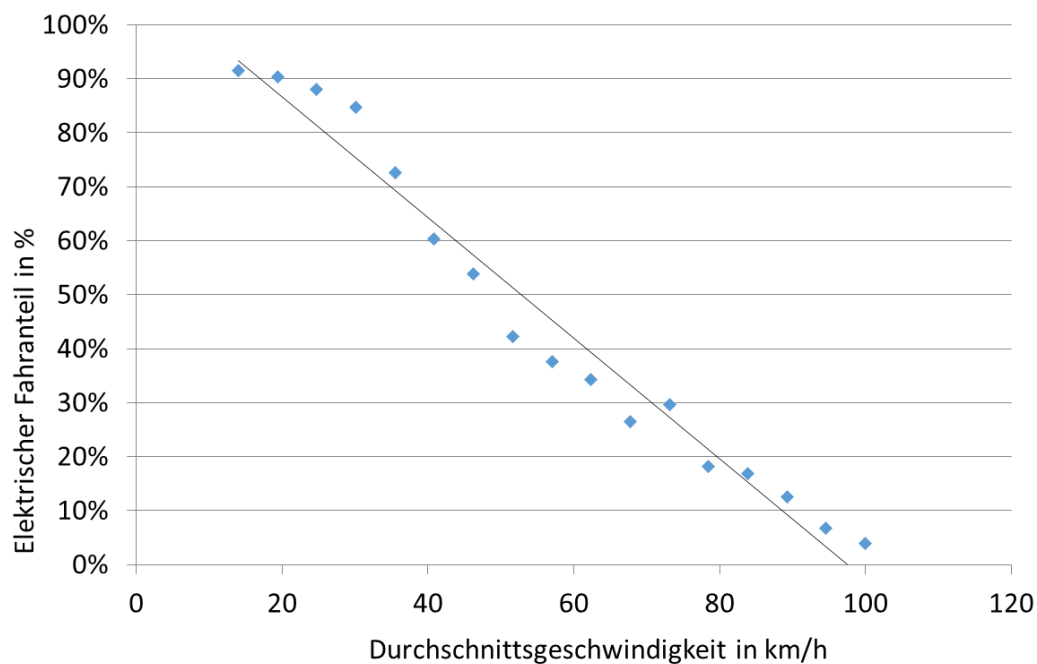


Abbildung 46: Elektrischer Fahranteil über durchschnittlicher Geschwindigkeit [17]

Wendet man diese Funktion auf die HBEFA-Zyklen für Österreich an, dann ergeben sich die in Tabelle 40 dargestellten CO₂-Emissionen.

Tabelle 40: Simulierte TTW- und WTW-CO₂-Emissionen für variablen K_{EV} Variante 2

Fahrzeug	TTW-CO ₂	WTW-CO ₂	Kraftstoffverbrauch
[-]	[g/km]		[l/100 km]
Ø EU6 Benzin-Pkw	123,45	150,55	5,30
Ø PHEV mit K _{EV} = f(Ø _V)	81,34	122,15	3,49

Die simulierten CO₂-Emissionen der Variante 2 liegen somit im Mittel unterhalb jenen der Variante 1 mit dem konstanten elektrischen Fahranteil von 35%. Innerorts ergeben sich dementsprechend viel niedrigere Werte, für die Autobahn höhere Emissionsfaktoren. Der elektrische Fahranteil wirkt ja gleichermaßen für CO₂ und Schadstoffemissionen.

6.6.3 Variabler elektrischer Fahranteil Variante 3

Die Variante 3 hatte das Ziel, eine repräsentative Matrix zu erstellen, die elektrische Fahranteile abhängig von Verkehrssituation und Ladungszustand der Batterie bei Fahrtantritt darstellt. Im ersten Schritt wurden typische Fahrprofile für PHEVs ausgearbeitet, um diese mit unterschiedlichen Anfangsladezuständen (Start-SOCs) der Batterie zu simulieren. Diese Fahrprofile reichen von 20 bis 300 km und wurden, auf relevanten HBEFA-Fahrzyklen basierend, aufgebaut. Für jede Straßenkategorie (Stadt, Land und Autobahn) wurde ein repräsentativer Fahrzyklus definiert. Die Unterscheidung zwischen den drei Straßenkategorien wurde aufgrund der Geschwindigkeit durchgeführt. Geschwindigkeiten kleiner gleich 50 km/h repräsentieren das Fahren in der Stadt. Fahrten bei Geschwindigkeiten größer als 50 km/h, aber kleiner gleich 90 km/h, zählen zur Kategorie Land. Autobahnfahrten wird bei Geschwindigkeiten größer als 90 km/h definiert.

Der kürzeste Standardfahrzyklus mit 20 km Strecke wurde mit einer Drittel-Verteilung für Stadt-, Land- und Autobahnfahrten, bezogen auf die Zeit und nicht die Strecke, angenommen. Dabei wurde der Stadtanteil in zwei Bereiche aufgeteilt, nämlich in einen am Anfang und einen am Ende des Fahrzyklus. Abbildung 47 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des Standardfahrprofils mit 20 km als Gesamtstrecke mit der Aufteilung in Stadt-, Land- und Autobahnanteil.

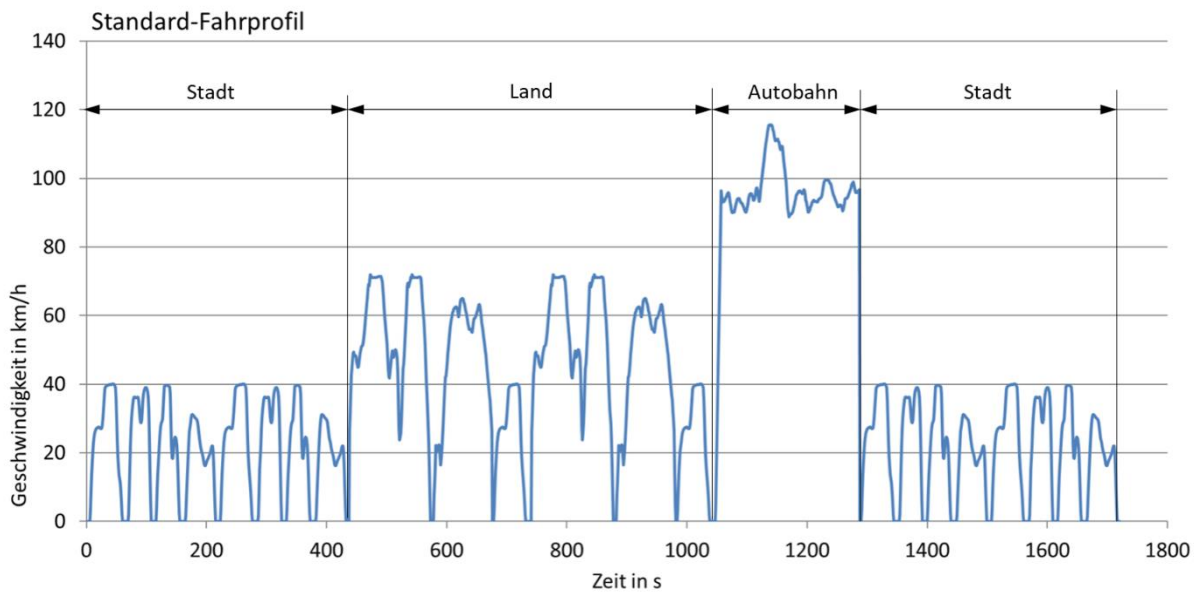


Abbildung 47: Standard-Fahrprofil mit 20 km [17]

Für die längeren Fahrprofile bis 100 km Gesamtstrecke wurde die Strecke in der Stadt beibehalten. Lediglich die Anteile für Land und Autobahn wurden so erweitert, dass die gefahrene Strecke der beiden Anteile nahezu gleich ist. Für die Fahrprofile mit einer Gesamtstrecke von 200 km bzw. 300 km wurde das 100 km lange Fahrprofil zweimal bzw. dreimal hintereinander gereiht.

Typische Fahrprofile mit 20, 40, 60, 100, 200 und 300 km wurden mit vier unterschiedlichen Start-SOCs mit dem Durchschnittsfahrzeug der PHEVs simuliert, welches eine elektrische Reichweite von ungefähr 40 km aufweist, abhängig vom Fahrzyklus, der Beladung und dem Leistungsbedarf der Nebenverbraucher. Der Start-SOC variierte zwischen 20, 40, 60 und 80%. Das PHEM-Modell des durchschnittlichen PHEVs wurde bereits beschrieben. Bei einem SOC kleiner als 20% wird die Betriebsstrategie im Ladungserhaltungsmodus ausgeführt und es kommt zu keinem elektrischen Fahren mit Strom vom Netz. Der Anteil des elektrischen Fahrens mit Strom vom Netz kann somit für jeden simulierten Fahrzyklus berechnet werden, indem man jeden Zeitschritt mit Kraftstoffverbrauch gleich null bis zum ersten Zeitpunkt wo der SOC auf 20% fällt, aufsummiert. Das spätere elektrische Fahren im Zyklus erfolgt nicht mehr mit Strom vom Netz, sondern mit der im Fahrzeug erzeugten Energie im HEV-Modus in Rekuperationsphasen und wird daher nicht dazugerechnet.

Ziel dieser Simulationen und Berechnungen ist es, eine Matrix aus elektrischen Fahranteilen je Verkehrssituation zu erstellen. Die Verkehrssituation wird durch die Fahrstrecke und dem Start-SOC beschrieben.

Die Matrix gibt also den elektrischen Fahranteil mit Strom aus dem Netz abhängig von der Fahrstrecke und dem Anfangsladezustand der Batterie an. Tabelle 41 zeigt die Abhängigkeit des elektrischen Fahranteils mit Strom vom Netz über Geschwindigkeit und Fahrstrecke für unterschiedliche Start-SOCs.

Tabelle 41: Elektrischer Fahranteil mit Strom vom Netz über Geschwindigkeit und Fahrstrecke bei unterschiedlichen Start-SOCs [17]

Geschwindigkeit in km/h	0-50	SOC 20	51%	51%	47%	47%	43%	29%
		SOC 40	96%	93%	79%	63%	52%	35%
		SOC 60	96%	93%	90%	83%	61%	40%
		SOC 80	97%	95%	92%	90%	69%	46%
	50-90	SOC 20	6%	5%	8%	13%	13%	9%
		SOC 40	88%	87%	62%	39%	28%	19%
		SOC 60	88%	87%	88%	78%	45%	30%
		SOC 80	87%	87%	89%	89%	60%	40%
	>90	SOC 20	18%	23%	24%	25%	12%	8%
		SOC 40	23%	25%	24%	25%	12%	8%
		SOC 60	23%	25%	25%	25%	12%	8%
		SOC 80	26%	26%	25%	26%	13%	9%
Fahrstrecke in km		20	40	60	100	200	300	

Erwartungsgemäß nimmt der elektrische Fahranteil mit Strom aus dem Netz (K_{EV}) mit zunehmender Fahrstrecke ab. Eine größere Fahrstrecke ist mit einer höheren durchschnittlichen Geschwindigkeit gekoppelt.

Um nun eine Abhängigkeit zwischen dem elektrischem Fahranteil mit Strom vom Netz (K_{EV}) und der Durchschnittsgeschwindigkeit (Straßenkategorie) zu erhalten, müssen die Verteilungen des Start-SOCs und der Wegstrecken bekannt sein. Während es für die Wegstreckenverteilung für mehrere Länder Statistiken gibt, liegen für die SOC-Verteilung zum Fahrtantritt keine Daten vor. Daher wurde für die SOC-Verteilung eine Annahme getroffen. Die Annahme geht davon aus, dass die Batterie des PHEVs regelmäßig aufgeladen wird und somit der Großteil der Fahrten mit einem hohen Ladezustand der Batterie angetreten wird. Eine zu 80% geladene Batterie für 40% der Fahrtantritte wird angenommen, was in Abbildung 48 gezeigt wird. [17]

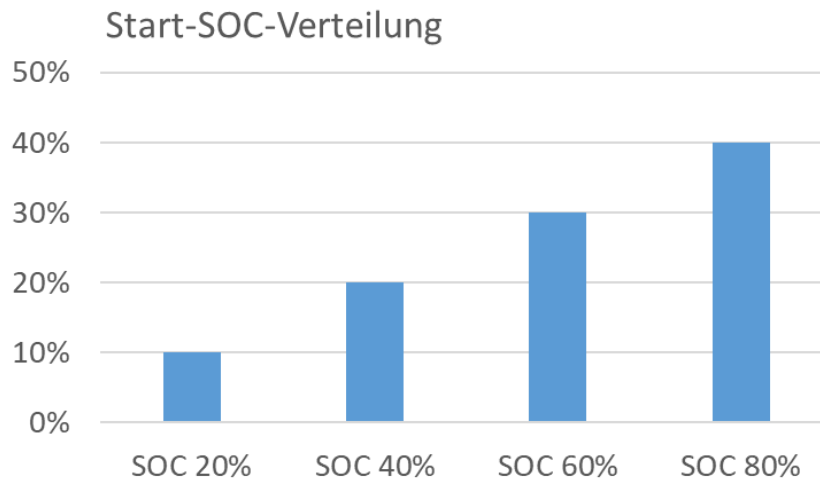


Abbildung 48: SOC-Verteilung (Annahme TU Graz) [17]

Die vorerst angenommene SOC-Verteilung kann zu einem späteren Zeitpunkt, wenn zum Beispiel statistische Daten vorliegen, einfach ersetzt werden.

Die Verteilung der gefahrenen Wegstrecken wurde auf Basis des Datensatzes des DLR, der bereits für die Variante 2 des elektrischen Fahranteils erwähnt wurde, abgeschätzt. Abbildung 49 zeigt die verwendete Wegstreckenverteilung für die Variante 3. Der Großteil der Fahrten wurde als eher kurze Wegstrecke bis zu 40 km angenommen. Wegstrecken größer als 40 km und kleiner als 200 km werden weniger oft zurückgelegt. Für Wegstrecken ab ca. 200 km steigt die Verteilung wieder an, diese repräsentieren z. B. Fahrten in den Urlaub mit dem Auto.

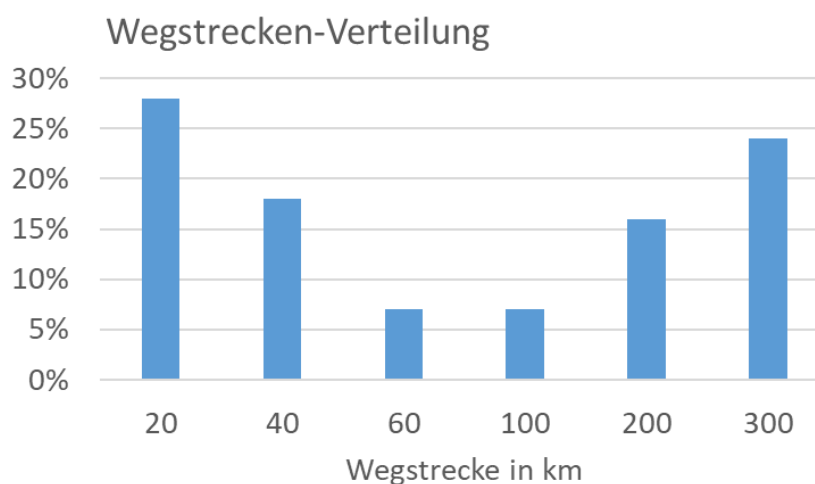


Abbildung 49: Wegstreckenverteilung [17]

Beide Verteilungen (Start-SOC und Wegstrecke) wurden mit der Matrix aus Tabelle 41 multipliziert und damit wurde für Version 3 die Abhängigkeit des K_{EV} -Faktors von der durchschnittlichen Geschwindigkeit im Fahrzyklus gefunden. Diese ist in Abbildung 50 dargestellt.

Für die Berechnung der Emissionsfaktors fürs HBEFA 4.1 wurde der Übergang von innerorts zu außerorts sowie zur Autobahn in zwei lineare Funktionen unterteilt, und es wurden konstante elektrische Fahranteile für Geschwindigkeiten kleiner als 22 km/h und für Geschwindigkeiten über 110 km/h angenommen. In Abbildung 50 sieht man die Funktion des elektrischen Fahranteils

teils über der durchschnittlichen Geschwindigkeit je Fahrzyklus. Fahrzyklen, deren Durchschnittsgeschwindigkeit kleiner als 22 km/h ist, werden mit einem konstanten elektrischen Fahranteil von 72,5% gerechnet. Für Fahrzyklen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit über 110 km/h wird dieser konstant auf 18,7% gesetzt. Bei mittleren Geschwindigkeiten von 22 – 75 km/h und 75 – 110 km/h werden zwei lineare Funktionen zur Berechnung des elektrisch gefahrenen Anteils im Zyklus verwendet.

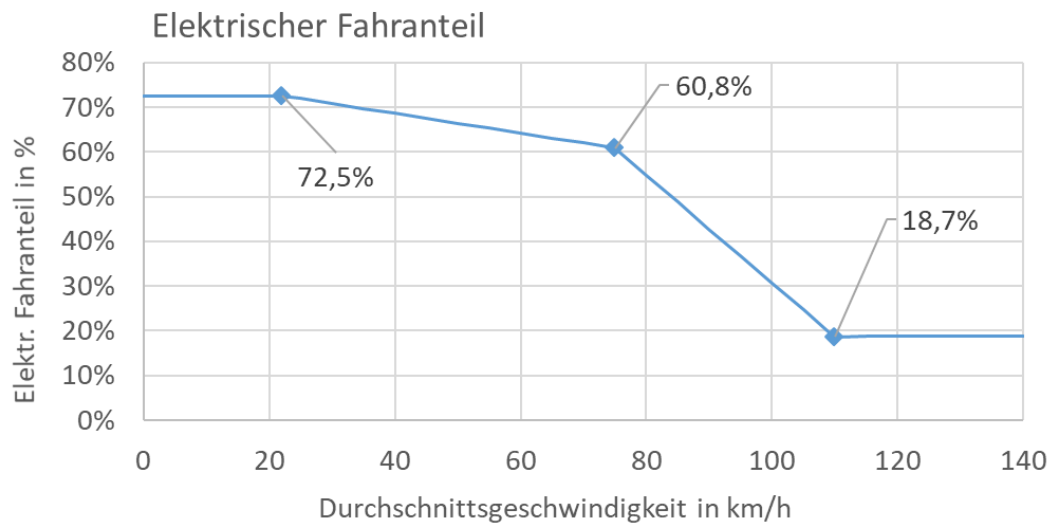


Abbildung 50: K_{EV} -Funktion für HBEFA 4.1

7 Ergebnisse Emissionsfaktoren

Im vorigen Kapitel wurde die Durchführung der Simulation von PHEVs, HEVs und BEVs im Simulationstool PHEM beschrieben. Nun werden die ermittelten Emissionsfaktoren fürs HBEFA 4.1-Update für die genannten Fahrzeugkonzepte gezeigt. Die Buchstaben D und G für die nachfolgend gezeigten Fahrzeugvariantenbezeichnungen stehen für Diesel und Gasoline (Benzin).

7.1 Ergebnisse BEV fürs HBEFA 4.1

Für die Ermittlung der Emissionsfaktoren von Elektrofahrzeugen (BEVs) für das HBEFA 4.1 wurden die im Folgenden beschriebenen BEV-Fahrzeugmodelle erstellt. Um den simulierten elektrischen Verbrauch in kWh/km mittels PHEM in eine CO₂-Emission umrechnen zu können, wird ein Emissionsfaktor für die Stromproduktion benötigt. Die nachfolgend gezeigten Ergebnisse der Simulationen HBEFA 4.1 stellen die simulierten Verbräuche für die Verkehrssituation in Deutschland dar. Für Deutschland wurde für das Jahr 2019 ein CO₂-Wert von 401 g/kWh für die Stromerzeugung nach Statistikdaten verwendet. Abbildung 51 zeigt die Entwicklung der CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2019.

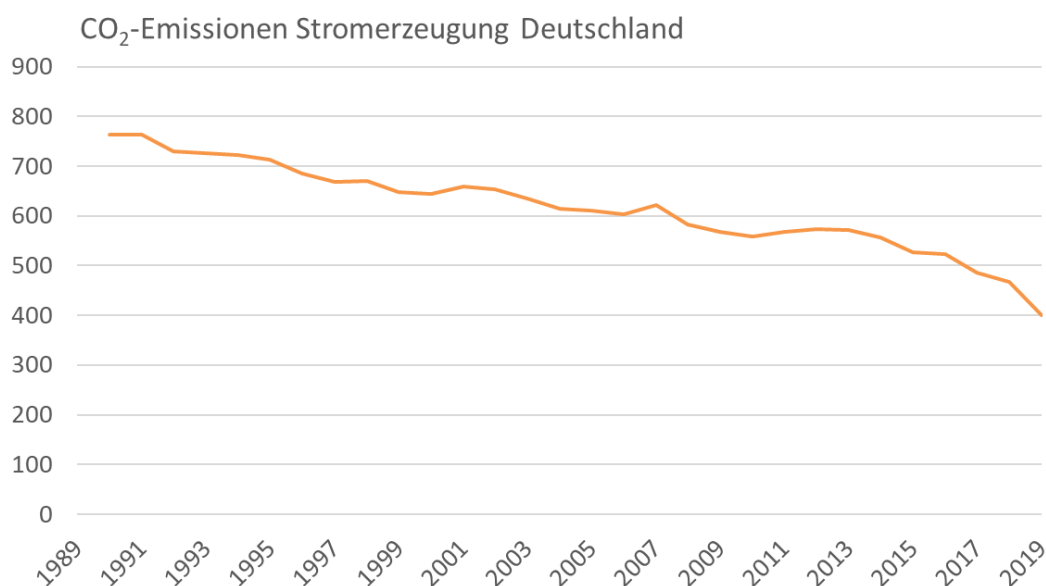


Abbildung 51: Entwicklung der CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2019 [14]

Abbildung 52 zeigt die Entwicklung der spezifischen CO₂-Emissionen ab dem Jahr 1990 bis 2014 für Österreich, Deutschland und die EU im Vergleich. Dabei sind nur Emissionen aus den Kraftwerken berücksichtigt, vorgelagerte Emissionen, z. B. aus Gasförderung und Transport, sind nicht enthalten. Das CO₂-Äquivalent für die Stromerzeugung in Deutschland ist im Vergleich zu Österreich recht hoch, was durch den Einsatz von Kohlekraftwerken für die Stromerzeugung in Deutschland begründet werden kann.

Der Strommix umfasst sowohl fossile und nukleare als auch erneuerbare Energieträger. Der Emissionsfaktor ist Ausdruck für das Verhältnis der Masse eines freigesetzten (emittierten) Stoffes zu der produzierten Energieeinheit. In diesem Zusammenhang bedeutet dies also für das

Jahr 2019, dass eine produzierte Kilowattstunde Strom 401 Gramm Kohlenstoffdioxid verursacht, die ausgestoßen werden.

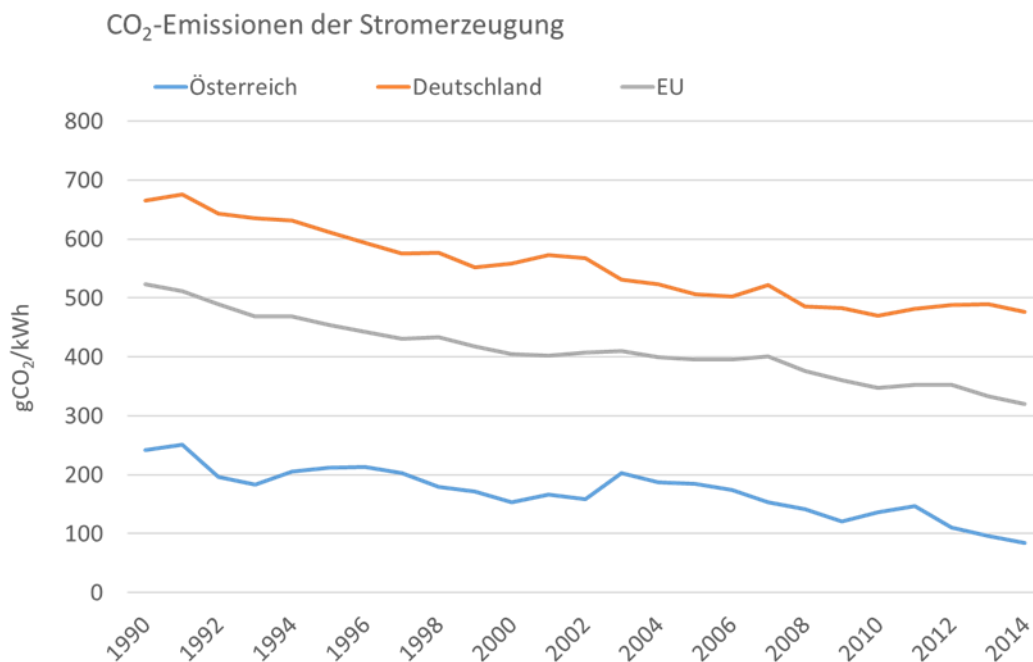


Abbildung 52: Entwicklung der CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung in Österreich, Deutschland und der EU von 1990 bis 2014 [14]

7.1.1 BEV EURO 6b Basisvariante

Ausgehend von einem EURO 6b Benzin-Pkw wurde ein BEV-Fahrzeug für die HBEFA-Simulationen (Update 4.1) abgeleitet. Die Massenabschätzung der einzelnen Komponenten wurde bereits in Kapitel 6.2 in Tabelle 17 erläutert.

Für die Basisvariante des Elektrofahrzeugs für die HBEFA 4.1-Simulationen wurden in einem ersten Schritt die Fahrwiderstandsbeiwerte des konventionellen Benzinfahrzeugs (EURO 6b Pkw G, HBEFA4.1) übernommen. Diese Werte sind für ein Elektrofahrzeug nicht unbedingt repräsentativ, aus heutiger Sicht, da diese Werte z. B. das Fahren mit Anhänger und Urlaubsreisen mit höherer Beladung beinhalten, wofür Elektrofahrzeuge derzeit aber eher weniger eingesetzt werden. Wenn BEVs in Zukunft höhere Flottenanteile und Reichweiten haben sollten, wäre es aber naheliegend, dass sich zumindest gleiche Nutzungsmuster ergeben wie bei konventionellen Benzin-Pkw heute. Diesel-Pkw haben gegenüber Otto-Pkw im Mittel vermutlich noch höhere Beladungen, da sie in höhere Anteile in größeren Pkw und bei Langstreckenfahrten haben.

Tabelle 42 zeigt die Fahrzeugspezifikationen der Basisvariante des BEVs fürs HBEFA 4.1

Tabelle 42: Fahrzeugdaten BEV EURO 6b für HBEFA 4.1

Parameter	Einheit	Größe
Fahrzeugmasse	[kg]	1562
Beladung	[kg]	159
Gesamtleistung	[kW]	99
Elektrische Leistung	[kW]	99
Elektromotor Drehmoment	[Nm]	300
Batteriekapazität	[kWh]	45
Elektrische Reichweite	[km]	300

Das Ergebnis der BEV-Simulation mit PHEM ist ein spezifischer Energieverbrauch in kWh/km. Für die zugehörigen CO₂-Emissionen in g/km wird der simulierte Energieverbrauch mit einem CO₂-Wert für die Stromerzeugung multipliziert und man erhält das WTW-CO₂, welches bereits in Kapitel 6 beschrieben wurde. Im HBEFA 4.1 kann das jeweilige Land, für das man die Emissionswerte berechnen möchte, ausgewählt werden, wodurch der jeweilige länderspezifische CO₂-Umrechnungsfaktor herangezogen wird. Für die durchschnittliche Verkehrssituation in Deutschland beträgt das WTW-CO₂ des simulierten BEVs etwa 99 g/km mit dem Deutschland-Kraftwerksmix für die Umrechnung. Für HBEFA-Fahrzyklen mit einer Steigung von 0% ist der simulierte elektrische Verbrauch in kWh/km über der Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzyklen in Abbildung 53 gezeigt.

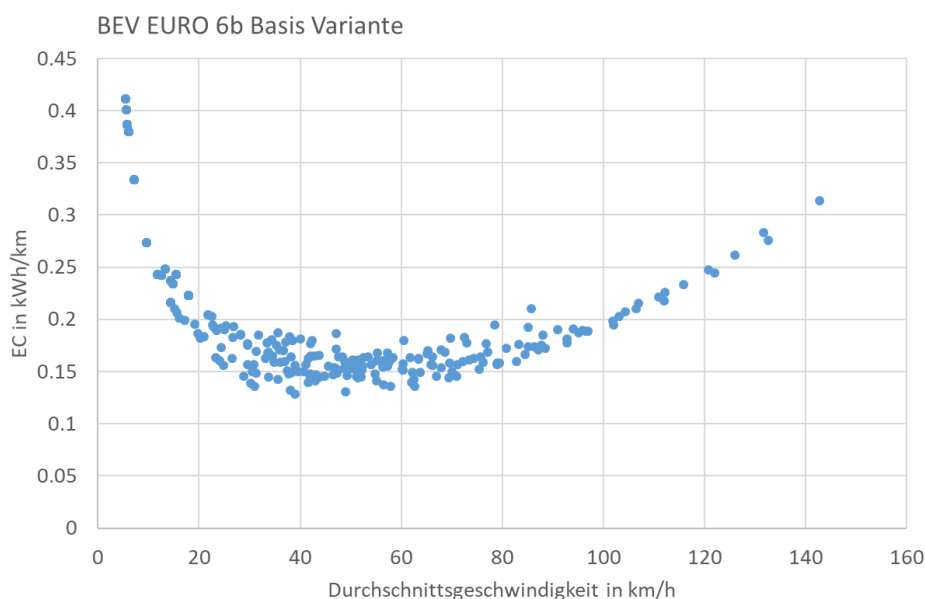


Abbildung 53: EC BEV EURO 6b Basisvariante für HBEFA-Zyklen (Verkehrssituation Deutschland) mit 0% Steigung

Da die BEVs vom durchschnittlichen EURO 6b Benzin-Pkw abgeleitet wurden, indem die Massen für Antriebsstrang und Energiespeicher geändert wurden, wird der zusätzliche Fahrwiderstand für Seitenwind, Dachboxen, Winterreifen usw., der bei den konventionellen Fahrzeugen hinzukommt, wie zuvor schon beschrieben, beim BEV miteingerechnet. Damit lässt sich der recht hohe elektrische Energieverbrauch für die HBEFA-Simulation begründen. Bislang werden BEVs vermutlich eher für Pendlerzwecke eingesetzt und eher für Zwecke, wo der Energieverbrauch je Kilometer gering ist. Zudem führt die Sorge um die elektrische Reichweite eventuell zu einer im Mittel ökonomischeren Fahrweise. Sobald diese Fahrzeuge mehr Anteil an der gesamten Laufleistung haben, erscheint die Annahme, dass auch BEVs wie konventionelle Fahrzeuge eingesetzt werden, sinnvoll. Um aktuell am Markt befindliche Elektrofahrzeuge hinsichtlich ihrer CO₂-Emissionen zu beurteilen, wurde ein BEV 2019 Simulationsmodell erstellt, mit dem dieselben HBEFA-Zyklen simuliert wurden. Nachfolgendes Kapitel beschreibt die Vorgehensweise dafür.

7.1.2 BEV EURO 6b HBEFA 4.1 Variante (BEV 2019)

Weggehend von der Betrachtung eines konventionell betriebenen Benzinfahrzeugs als Basis für die Ableitung des Elektrofahrzeugs wurde ein BEV generiert, dessen Fahrzeugspezifikationen den derzeit am Markt befindlichen Elektrofahrzeugen entsprechen, was eine realistische Abschätzung hinsichtlich des elektrischen Verbrauchs zulässt. Die Aufzeichnungen laut Spritmonitor.de (Beschreibung in Kapitel 4.2.2) über die Verbräuche von im Betrieb befindlichen Fahrzeugen zeigen einen mittleren elektrischen Verbrauch von ca. 200 Wh/km für derzeitige Elektrofahrzeuge.

Folgende Annahmen für das BEV 2019 wurden getroffen.

- Basismasse des EURO 6b Benzinfahrzeugs wurde mit dem Faktor 1,05 skaliert
- Fahrwiderstandskoeffizienten wurden über das Reifenlabel bestimmt (Annahme, dass BEVs mit Reifen des Reifenlabels A betrieben werden, also einen geringen Rollwiderstand aufweisen)
- Verringerter Luftwiderstand durch geringeren Strömungswiderstandskoeffizienten des BEVs aufgrund von anderer Ausführung der Karosserie im Vergleich zum konventionellem Benzinfahrzeug

Tabelle 43 zeigt die Fahrzeugdaten des BEV 2019. Die Fahrzeugmasse ist im Vergleich zur BEV EURO 6b Basisvariante, wie sie fürs HBEFA 4.1 verwendet wurde, um etwa 60 kg geringer.

Tabelle 43: Fahrzeugdaten BEV 2019

Parameter	Einheit	Größe
Fahrzeugmasse	[kg]	1503
Beladung	[kg]	159
Gesamtleistung	[kW]	99
Elektromotor-Drehmoment	[Nm]	300
Batteriekapazität	[kWh]	45
Elektrische Reichweite	[km]	300

Neben der geringeren Fahrzeugmasse ergaben sich durch die Ermittlung der Fahrwiderstandskoeffizienten über das Reifenlabel A auch geringere Fahrwiderstände für das BEV 2019. Mit beiden Fahrzeugsettings (BEV EURO 6b Basisvariante und BEV 2019) wurden NEDC, WLTC und ein RWC simuliert. Der RWC entspricht dem bereits beschriebenen Real World Cycle abgeleitet aus der Standard-RDE-Route (Ries) der TU Graz. Abbildung 54 zeigt den Vergleich des simulierten elektrischen Verbrauchs beider Fahrzeuge in den drei Zyklen mit PHEM.

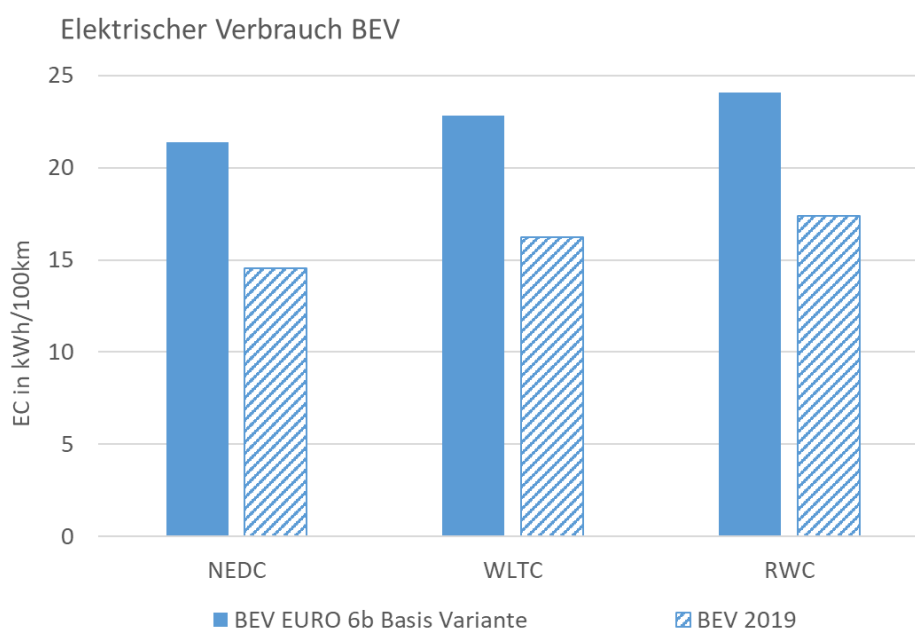


Abbildung 54: Vergleich elektrischer Verbrauch von BEV EURO 6b Basis Variante und BEV 2019

Durch die geringere Fahrzeugmasse und die geringeren Fahrwiderstände ist der elektrische Verbrauch des BEVs 2019 in allen drei simulierten Zyklen um ca. 30% geringer als jener der BEV EURO 6b Basis Variante. Mit etwa 15% Ladewirkungsgrad ergibt sich im RWC ein Verbrauch von ca. 200 Wh/km, was den in Spritmonitor.de gesammelten Realverbräuchen der BEVs entspricht.

Auch die HBEFA-Zyklen für die Verkehrssituation in Deutschland wurden mit den BEV 2019 Konfigurationen in PHEM simuliert. Abbildung 55 zeigt den simulierten elektrischen Verbrauch in kWh/km für das BEV 2019 in den HBEFA-Zyklen für die Verkehrssituation in Deutschland.

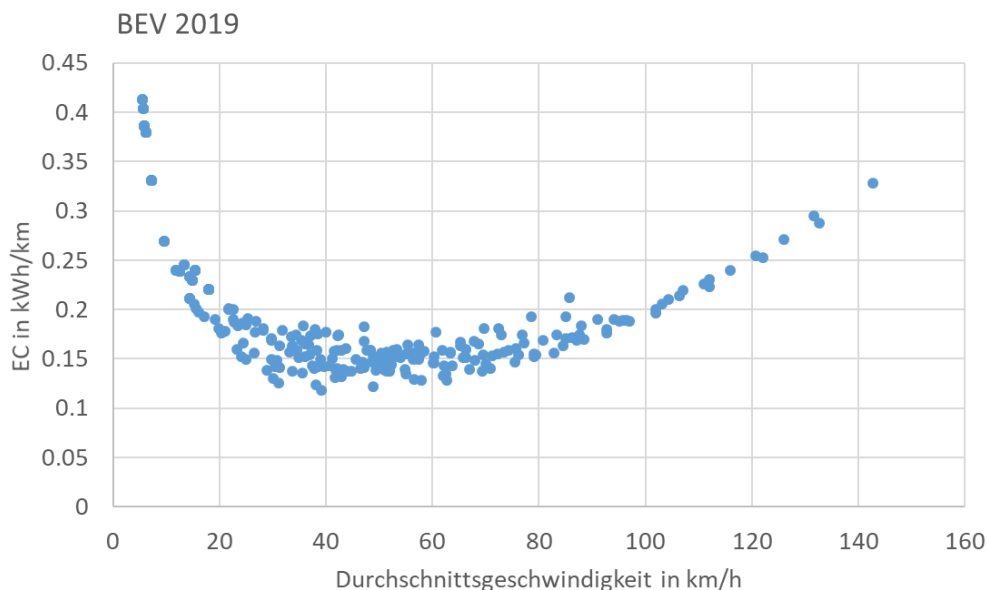


Abbildung 55 EC BEV 2019 für HBEFA-Zyklen (Verkehrssituation Deutschland) mit 0% Steigung

Das WTW CO₂ des BEV 2019 für den Deutschland-Mix beträgt in etwa 81 g/km und ist somit um etwa 20% geringer als jenes der BEV EURO 6b Basis Variante. Die beiden nachfolgenden Tabellen (Tabelle 44 und Tabelle 45) fassen die simulierten Ergebnisse von Verbrauch und CO₂-Emissionen der beiden BEV-Varianten für den RWC und für den HBEFA 4.1 Deutschland-Mix zusammen.

Tabelle 44: Simulierter elektrischer Verbrauch in Wh/100km für BEVs EURO 6b und BEV 2019

EC in kWh/100 km	RWC	HBEFA 4.1 Deutschland-Mix
BEV EURO 6b	24,09	24,70
BEV 2019	17,37	20,21

Tabelle 45: Simuliertes CO₂ für BEVs EURO 6b und BEV 2019

CO ₂ in g/km	RWC	HBEFA 4.1 Deutschland-Mix
BEV EURO 6b	71,30	99,03
BEV 2019	51,42	81,05

7.2 Ergebnisse PHEV fürs HBEFA 4.1

Bei den PHEV-Simulationen fürs HBEFA 4.1 bildeten ebenfalls die konventionell betriebenen Fahrzeuge die Datengrundlage für die Simulationsmodelle in PHEM. In Kapitel 5.2 in Abbildung 22 sieht man mitunter den Aufbau eines PHEVs mit seinen zusätzlichen Komponenten für den elektrischen Antriebsstrang im Fahrzeug. Die Massenabschätzungen wurden je Segment für die Emissionsklassen EURO 4, 5, 6b, und EURO 6d Diesel und Benzin gemacht. Dabei wurden, ähnlich wie beim BEV, die Massen für die zusätzlichen elektrischen Komponenten addiert und Parameter, wie z. B. ein geringeres Tankvolumen, subtrahiert. Die genauere Beschreibung zur Massen- und Parameter-Abschätzung erfolgte in Kapitel 6.2. Die elektrischen Reichweiten der PHEVs je Segment wurden so gewählt, dass die Mittelwerte der elektrischen Reichweiten von repräsentativen ausgeführten PHEVs erreicht werden.

Tabelle 46 fasst die Eingabedaten der Plug-in-Hybridfahrzeuge für die HBEFA 4.1 Simulationen in PHEM zusammen.

Tabelle 46: Fahrzeugdaten PHEVs für HBEFA-Simulation

Parameter	Einheit	PHEV EU4 D	PHEV EU4 G	PHEV EU5 D	PHEV EU5 G	PHEV EU6b D	PHEV EU6b G	PHEV EU6d D	PHEV EU6d G
Fahrzeugmasse	[kg]	1792	1431	1849	1453	1885	1483	1907	1502
Systemleistung	[kW]	84	103	112	89	121	99	127	106
VKM-Leistung	[kW]	80	65	87	69	94	77	98	82
E-Motorleistung	[kW]	69	56	75	59	80	66	84	71
Batteriekapazität	[kWh]	9							
El. RW ¹	[km]	26	32	25	32	25	31	24	30

¹...Elektrische Reichweite im Deutschland-Mix HBEFA 4.1

Die Fahrwiderstandsbeiwerte wurden von den konventionellen Fahrzeugen der jeweiligen Emissionsklasse übernommen.

Abbildung 56 zeigt die gewichteten CO₂-Emissionen der PHEVs im Deutschland-Mix. Das CO₂ der Diesel-PHEVs liegt dabei über jenem der Benzin-PHEVs. Begründbar ist dies durch die höhere Fahrzeugmasse der Diesel-PHEVs im Vergleich zu den Benzin-PHEVs. Die Dieselvarianten der PHEVs im HBEFA 4.1 stellen SUVs (Sport Utility Vehicles) oder Vans dar, deren Fahrzeugmasse hoch ist.

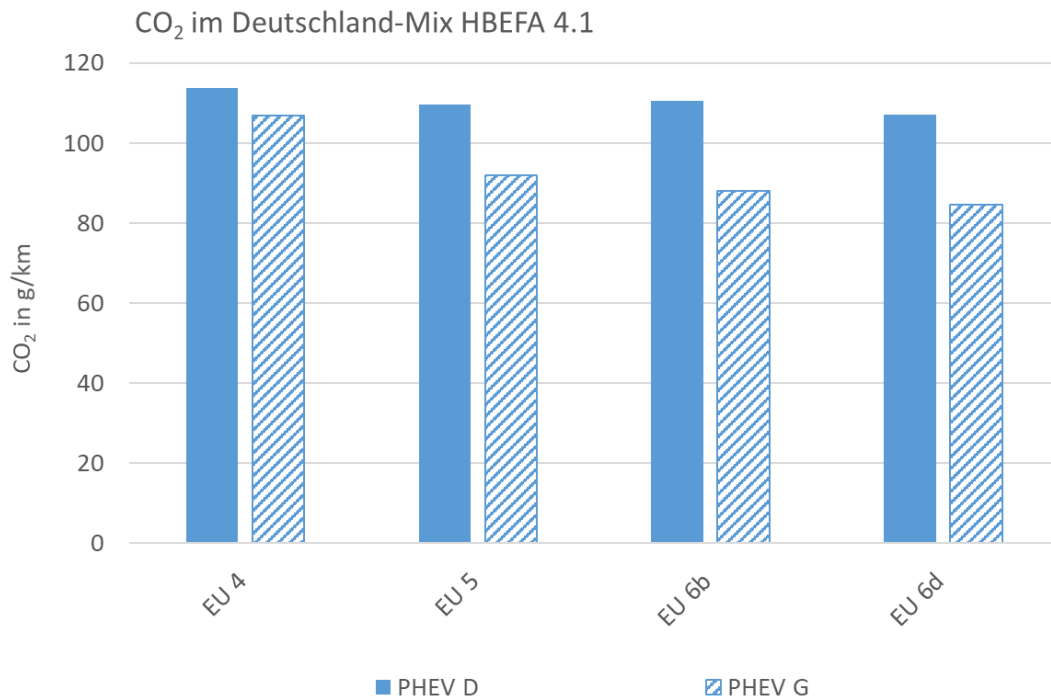
Abbildung 56: CO₂ TTW im Deutschland-Mix HBEFA 4.1

Tabelle 47 fasst die simulierten CO₂-Emissionen für TTW und WTW sowie den Verbrauch in l/100 km für die durchschnittlichen Plug-in-Hybridfahrzeuge des HBEFAs 4.1 zusammen. Für Benzin und Diesel wurde wiederum ein Aufschlag von 22% angesetzt, um die vorgelagerten Emissionen für die Produktion der Kraftstoffe zu berücksichtigen.

Tabelle 47: Ergebnisse PHEV-Simulation fürs HBEFA 4.1

PHEV HBEFA 4.1	CO ₂ TTW	CO ₂ WTW	Verbrauch
Deutschland-Mix	[g/km]	[g/km]	[l/100 km]
EURO 4 D	113,82	176,11	4,35
EURO 5 D	109,55	173,74	4,19
EURO 6b D	110,48	175,05	4,22
EURO 6d D	107,04	172,30	4,09
EURO 4 G	106,80	169,88	4,62
EURO 5 G	91,88	151,23	3,97
EURO 6b G	88,07	148,71	3,81
EURO 6d G	84,64	145,24	3,66

Betrachtet man den elektrischen Verbrauch der PHEVs für die Verkehrssituation in Deutschland, dann ergibt sich das in Abbildung 57 dargestellte Bild. In der Simulation wurde eine voll aufgeladene Batterie dafür vorgegeben.

Zur Veranschaulichung, wo im Vergleich die elektrischen Verbräuche der BEVs liegen, wurden die Verbräuche der BEV EURO 6b Basisvariante und des BEVs 2019 ebenfalls eingezeichnet. Da die Basis für die beiden BEVs das durchschnittliche EURO 6b Benzinfahrzeug im HBEFA 4.1 war, wurden die beiden Balken dort angeordnet.

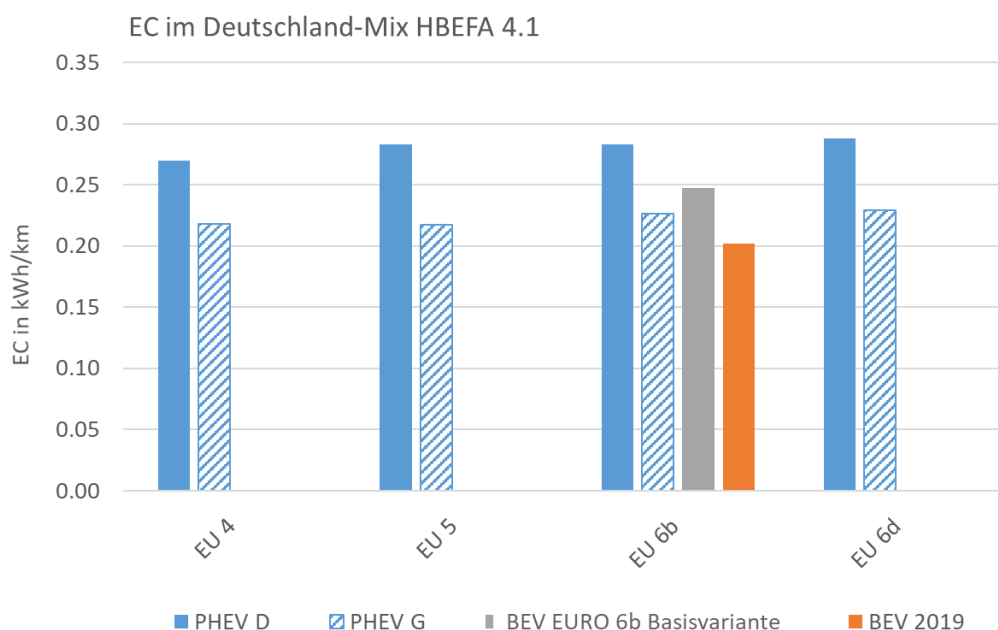


Abbildung 57: Elektrischer Verbrauch PEHVs und BEVs im Deutschland-Mix HBEFA 4.1

Tabelle 48 zeigt die simulierten elektrischen Verbräuche in kWh/100 km für die PHEVs und die beiden BEVs.

Tabelle 48: Elektrischer Verbrauch PHEV und BEV im Deutschland-Mix HBEFA 4.1

HBEFA 4.1 Deutschland-Mix	EC in kWh/100km
PHEV EURO 4 D	26,94
PHEV EURO 5 D	28,26
PHEV EURO 6b D	28,28
PHEV EURO 6d D	28,76
PHEV EURO 4 G	21,82
PHEV EURO 5 G	21,71
PHEV EURO 6b G	22,61

PHEV EURO 6d G	22,90
BEV EURO 6b Basis Variante	24,70
BEV 2019	20,21

7.3 Ergebnisse HEV fürs HBEFA 4.1

Für das HBEFA 4.1 wurden, gleich wie bei den PHEVs, ausgehend von den konventionellen Durchschnittsfahrzeugen je Emissionsklasse HEV-Fahrzeugmodelle für die PHEM-Simulation erstellt und die CO₂-Emissionen simuliert. Anders als für die PHEVs werden im HBEFA die HEVs aber nicht als gesonderte Fahrzeuge betrachtet, sondern ab der Emissionsstufe EURO 6d Temp gibt es einen HEV-Flottenanteil, durch den die CO₂-Emissionen der gesamten Flotte gesenkt werden. Tabelle 49 zeigt die Anteile der Hybridfahrzeuge, wie sie im HBEFA 4.1 für die gesamte Fahrzeugflotte berücksichtigt werden.

Tabelle 49: HEV-Flotten-Anteile im HBEFA 4.1

HBEFA 4.1 Flottenanteil HEVs		
Emissions-Klasse	Diesel	Benzin
EURO 6d Temp	4%	7%
EURO 6d	11%	22%
Nach EURO 6d	22%	45%

Der Anteil an Diesel-Hybridfahrzeugen wird geringer geschätzt als jener der Benzin-Hybridfahrzeuge, was auf die hohen Kosten eines Diesel-Hybridantriebs zurückgeführt wird, welcher an real ausgeführten Fahrzeug-Beispielen ersichtlich ist. Abbildung 58 zeigt den Anteil von Diesel- und Benzin-Hybridfahrzeugen an den Neuzulassungen in Österreich für Jänner 2019 bis November 2019. In dieser Grafik sind auch Plug-in-Hybridfahrzeuge in der Gesamtanzahl enthalten. Es lässt sich erkennen, dass deutlich mehr Benzin-Hybridfahrzeuge als Diesel-Hybridfahrzeuge zugelassen werden. Auch bei den Plug-in-Hybridfahrzeugen ist der Anteil der Benzin-PHEVs weit höher als jener der Diesel-PHEVs.

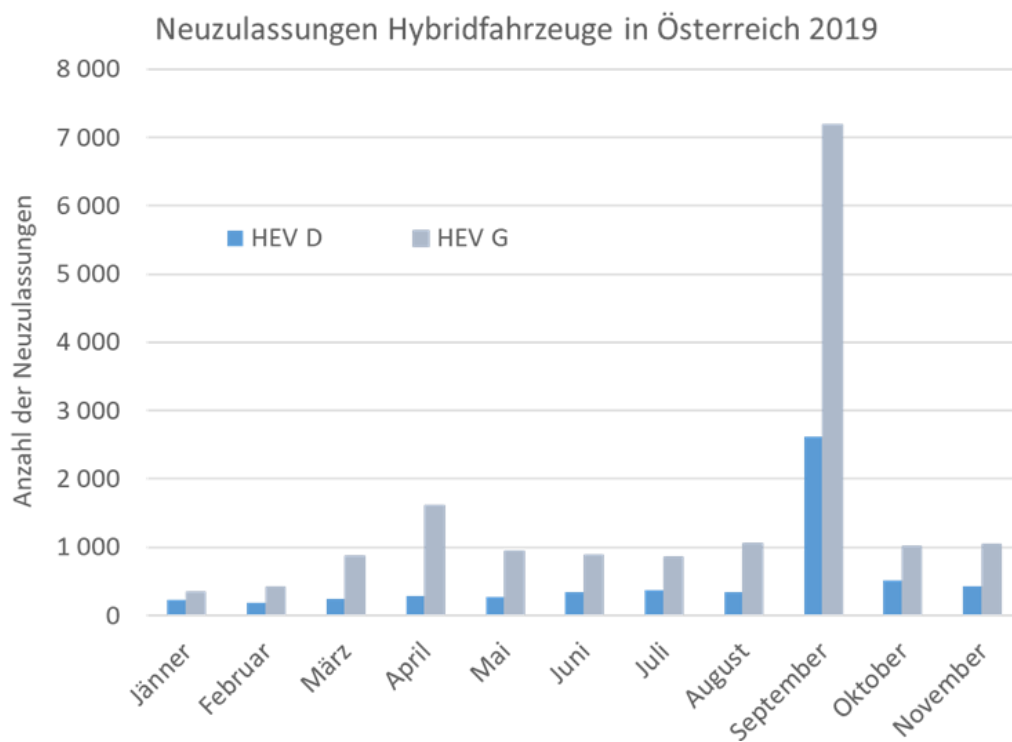


Abbildung 58: Neuzulassungen Hybridfahrzeuge in Österreich 2019 [12]

Das simulierte CO₂ der HEVs für den Deutschland-Verkehrssituationsmix (HBEFA 4.1) ist in Abbildung 59 für die Emissionsklassen EURO 6d Temp und EURO 6d dargestellt.

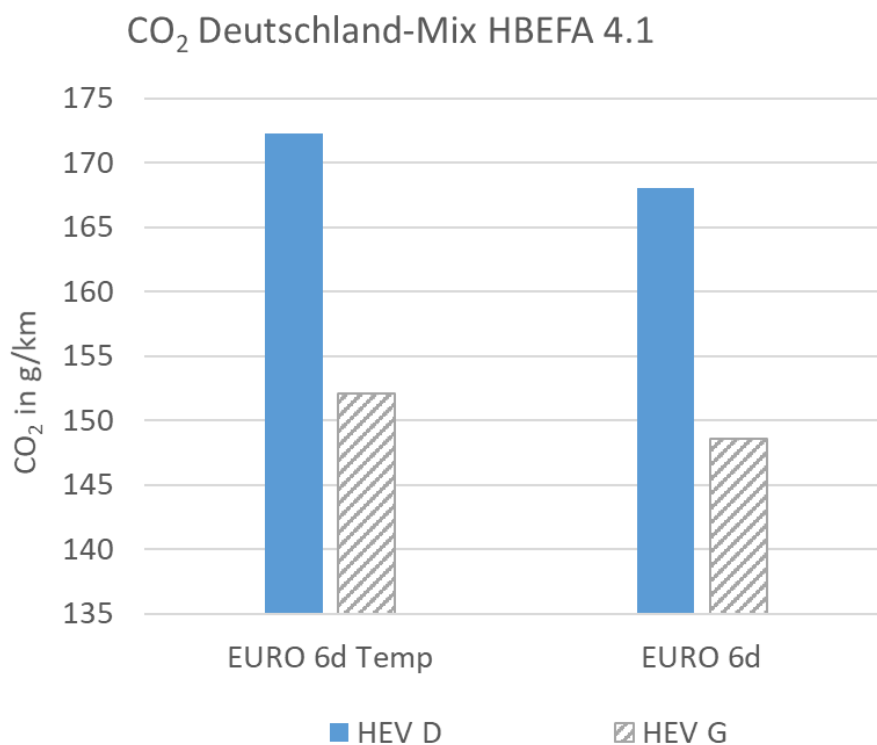


Abbildung 59: CO₂ im HBEFA 4.1 Verkehrssituationsmix von Deutschland für HEVs EURO 6d Temp und EURO 6d D und G

In Tabelle 50 sind die simulierten Größen für CO₂ und Verbrauch der Hybridfahrzeuge für den HBEFA 4.1 Deutschland-Mix nochmals zusammengefasst.

Tabelle 50: Simulierte Ergebnisse HEVs im HBEFA 4.1 Deutschland-Mix

HBEFA 4.1 Deutschland-Mix	Einheit	EURO 6d Temp		EURO 6d	
		D	G	D	G
CO ₂	[g/km]	172,30	152,10	167,99	148,55
Verbrauch	[g/km]	55,05	49,06	53,67	47,92
Verbrauch	[l/100km]	6,58	6,58	6,42	6,43

8 Ergänzende Untersuchungen von Verbrauch und NO_x-Emissionen von PHEV- und HEV-Diesel-Pkw

Für das HBEFA 4.1 wurden die CO₂-Emissionen für PHEV- und HEV-Fahrzeuge in PHEM simuliert, wie bereits in Kapitel 6 beschrieben. Die restlichen Schadstoffkomponenten für den VKM- und HEV-Betrieb wurden von den konventionellen Antriebskonzepten übernommen. Die Emissionsfaktoren der PHEVs wurden unter Berücksichtigung des jeweiligen elektrischen Fahranteils je simulierten Fahrzyklus bestimmt.

Es wurde also die Vereinfachung getroffen, dass das Emissionsverhalten, bis auf den Verbrauch, zwischen konventionellem Antriebsstrang und PHEV- und HEV-Antrieben im „Charge Sustaining Mode“ (Ladungserhaltungsmodus der Batterie) ident ist. Diese Vereinfachung musste getroffen werden, da die Anzahl an gemessenen HEVs und PHEVs je EURO-Klasse und Antriebsart viel zu gering war, um damit für die EU-Flotte repräsentative Emissionsfaktoren zu simulieren.

Die hier angestellten ergänzenden Untersuchungen dienen als Machbarkeitsanalyse, um die Schadstoffemissionen von HEVs und PHEVs in einem nächsten Update des Handbuchs aus gemittelten Motor-Emissionskennfeldern und der generischen Betriebsstrategie zu berechnen.

Da die Emissionen bei unterschiedlichen Lastpunkten der VKM zu unterschiedlichem Emissionsverhalten beim selben Emissionskennfeld führen, können die Ergebnisse bei gleicher abgegebener Zyklusarbeit je nach Hybridstrategie sehr unterschiedlich ausfallen. Damit kann eine generische Betriebsstrategie zu Artefakten in den Emissionsfaktoren führen. Verglichen werden im Weiteren die Antriebskonzepte konventioneller Diesel-, PHEV- und HEV-Pkw der Abgasnormen EURO 6b, 6d und 6d Temp. Zusätzlich werden noch drei Varianten zur Berücksichtigung der elektrischen Reichweite verglichen.

8.1 Gewichtung PHEV- und HEV-Emissionen für WLTC und RWC

Im Gegensatz zu einem konventionell betriebenen Fahrzeug gibt es für PHEV- und HEV-Fahrzeuge eine größere Variabilität hinsichtlich der Fahrzeugeinstellungen bei Fahrtantritt. Der Ladezustand der Batterie hat erheblichen Einfluss auf die Fahrzeugemissionen, da bei voller Batterie der elektrische Fahranteil im Fahrzyklus höher sein kann und somit die Emissionen sinken. Beim PHEV ist der Ladezustand der Batterie bekannt bzw. kann dieser durch externes Aufladen der Batterie vom Anwender bestimmt werden. Beim HEV kann man von außen die Batterieladung nicht beeinflussen und deren Ladestatus bei Fahrtantritt ist jener, der sich aus vorherig gefahrenen Fahrsituationen durch die interne Regelung des Fahrzeugs ergibt. Um dennoch die Emissionen der drei Antriebskonzepte (D, PHEV und HEV) korrekt vergleichen zu können, gibt es für den WLTC eine gesetzlich geregelte Prozedur zur Ermittlung der Emissionsergebnisse für PHEV und HEV, die nachfolgend beschrieben wird.

8.1.1 PHEV- und HEV-Emissionsergebnisse WLTC und RWC

Für die Ermittlung der WLTC-Emissionsergebnisse für PHEVs gibt es vom Gesetzgeber einzuhaltende Vorgaben zur Messung und anschließenden Berechnung, welche nun genauer beschrieben werden.

Die WLTC-Prüfung eines PHEVs erfolgt einmal im Modus der Ladungserhaltung der Batterie, also bei einem Δ SOC von ca. null über den gesamten WLTC gesehen, und einmal bei Entladung. Bei Ladungserhaltung wird das Fahrzeug zu einem großen Teil vom VKM betrieben, während bei Entladung die Batteriekapazität voll genutzt wird und so viel wie möglich elektrisch gefahren wird. Die Prüfung des WLTCs bei Entladung wird so soft hintereinander gemacht, bis ein sogenanntes Abbruchkriterium erreicht wird. Der WLTC vor dem Erreichen

des Abbruchkriteriums wird als Übergangszyklus bezeichnet, während jener, in dem das Abbruchkriterium erreicht wird, Bestätigungszyklus heißt. Die Formel 8-1 zeigt die Definition des Abbruchkriteriums. Die Anzahl der gemessenen WLTCs inklusive des Bestätigungszyklus ist n . Es werden somit $n + 1$ WLTCs durchfahren. [1]

8-1

$$REEC_i = \frac{|\Delta E_{REESS,i}|}{E_{cycle}} < 0,04$$

mit:

- $REEC_i...$ relative Veränderung der elektrischen Energie im Prüfzyklus i dimensionslos
 $\Delta E_{REESS,i}...$ Veränderung der elektrischen Energie aller wiederaufladbaren Energiespeicher im Prüfzyklus i in Wh
 $E_{cycle}...$ Zyklusenergiebedarf des anzuwendenden WLTCs in Wh

Die gewichteten PHEV-Emissionen im WLTC werden mittels sogenannter Utility Faktoren (UF) berechnet. Utility Faktoren sind Nutzfaktoren, welche auf Basis von Fahrstatistiken ermittelt wurden und den Zweck haben, die erreichten elektrischen Reichweiten bei Ladungserhaltung und bei Entladung zu berücksichtigen. Je Phase des WLTCs wird ein Nutzfaktor berechnet. Die Nummerierung der Phasen wird fortlaufend gemacht. Formel 8-2 gibt den Zusammenhang für die Berechnung des Nutzfaktors je Phase an.

8-2

$$UF_i = 1 - \exp \left[- \left(\sum_{j=1}^k C_j * \left(\frac{d_i}{d_n} \right)^j \right) \right] - \sum_{l=1}^{i-1} UF_l$$

mit:

- $UF_i...$ Nutzfaktor der Phase i dimensionslos
 $d_i...$ gefahrene Strecke bis zum Ende der Phase i in km
 $C_j...$ j -ter Koeffizient dimensionslos
 $d_n...$ normalisierte Strecke in km
 $k...$ Anzahl der Terme und Koeffizienten im Exponenten dimensionslos
 $i...$ Nummer der betrachteten Phase dimensionslos
 $\sum_{l=1}^{i-1} UF_l ...$ Summe der errechneten Nutzfaktoren bis zur Phase $i - 1$

Die Zahlenwerte für C_j , d_n und k sind im Anhang (Tabelle 81) aufgelistet.[1]

Mithilfe der so ermittelten Nutzfaktoren ergeben sich dann die nutzfaktorengewichteten Emissionsmassen der gasförmigen Verbindungen. Die Formel 8-3 zeigt den dafür angewandten Zusammenhang für die Berechnung der WLTC-Emissionsergebnisse für PHEVs. Für diese Berechnung werden nun die Nutzfaktoren aller Phasen bis zum Ende des Übergangszyklus berücksichtigt, wodurch die elektrische Reichweite des PHEVs einfließt.

8-3

$$M_{i,weighted} = \sum_{j=1}^k (UF_j * M_{i,CD,j}) + \left(1 - \sum_{j=1}^k UF_j\right) * M_{i,CS}$$

mit:

$M_{i,weighted}...$	nutzfaktorgewichtete Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung i in g/km
$M_{i,CD,j}...$	Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung der Phase j bei Entladung in g/km
$M_{i,CS}...$	Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung i bei Ladungserhaltung in g/km
$UF_j...$	Nutzfaktor der Phase j dimensionslos
$i...$	die Kennzahl der betrachteten gasförmigen Verbindung dimensionslos
$j...$	Kennziffer der betrachteten Phase dimensionslos
$k...$	Zahl der bis zum Ende des Übergangszyklus gefahrenen Phasen dimensionslos

In den nachfolgend gezeigten Diagrammen werden die mittels Nutzfaktoren gewichteten Emissionsergebnisse für den WLTC mit dem Zusatz UF bezeichnet. Beim HEV-Fahrzeug werden Verbrauch und Emissionen im WLTC und RWC bei SOC-Korrektur (also $\Delta SOC=0$ über den Fahrzyklus) angegeben.

Für das HBEFA wurden die elektrischen Fahranteile zur Gewichtung von Fahren im Ladungserhaltungs- und im Entladungsmodus bei PHEVs ja gemäß der bereits in Kapitel 6.6.3 beschriebenen Funktion abhängig von der durchschnittlichen Geschwindigkeit im Fahrzyklus angewandt. Die Ergebnisse dazu werden in den nachfolgend gezeigten Diagrammen mit der Bezeichnung „HBEFA“ gekennzeichnet. Ebenso wurde ein Drittel-Mix für den elektrischen Fahranteil aus den drei Punkten der Funktion zur Bestimmung der RWC-Emissionsergebnisse für PHEVs angewandt (siehe Kapitel 6.6.3), welche mit der Bezeichnung „1/3 Mix“ in den Diagrammen versehen wurde. Die Idee der 1/3 Gewichtung entstand aus dem Grund, dass laut RDE-Gesetzgebung die streckenmäßige Verteilung einer RDE-Fahrt so gestaltet werden muss, dass je Straßenkategorie (Stadt, Überland und Autobahn) ein Drittel gefahren wird. Zudem ist auch der Streckenanteil von Stadt, Überland und Autobahn im realen Fahrmix knapp 1/3 Mix. Für die Gewichtung nach HBEFA ergibt sich im WLTC ein elektrischer Fahranteil von 67%. Für den Drittel-Mix liegt dieser bei 51%.

Eine sehr aktuelle Studie von ICCT in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut, die der Untersuchung des realen elektrischen Fahranteils von PHEV diene, zeigt, dass der reale elektrische Fahranteil von PHEV im Mittel nur halb so groß ist, wie jener im NEDC bezogen auf Deutschland. Ähnliche Abweichungen ergeben sich für den WLTC. Laut dieser Studie liegt der reale elektrische Fahranteil von Privatfahrzeugen im Mittel bei 37%. Der mittlere elektrische Fahranteil im NEDC wird mit 69% angegeben. [24]

8.2 Fahrzeugdaten PHEV, HEV und Diesel-Pkw für ergänzende Untersuchungen

Da vor allem die Stickoxid-Emissionen bei Dieselfahrzeugen von besonderem Interesse sind, wurden die ergänzenden Analysen zum Emissionsverhalten von verschiedenen Pkw-Antriebskonzepten für Dieselantriebe durchgeführt. Die Bezeichnung „D“ steht dabei für das Dieselfahrzeug mit konventionellem Antrieb, also nur mittels VKM. Tabelle 51 zeigt eine Übersicht der Fahrzeugdaten, die für den Vergleich herangezogen wurden. Diese Fahrzeuge stellen die durchschnittlichen Fahrzeuge je Kategorie und Abgasemissionsklasse dar, wie sie auch für das HBEFA 4.1-Update verwendet wurden. Die angegebene Systemleistung für die PHEV- und HEV-Fahrzeuge entspricht nicht der Summe aus VKM- und E-Motor-Leistung, da beide Kraftquellen unterschiedliche Leistungskurven (Leistung über Drehzahl) aufweisen und somit nicht zwingend ihr Leistungsmaximum bei derselben Drehzahl erreichen. Im Falle des Elektromotors kann die Maximalleistung auch durch die Traktionsbatterie begrenzt werden und dieser kann somit nicht seine Nominalleistung aufbringen.

Tabelle 51: Fahrzeugdaten PHEV, HEV und Diesel-Pkw für Vergleich

		EU 6b			EU 6d			EU 6d Temp		
Parameter	Einheit	D	PHEV	HEV	D	PHEV	HEV	D	PHEV	HEV
Fahrzeugmasse	[kg]	1628	1885	1731	1647	1907	1746	1640	1900	1738
Systemleistung	[kW]	121			127			124		
VKM-Leistung	[kW]	121	94	94	127	98	98	124	97	97
E-Motorleistung	[kW]	-	84	34	-	84	35	-	83	35
Batteriekapazität	[kWh]	-	9,9	1,5	-	9,9	1,5	-	9,9	1,5

Die Fahrzeugmasse je Antriebskonzept ist aufgrund der Kapazität der Hochleistungsbatterie und der Nennleistung des Elektromotors bei konventionellem Antrieb, PHEV und HEV unterschiedlich. Vergleicht man zum Beispiel, die drei Varianten der Emissionsklasse EURO 6d Temp, dann hat der konventionelle Diesel-Pkw eine Masse von 1640 kg, währenddessen für PHEV 260 kg und für HEV 138 kg dazukommen. Die Gesamtsystemleistung liegt bei 124 kW und wird im Falle von PHEV und HEV mit 97 kW von der VKM und 83 kW bzw. 35 kW vom Elektromotor erzeugt.

8.2.1 PHEM-Simulationen

Die Simulation der Emissionen in PHEM für konventionelle Antriebe, PHEV- und HEV-Konzepte wurde bereits in Kapitel 5 beschrieben. Für diese ergänzenden Untersuchungen, speziell der NO_x-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte, wurden die nachfolgend gezeigten Simulationen inklusive Abgasnachbehandlung mit PHEM simuliert. Das jeweilige Abgasnachbehandlungssystem (Aufbau, Bauteile, Parameter für die Simulation) wurde dabei von den konventionellen Antrieben laut HBEFA 4.1 übernommen. Im Wesentlichen wird dabei in PHEM zwischen Emissionen direkt nach der VKM (EO... Engine Out) und nach Auspuff (TP... Tail Pipe) unterschieden. Dazwischen findet die Abgasnachbehandlung statt. PHEM beinhaltet ein Modell zur Simulation der Abgasnachbehandlung, welches im Wesentlichen aus zwei Teilen besteht, einem Temperatur- und einem Katalysator-Modell. Für die Analyse der NO_x-Emissionen der Diesel-Pkw wurde die NO_x-Konvertierung im SCR-Katalysator als Funktion von Temperatur, Abgasmassenstrom und NH₃-Füllstand simuliert. Eine detaillierte Beschreibung der Abgasnachbehandlung in PHEM und deren Funktion, so wie sie für das HBEFA 4.1-Update angewandt wurde, ist im HBEFA 4.1-Bericht zu finden. [8]

Es wurden die Fahrzyklen WLTC und RWC simuliert. Es werden die simulierten NO_x-Emissionen der drei unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte miteinander verglichen, ohne dabei den Kaltstart zu berücksichtigen. PHEM-simulierte Emissionen sind hier immer als Emissionen eines warmen Fahrzeugs zu sehen, weshalb der Kaltstart in einem gesonderten Schritt nach der Simulation berücksichtigt werden müsste. Das Auskühlverhalten der Abgasnachbehandlung in der Simulation der Fahrzyklen wird in PHEM berücksichtigt.

8.2.1.1 Berechnung des WLTC-Utility-Faktors

Für die gewichteten Emissionen der PHEVs mittels der beschriebenen Nutzfaktoren wurde der WLTC mehrere Male hintereinander simuliert, um den Übergangs- und Bestätigungs-Zyklus zu definieren. Dabei zeigte sich, dass das Abbruchkriterium der simulierten PHEVs im 3. WLTC erreicht wurde, weshalb insgesamt 8 Phasen (4 Phasen je WLTC) für die Berechnung der mittels Nutzfaktoren gewichteten Emissionen herangezogen wurden. Am Beispiel des EURO 6d Temp PHEV wird die Berechnung der gewichteten CO₂ und NO_x-Emissionen für den WTLC folglich gezeigt.

Im ersten Schritt wird der Utility Faktor UF je Phase (UF_i) berechnet, indem die Formel 8-2 angewendet wird.

Phase i=1:

8-4

$$UF_1 = 1 - \exp \left[- \left(\sum_{j=1}^k C_j * \left(\frac{d_1}{d_n} \right)^j \right) \right] - \sum_{l=1}^{i-1} UF_l$$

mit:

- $UF_1 \dots$ Nutzfaktor der Phase 1 dimensionslos
- $d_1 \dots$ gefahrene Strecke bis zum Ende der Phase 1 entspricht 3,09 km für den WLTC
- $C_j \dots$ j-ter Koeffizient dimensionslos
- $d_n \dots$ normalisierte Strecke in km
- $k \dots$ Anzahl der Terme und Koeffizienten im Exponenten dimensionslos
- $\sum_{l=1}^{i-1} UF_l \dots$ Summe der errechneten Nutzfaktoren bis zur Phase i-1; entspricht 0

Die Zahlenwerte für C_j , d_n und k sind in Tabelle 81 (im Anhang) angeführt.

Für die Phase 1 des WLTC ergibt sich somit ein UF von 0,096. Für die weiteren Phasen, bis inkl. Phase 8 wurde die Berechnung identisch durchgeführt unter Abzug der Summe der Nutzfaktoren bis zur Phase $i-1$ (letzter Term der Formel 8-4).

Für jede Phase wurden die CO₂- und NO_x-Emissionen (bei Ladungsnutzung) berechnet und mit dem jeweiligem UF je Phase multipliziert, siehe Tabelle 52.

Tabelle 52: Ermittlung der UF-gewichteten CO₂- und NO_x-Emissionen

Phase i	UF _i	MCO ₂	MNO _x	UF _i x MCO ₂	UF _i x MNO _x
[-]	[-]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]
1	0,096	0	0	0	0
2	0,128	0	0	0	0
3	0,155	0	0	0	0
4	0,134	2,2	0,001	0,3	0
5	0,041	10,9	0,005	0,45	0
6	0,055	184,6	0,120	10,08	0,007
7	0,067	151,9	0,088	10,15	0,006
8	0,059	196,9	0,169	11,68	0,010
Summe	0,734			32,64	0,02

Unter Anwendung der Formel 8-5 können somit die gewichteten CO₂- und NO_x-Emissionen für den WLTC berechnet werden.

8-5

$$M_{i,weighted} = \sum_{j=1}^k (UF_j * M_{i,CD,j}) + \left(1 - \sum_{j=1}^k UF_j \right) * M_{i,CS}$$

mit:

$M_{i,weighted}...$ nutzfaktorgewichtete Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung i in g/km

$M_{i,CD,j}...$ Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung der Phase j bei Entladung in g/km

$M_{i,CS}...$ Emissionsmasse der gasförmigen Verbindung i bei Ladungserhaltung in g/km

$UF_j...$ Nutzfaktor der Phase j dimensionslos

$i...$ die Kennzahl der betrachteten gasförmigen Verbindung dimensionslos

- j...* Kennziffer der betrachteten Phase dimensionslos
- k...* Zahl der bis zum Ende des Übergangszyklus gefahrenen Phasen dimensionslos

Für die Emissionsmassen von CO₂ und NO_x bei Ladungserhaltung wurde ein WLTC mit unterschiedlichen Start-SOCs simuliert und die Werte bei SOC-Korrektur für die Berechnung verwendet.

Für das EURO 6d Temp-PHEV ergeben sich somit FC und NO_x in g/km für die unterschiedlichen Gewichtungsmethoden laut Tabelle 53.

Tabelle 53: Vergleich FC und NO_x im WLTC nach unterschiedlichen Gewichtungsmethoden für das EURO 6d Temp-PHEV

	delta SOC 0	1/3 Mix	UF	HBEFA-Mix
NO _x in g/km	0,12	0,07	0,054	0,04
FC in g/km	53	30,6	24,51	20,4

Die Zahlenwerte für FC und NO_x für den WLTC gewichtet nach UF liegen somit zwischen dem 1/3 und HBEFA-Mix.

8.2.1.2 PHEM-Ergebnisse EURO 6b-Simulation

Für die Simulation der NO_x-Emissionen der Durchschnittsfahrzeuge Diesel, PHEV und HEV des HBEFAs 4.1 für die Emissionsklasse EURO 6b wurde das in Abbildung 60 gezeigte NO_x-Kennfeld für die VKM in der Simulation mit PHEM vorgegeben. Das Kennfeld zeigt die Isolinien der NO_x-Emissionen am Auspuff in g/h im Motorkennfeld aufgetragen über Drehzahl und Leistung im normierten Zustand.

Durch die normierten Werte können Motorkennfelder von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Leistungs- und Drehzahldaten besser verglichen und ein Emissionskennfeld des Durchschnittsmotors aus allen Messdaten erstellt werden. Die Umrechnung auf Absolutwerte erfolgt mit den spezifischen Fahrzeugdaten, die im PHEM im Vehicle File vorgegeben werden.

Die Isolinien im Kennfeld, welche die NO_x-Emissionen in g/h darstellen, zeigen die Bereiche auf, in denen die NO_x-Emissionen hoch bzw. niedrig sind. Es ist ersichtlich, dass in Bereichen höherer Last bzw. in Richtung Vollast des EURO 6b-Motors die NO_x-Emissionen zunehmen. Die Werte reichen dabei von etwa 8 g/h im Niederlast-Bereich bis hin zu 280 g/h im Bereich voller Last, was eine zur Leistung überproportionale Spreizung der NO_x-Emissionen in diesem Kennfeld bedeutet.

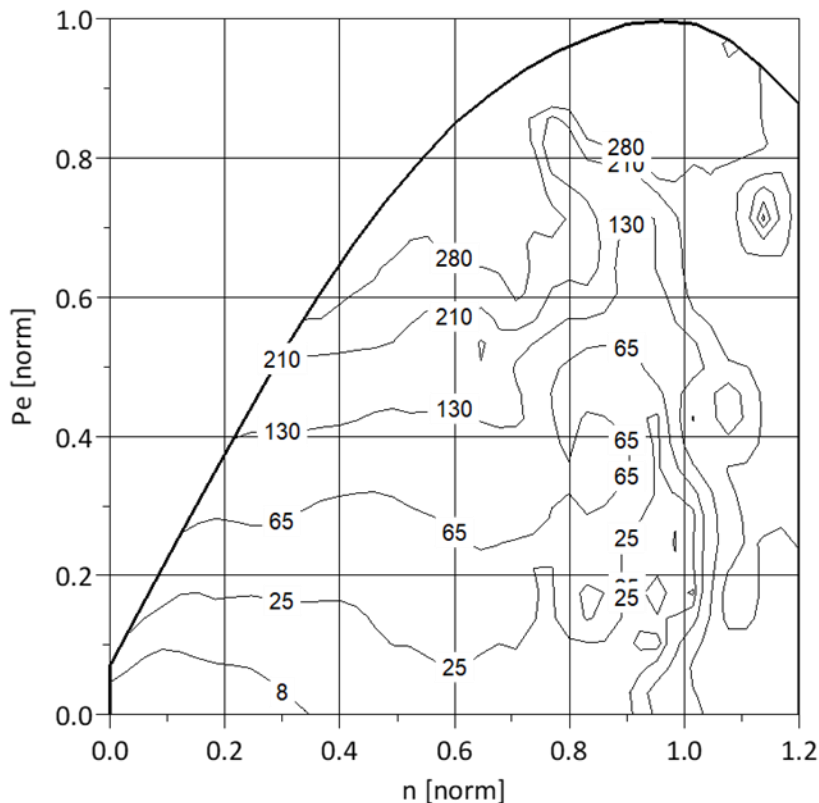


Abbildung 60: NO_x-Kennfeld (Tailpipe) HBEFA 4.1 für Dieselmotoren EURO 6b

Abbildung 61 zeigt die simulierten NO_x in mg/km für WLTC und RWC der durchschnittlichen HBEFA 4.1 Pkw-Fahrzeuge (D Pkw, PHEV und HEV) der Emissionsklasse EURO 6b. Die Emissionsergebnisse des HEVs wurden auf null Ladezustandsänderung der Batterie hin korrigiert ($\Delta\text{SOC}=0$ über den Zyklus gesehen).

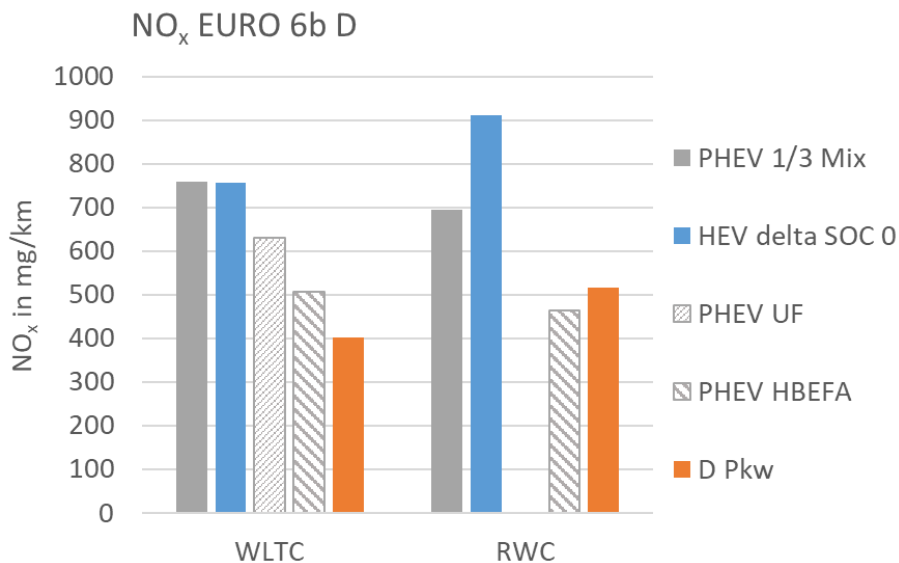


Abbildung 61: Vergleich NO_x EURO 6b Diesel-Pkw, PHEV und HEV

Im RWC liegen die simulierten Emissionen des Diesel-HEVs am höchsten. Im WLTC ergibt sich dasselbe Bild, wenn man für den PHEV die nutzfaktorengewichteten NO_x-Emissionen zum Vergleich heranzieht.

Im Folgenden werden die Lastpunkte des Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC im NO_x-Kennfeld dargestellt, um den Unterschied der simulierten NO_x-Emissionen zu begründen. Der konventionelle Diesel-Pkw für diese Betrachtung hat eine Leistung von 121 kW, während die VKM der PHEV- und HEV-Variante 94 kW leistet. Durch diese Differenz sowie durch die unterschiedlichen Fahrzeugparameter kommt es in den simulierten Fahrzyklen zu unterschiedlich angefahrenen Lastpunkten je Fahrzeugvariante. Abbildung 62 zeigt die angefahrenen Lastpunkte des Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC.

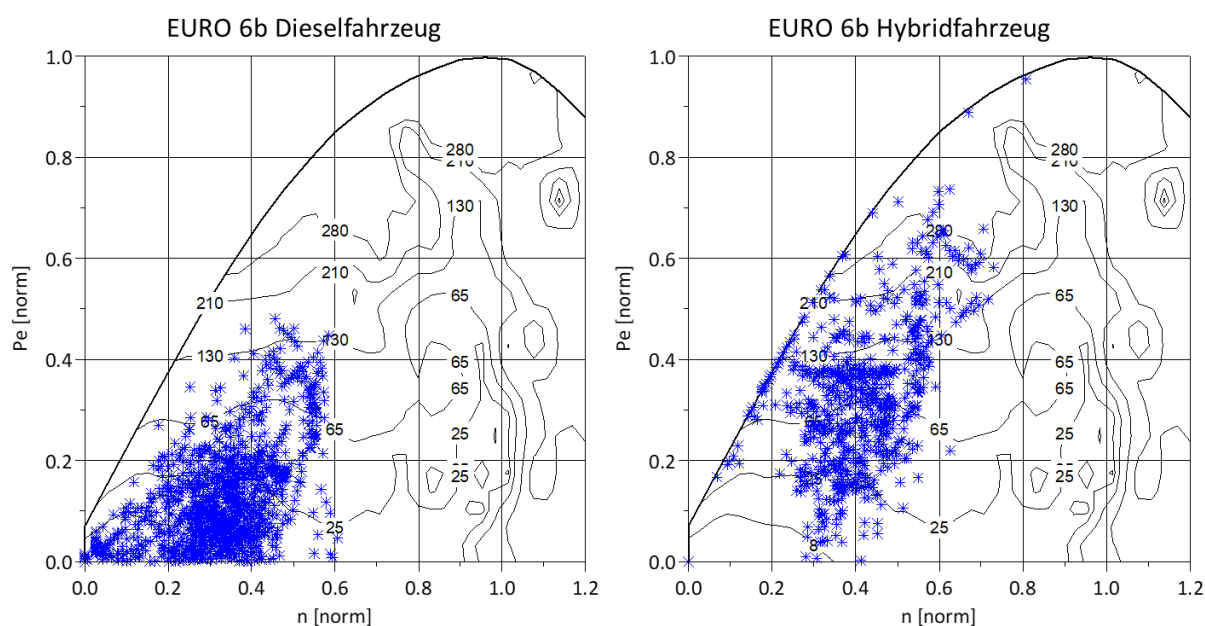


Abbildung 62: Lastpunkte des EURO 6b Diesel- und EURO 6b Hybridfahrzeugs im WLTC (jeder Punkt stellt eine Sekunde im Betrieb dar)

Betrachtet man die Lage der Lastpunkte, die vom Hybridfahrzeug im WLTC angefahren werden, dann erkennt man eine hohe Dichte der Punkte im oberen/mittleren Bereich des Kennfelds, wo die NO_x-Emissionen im Vergleich zum Niederlast-Bereich schon deutlich erhöht sind. Diese hohen Lastpunkte ergeben sich aus der Betriebsstrategie im PHEM, die Lastanhebungen beim VKM zur Erzeugung von elektrischer Energie bei niedrigem Batterieladezustand durchführt.

Das konventionell betriebene Dieselfahrzeug hingegen bewegt sich in Kennfeldbereichen, wo die spezifischen NO_x in [g/kWh] der VKM niedriger sind. Daher ergeben sich in der Simulation die niedrigeren NO_x-Emissionen für das Dieselfahrzeug, trotz des reinen VKM-Betriebs im Vergleich zum Hybrid- und PHEV-Fahrzeug. Die beiden folgenden Tabellen (Tabelle 54 und Tabelle 55) zeigen die Werte der simulierten NO_x- und CO₂-Emissionen der drei Fahrzeuge mit PHEM für NEDC, WLTC und RWC.

Tabelle 54: Simulierte NO_x mit HBEFA 4.1 EURO 6b Diesel-Kennfeld

NO _x in mg/km	D Pkw	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (ΔSOC=0)
WLTC	401,5	630,6	758,6	505,5	756,0
RWC	515,3	-	649,1	464,3	910,2

Tabelle 55: Simulierter Verbrauch mit HBEFA 4.1 Kennfeld

FC in g/km	D Pkw	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (ΔSOC=0)
WLTC	54,85	25,44	31,93	21,27	49,33
RWC	57,54	-	29,56	19,78	53,37

In Abbildung 63 wird der simulierte Verbrauch der drei EURO 6b Fahrzeuge miteinander verglichen. Vergleicht man den Verbrauch des konventionellen Diesel EURO 6b Pkws mit jenem des HEVs (bei ΔSOC=0), dann ergibt sich beim Hybridfahrzeug ein Einsparungspotenzial von ca. 11% im WLTC und 8% im RWC. Für das PHEV ergibt sich nach der Gewichtungsmethode laut HBEFA 4.1 ein elektrischer Fahranteil von ca. 67% und beim 1/3 Mix von ca. 51%, womit sich die niedrig dargestellten Verbrauchswerte erklären lassen.

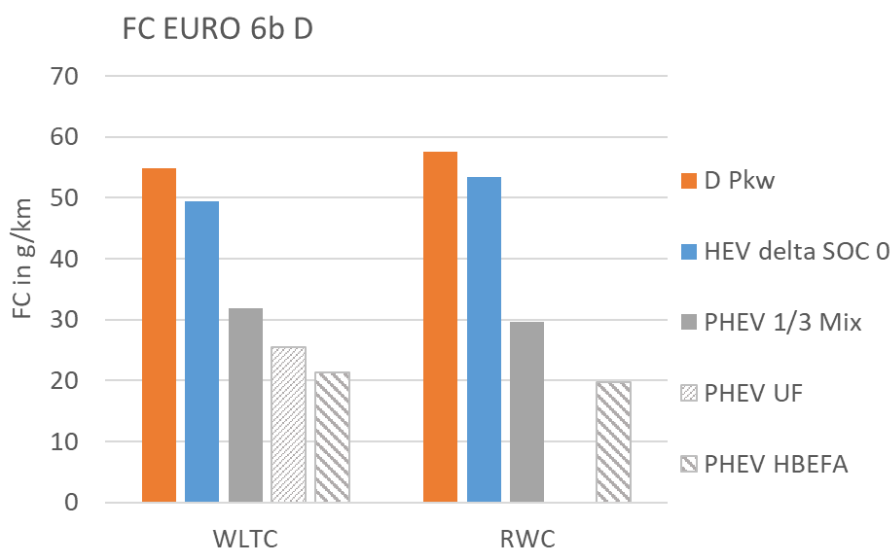


Abbildung 63: Vergleich FC EURO 6b D-Pkw, PHEV und HEV

Der Ladezustand der Batterie beeinflusst den Anteil am elektrischen Fahren im Fahrzyklus und hat somit Einfluss auf den Verbrauch und die simulierte Emissionen. Die nächsten beiden Abbildungen (Abbildung 64 und Abbildung 65) zeigen den Einfluss des Start-SOCs auf die simulierte Verbrauchs- und NO_x-Werte für das EURO 6b HEV-Dieselfahrzeug im WLTC und RWC. Der Start-SOC der Batterie wurde dazu von 0,15 bis 0,8 variiert und auch die Werte bei

SOC-Korrektur ($\Delta\text{SOC}=0$) wurden für den Vergleich in die beiden Diagramme eingetragen. Die NO_x-Simulationsergebnisse mit unterschiedlichem Start-SOC zeigten einen linearen Zusammenhang zwischen NO_x und SOC, weshalb dieselbe SOC-Korrektur wie für den Kraftstoffverbrauch (FC) angewandt werden konnte.

Die simulierten NO_x-Emissionen im WLTC bei Start-SOC 0,8 liegen um etwa 102 mg/km niedriger als jene bei fast leerer Batterie (Start-SOC 0,15). Ursache sind erwartungsgemäß die häufigeren Lastanhebungen zur Stromerzeugung bei Start mit geringer Batterieladung.

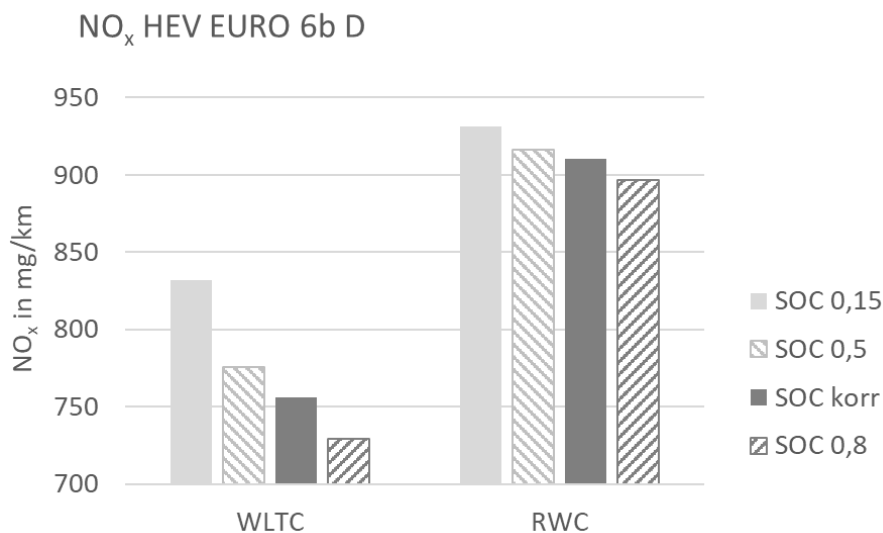


Abbildung 64: Vergleich simulierte NO_x-Emissionen mit EURO 6b Diesel-Kennfeld bei unterschiedlichem Start-SOC

Abbildung 65 zeigt den simulierten Verbrauch des EURO 6b HEV-Dieselfahrzeugs bei unterschiedlichen Start-SOCs. Auch hier ergibt sich das zu erwartende Bild, dass ein höherer Ladezustand der Batterie zu niedrigeren Verbräuchen führt.

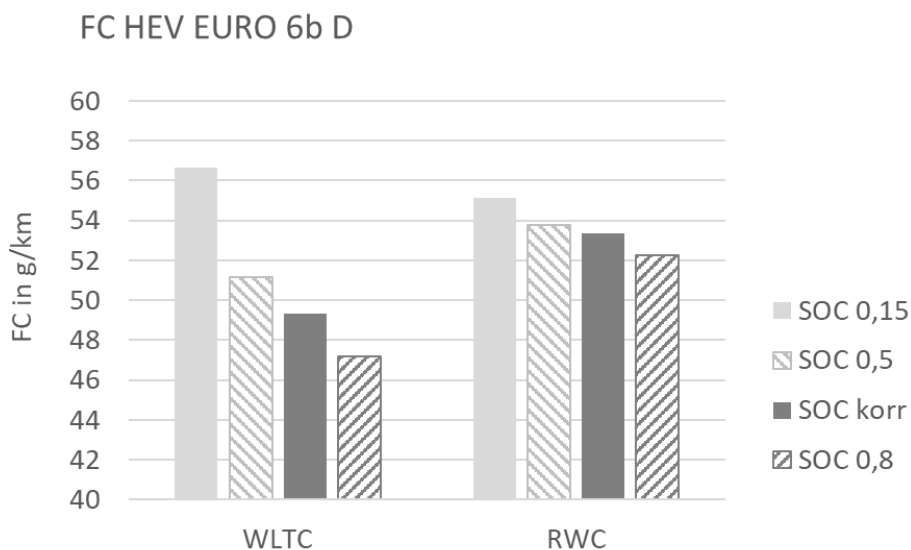


Abbildung 65: Vergleich simulierter FC mit EURO 6b Diesel-Kennfeld bei unterschiedlichem Start-SOC

Tabelle 56 fasst die simulierten Ergebnisse für NO_x und FC für WLTC und RWC des EURO 6b HEV-Dieselfahrzeugs bei unterschiedlichem Start-SOC der Batterie zusammen.

Tabelle 56: Simulationsergebnisse NO_x und FC mit EURO 6b Diesel-Kennfeld bei unterschiedlichem Start-SOC

EURO 6b HEV	NO _x in mg/km			FC in g/km		
	15%	50%	80%	15%	50%	80%
WLTC	831,69	775,73	729,53	56,65	51,16	47,16
RWC	931,06	916,10	896,49	55,16	53,80	52,26

Die Ergebnisse zeigen also, dass zur Simulation repräsentativer Schadstoffemissionen von HEV und PHEV Betriebsstrategie und Emissionskennfelder gut abgestimmt sein müssen.

8.2.1.3 Ergebnisse EURO 6d Temp-Simulation

Auch mit den Durchschnittsfahrzeugen der Emissionsklasse EURO 6d Temp des HBEFAs 4.1 wurden dieselben Simulationen für WLTC und RWC in PHEM durchgeführt. Abbildung 66 zeigt das NO_x-Kennfeld (Tailpipe) für EURO 6d Temp-Dieselfahrzeuge, das in der Simulation verwendet wurde.

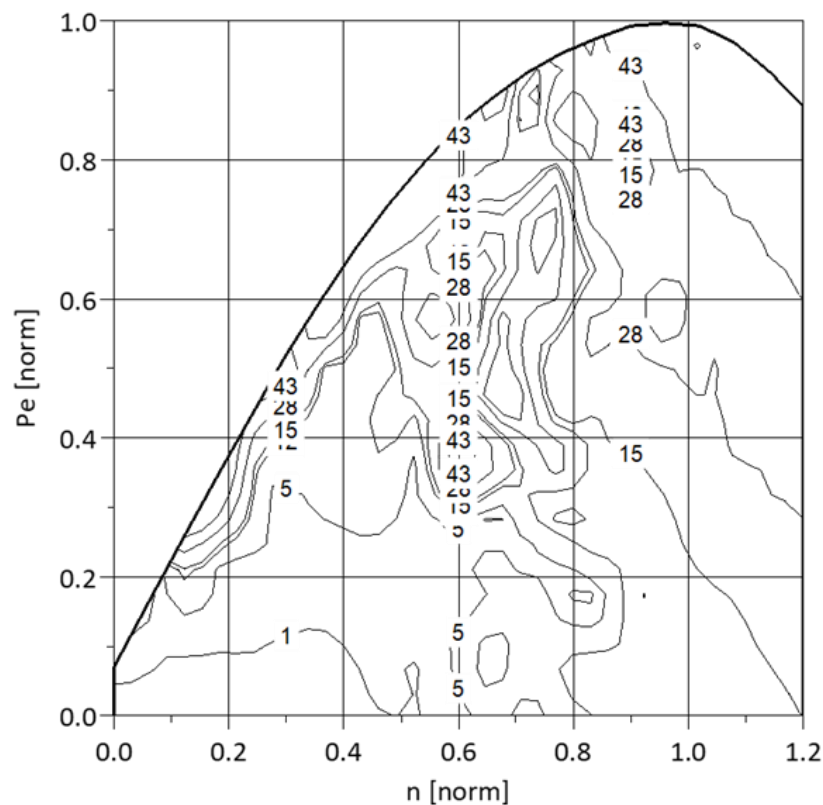


Abbildung 66: NO_x-Kennfeld (Tailpipe) HBEFA 4.1 für Dieselmotoren EURO 6d Temp

Die beiden Kennfelder EURO 6d und 6d Temp, wie sie für die Simulationen fürs HBEFA 4.1-Update verwendet wurden, sind sehr ähnlich. Das EURO 6d-Motorkennfeld wurde vom EURO 6d Temp-Motorkennfeld abgeleitet, da zum Zeitpunkt der Kennfelderstellung nur Messdaten von EURO 6d Temp Fahrzeugen vorlagen. Für die Kennfeld-Variante EURO 6d wurden sämtliche Schadstoffkomponenten des EURO 6d Temp-Motorkennfeldes um 10% reduziert.

Die Simulationsergebnisse der Stickoxide für die drei Fahrzeugvarianten mit der Emissionsstufe EURO 6d Temp für WLTC und RWC sind in Abbildung 67 gezeigt. Für alle drei Fahrzeugvarianten wurde dasselbe Emissionskennfeld für den VKM vorgegeben.

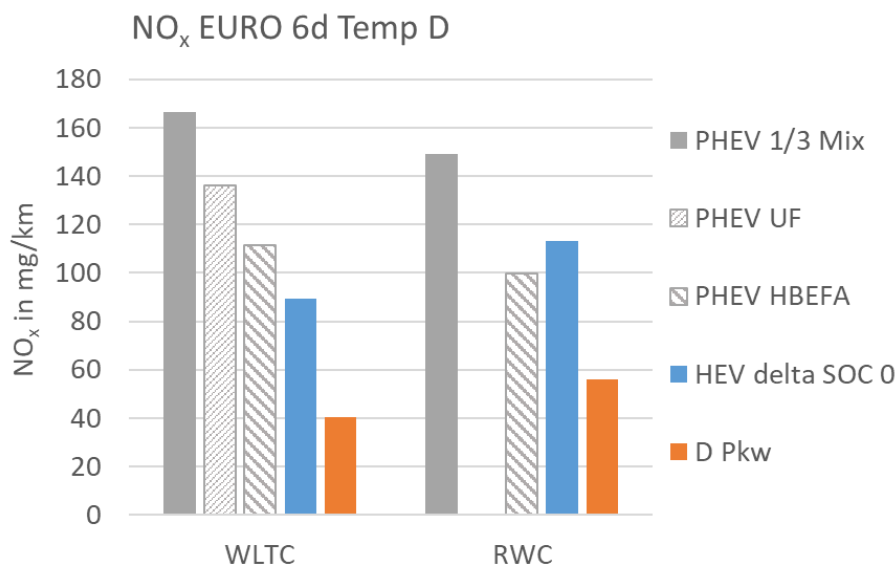


Abbildung 67: Vergleich NO_x EURO 6d Temp-Diesel-Pkw, PHEV und HEV

Abbildung 68 zeigt den Vergleich der angefahrenen Lastpunkte des konventionellen Diesel- und Hybridfahrzeugs der Emissionsklasse EURO 6d Temp im WLTC. Es ergibt sich wieder jenes Bild, dass das Hybridfahrzeug in Bereichen höherer NO_x-Emissionen im Kennfeld des Motors fährt, womit sich die höher simulierten NO_x-Emissionen der HEV- gegenüber der reinen Dieselfahrzeug-Variante begründen lassen. Wegen des deutlich geringeren Niveaus der NO_x-Emissionen im EURO 6d Temp-Kennfeld gegenüber dem EURO 6b Kennfeld ist auch die absolute Differenz zwischen reinem Dieselantrieb und den Hybridvarianten bei EURO 6d Temp geringer als bei den zuvor gezeigten EURO 6b-Simulationen, die relativen Unterschiede sind aber ausgeprägter.

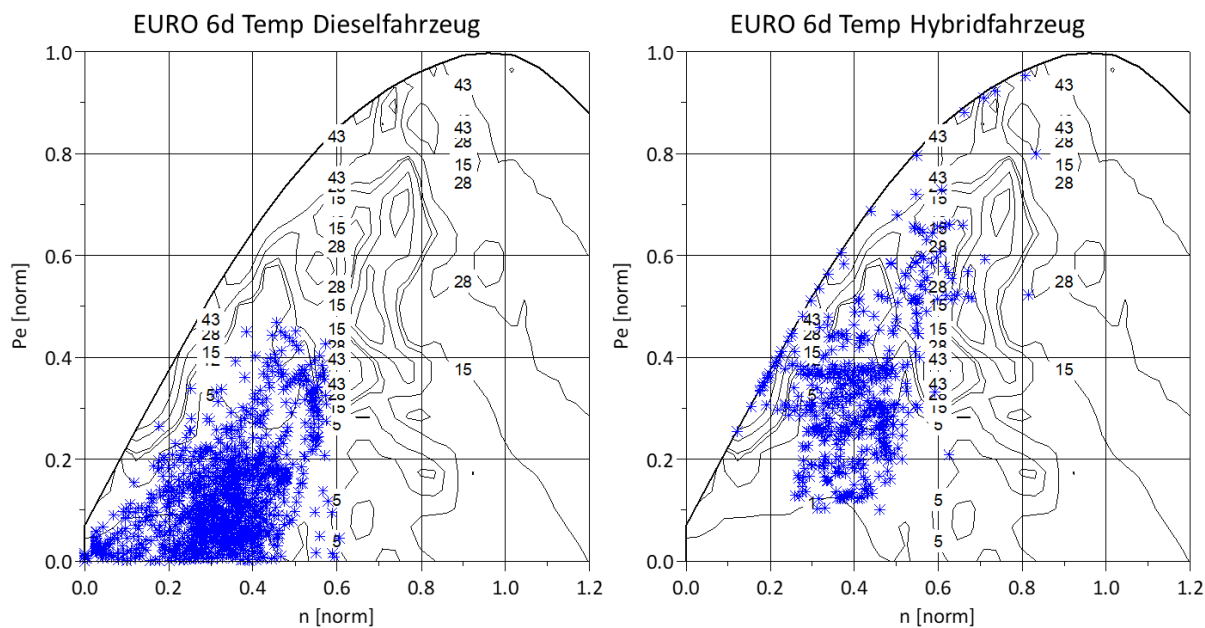


Abbildung 68: Lastpunkte des EURO 6d Temp Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC

Tabelle 57 und Tabelle 58 fassen die simulierten Werte für NO_x und CO₂ der drei Fahrzeugvarianten für die drei Fahrzyklen zusammen.

Tabelle 57: Simuliertes NO_x mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Temp-Dieselmotoren

NO _x in mg/km	D Pkw	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (ΔSOC=0)
WLTC	40,37	136,03	166,60	111,44	89,13
RWC	55,96	-	149,07	99,72	112,96

In Abbildung 69 ist der simulierte Verbrauch für WLTC und RWC dargestellt. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den EURO 6b Dieselfahrzeugen.

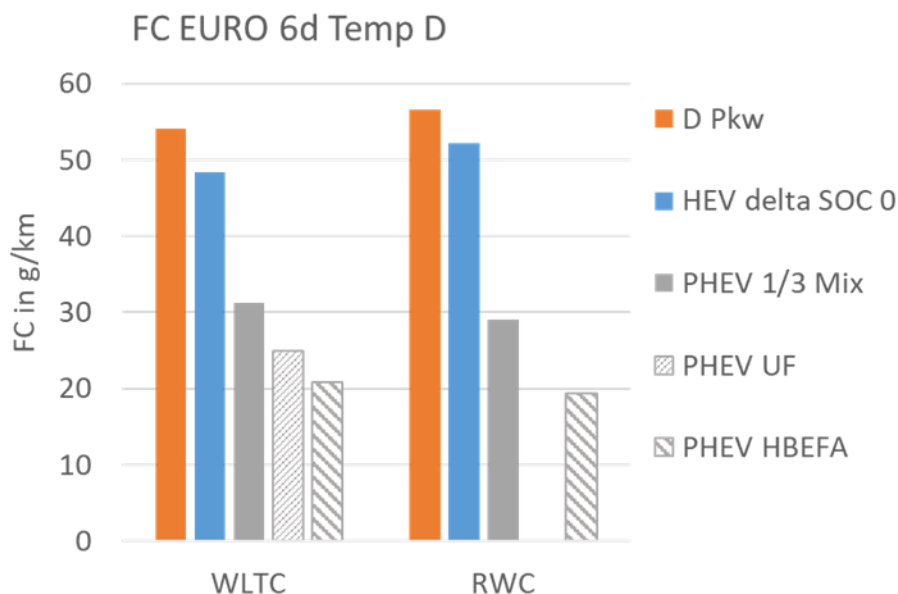


Abbildung 69: Vergleich FC EURO 6d Temp Diesel Pkw, PHEV und HEV

Tabelle 58 fasst die Simulationsergebnisse der Verbrauchswerte der EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge für den WLTC und RWC zusammen.

Tabelle 58: Simulierter FC mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Temp-Dieselmotoren

FC in g/km	D Pkw	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (Δ SOC=0)
WLTC	54,07	24,93	31,20	20,87	48,34
RWC	56,60	-	29,04	19,42	52,26

8.2.1.4 PHEM Ergebnisse EURO 6d-Simulation

Für die Simulationen der EURO 6d Durchschnittsfahrzeuge wurde das in Abbildung 70 gezeigte NO_x-Kennfeld verwendet. Die absolute Spreizung der NO_x-Emissionen im Kennfeld zwischen Niederlast- und Vollast-Bereich ist weitaus geringer als im NO_x-Kennfeld für EURO 6b-Motoren, gezeigt in Abbildung 60, weshalb das Anfahren unterschiedlicher Lastpunkte in diesem Kennfeld zu anderen Resultaten für die simulierten NO_x-Emissionen der Fahrzeugvarianten führt.

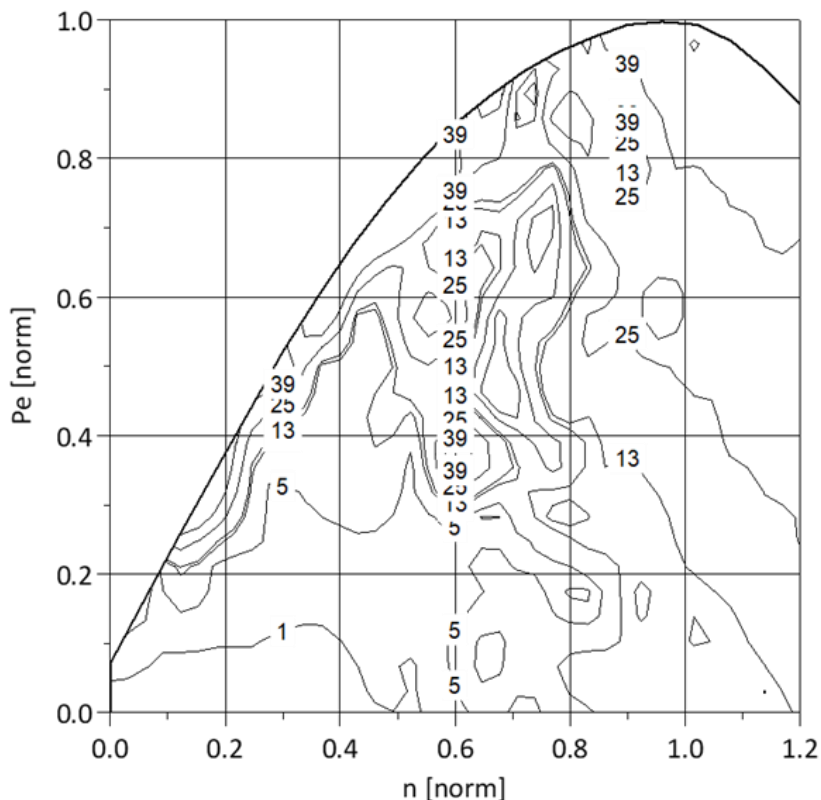


Abbildung 70: NO_x-Kennfeld (Tailpipe) HBEFA 4.1 für Dieselmotoren EURO 6d

Die Isolinien der NO_x-Emissionen im EURO 6d-Kennfeld reichen von 1 g/h im Niederlast-Bereich bis hin zu etwa 40 g/h bei Volllast.

Abbildung 71 zeigt die simulierten NO_x-Emissionen der drei Fahrzeuge mit PHEM für WLTC und RWC. Entsprechend der zuvor beschriebenen Ableitung des EURO 6d-Kennfelds aus dem gemessenen EURO 6d Temp-Kennfeld sind die Trends der Ergebnisse auch sehr ähnlich wie bei EURO 6d Temp. Die simulierten Stickoxide von PHEV und HEV liegen für WLTC und RWC deutlich oberhalb jenen des konventionellen Dieselfahrzeugs.

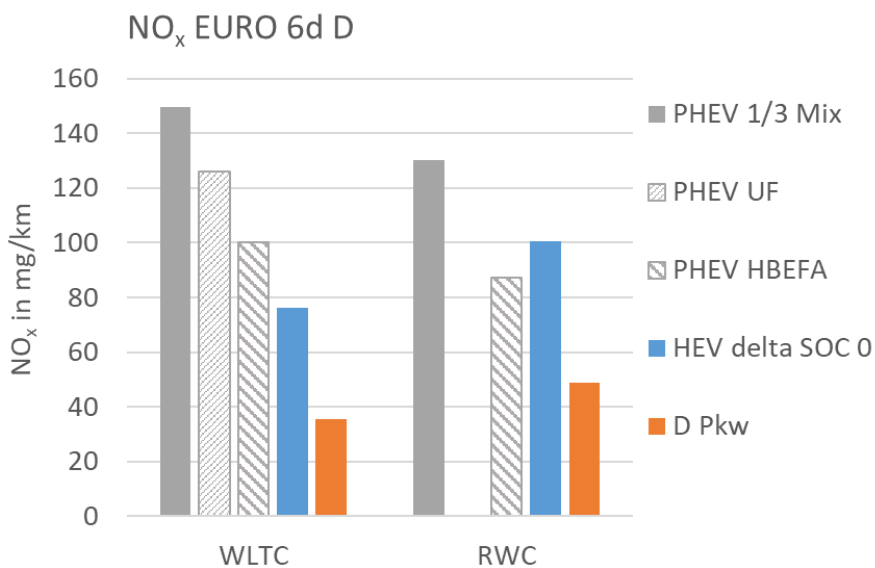


Abbildung 71: Vergleich NO_x EURO 6d Diesel-Pkw, PHEV und HEV

Abbildung 72 zeigt die Gegenüberstellung der angefahrenen Lastpunkte des Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC. Dies ergibt wie auch schon für die Fahrzeuge EURO 6b und EURO 6d Temp das Bild, dass das Hybridfahrzeug mit der generischen Betriebsstrategie in Bereichen höherer Last und somit auch in Bereichen der höheren NO_x-Emissionen im Motorkennfeld in der Simulation fährt und daher die simulierten Stickoxide für PHEV und HEV höher sind als jene des Diesel-Pkws.

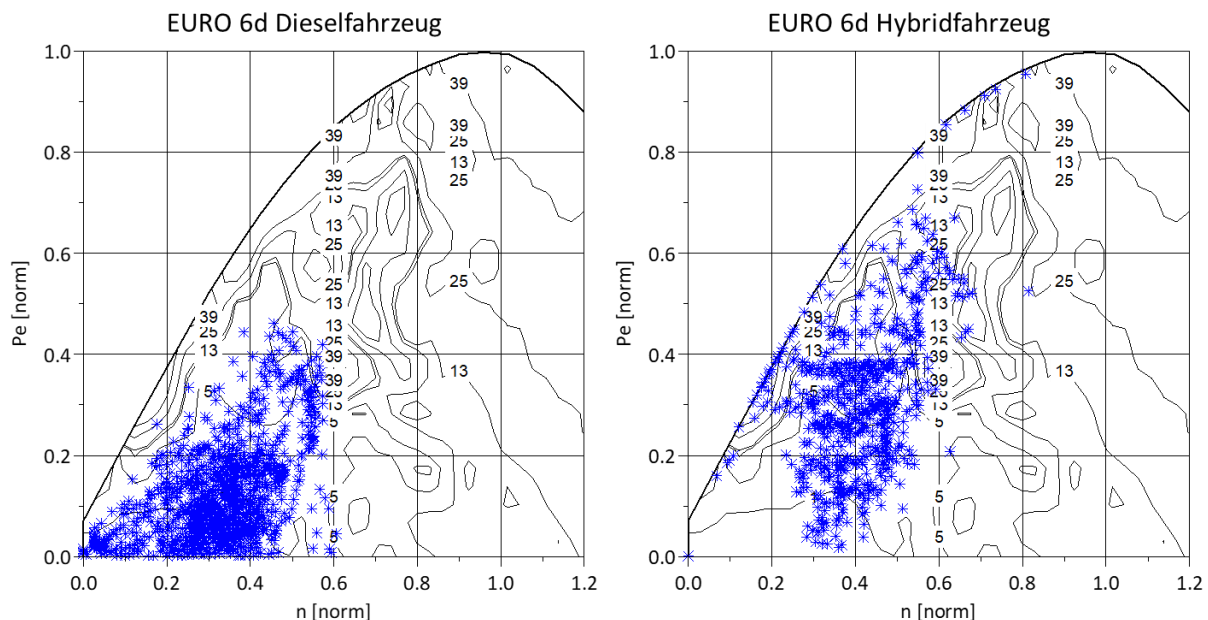


Abbildung 72: Lastpunkte des EURO 6d Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC

Das PHEV ist mit ca. 1910 kg fast 260 kg schwerer als das Dieselfahrzeug und 160 kg schwerer als das Hybridfahrzeug. Der Vorteil von null Emissionen im rein elektrischen Fahrbetrieb des PHEVs kann durch die hohe Fahrzeugmasse dieser Fahrzeugvariante sowie durch die Lastpunktanhebung für die Generierung elektrischer Energie bezüglich NO_x deutlich überkompensiert werden, sofern keine Adaptionen der AGR- und SCR-Strategien an den erweiterten Lastbereich vorgenommen werden. Alternativ bzw. überlagernd könnte auch die Lastpunktverschiebung in der HEV-Betriebsstrategie in Richtung Vollastkurve stark eingeschränkt werden, um NO_x-Spitzen zu vermeiden.

Die simulierten NO_x-Emissionen und der Verbrauch der EURO 6d Fahrzeuge für WLTC und RWC in PHEM, sind in Tabelle 59 und Tabelle 60 dargestellt.

Tabelle 59: Simuliertes NO_x mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Dieselmotoren

NO _x in mg/km	D Pkw	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (ΔSOC=0)
WLTC	35,51	125,91	158,61	171,38	76,20
RWC	48,71	-	143,36	246,54	100,55

In Abbildung 73 sieht man den Vergleich des simulierten Verbrauchs für WLTC und RWC für die EURO 6d Dieselfahrzeuge. Das Verbrauchseinsparungspotenzial von PHEV und HEV gegenüber dem Dieselfahrzeug ist trotz der höheren Fahrzeugmasse dieser Fahrzeugvarianten gegeben und liegt ähnlich hoch wie beim zuvor gezeigten Vergleich der EURO 6d Temp-Fahrzeuge.

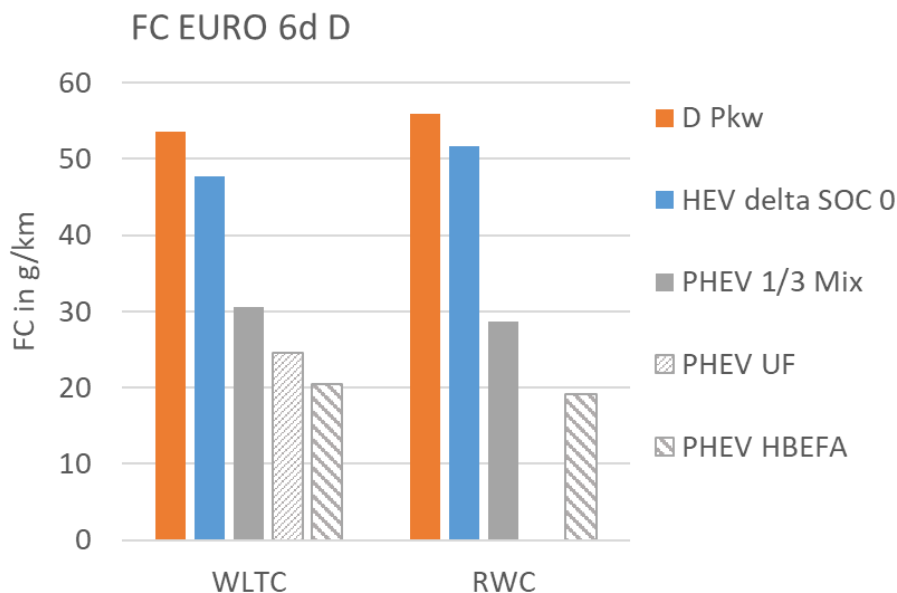


Abbildung 73: Vergleich FC EURO 6d Diesel-Pkw, PHEV und HEV

Tabelle 60: Simulierter Verbrauch mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Dieselmotoren

FC in g/km	D Pkw	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (Δ SOC=0)
WLTC	53,54	24,51	30,64	20,49	53,20
RWC	56	--	28,70	19,20	55,78

8.3 Reduktionspotential Verbrauch und NO_x-Emissionen für EU 6d Temp D-PHEV und -HEV

Die durchschnittlichen Motorkennfelder je Emissionsklasse für das HBEFA 4.1-Update wurden, wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, aus Messdaten von Labor- und On-Board-Messungen im realen Betrieb auf der Straße erstellt. Die Emissionen wurden nach Zulassungsverteilung zusammengewichtet, um somit das Emissionsverhalten eines durchschnittlichen Pkws (Diesel/Benzin) je Emissionsklasse darzustellen. Betrachtet man ein Emissionskennfeld eines spezifischen EURO 6d Temp Dieselfahrzeugs gesondert, so können sich abweichend vom durchschnittlichem Emissionskennfeld durchaus höhere oder niedrigere Emissionen ergeben. Für die Untersuchungen hinsichtlich des Reduktionspotenzials und der Sensitivität der NO_x-Emissionen für PHEVs und HEVs wurden zwei Ansätze betrachtet. Als erster Schritt wurde das Durchschnittskennfeld aus HBEFA 4.1 durch ein fahrzeugspezifisches Emissionskennfeld ersetzt, welches niedrigere NO_x-Emissionen im gesamten Kennfeldbereich aufweist. Die zweite Maßnahme diente der Vermeidung der Lastanhebung bis zur Vollast, wo die NO_x-Emissionen im

Kennfeld am höchsten sind. Dazu wurden Lastanhebungen nur bis maximal 90% der Volllastkurve der VKM zugelassen. Der Effekt beider Maßnahmen wird im Folgenden genauer beschrieben. Die Bezeichnungen „V0“, „V1“ und „V2“ im Weiteren stehen für die jeweils simulierten Versionen der EURO d Temp-Fahrzeugvarianten in PHEM. Tabelle 61 zeigt eine Übersicht der verwendeten Inputdaten für Motorkennfeld und Volllastkurve für die NO_x-Simulationen der drei Versionen.

Tabelle 61: Übersicht PHEM-Simulationsvorgaben für Varianten V0, V1 und V2

Variante	Kennfeld	Volllastkurve
V0	Ø KF HBEFA 4.1 D Pkw EURO 6d Temp	Ø Volllastkurve HBEFA 4.1 D Pkw EURO 6d Temp
V1	KF D Pkw 1 EURO 6d Temp	Ø Volllastkurve HBEFA 4.1 D Pkw EURO 6d Temp
V2	KF D Pkw 1 EURO 6d Temp	Ø Volllastkurve HBEFA 4.1 D Pkw EURO 6d Temp, Lastanhebung nur bis 90% Volllast zulässig

8.3.1 NO_x-Reduktion durch fahrzeugspezifisches Motorkennfeld V1

Anstelle des durchschnittlichen Emissionskennfelds für EURO 6d Temp Diesel-Pkw laut HBEFA 4.1 wurde ein fahrzeugspezifisches Emissionskennfeld eines beispielhaften EURO 6d Temp Diesel-Pkws (nachfolgend mit D Pkw 1 bezeichnet) in der Simulation vorgegeben. Die Daten dazu stammen aus der Messserie für das UBA-D (siehe Kapitel 4.2.4) für die ERMES-Datenbank. Tabelle 62 zeigt die Gegenüberstellung der Fahrzeugdaten des durchschnittlichen Diesel-Pkws laut HBEFA 4.1 und des Diesel-Pkws 1.

Tabelle 62: Fahrzeugdaten Ø D Pkw HBEFA 4.1 und D Pkw 1

Parameter	Einheit	Ø D Pkw HBEFA 4.1	D Pkw 1
Fahrzeugmasse	[kg]	1640	1591
Leistung VKM	[kW]	124	110

In Abbildung 74 sieht man die Gegenüberstellung vom NO_x-Kennfeld nach HBEFA 4.1 (links in der Abbildung dargestellt) und dem NO_x-Kennfeld des Diesel-Pkw 1. Beide Kennfelder zeigen die NO_x-Emissionen Tailpipe in g/h aufgetragen im normierten Kennfeld über Leistung und Drehzahl. Über den gesamten Kennfeldbereich sind die NO_x-Emissionen im Kennfeld des Pkws 1 niedriger im Vergleich zum durchschnittlichen Kennfeld laut HBEFA 4.1.

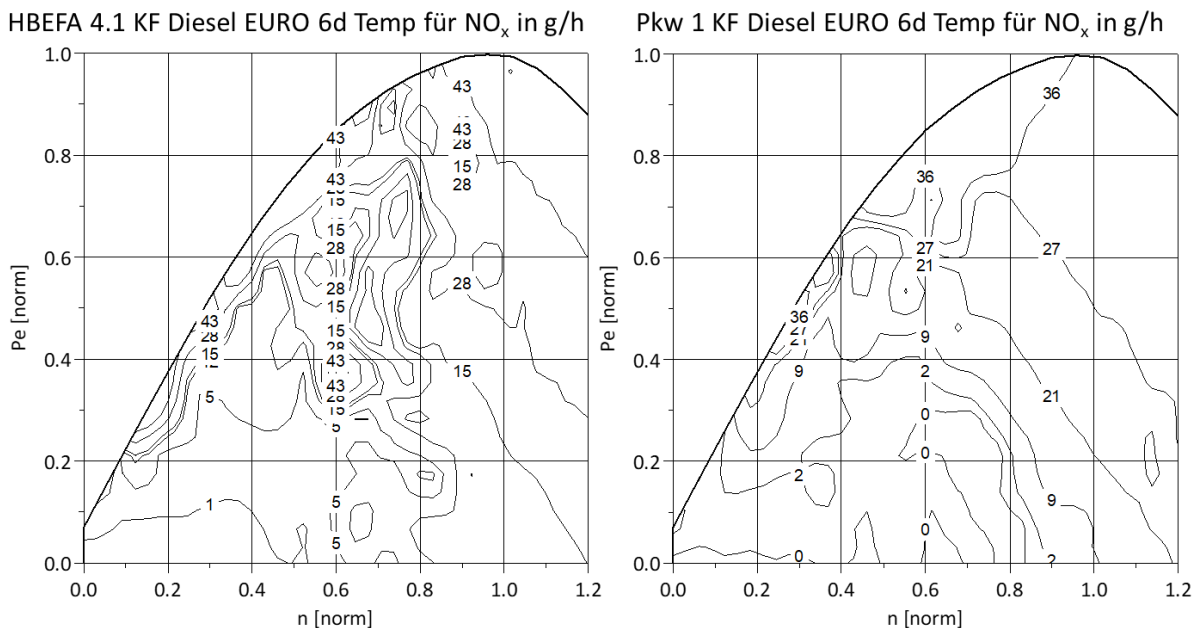


Abbildung 74: NO_x-Kennfeld HBEFA 4.1 und Pkw 1 (EURO 6d Temp)

Für die PHEM-Simulationen der V1 (Version 1) wurden wiederum die beiden Zyklen WLTC und RWC mit den Durchschnittsfahrzeugen laut HBEFA 4.1 (EURO 6d Temp) sowie der Pkw 1 mit der Vorgabe dessen Emissionskennfeldes in PHEM simuliert. Für die Simulationen zu V1 wurde die durchschnittliche Volllastkurve laut HBEFA 4.1 für EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge verwendet. Abbildung 75 zeigt die Ergebnisse der simulierten NO_x-Emissionen der Version 1 für PHEV, HEV und der beiden Diesel-Pkws (D-Pkw bezeichnet dabei das durchschnittliche Dieselfahrzeug laut HBEFA 4.1). Die dargestellten NO_x-Ergebnisse des PHEV-Fahrzeugs sind dabei wiederum nach den drei Methoden gewichtet worden, die bereits im vorigen Abschnitt dieses Kapitels beschrieben wurden. Für das HEV-Fahrzeug sind die simulierten NO_x für ein Δ SOC von 0 für WLTC und RWC dargestellt.

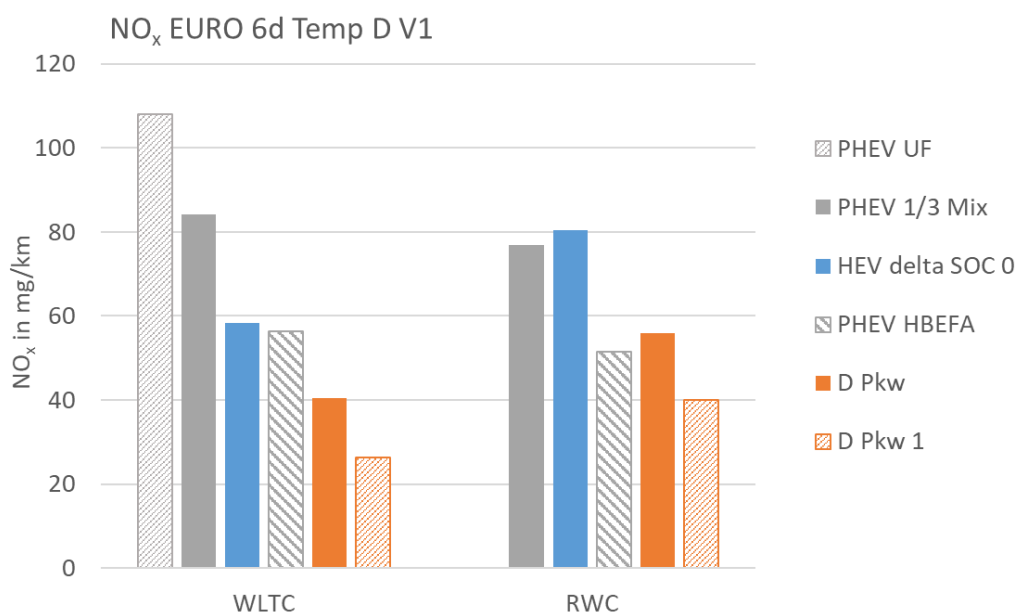


Abbildung 75: Vergleich simuliertes NO_x für Euro 6d Temp Diesel, PHEV, HEV und Diesel-Pkw 1, alle mit NO_x-Kennfeldvariante V1

Der Grenzwert für den WLTC, gemessen am Pkw-Rollenprüfstand, liegt für EURO 6d Temp-Fahrzeuge bei 80 mg/km. Dieser wird für das PHEV-Fahrzeug nur nach der Gewichtung laut HBEFA 4.1, welche einen elektrischen Fahranteil von 67% im WLTC ergibt, eingehalten werden. Für die Gewichtung nach 1/3 Mix, mit einem elektrischen Fahranteil von 51% im WLTC, kann der Grenzwert nicht eingehalten werden. Da ja in den Schadstofftests die Grenzwerte auch in den Charge Sustaining Modi eingehalten werden müssen, wäre ein PHEV in der simulierten Konfiguration nicht zertifizierbar. Damit wären wohl auch Emissionsfaktoren für das HBEFA, die mit dieser Konfiguration berechnet werden, nicht repräsentativ.

Auch die simulierten NO_x-Emissionen für das HEV-Fahrzeug (bei $\Delta SOC=0$) überschreiten, wenn auch nur knapp, den Grenzwert. In Tabelle 63 sind die Simulationsergebnisse der NO_x-Emissionen für V1 zusammengefasst.

Tabelle 63: Simuliertes NO_x V1

NO _x in mg/km	D Pkw	D Pkw 1	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV ($\Delta SOC=0$)
WLTC	40,37	26,38	107,95	84,23	56,34	58,35
RWC	55,96	40,01	-	76,90	51,45	80,37

Abbildung 76 zeigt den simulierten Verbrauch nach V1.

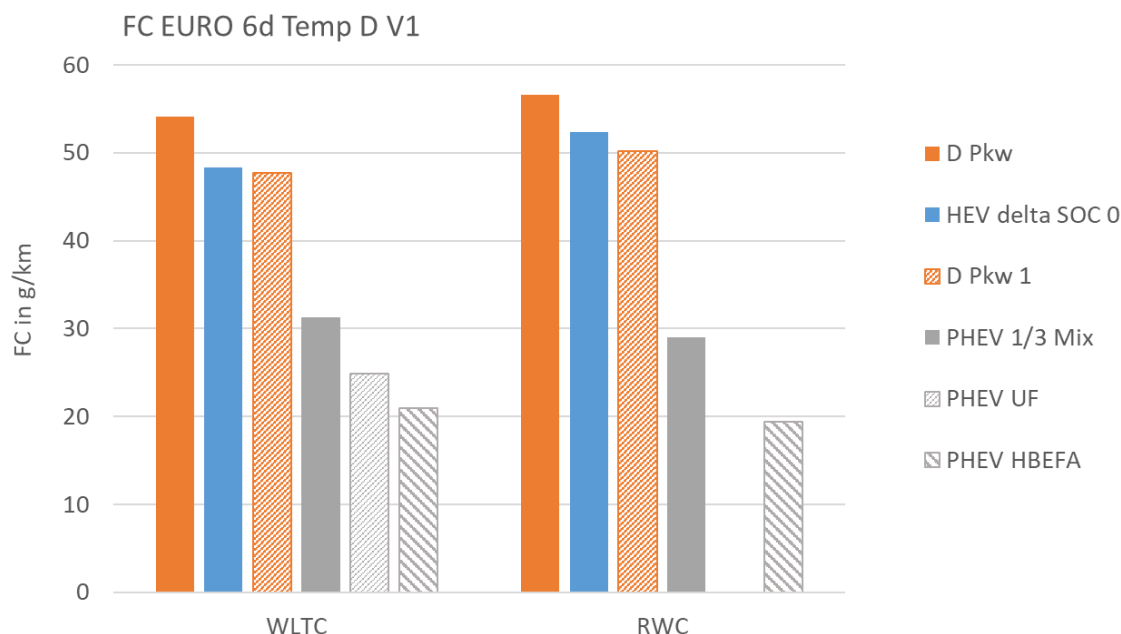


Abbildung 76: Vergleich simulierter FC Euro 6d Temp D, PHEV, HEV und D-Pkw 1 V1

Im Vergleich zum konventionellen Diesel-Pkw werden auch in dieser Konfiguration deutliche Verbrauchseinsparungen für die PHEV- und HEV-Fahrzeuge im WLTC und auch im RWC erreicht. Die Zahlenwerte der simulierten Verbräuche nach V1 sind in Tabelle 64 zusammengefasst.

Tabelle 64: Simulierter FC mit EURO 6d Temp Diesel Kennfeld V1

FC in g/km	D Pkw	D Pkw 1	PHEV UF	PHEV 1/3 Mix	PHEV HBEFA	HEV (Δ SOC=0)
WLTC	54,07	47,73	24,84	31,28	20,92	48,34
RWC	56,60	50,22	-	29,01	19,40	52,37

8.3.2 NO_x-Reduktion durch Vermeidung der Lastanhebung auf Vollast V2

Die höchsten NO_x-Emissionen werden in Bereichen hoher Last im Motorkennfeld verursacht. Die Darstellung der Lastpunkte des EURO 6d Temp HEV-Fahrzeugs im WLTC (siehe Abbildung 68) zeigt, dass viele angefahrne Betriebspunkte in der HEV-Simulation an der Vollast liegen, weshalb sich im Vergleich zum konventionellem Diesel-Pkw höhere NO_x-Emissionen für die HEV-Variante ergeben. Eine Reduktion der NO_x-Emissionen durch Unterbindung der Lastanhebung auf Vollast am Beispiel HEV-Fahrzeug kann somit zu niedrigeren NO_x-Emissionen führen. Die Simulationen zur V2 untersuchen diesen Ansatz zur NO_x-Reduktion für Hybridfahrzeuge, indem die durchschnittliche Vollastkurve für Diesel-Pkw aus dem HBEFA 4.1 um 10% in jedem Punkt gesenkt wurde, um eine Lastanhebung bis zur Vollast zu vermeiden¹. Abbildung 77 zeigt den Vergleich der angefahrenen Lastpunkte des HEVs im WLTC der beiden Varianten V0 (links in der Abbildung) und V2 (rechts in der Abbildung).

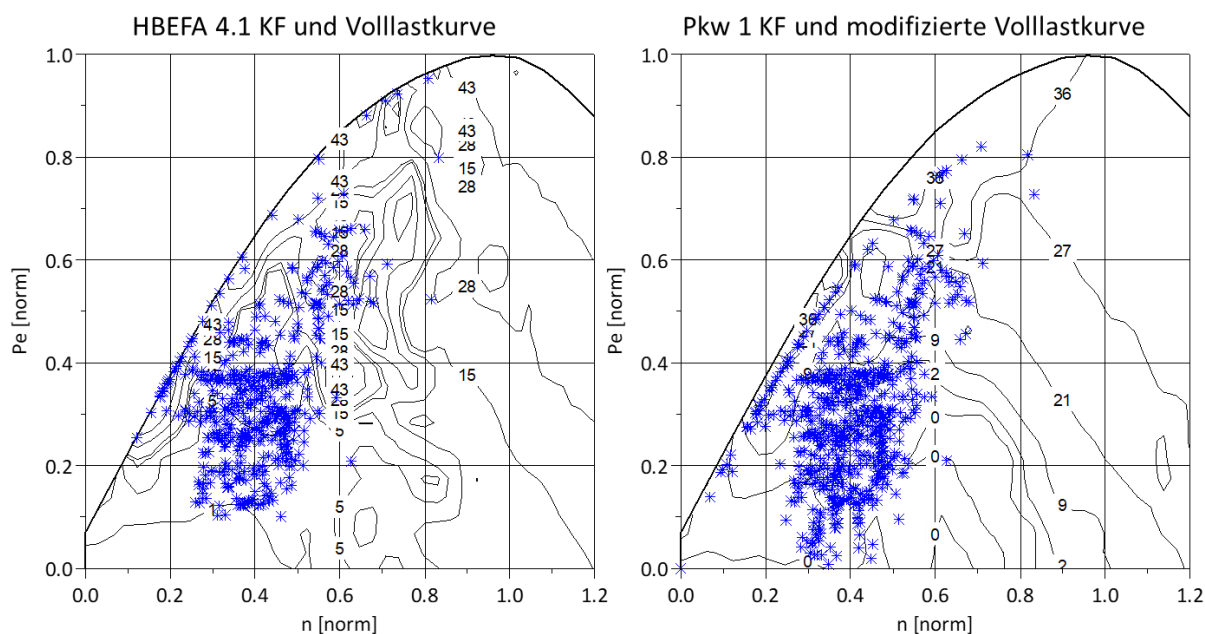


Abbildung 77: Lastpunkte HEV-Fahrzeug EURO 6d Temp im WLTC V0 und V2

¹ Das Modell PHEM passt die Hybrid- und Schaltstrategie an die verfügbaren Leistungen an, sodass eine Reduktion der vorgegebenen Vollastkurve eine Hybridstrategie mit eingeschränkt zulässiger Lastanhebung abbildet.

Durch die Vorgabe der modifizierten Volllastkurve für V2 in der PHEM-Simulation ergaben sich niedrigere NO_x-Emissionen für die HEV-Fahrzeuge im Vergleich zu V0 und V1.

In Abbildung 78 sind die simulierten NO_x-Emissionen für die Durchschnittsfahrzeuge PHEV und HEV EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge laut HBEFA 4.1 für die drei Versionen für Kennfelder und Betriebsstrategie zusammengefasst. Für das PHEV-Fahrzeug wurden die Ergebnisse nach UF- und 1/3 Mix- Gewichtung und für das HEV-Fahrzeug die Ergebnisse nach Korrektur der Batterieladung auf $\Delta\text{SOC}=0$ für WLTC und RWC dargestellt.

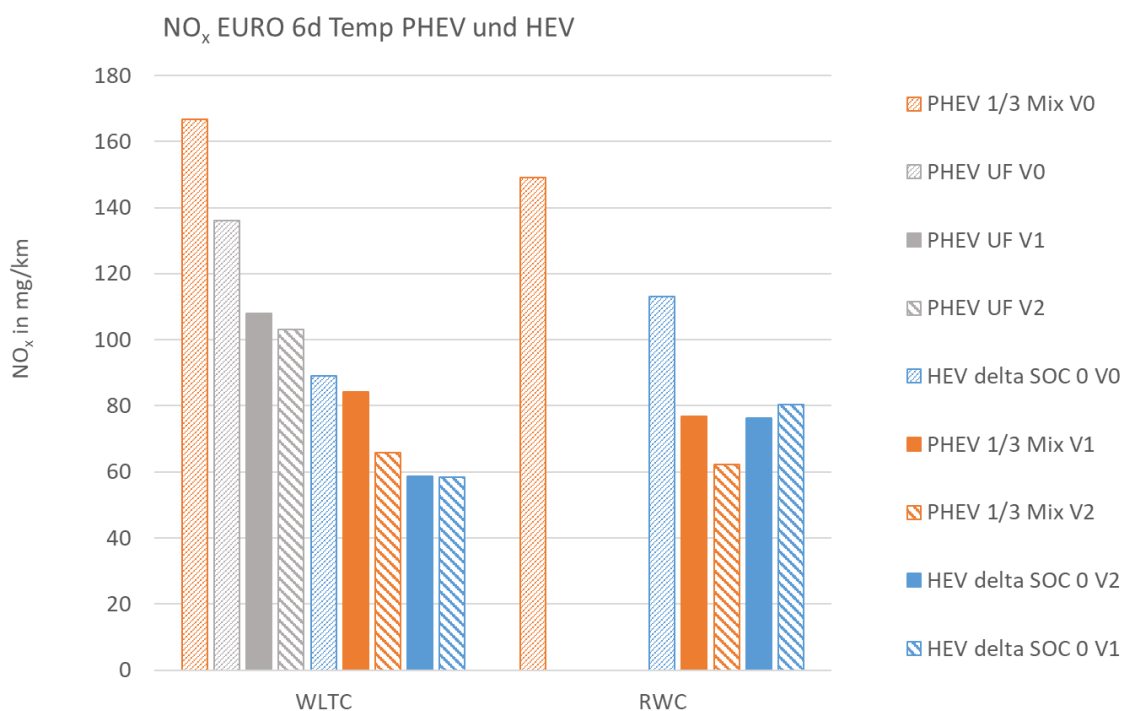


Abbildung 78: Simuliertes NO_x für EURO 6d Temp PHEV und HEV

Tabelle 65 fasst die Simulationsergebnisse der NO_x-Emissionen für PHEV und HEV für die drei Versionen zusammen.

Tabelle 65: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für NO_x für V0, V1 und V2 PHEV- und HEV-Fahrzeuge EURO 6d Temp Diesel

NO _x in mg/km	PHEV UF			PHEV 1/3 Mix		
	V0	V1	V2	V0	V1	V2
WLTC	136,03	107,95	103,02	166,60	84,23	65,73
RWC	-	-	-	149,07	76,91	62,25
NO _x in mg/km	PHEV HBEFA 4.1			HEV delta SOC 0		
	V0	V1	V2	V0	V1	V2
WLTC	111,44	56,34	43,97	89,13	58,35	58,67
RWC	99,72	51,45	41,64	112,96	80,37	76,27

Ausgehend von der Version V0 wurden die NO_x-Emissionen des PHEVs, gewichtet mittels Utility Faktor, im WLTC um 24% reduziert. Beim HEV-Fahrzeug konnten die für Version 0 simulierten NO_x um 34% in der Version 2 gesenkt werden. Der Grenzwert von 80 mg/km NO_x im WLTC wird somit für das HEV-Fahrzeug in der Version 2 eingehalten.

Tabelle 66: Reduktion der NO_x-Emissionen für PHEV UF und HEV delta SOC 0

Reduktion der NO _x -Emissionen bezogen auf V0 in %	PHEV UF		HEV delta SOC 0	
	V1	V2	V1	V2
WLTC	21%	24%	35%	34%
RWC	-	-	29%	32%

Die Reduktion wurde mit dem in Formel 8-6 dargestellten Zusammenhang gerechnet.

8-6

$$\text{Reduktion in \%} = 1 - \frac{NO_{xV1,2}}{NO_{xV0}} * 100$$

mit:

$NO_{xV1,2}$... simuliertes NO_x in mg/km für die Versionen V1 bzw. V2

NO_{xV0} ... simuliertes NO_x in mg/km für die Version V0

Für die simulierten Versionen der Hybridfahrzeuge (PHEV und HEV) konnte gezeigt werden, dass bei Anpassung des Emissionskennfelds und der Betriebsstrategie in der Simulation die NO_x-Emissionen gesenkt werden können. Im Vergleich zu den konventionell betriebenen Fahrzeugen (D Pkw und D Pkw 1) ergibt sich somit das in Abbildung 79 gezeigte Bild für die Simulationen der Version 2. Dargestellt sind für das PHEV-Fahrzeug wieder die gewichteten NO_x-Emissionen nach Utility Faktor, HBEFA und 1/3 Mix. Für das HEV-Fahrzeug wurde das Ergebnis bei SOC-Korrektur zum Vergleich herangezogen.

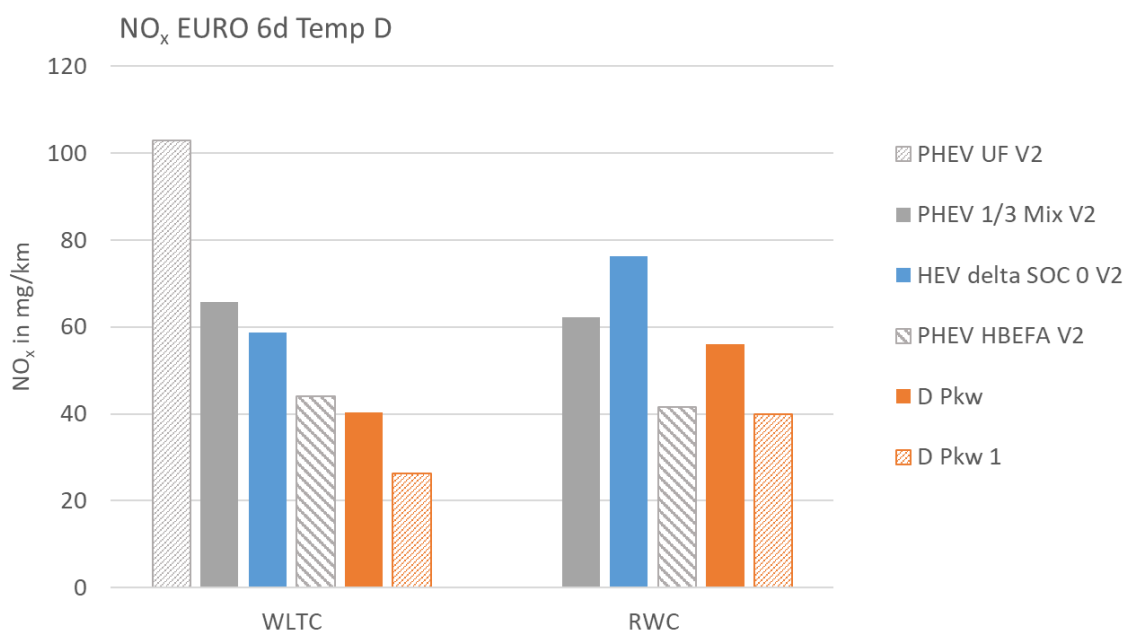


Abbildung 79: Vergleich simulierte NO_x EURO 6d Temp PHEV, HEV und D

Die simulierten NO_x der Version 2 des PHEV-Fahrzeugs, gewichtet nach HBEFA, liegen im WLTC nur knapp oberhalb des durchschnittlichen HBEFA 4.1 Dieselfahrzeugs und sind im RWC fast ident mit dem NO_x-Ergebnis für den Diesel-Pkw 1. Effekte von erweiterten Heizstrategien des SCR, die ja bei HEV- und PHEV-Pkw gegeben wären, wurden nicht berücksichtigt und könnten die simulierten Emissionen weiter senken.

Die Sensitivitätsanalyse für Diesel-Hybride zeigt also, dass eine eher einfache CO₂ optimierte Betriebsstrategie ohne Anpassung der Motorkalibrierung zu deutlichen NO_x-Anstiegen führen kann. Um die RDE-Gesetzgebung zu erfüllen, müssen Hersteller ab EURO 6d Temp-Zulassung Betriebsstrategien und Motoreinstellungen von HEVs auch auf real world NO_x einstellen. Solche Strategien können in PHEM tendenziell berücksichtigt werden, ob sich der Aufwand einer Berechnung eigener HEV Emissionsfaktoren lohnt, ist allerdings noch fraglich. Als Entscheidungsgrundlage sollten Messungen an mehreren HEVs und PHEVs durchgeführt und diese mit konventionellen Antrieben bezüglich der Schadstoffniveaus verglichen werden. Bei deutlichen Unterschieden ist eine separate Simulation der Emissionsfaktoren sinnvoll, vor allem da dabei auch der partiell emissionsfreie Betrieb von PHEVs berücksichtigt werden kann.

8.4 RDE-Messungen Pkw D-PHEV und Pkw D

Im Zuge dieser Dissertation wurde ein EURO 6b Diesel-SUV, einmal als PHEV und einmal als rein konventionell betriebenes Dieselfahrzeug ausgeführt, hinsichtlich seiner Realemissionen auf der Straße vermessen. Tabelle 37 zeigt die Gegenüberstellung beider Fahrzeugdaten des Diesel- und PHEV-Fahrzeugs. Der PHEV ist aufgrund der zusätzlichen Komponenten für den elektrischen Antrieb um 470 kg schwerer als der nur mittels VKM betriebene Diesel-Pkw. Beide Fahrzeuge sind mit einem SCR-System als Abgasnachbehandlung ausgestattet.

Tabelle 67: Fahrzeugdaten EU6b Pkw D und PHEV

Parameter	Einheit	D	PHEV
Fahrzeugmasse	[kg]	2050	2520
VKM-Leistung	[kW]	160	190
E-Motor-Leistung	[kW]	-	85

Mit beiden Fahrzeugen wurde die Standardroute der TU Graz (Ries-Route) mehrere Male gemäß RDE-Richtlinien vermessen. Abbildung 80 zeigt die Messergebnisse des konventionell angetriebenen Diesel-Pkws für drei Ries-Routen für CO₂ und NO_x. Im Mittel liegen die gemessenen CO₂-Emissionen für das Dieselfahrzeug bei etwa 203 g/km und die gemessenen Stickoxide bei etwa 90 mg/km.

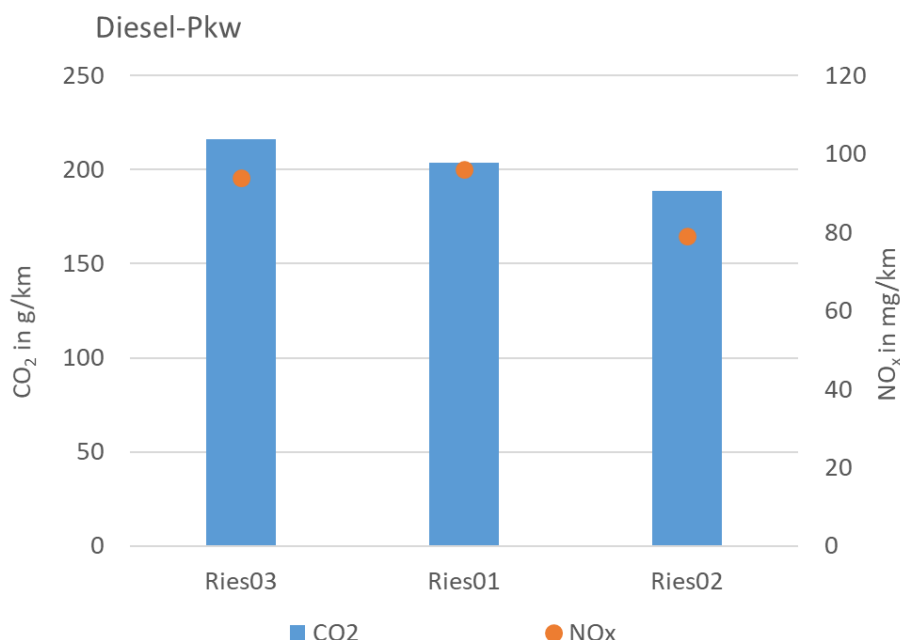


Abbildung 80: Messergebnisse RDE EURO 6b Diesel-Pkw

Die Ries-Route wurde mit dem PHEV-Diesel-Pkw insgesamt fünfmal vermessen. Die Messergebnisse für CO₂ und NO_x sind in Abbildung 81 dargestellt. Ries05 und Ries04 wurden mit voll aufgeladener Batterie gestartet, also mit einem SOC von 100%. Ries02 wurde mit einem SOC von 85% gestartet, die anderen beiden Fahrten wurden mit jenem Ladezustand der Batterie gefahren, der sich aufgrund der vorherigen Fahrten ergab. Der genaue Start-SOC wurde für diese Fahrten nicht mitaufgezeichnet und ist daher unbekannt. Der gemessene Verbrauch bzw. das gemessene CO₂ sinkt mit zunehmendem SOC, da der elektrisch gefahrene Anteil der RDE-Fahrten mit voll geladener Batterie am höchsten ist.

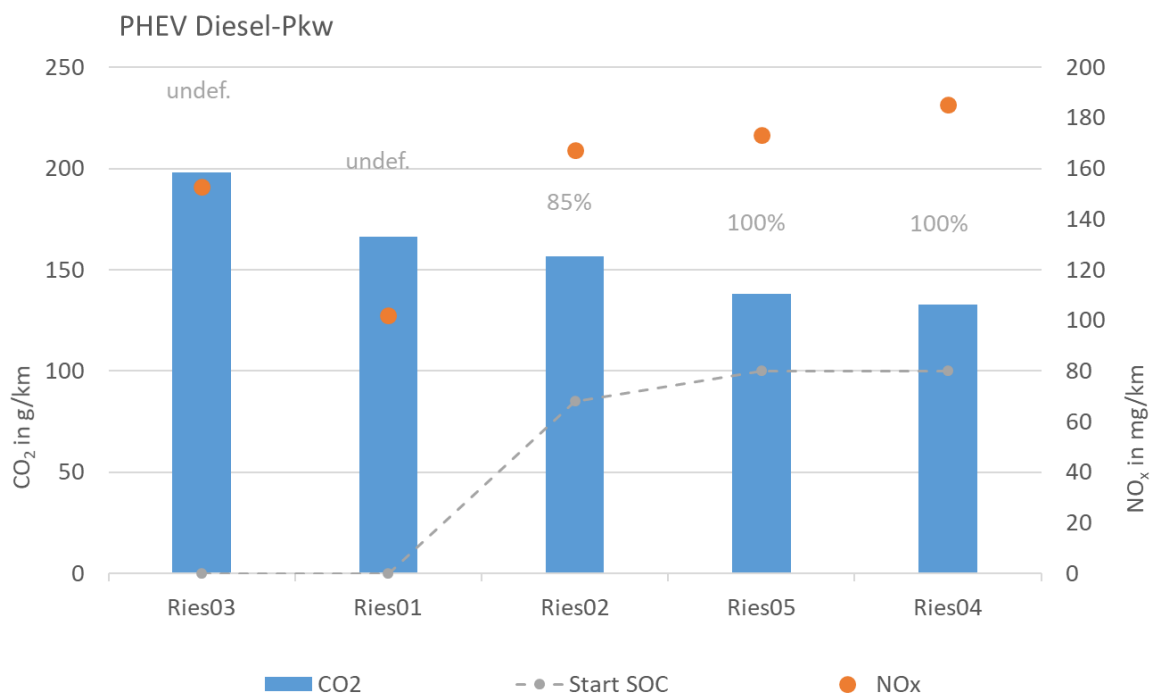


Abbildung 81: Messergebnisse RDE EURO 6b PHEV-Diesel-Pkw

Der Mittelwert der gemessenen CO₂-Emissionen des Diesel-PHEVs liegt bei etwa 170 g/km und somit um ca. 16% unterhalb der CO₂-Emissionen des Diesel-Pkws. Die gemessenen NO_x-Emissionen des PHEVs liegen im Schnitt bei etwa 156 mg/km und somit deutlich über jenen des Diesel-Pkws.

Tabelle 68 fasst die Ergebnisse beider Fahrzeuge für die gemessenen CO₂- und NO_x-Emissionen der RDE-Fahrten zusammen.

Tabelle 68: Zusammenfassung RDE-Messergebnisse für CO₂ und NO_x für Diesel- und PHEV-Pkw

Route	Diesel		PHEV	
	CO ₂ in g/km	NO _x in g/km	CO ₂ in g/km	NO _x in g/km
Ries01	203,95	0,096	166,21	0,102
Ries02	188,80	0,079	156,66	0,167
Ries03	216,10	0,094	197,96	0,153
Ries04	-	-	132,55	0,185
Ries05	-	-	138,18	0,173

Das hier gezeigte Beispiel aus der Praxis zeigt, dass das Emissionsverhalten eines baugleichen Fahrzeugs je nach Antriebsart stark unterschiedlich sein kann. Dasselbe konnte bereits in den vorherig angestellten Untersuchungen mithilfe der Simulation von WLTC und RWC mit PHEV- HEV- und Dieselfahrzeug gezeigt werden (Kapitel 8.2.1). Die PHEV-Variante weist zwar einen niedrigeren Verbrauch auf, die gemessenen NO_x-Emissionen lagen aber deutlich oberhalb des konventionell betriebenen Fahrzeugs ohne elektrischen Antriebsstrang. Bei Ausnutzung der Hybrid-Optionen nicht nur zur Verbrauchsminderung, sondern auch zur Senkung der Schadstoffemissionen, sollten HEV und PHEV aber auch ohne Weiteres die Emissionsniveaus konventioneller Antriebe erreichen können.

Je nach den weiteren Messergebnissen von EURO 6d Temp und EURO 6d HEV und PHEV mit Benzin- und Dieselantrieb, im Vergleich zu konventionellen Antrieben, werden in kommenden Updates des HBEFAs separate Emissionsfaktoren für diese Technologien nicht nur für Verbrauch und CO₂ zu bestimmen sein. Die Simulationsmethode im Modell PHEM könnte wesentliche Effekte vermutlich tendenziell für die Flotten repräsentativ abbilden.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zuge der hier vorliegenden Arbeit wurden im praktischen Teil Messungen von Pkw- und LNF-Emissionen am Pkw-Rollenprüfstand und im realen Betrieb auf der Straße mithilfe eines portablen Messsystems durchgeführt. Die Messergebnisse dienen einerseits als Hilfe für die Ausarbeitung der RDE-Gesetzgebung, welche sich zu Beginn dieser Dissertation erst in der Anfangsphase befand, andererseits zur Bedatung eines bereits bestehenden Emissionsmodells, dem HBEFA (Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs). Um Emissionen, die durch Fahrzeuge im Straßenverkehr verursacht werden, real abzuschätzen, bedarf es einer Sammlung an Emissionsmessdaten, die als Grundlage zur Erstellung von durchschnittlichen Emissionskennfeldern je Abgasklasse für die Simulation dienen. Im Zuge eines Updates des HBEFAs im September 2019 (HBEFA 4.1) wurde die Datenbasis, die zuvor vermehrt Messungen im Labor am Pkw-Rollenprüfstand beinhaltete, unter anderem durch die im Laufe dieser Dissertation gewonnenen RDE-Messdaten erweitert. Neben der erweiterten Messdatenbasis wurde im Zuge des HBEFAs 4.1-Updates auch erstmals die Abschätzung von Emissionsfaktoren für elektrifizierte Antriebsstränge angedacht, weshalb im theoretischen Teil der Arbeit durchschnittliche Fahrzeugmodelle für Plug-in-Hybrid- und Elektrofahrzeuge in der Simulation erstellt wurden. Mithilfe dieser Fahrzeugmodelle wurden schließlich Emissionssimulationen durchgeführt, welche im HBEFA 4.1 verwendet werden.

Die Simulation elektrifizierter Antriebsstränge stellte sich als Herausforderung dar, da die fahrzeuginterne Hybridsteuerung das Emissionsverhalten stark beeinflusst und diese möglichst real in der Simulation abgebildet werden soll. Außerdem muss unter anderem das Motorkennfeld des Elektromotors für die Simulation vorgegeben werden, welches bislang noch nicht messtechnisch erfasst wurde. Als Kennfeld für den Elektromotor wurde im ersten Schritt ein Kennfeld aus der Literatur herangezogen. Für die Validierung dieses Kennfelds wurden im Laufe dieser Dissertation vier Elektrofahrzeuge vermessen und das E-Motor-Kennfeld wurde kalibriert, sodass die Abweichung des elektrischen Verbrauchs im gesetzlich definierten Fahrzyklus (WLTC) von der Angabe laut Hersteller bzw. vom gemessenen Wert minimal ist. Dieses neue Kennfeld für den Elektromotor dient nun als neues Basiskennfeld für die Simulation von elektrifizierten Antriebssträngen in PHEM am Institut.

Der Ladezustand der Batterie und der dadurch erreichbare elektrische Fahranteil dieser Fahrzeuge im Betrieb hat wesentlichen Einfluss auf das Emissions- und Verbrauchsniveau elektrifizierter Fahrzeuge. Zur Abschätzung realistischer elektrischer Fahranteile wurde für das HBEFA 4.1-Update eine Funktion, abhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit je Fahrzyklus, gefunden. Grundlage dafür bildeten die Simulationen angenommener Fahrprofile, die einen Stadt-, Überland- und Autobahnanteil beinhalten. Durch die Variation von Weglänge des Fahrprofils und Beladungszustand der Batterie bei Start wurde der elektrische Fahranteil in der Simulation abgeschätzt und mit dessen Hilfe die für das HBEFA verwendete Funktion gefunden. Für das HBEFA 4.1 wurden die CO₂-Emissionen für PHEV- und HEV-Fahrzeuge in PHEM simuliert. Die restlichen Schadstoffkomponenten wurden von den konventionellen Fahrzeugen übernommen und unter Berücksichtigung des elektrischen Fahranteils werden die Emissionsfaktoren für das HBEFA ermittelt.

An dieser Stelle wurden ergänzende Untersuchungen zum NO_x-Emissionsverhalten für EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge (konventionell betrieben, PHEV und HEV) mithilfe der Simulation durchgeführt und mögliche Unterschiede für NO_x und Verbrauch von PHEV und HEV gegenüber rein VKM-betriebenen Diesel-Pkw abgeschätzt. Es wurde dazu die Datengrundlage von Emissionskennfeld und Vollastkurve für den VKM für die PHEV- und HEV-Variante des EURO 6d Temp Dieselfahrzeugs verändert und es konnte gezeigt werden, dass bei Ausnutzung der Hybrid-Optionen eine Verbrauchseinsparung gegenüber dem reinen VKM-Antrieb gegeben ist. Je nach Betriebsstrategie und Abstimmung des Motors können sich deutlich höhere NO_x-

Emissionen als bei konventionellen Antrieben ergeben. Unter Ausnutzung der Optimierungspotenziale können die NO_x -Emissionen auf vergleichbarem Niveau der konventionellen Diesel-Pkw liegen. Ein real vermessenes EURO 6b Dieselfahrzeug als Variante PHEV und VKM-betriebenes Fahrzeug bestätigte das in der Simulation erhaltene Ergebnis, dass bei gegebener Verbrauchseinsparung die NO_x -Emissionen von PHEV-Fahrzeugen tendenziell höher als bei reinem VKM-Antrieb liegen. Nach Vorliegen von Messungen an weiteren aktuellen PHEV und HEV wäre zu entscheiden, ob für diese Technologien eigene Emissionsfaktoren im HBEFA berechnet werden sollen.

Um das Emissionsverhalten von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang in PHEM zukünftig noch besser darzustellen, bedarf es weiterer praktischer Messungen von PHEV-, HEV- und BEV-Fahrzeugen am Pkw-Rollenprüfstand sowie im Realfahrbetrieb auf der Straße. Bei den bisher vermessenen Elektrofahrzeugen ergab sich das Problem der Zugänglichkeit für die Messung von Spannung und Strom und es wurde durch ein Wiederaufladen der elektrische Verbrauch ermittelt. In den meisten Fällen konnte keine modale Messdatenaufzeichnung erfolgen. Das verwendete Hybrid-Modell im Simulationstool PHEM wird derzeit gerade im Zuge einer Diplomarbeit überarbeitet und soll zukünftig vor allem die Rechenzeit, die aktuell hoch ist, verkürzen.

Literatur

- [1] Amtsblatt der Europäischen Union. Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017
- [2] Beermann M., Canella L., Jungmeier G., Pucker J., Hausberger S., Lipp S.: „Lebenszyklusanalyse zur gesamtheitlichen Ermittlung der Treibhausgas-Emissionen und des Primärenergie-Verbrauchs von Transportsystemen“, Endbericht, 2018
- [3] DELPHI, Worldwide Emission Standards, Passenger Cars and Light Duty Vehicles 2019/2020
- [4] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt DLR, „LADEN2020“, Schlussbericht, 2016
- [5] Hausberger S.: Skriptum „Umweltauswirkungen des Verkehrs“ Teil I, Herausgabedatum: 08.03.2015
- [6] Helms H., Lambrecht U., Jöhrens J., Pehnt M., Licbich A., Weiß U. Kämper C., et al.: „Ökologische Begleitforschung zum Flottenversuch Elektromobilität“, Endbericht, Heidelberg, Deutschland, Juni 2013
- [7] Hill, N., Windisch, E., Hausberger, S., Matzer, C., Skinner, I., et al.: Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Final Report for DG Climate Action Ref. CLIMA.C.2/FRA/2012/0006, Ricardo AEA, 2015
- [8] <http://www.auto-umwelt.at/> Aufruf der Homepage: 08.01.2020
- [9] <http://www.eafo.eu/vehicle-statistics/m1>, Aufruf der Homepage: 29.05.2017
- [10] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214008573>, Aufruf der Homepage: 20.12.2019
- [11] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/#:~:text=Im%20Jahr%202019%20wird%20der,mit%20kleinen%20Ausnahmen%20kontinuierlich%20ab.,> Aufruf der Homepage: 08.05.2020
- [12] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/287623/umfrage/neuzulassungen-von-hybridautos-in-oesterreich/>, Aufruf der Homepage: 10.01.2020
- [13] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/285808/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-oesterreich/>, Aufruf der Homepage: 10.01.2020
- [14] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4#tab-news-and-articles>, Aufruf der Homepage: 16.09.2019
- [15] <https://www.vboxautomotive.co.uk/index.php/de/products/data-loggers/vbox-iisx#ein-ausgaenge>, Aufruf der Homepage: 28.01.2020
- [16] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), „UMBRéLA“, Wissenschaftlicher Grundlagenbericht , Oktober 2011

- [17] Lipp S., Hausberger S., Schreiber L.: „Measurement and simulation of hybrid and plug in hybrid vehicles for the handbook of emission factors”, Paper TAP Tagung Zürich, Schweiz, 2017
- [18] Lipp S.: „Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen“, Zwischenberichte Los 1 bis Los 3, Graz, 2018/2019
- [19] Lohnauer L.: „Einfluss von Aufbauteile und Ugebungsbedingungen auf Real Drive Emission Ergebnisse“, Masterarbeit TU Graz, 2019
- [20] Luz R., Hausberger S., Rexeis M.: „Endbericht Hero, Optimisation tool for Hybrid Electric Recuperation and Operation Strategies“, TU Graz, 2011
- [21] Luz, R., Hausberger, S.: „User Guide for the Model PHEM”, Version 11.2, TU Graz, 2013
- [22] Matzer, C., Weller, K., Dippold, M., Lipp, S., Röck, M., Rexeis, M., Hausberger, S.: „Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1“, TU Graz, 2019
- [23] Mollenhauer K., Tschöke H.: „Handbuch Dieselmotoren“, 3.Auflage, 2007
- [24] Möller D.: „Luft: Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht“, 2003, ISBN 3-11-016431-0
- [25] Plötzl P., Moll C., Bieker G., Mock P., Li Y.: „Real-World Usage of Plug-in Hybrid Electric Vehicles“, Fraunhofer ISI, ICCT, September 2020
- [26] Rexeis, M.: „Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles“, Dissertation, TU Graz, 2009
- [27] Röck M., Rexeis M., Hausberger S.: „Report, Heavy Duty Vehicles, TANK-to-WHEELS“, JEC, Juli 2018
- [28] Sams Theodor: Skriptum „Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz“ Teil I, Herausgabedatum: 10.11.2010
- [29] Sauer U., Kowal J.: “MTZ-Motortechnische Zeitschrift Batterietechnik Grundlagen und Übersicht“, 2012
- [30] Scott J., Curran, Robert M., Wagner, Ronald L. Graves, Martin Keller, Joohney B. Green Jr.: „Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in passenger vehicles”, Knoxville, USA, 2014
- [31] Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1.Juni 2017
- [32] Verordnung Nr. 1222/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter
- [33] Wimmer A. et al.: Skriptum „Laborübung Motor und Umwelt“, Herausgabedatum SS 2018

Anhang

Tabelle 69: Definition der Fahrzeugsegmente nach EU-Kommission und KBA

Bezeichnung EU-Kommission	Beispiele	Bezeichnung KBA (Kraftfahrt-Bundesamt)
A: Kleinwagen	Smart, VW up!	Minis (Kleinwagen)
B: Kleinwagen	Fiat Punto, VW Polo	Kleinwagen
C: Mittelklasse	VW Golf	Kompaktklasse
D: Obere Mittelklasse	Volvo S70, VW Passat	Mittelklasse
E: Oberklasse	BMW 5er, Audi A6	Obere Mittelklasse
F: Luxusklasse	BMW 7er, Audi A8	Oberklasse
S: Sportwagen	Porsche 911	Sportwagen
M: Multivan	Renault Espace, Mercedes-Benz	Minivan
J: Sport Utility Vehicle (SUV, einschließlich Fahrzeuge mit Allradantrieb)	Suzuki Vitara, BMW X1	Sport Utility Vehicle, Geländewagen

Tabelle 70: Standardwerte für Nebenverbraucher konventioneller Fahrzeuge [7]

Nebenverbraucher Standardwerte in kW		NEDC	WLTC	RWC
Benzinfahrzeuge	A + B Kleinwagen + Kleinwagen	0.041	0.304	0.981
	C Mittelklasse	0.05	0.373	1.204
	D Obere Mittelklasse	0.055	0.412	1.329
	E + F + J + andere Oberklasse, Luxuswagen, Geländewagen	0.064	0.478	1.553
	Class I (<1.8 GVW) Kleintransporter	0.05	0.373	1.176
	Class II (1.8 - <2.5t GVW) Mittelklasse-Lieferwagen	0.05	0.373	1.176
	Class III (2.5 - <3.5t) Großtransporter	0.05	0.373	1.176

	GVW)					
Dieselfahrzeuge	A + B	Kleinstwagen Kleinwagen	+	0.041	0.304	0.981
	C	Mittelklasse		0.05	0.373	1.204
	D	Obere Mittelklasse		0.055	0.412	1.329
	E + F + J + andere	Oberklasse, Luxus- wagen, Geländewa- gen		0.064	0.481	1.553
	Class I (<1.8 GVW)	Kleintransporter		0.05	0.373	1.176
	Class II (1.8 - <2.5t GVW)	Mittelklasse-Liefer- wagen		0.05	0.373	1.176
	Class III (2.5 - <3.5t GVW)	Großtransporter		0.05	0.373	1.176

Tabelle 71: Kraftstoffeigenschaften EUCAR [20]

Fuel Type	Density	RON / CN	LHV	Elemental composition of Carbon	CO2 emission factor	
	kg/m ³ i.N.*	---	MJ/kg	%m	g/MJ	kg/kg
Gasoline 2016 (E0)	743.3	95	43.2	86.4	73.4	3.17
Gasoline 2016 (E5)	745.8	95	42.3	84.7	73.3	3.10
Gasoline E10	748.3	95	41.5	82.8	73.3	3.04
Gasoline High Octane. Case 1 (100 RON)	761	100	42.4	84.8	73.3	3.11
Gasoline High Octane. Case 2 (102 RON / E5eq)	759	102	42.4	84.8	73.3	3.11
Gasoline High Octane. Case 3 (102 RON/ E10eq)	759	102	41.6	83.3	73.4	3.05
Pyrolysis-based Naptha	745.0	95	43.2	86.4	73.4	3.17
Methanol	793.0	132	19.9	37.5	68.9	1.37
Ethanol	794.0	108	26.8	52.2	71.4	1.91
ED95	830	10 (CN)	24.7	54.3	80.5	1.99
Diesel (B0)	832.0	51.0	43.1	86.1	73.2	3.16
Pyrolysis-based Diesel	832.0	51.0	43.1	86.1	73.2	3.2
Diesel B7 market blend	836.1	53.0	42.7	85.4	73.4	3.13
FAME	890.0	56.0	37.2	77.3	76.2	2.83
FT Diesel	780.0	70	44.0	85.0	70.8	3.12
HVO	780.0	70	44.0	85.0	70.8	3.12
DME	670.0	55	28.4	52.2	67.3	1.91
OME	1066.6	84	19.2	43.5	83.3	1.60
LPG	0.55	**	46.0	82.4	65.7	3.02
CNG (EU mix piped NG)	0.780	**	46.6	70.8	56.1	2.60
CNG (2016 EU mix)	0.782	**	46.6	71.3	56.2	2.62
CNG (2030 EU mix)	0.782	**	46.8	71.7	56.2	2.63
H-CNG (2016)	0.775	**	48.0	73.5	56.2	2.69
H-CNG (2030)	0.775	**	48.0	73.5	56.2	2.70
LNG (EU mix. 2016/2030)	0.798	**	49.1	75.6	56.4	2.77
Biogas (2016/2030)	0.752	**	46.1	71.3	56.7	2.61
Hydrogen (CGH2 & cCGH2)	0.084	#	120	0	0	0

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

Tabelle 72: Gewichtungsfaktoren der HBEFA-Zyklen für Deutschland-Mix

Traffic situation ID	Traffic situation	Gradient ID	Weighting factor	PHEM cycle
110081	RUR/MW/80/Freeflow	0%	0.579%	9853
110081	RUR/MW/80/Freeflow	+/-2%	0.404%	9853
110081	RUR/MW/80/Freeflow	+/-4%	0.054%	9853
110081	RUR/MW/80/Freeflow	+/-6%	0.003%	9853
110083	RUR/MW/80/Satur.	0%	0.104%	9214
110083	RUR/MW/80/Satur.	+/-2%	0.076%	9214
110083	RUR/MW/80/Satur.	+/-4%	0.011%	9214
110083	RUR/MW/80/Satur.	+/-6%	0.000%	9214
110101	RUR/MW/100/Freeflow	0%	2.307%	9888
110101	RUR/MW/100/Freeflow	+/-2%	1.096%	9888
110101	RUR/MW/100/Freeflow	+/-4%	0.217%	9888
110101	RUR/MW/100/Freeflow	+/-6%	0.065%	9888
110103	RUR/MW/100/Satur.	0%	0.508%	9230
110103	RUR/MW/100/Satur.	+/-2%	0.251%	9230
110103	RUR/MW/100/Satur.	+/-4%	0.051%	9230
110103	RUR/MW/100/Satur.	+/-6%	0.014%	9230
110104	RUR/MW/100/St+Go	0%	0.282%	9105
110104	RUR/MW/100/St+Go	+/-2%	0.150%	9105
110104	RUR/MW/100/St+Go	+/-4%	0.031%	9105
110104	RUR/MW/100/St+Go	+/-6%	0.008%	9105
110121	RUR/MW/120/Freeflow	0%	1.669%	9905
110121	RUR/MW/120/Freeflow	+/-2%	1.019%	9905
110121	RUR/MW/120/Freeflow	+/-4%	0.155%	9905
110121	RUR/MW/120/Freeflow	+/-6%	0.138%	9905
110123	RUR/MW/120/Satur.	0%	0.212%	9239
110123	RUR/MW/120/Satur.	+/-2%	0.127%	9239
110123	RUR/MW/120/Satur.	+/-4%	0.020%	9239
110123	RUR/MW/120/Satur.	+/-6%	0.017%	9239
110131	RUR/MW/130/Freeflow	0%	1.070%	9911
110131	RUR/MW/130/Freeflow	+/-2%	0.512%	9911
110131	RUR/MW/130/Freeflow	+/-4%	0.117%	9911
110131	RUR/MW/130/Freeflow	+/-6%	0.018%	9911
110133	RUR/MW/130/Satur.	0%	0.094%	9243
110133	RUR/MW/130/Satur.	+/-2%	0.044%	9243
110133	RUR/MW/130/Satur.	+/-4%	0.010%	9243

Traffic situation ID	Traffic situation	Gradient ID	Weighting factor	PHEM cycle
110133	RUR/MW/130/Satur.	+/-6%	0.002%	9243
110141	RUR/MW/>130/Freeflow	0%	9.629%	9256
110141	RUR/MW/>130/Freeflow	+/-2%	4.610%	9256
110141	RUR/MW/>130/Freeflow	+/-4%	1.050%	9256
110141	RUR/MW/>130/Freeflow	+/-6%	0.165%	9256
110143	RUR/MW/>130/Satur.	0%	0.844%	9246
110143	RUR/MW/>130/Satur.	+/-2%	0.399%	9246
110143	RUR/MW/>130/Satur.	+/-4%	0.089%	9246
110143	RUR/MW/>130/Satur.	+/-6%	0.015%	9246
120082	RUR/Trunk/80/Heavy	0%	0.136%	9799
120082	RUR/Trunk/80/Heavy	+/-2%	0.138%	9799
120082	RUR/Trunk/80/Heavy	+/-4%	0.095%	9799
120082	RUR/Trunk/80/Heavy	+/-6%	0.071%	9799
120101	RUR/Trunk/100/Freeflow	0%	8.397%	9249
120101	RUR/Trunk/100/Freeflow	+/-2%	3.879%	9249
120101	RUR/Trunk/100/Freeflow	+/-4%	0.819%	9249
120101	RUR/Trunk/100/Freeflow	+/-6%	0.231%	9249
120102	RUR/Trunk/100/Heavy	0%	0.379%	9854
120102	RUR/Trunk/100/Heavy	+/-2%	0.346%	9854
120102	RUR/Trunk/100/Heavy	+/-4%	0.203%	9854
120102	RUR/Trunk/100/Heavy	+/-6%	0.095%	9854
120111	RUR/Trunk/110/Freeflow	0%	1.072%	9252
120111	RUR/Trunk/110/Freeflow	+/-2%	0.446%	9252
120111	RUR/Trunk/110/Freeflow	+/-4%	0.080%	9252
120111	RUR/Trunk/110/Freeflow	+/-6%	0.020%	9252
130081	RUR/Distr/80/Freeflow	0%	5.009%	9831
130081	RUR/Distr/80/Freeflow	+/-2%	2.545%	9831
130081	RUR/Distr/80/Freeflow	+/-4%	0.515%	9831
130081	RUR/Distr/80/Freeflow	+/-6%	0.105%	9831
130082	RUR/Distr/80/Heavy	0%	0.279%	9775
130082	RUR/Distr/80/Heavy	+/-2%	0.294%	9775

Traffic situation ID	Traffic situation	Gradient ID	Weighting factor	PHEM cycle
130082	RUR/Distr/80/Heavy	+/-4%	0.170%	9775
130082	RUR/Distr/80/Heavy	+/-6%	0.088%	9775
131082	RUR/Distr-sin./80/Heavy	0%	0.096%	9228
131082	RUR/Distr-sin./80/Heavy	+/-2%	0.117%	9228
131082	RUR/Distr-sin./80/Heavy	+/-4%	0.053%	9228
131082	RUR/Distr-sin./80/Heavy	+/-6%	0.063%	9228
140081	RUR/Local/80/Freeflow	0%	9.880%	9816
140081	RUR/Local/80/Freeflow	+/-2%	4.945%	9816
140081	RUR/Local/80/Freeflow	+/-4%	1.029%	9816
140081	RUR/Local/80/Freeflow	+/-6%	0.128%	9816
140082	RUR/Local/80/Heavy	0%	0.879%	9756
140082	RUR/Local/80/Heavy	+/-2%	0.872%	9756
140082	RUR/Local/80/Heavy	+/-4%	0.441%	9756
140082	RUR/Local/80/Heavy	+/-6%	0.295%	9756
141082	RUR/Local-sin./80/Heavy	0%	0.361%	9223
141082	RUR/Local-sin./80/Heavy	+/-2%	0.322%	9223
141082	RUR/Local-sin./80/Heavy	+/-4%	0.140%	9223
141082	RUR/Local-sin./80/Heavy	+/-6%	0.233%	9223
250032	URB/Access/30/Heavy	0%	1.640%	9151
250032	URB/Access/30/Heavy	+/-2%	0.802%	9151
250032	URB/Access/30/Heavy	+/-4%	0.155%	9151
250032	URB/Access/30/Heavy	+/-6%	0.052%	9151
250033	URB/Access/30/Satur.	0%	0.508%	9138
250033	URB/Access/30/Satur.	+/-2%	0.249%	9138
250033	URB/Access/30/Satur.	+/-4%	0.048%	9138
250033	URB/Access/30/Satur.	+/-6%	0.016%	9138
230051	URB/Distr/50/Freeflow	0%	0.273%	9703
230051	URB/Distr/50/Freeflow	+/-2%	0.130%	9703
230051	URB/Distr/50/Freeflow	+/-4%	0.024%	9703
230051	URB/Distr/50/Freeflow	+/-6%	0.008%	9703
230052	URB/Distr/50/Heavy	0%	5.459%	9183
230052	URB/Distr/50/Heavy	+/-2%	2.636%	9183
230052	URB/Distr/50/Heavy	+/-4%	0.501%	9183
230052	URB/Distr/50/Heavy	+/-6%	0.160%	9183
230053	URB/Distr/50/Satur.	0%	2.226%	9152
230053	URB/Distr/50/Satur.	+/-2%	1.078%	9152
230053	URB/Distr/50/Satur.	+/-4%	0.206%	9152

Traffic situation ID	Traffic situation	Gradient ID	Weighting factor	PHEM cycle
230053	URB/Distr/50/Satur.	+/-6%	0.066%	9152
230054	URB/Distr/50/St+Go	0%	0.826%	9047
230054	URB/Distr/50/St+Go	+/-2%	0.396%	9047
230054	URB/Distr/50/St+Go	+/-4%	0.077%	9047
230054	URB/Distr/50/St+Go	+/-6%	0.026%	9047
230071	URB/Distr/70/Freeflow	0%	1.089%	9779
230071	URB/Distr/70/Freeflow	+/-2%	0.527%	9779
230071	URB/Distr/70/Freeflow	+/-4%	0.101%	9779
230071	URB/Distr/70/Freeflow	+/-6%	0.032%	9779
230072	URB/Distr/70/Heavy	0%	0.803%	9729
230072	URB/Distr/70/Heavy	+/-2%	0.389%	9729
230072	URB/Distr/70/Heavy	+/-4%	0.074%	9729
230072	URB/Distr/70/Heavy	+/-6%	0.024%	9729
230073	URB/Distr/70/Satur.	0%	0.546%	9176
230073	URB/Distr/70/Satur.	+/-2%	0.268%	9176
230073	URB/Distr/70/Satur.	+/-4%	0.053%	9176
230073	URB/Distr/70/Satur.	+/-6%	0.019%	9176
250052	URB/Access/50/Heavy	0%	1.508%	9175
250052	URB/Access/50/Heavy	+/-2%	0.776%	9175
250052	URB/Access/50/Heavy	+/-4%	0.159%	9175
250052	URB/Access/50/Heavy	+/-6%	0.061%	9175
250053	URB/Access/50/Satur.	0%	1.508%	9147
250053	URB/Access/50/Satur.	+/-2%	0.776%	9147
250053	URB/Access/50/Satur.	+/-4%	0.159%	9147
250053	URB/Access/50/Satur.	+/-6%	0.061%	9147

Tabelle 73: Massenabschätzung HBEFA 4.1 BEV, HEV und PHEV

Masse der jew. Komp. In kg		BEV	BEV (2019)	PHEV EU 6d D	PHEV EU 6dTemp D	PHEV EU 6d G	HEV EU 6d D	HEV EU 6d G	HEV EU 6d Temp D	HEV EU 6d Temp G
Basisfahrzeug HBEFA 4.1		1237	1178	1647	1640	1253	1647	1253	1640	1247
ICE Ottomotor	Subtrahiert	165	165							
Abgasnachbehandlungssystem Otto		15	15							
Starterbatterie		15	15				15	15	15	15
Tank		15	15							
90% Tankinhalt HBEFA 4.1		33.56	33.56	45.15	45.15	33.56	45.15	33.56	45.15	33.56
Tankvolumen 90% befüllt			38	38	27	38	27	38	27	
E-Motor	Addiert	76	76	63	63	52	22	18	22	17
Spannungswandler		5.00	5.00	5	5	5	5	5	5	5
Umrichter		10.00	10.00	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Batterie		409	409	124	124	124	30	30	30	30
Ladegerät		12	12	12	12	12				
Zusätzliche Verkabelung		56	56	56	56	56	56	56	56	56
Fahrzeugmasse		1562	1503	1907	1900	1502	1746	1347	1738	1341

Tabelle 74: Massenabschätzung HBEFA 4.1 PHEV, HEV

Masse der jew. Komp. In kg		PHEV EU 6b D	PHEV EU 6b G	HEV EU 6b D	HEV EU 6b G	PHEV EU 5 D	PHEV EU 5 G	HEV EU 5 D	HEV EU 5 G	PHEV EU 4 D	PHEV EU 4 G	HEV EU 4 D	HEV EU 4 G
Basisfahrzeug HBEFA 4.1		1628	1237	1628	1237	1597	1212	1597	1212	1545	1194	1545	1194
ICE Ottomotor	Subtrahiert												
Abgasnachbehandlungssystem Otto				15	15			15	15			15	15
Starterbatterie													
Tank													
90% Tankinhalt HBEFA 4.1		45.15	33.56	45.15	33.56	45.15	33.56	45.15	33.56	45.15	33.56	45.15	33.56
Tankvolumen 90% befüllt		38	27	38	27	38	27	38	27	38	27	38	27
E-Motor	Addiert	60	48	27	16	55	43	19	14	50	40	17	13
Spannungswandler		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Umrichter		7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5		
Batterie		124	124	30	30	124	124	30	30	124	124	30	30
Ladegerät		12	12			12	12			12	12		
Zusätzliche Verkabelung		56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Fahrzeugmasse		1885	1483	1731	1330	1849	1453	1692	1303	1792	1431	1630	1276

Tabelle 75: Parameterabschätzung HEV-Dieselfahrzeuge fürs HBEFA 4.1

Komp./Parameter	HEV D					
	Einheit	EURO 6b	EURO 5	EURO 6d	EURO 4	EURO 6d Temp
Tankvolumen	[l]	50	50	50	50	50
Batteriekapazität	[kWh]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Energiedichte Batterie	[Wh/kg]	50	50	50	50	50
Batteriespannung (Nominalspannung)	[V]	250	250	250	250	250
Spannungswandler	[kg]	5	5	5	5	5
Umrichter	[kg]	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Drehmoment E-Motor	[Nm]	200	200	200	200	200
Leistung E-Motor	[kW]	34	31	35	29	35
Nenn Drehzahl E-Motor	[U/min]	1194	1194	1194	1194	1194
Zusätzliche Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	0	0	0	0	0
Leistung ICE	[kW]	94	87	98	80	97

Tabelle 76: Parameterabschätzung HEV-Benzinfahrzeuge fürs HBEFA 4.1

Komp./Parameter	HEV G					
	Einheit	EURO 6b	EURO 5	EURO 6d	EURO 4	EURO 6d Temp
Tankvolumen	[l]	40	40	40	40	40
Batteriekapazität	[kWh]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Energiedichte Batterie	[Wh/kg]	50	50	50	50	50
Batteriespannung (Nominalspannung)	[V]	250	250	250	250	250
Kapazität	[Ah]	6	6	6	6	6
Spannungswandler	[kg]	5	5	5	5	5
Umrichter	[kg]	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Drehmoment E-Motor	[Nm]	200	200	200	200	200
Leistung E-Motor	[kW]	28	25	29	23	29
Zusätzliche Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	0	0	0	0	0
Nennndrehzahl E-Motor	[U/min]	1194	1194	1194	1194	1194
Leistung ICE	[kW]	77	69	82	65	80

Tabelle 77: Parameterabschätzung PHEV-Dieselfahrzeuge fürs HBEFA 4.1

Komp./Parameter	PHEV D					
		EURO 6b	EURO 5	EURO 6d	EURO 4	EURO 6d Temp
Tankvolumen	[l]	50	50	50	50	50
Batteriespannung (Nominalspannung)	[V]	314	314	314	314	314
Batteriekapazität	[kWh]	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
Energiedichte Batterie	[Wh/kg]	80	80	80	80	80
Kapazität	[Ah]	32	32	32	32	32
Umrichter	[kg]	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Spannungswandler	[kg]	5	5	5	5	5
Ladegerät	[kg]	12	12	12	12	12
Drehmoment E-Motor	[Nm]	200	200	200	200	200
Leistung E-Motor	[kW]	80	75	84	69	0
Nennndrehzahl E-Motor	[U/min]	2865	2865	2865	2865	2865
zusätzliche Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Leistung ICE	[kW]	94	87	98	80	97

Tabelle 78: Parameterabschätzung PHEV-Benzinfahrzeuge fürs HBEFA 4.1

Komp./Parameter	PHEV G					
		EURO 6b	EURO 5	EURO 6d	EURO 4	EURO 6d Temp
Tankvolumen	[l]	40	40	40	40	40
Batteriespannung (Nominalspannung)	[V]	314	314	314	314	314
Batteriekapazität	[kWh]	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
Energiedichte Batterie	[Wh/kg]	80	80	80	80	80
Kapazität	[Ah]	32	32	32	32	32
Umrichter	[kg]	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Spannungswandler	[kg]	5	5	5	5	5
Ladegerät	[kg]	12	12	12	12	12
Drehmoment E-Motor	[Nm]	200	200	200	200	200
Leistung E-Motor	[kW]	66	59	71	56	56
Nennndrehzahl E-Motor	[U/min]	2865	2865	2865	2865	2865
zusätzliche Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Leistung ICE	[kW]	77	69	82	65	80

Tabelle 79: Parameterabschätzung BEV HBEFA 4.1 und BEV 2019

Komp./Parameter	BEV		
	Einheit	HBEFA 4.1	BEV 2019
Batteriekapazität	[kWh]	45	45
Batteriespannung (Nominalspannung)	[V]	350	350
Energiedichte Batterie	[Wh/kg]	110	110
Kapazität	[Ah]	129	129
Umrichter	[kg]	10	10
Spannungswandler	[kg]	5	5
Ladegerät	[kg]	12	12
Drehmoment E-Motor	[Nm]	300	300
Zusätzliche Leistung der Nebenverbraucher	[kW]	0.3	0
Nenn Drehzahl E-Motor	[U/min]	2865	2865
Leistung E-Motor	[kW]	99	99

Verwendete Messtechnik:

Racelogic VBox IISX 5Hz:

Für die Aufzeichnung von Geschwindigkeit, Koordinaten und Seehöhe bei den Realfahrten mit den Elektrofahrzeugen, wurde als Datenlogger die VBox von Racelogic verwendet. Die VBox ist ein 5 Hz GPS Datenlogger, der über die Bordspannung des Fahrzeugs versorgt wird. Die Antenne als Empfänger wird am Dach des Fahrzeugs platziert. Die Datenaufzeichnung erfolgt auf einer SD-Karte. Abbildung 82 zeigt die Ein- und Ausgangskanäle der VBox.

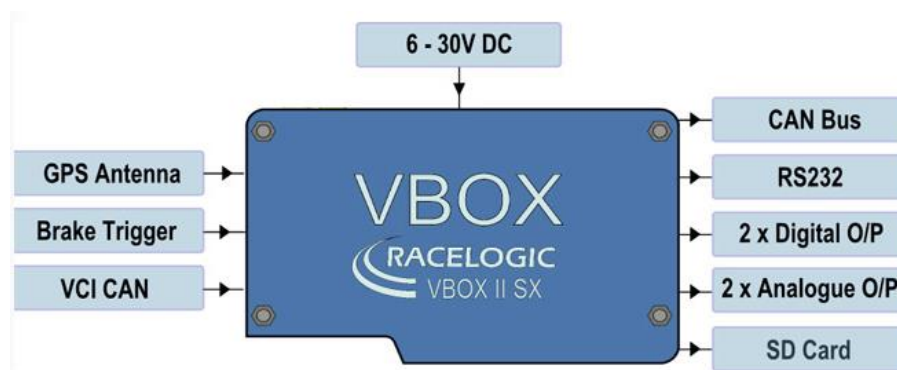


Abbildung 82: Darstellung der VBOX

Voltcraft-Energiemessgerät:

Für die Messung der benötigten Energie für das Wiederbeladen der Batterie von Elektrofahrzeugen wurde ein Energiemessgerät der Firma Voltcraft (Abbildung 83) verwendet.



Abbildung 83: Voltcraft Energy Logger 4000

In Tabelle 80 sind die Gerätespezifikationen des Voltcraft Energiemessgeräts zusammengefasst.

Tabelle 80: Voltcraft Energy Logger 4000 Technische Daten

Voltcraft Energy Logger 4000		
Max. Leistung	[kW]	3,5
Max. Strom	[A]	15
Messbereich	[W]	0,1 - 3500
Betriebsspannung	[V]	230
Genauigkeit (3500 W)	[%]	+/-1% vom Messwert
Genauigkeit (2-5 W)	[%]	+/-5% vom Messwert
Genauigkeit (<2 W)	[%]	+/-15% vom Messwert

Tabelle 81: Koeffizienten zur Berechnung der Nutzfaktoren [1]

C ₁	26,25
C ₂	-38,94
C ₃	-631,05
C ₄	5964,83
C ₅	-25094,60
C ₆	60380,21

C_7	-87517,16
C_8	75513,77
C_9	-35748,77
C_{10}	7154,94
d_n [km]	800
k	10

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung der Rohemissionen eines Ottomotors und Dieselmotors [23]	4
Abbildung 2: Zeitplan Emissionsstandards für Pkw EU, USA, Japan und China [3]	8
Abbildung 3: Geschwindigkeitsverlauf NEDC.....	9
Abbildung 4: Geschwindigkeitsverlauf WLTC [3].....	9
Abbildung 5: Funktionsschema Pkw-Rollenprüfstand [33].....	10
Abbildung 6: Beispielhaftes EU-Reifenlabel [32]	13
Abbildung 7: Kraftstoffeffizienzklassen [32]	14
Abbildung 8: Fahrwiderstandspolynome Diesel-Pkw EURO 6.....	14
Abbildung 9: PEMS im Fahrzeug eingebaut.....	17
Abbildung 10: Tabelle der u_{gas} -Werte für diverse Kraftstoffe [31]	18
Abbildung 11: CO ₂ -charakteristische-Kurve [3].....	22
Abbildung 12: Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf der Ries-Route	24
Abbildung 13: Gemessene Fahrdynamik und CO ₂ eines EURO 6c Dieselfahrzeugs für Realfahrten und Rollenzyklen	24
Abbildung 14: Leistung am Rad über Drehzahl für WLTC, NEDC und RDE (1 Punkt entspricht 1 Sek. Messung)	25
Abbildung 15: Result Evaluation Faktor über das CO ₂ -Verhältnis RDE/WLTC [3]	27
Abbildung 16: Geschwindigkeitsverlauf IUFC.....	33
Abbildung 17: Geschwindigkeitsverlauf ERMES	34
Abbildung 18: Geschwindigkeitsverlauf CADC.....	34
Abbildung 19: Gemessenes NO _x EURO 6d Temp Dieselfahrzeuge.....	37
Abbildung 20: Gemessenes NO _x EURO 6d Temp Benzinfahrzeuge	37
Abbildung 21: Schema PHEM-Modell [21]	38
Abbildung 22: Schema der unterschiedlichen Antriebsstränge für PHEM [27].....	39
Abbildung 23: Energie- und Leistungsdichte verschiedener Batterietechnologien [29]	40
Abbildung 24: Batteriespannung über nutzbaren Bereich der Batterie.....	41
Abbildung 25: Steuerkennlinie für PHEM [20]	43
Abbildung 26: Ermittlung der Lage der Steuerkennlinie	44
Abbildung 27: Wirkungsgradkennfeld Elektromotor	45
Abbildung 28: Volllastkurve Elektromotor.....	46
Abbildung 29: Anzahl der neu zugelassenen Elektrofahrzeuge in Österreich von 2008 bis 2018 [13]	47
Abbildung 30: Anzahl der Neuzulassungen Hybridfahrzeuge und Plug-in-Hybridfahrzeuge in Österreich von 2008 bis 2018 [12].....	48

Abbildung 31: Schema der Well-To-Wheel-Betrachtung [10]	48
Abbildung 32: Massenabschätzung für E-Motor ASM oder PSM [2].....	50
Abbildung 33: Beispielhafte Geschwindigkeitsverläufe von Ausrollversuchen mit dem Tesla Model S in Richtung Norden	54
Abbildung 34: Fahrwiderstandspolynom für den Tesla Model S	55
Abbildung 35: Kennfeld Elektromotor	57
Abbildung 36: Messergebnisse BMW i3	59
Abbildung 37: Messergebnisse Renault Zoe.....	60
Abbildung 38: Vereinfachtes Energieflussdiagramm für das Laden mit Wechselstrom [6] ...	61
Abbildung 39: Neues Kennfeld nach Anpassung (KF V2).....	62
Abbildung 40: Vergleich Simulation und Messung VW e Golf	65
Abbildung 41: Vergleich Simulation und Messung Tesla Model S.....	67
Abbildung 42: Vergleich Simulation und Messung/Herstellerangaben Renault Zoe	69
Abbildung 43: Vergleich Simulation und Messung/Herstellerangaben BMW i3.....	71
Abbildung 44: TTW-CO ₂ -Emissionen für Ø PHEV und Ø Benzin-Pkw EU6 bei K _{EV} =0% ...	75
Abbildung 45: TTW CO ₂ -Emissionen für Ø PHEV und Ø Benzin- Pkw EU6 bei K _{EV} =35%	76
Abbildung 46: Elektrischer Fahranteil über durchschnittlicher Geschwindigkeit [17]	77
Abbildung 47: Standard-Fahrprofil mit 20 km [17].....	79
Abbildung 48: SOC-Verteilung (Annahme TU Graz) [17]	81
Abbildung 49: Wegstreckenverteilung [17].....	81
Abbildung 50: K _{EV} -Funktion für HBEFA 4.1.....	82
Abbildung 51: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen für die Stromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2019 [14].....	83
Abbildung 52: Entwicklung der CO ₂ -Emissionen für die Stromerzeugung in Österreich, Deutschland und der EU von 1990 bis 2014 [14]	84
Abbildung 53: EC BEV EURO 6b Basisvariante für HBEFA-Zyklen (Verkehrssituation Deutschland) mit 0% Steigung.....	85
Abbildung 54: Vergleich elektrischer Verbrauch von BEV EURO 6b Basis Variante und BEV 2019.....	87
Abbildung 55 EC BEV 2019 für HBEFA-Zyklen (Verkehrssituation Deutschland) mit 0% Steigung.....	88
Abbildung 56: CO ₂ TTW im Deutschland-Mix HBEFA 4.1	90
Abbildung 57: Elektrischer Verbrauch PEHVs und BEVs im Deutschland-Mix HBEFA 4.1	91
Abbildung 58: Neuzulassungen Hybridfahrzeuge in Österreich 2019 [12].....	93
Abbildung 59: CO ₂ im HBEFA 4.1 Verkehrssituationsmix von Deutschland für HEVs EURO 6d Temp und EURO 6d D und G.....	93
Abbildung 60: NO _x -Kennfeld (Tailpipe) HBEFA 4.1 für Dieselmotoren EURO 6b	102
Abbildung 61: Vergleich NO _x EURO 6b Diesel-Pkw, PHEV und HEV.....	102

Abbildung 62: Lastpunkte des EURO 6b Diesel- und EURO 6b Hybridfahrzeugs im WLTC (jeder Punkt stellt eine Sekunde im Betrieb dar).....	103
Abbildung 63: Vergleich FC EURO 6b D-Pkw, PHEV und HEV	104
Abbildung 64: Vergleich simulierte NO _x -Emissionen mit EURO 6b Diesel-Kennfeld bei unterschiedlichem Start-SOC	105
Abbildung 65: Vergleich simulierter FC mit EURO 6b Diesel-Kennfeld bei unterschiedlichem Start-SOC	105
Abbildung 66: NO _x -Kennfeld (Tailpipe) HBEFA 4.1 für Dieselmotoren EURO 6d Temp..	106
Abbildung 67: Vergleich NO _x EURO 6d Temp-Diesel-Pkw, PHEV und HEV	107
Abbildung 68: Lastpunkte des EURO 6d Temp Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC ...	108
Abbildung 69: Vergleich FC EURO 6d Temp Diesel Pkw, PHEV und HEV	109
Abbildung 70: NO _x -Kennfeld (Tailpipe) HBEFA 4.1 für Dieselmotoren EURO 6d	110
Abbildung 71: Vergleich NO _x EURO 6d Diesel-Pkw, PHEV und HEV.....	110
Abbildung 72: Lastpunkte des EURO 6d Diesel- und Hybridfahrzeugs im WLTC.....	111
Abbildung 73: Vergleich FC EURO 6d Diesel-Pkw, PHEV und HEV	112
Abbildung 74: NO _x -Kennfeld HBEFA 4.1 und Pkw 1 (EURO 6d Temp)	114
Abbildung 75: Vergleich simuliertes NO _x für Euro 6d Temp Diesel, PHEV, HEV und Diesel-Pkw 1, alle mit NO _x -Kennfeldvariante V1.....	114
Abbildung 76: Vergleich simulierter FC Euro 6d Temp D, PHEV, HEV und D-Pkw 1 V1.	115
Abbildung 77: Lastpunkte HEV-Fahrzeug EURO 6d Temp im WLTC V0 und V2.....	116
Abbildung 78: Simuliertes NO _x für EURO 6d Temp PHEV und HEV	117
Abbildung 79: Vergleich simulierte NO _x EURO 6d Temp PHEV, HEV und D	119
Abbildung 80: Messergebnisse RDE EURO 6b Diesel-Pkw.....	120
Abbildung 81: Messergebnisse RDE EURO 6b PHEV-Diesel-Pkw	121
Abbildung 82: Darstellung der VBOX.....	136
Abbildung 83: Voltcraft Energy Logger 4000	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Emissionsnormen Diesel-Pkw [3]	7
Tabelle 2: Übersicht Emissionsnormen Benzin-Pkw [3]	7
Tabelle 3: Grenzwerte für Otto- und Diesel-Pkw EURO 6 [3].....	8
Tabelle 4: Randbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt [3].....	20
Tabelle 5: Dynamikparameter für eine gültige RDE-Fahrt [3].....	21
Tabelle 6: Punkte der CO ₂ -charakteristischen Kurve für das Fahrzeug [3].....	21
Tabelle 7: Parameter für die Methode der gleitenden Mittelungsfenster [3]	22
Tabelle 8: Umgebungsbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt [3].....	23
Tabelle 9: Routen-Daten RDE-Routen TU Graz	23
Tabelle 10: Konformitätsfaktoren für EURO 6d RDE [3].....	26
Tabelle 11: Relevantes CO ₂ im WLTC für die Gewichtung [3]	28
Tabelle 12: Übersicht Messungen für HBEFA der TU Graz	32
Tabelle 13: Messprogramm Pkw -Rolle.....	35
Tabelle 14: Beispielhafte Emissionsmessdaten der RDE für die Kategorie Stadt.....	35
Tabelle 15: Beispielhafte Emissionsmessdaten für gesamten RDE-Trip und WLTC	36
Tabelle 16: Zusätzliche Inputdaten für PHEV-, HEV- und BEV-Simulation in PHEM	40
Tabelle 17: Massenabschätzung BEV, HEV und PHEV für HBEFA-Simulation	49
Tabelle 18: Fahrzeugdaten VW e Golf	52
Tabelle 19: Vergleich Messung und Simulation VW-e-Golf für Rollenzyklen.....	53
Tabelle 20: Ladeverluste VW e Golf	53
Tabelle 21: Fahrzeugdaten Tesla Model S	54
Tabelle 22: Parameter beim Ausrollversuch mit dem Tesla Model S.....	55
Tabelle 23: Vergleich Messung und Simulation Tesla Model S.....	56
Tabelle 24: Fahrzeugspezifikationen vermessener Elektrofahrzeuge	58
Tabelle 25: Randbedingungen Messfahrten BMW i3.....	58
Tabelle 26: Randbedingungen Messfahrten Renault Zoe	59
Tabelle 27: Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher [16]	63
Tabelle 28: Eingabedaten für die Simulation VW e Golf	64
Tabelle 29: Übersicht Simulationsergebnisse VW e Golf	65
Tabelle 30: Eingabedaten für die Simulation Tesla Model S.....	66
Tabelle 31: Simulationsergebnisse Tesla Model S	67
Tabelle 32: Eingabedaten für die Simulation Renault Zoe	68
Tabelle 33: Simulationsergebnisse Renault Zoe	69
Tabelle 34: Eingabedaten für die Simulation BMW i3.....	70

Tabelle 35: Simulationsergebnisse BMW i3.....	71
Tabelle 36: Kalibrierergebnisse Elektromotor-Kennfeld.....	72
Tabelle 37: Statistik der zehn meistverkauften PHEVs in Europa im Jahr 2016 [9].....	73
Tabelle 38: Fahrzeugspezifikationen durchschnittliches PHEV	74
Tabelle 39: Simulierte TTW- und WTW-CO ₂ -Emissionen für konstanten K _{EV} Variante 1	76
Tabelle 40: Simulierte TTW- und WTW-CO ₂ -Emissionen für variablen K _{EV} Variante 2.....	78
Tabelle 41: Elektrischer Fahranteil mit Strom vom Netz über Geschwindigkeit und Fahrstrecke bei unterschiedlichen Start-SOCs [17].....	80
Tabelle 42: Fahrzeugdaten BEV EURO 6b für HBEFA 4.1.....	85
Tabelle 43: Fahrzeugdaten BEV 2019	86
Tabelle 44: Simulierter elektrischer Verbrauch in Wh/100km für BEVs EURO 6b und BEV 2019.....	88
Tabelle 45: Simuliertes CO ₂ für BEVs EURO 6b und BEV 2019.....	88
Tabelle 46: Fahrzeugdaten PHEVs für HBEFA-Simulation.....	89
Tabelle 47: Ergebnisse PHEV-Simulation fürs HBEFA 4.1.....	90
Tabelle 48: Elektrischer Verbrauch PHEV und BEV im Deutschland-Mix HBEFA 4.1.....	91
Tabelle 49: HEV-Flotten-Anteile im HBEFA 4.1	92
Tabelle 50: Simulierte Ergebnisse HEVs im HBEFA 4.1 Deutschland-Mix	94
Tabelle 51: Fahrzeugdaten PHEV, HEV und Diesel-Pkw für Vergleich	98
Tabelle 52: Ermittlung der UF-gewichteten CO ₂ - und NO _x -Emissionen.....	100
Tabelle 53: Vergleich FC und NO _x im WLTC nach unterschiedlichen Gewichtungsmethoden für das EURO 6d Temp-PHEV	101
Tabelle 54: Simulierte NO _x mit HBEFA 4.1 EURO 6b Diesel-Kennfeld	104
Tabelle 55: Simulierter Verbrauch mit HBEFA 4.1 Kennfeld.....	104
Tabelle 56: Simulationsergebnisse NO _x und FC mit EURO 6b Diesel-Kennfeld bei unterschiedlichem Start-SOC.....	106
Tabelle 57: Simuliertes NO _x mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Temp-Dieselmotoren	108
Tabelle 58: Simulierter FC mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Temp-Dieselmotoren	109
Tabelle 59: Simuliertes NO _x mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Dieselmotoren.....	111
Tabelle 60: Simulierter Verbrauch mit HBEFA 4.1-Kennfeld für EURO 6d Dieselmotoren	112
Tabelle 61: Übersicht PHEM-Simulationsvorgaben für Varianten V0, V1 und V2.....	113
Tabelle 62: Fahrzeugdaten Ø D Pkw HBEFA 4.1 und D Pkw 1	113
Tabelle 63: Simuliertes NO _x V1	115
Tabelle 64: Simulierter FC mit EURO 6d Temp Diesel Kennfeld V1	116
Tabelle 65: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für NO _x für V0, V1 und V2 PHEV- und HEV-Fahrzeuge EURO 6d Temp Diesel	118
Tabelle 66: Reduktion der NO _x -Emissionen für PHEV UF und HEV delta SOC 0.....	118

Tabelle 67: Fahrzeugdaten EU6b Pkw D und PHEV	120
Tabelle 68: Zusammenfassung RDE-Messergebnisse für CO ₂ und NO _x für Diesel- und PHEV-Pkw.....	122
Tabelle 69: Definition der Fahrzeugsegmente nach EU-Kommission und KBA	128
Tabelle 70: Standardwerte für Nebenverbraucher konventioneller Fahrzeuge [7]	128
Tabelle 71: Kraftstoffeigenschaften EUCAR [20].....	129
Tabelle 72: Gewichtungsfaktoren der HBEFA-Zyklen für Deutschland-Mix.....	130
Tabelle 73: Massenabschätzung HBEFA 4.1 BEV, HEV und PHEV	134
Tabelle 74: Massenabschätzung HBEFA 4.1 PHEV, HEV	134
Tabelle 75: Parameterabschätzung HEV-Dieselfahrzeuge fürs HBEFA 4.1	134
Tabelle 76: Parameterabschätzung HEV-Benzinfahrzeuge fürs HBEFA 4.1	135
Tabelle 77: Parameterabschätzung PHEV-Dieselfahrzeuge fürs HBEFA 4.1.....	135
Tabelle 78: Parameterabschätzung PHEV-Benzinfahrzeuge fürs HBEFA 4.1.....	135
Tabelle 79: Parameterabschätzung BEV HBEFA 4.1 und BEV 2019.....	136
Tabelle 80: Voltcraft Energy Logger 4000 Technische Daten	137
Tabelle 81: Koeffizienten zur Berechnung der Nutzfaktoren [1]	137