



Martin Opetnik, Bsc.

# **Messung und Simulation von Otto-PKW Emissionen für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplomingenieur  
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

### **Technischen Universität Graz**

Vorstand

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

Betreuer

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

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Februar 2019



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



## Vorwort

Als ich im Jahr 2016 meine Bachelorarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik schrieb, war für mich klar, dass ich meine Schwerpunkte im Bereich der Motor- und Antriebstechnik setzen möchte. Da ich mich bereits in der Bachelorarbeit mit dem Thema Emissionen beschäftigte und mich die Themen Verkehr, Umwelt und Schadstoffemissionen sehr interessieren, wusste ich, dass sich meine Masterarbeit mit dem Thema Schadstoffbildung und Emissionsminimierung beschäftigen wird. Durch die Vorlesungen Schadstoffbildung, Emissionsminimierung und Umweltauswirkungen des Verkehrs wurde ich auf das Thema der Emissionsmodelle aufmerksam, mit welchen ich mich in dieser Arbeit beschäftigte.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Hausberger recht herzlich für die Unterstützung und die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken.

Ein großer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer, der bei Fragen oder Problemen jederzeit zur Verfügung stand und durch seine fachliche und persönliche Unterstützung meine Arbeit begleitet hat. Die außerordentliche Betreuung sowie ständige Verfügbarkeit waren nicht selbstverständlich.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Rexeis, Frau Dipl.-Ing<sup>in</sup>. Silke Lipp, Herrn Dipl.-Ing. Martin Dippold sowie allen anderen Mitarbeitern des Instituts bedanken, die bei Fragen stets um Hilfe bemüht waren.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich in jeder Lebenssituation unterstützt und mir mein Studium ermöglicht hat. Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin bedanken, die mir auch in schwierigen Abschnitten zur Seite steht und mich während meines Studiums mit viel Geduld moralisch unterstützt hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>VI</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>X</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XII</b>
<b>POVZETEK</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1 EMISSIONSKOMPONENTEN .....	2
2.1.1 Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub> .....	2
2.1.2 Limitierte Schadstoffe .....	3
2.1.3 Nicht limitierte Schadstoffe .....	4
2.1.4 Abgasnachbehandlung .....	5
2.2 ABGASGESETZGEBUNG .....	13
2.2.1 Verlauf der Euro-Klassen .....	13
2.2.2 CO <sub>2</sub> -Grenzwerte .....	15
2.2.3 Fahrzyklen .....	15
2.2.4 RDE-Messung .....	17
2.3 EMISSIONSMESSTECHNIK .....	19
2.3.1 Rollenprüfstand .....	19
2.3.2 CVS – Constant Volume Sampling .....	24
2.3.3 PEMS – Portable Emission Measurement System .....	25
2.3.4 FTIR – Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie .....	25
2.4 EMISSIONS-INVENTURMODELLE .....	26
2.4.1 HBEFA – Handbook Emission Factors for Road Transport .....	27
<b>3 MESSUNGEN FÜR HBEFA 4.1</b> .....	<b>29</b>
3.1 MESSUNGEN MIT DEM EURO 6B FAHRZEUG .....	29
3.1.1 Fahrzeugbeschreibung .....	29
3.1.2 RDE-Messung .....	31
3.1.3 Auswertung der Messungen .....	34
3.2 MESSUNGEN MIT DEM EURO 6D-TEMP FAHRZEUG .....	37
3.2.1 Fahrzeugbeschreibung .....	37
3.2.2 Ausrollversuch .....	39
3.2.3 RDE-Messung .....	40
3.2.4 Messung am Rollenprüfstand .....	40
3.2.5 Auswertung der Rollenmessungen .....	41
3.2.6 Auswertung der RDE-Messungen .....	43
<b>4 SIMULATIONEN FÜR HBEFA 4.1</b> .....	<b>45</b>
4.1 SIMULATIONSSOFTWARE PHEM .....	46
4.1.1 Funktionsprinzip PHEM .....	46
4.1.2 Eingabefiles .....	47
4.1.3 Kennfelderstellung mithilfe der CO <sub>2</sub> -Leistungsinterpolationsmethode in PHEM .....	53
4.2 VORUNTERSUCHUNGEN FÜR HBEFA-SETTINGS .....	55
4.2.1 Ausgewählte Fahrzeuge für die Voruntersuchung .....	56
4.2.2 Website Spritmonitor.de .....	57
4.2.3 Simulation WLTC .....	58
4.2.4 Ableitung von Simulationsparametern für Voruntersuchung .....	60
4.2.5 Simulation NEDC .....	64
4.2.6 Simulation RWC .....	67
4.2.7 Simulation HBEFA und Vergleich mit Spritmonitor .....	68

---

4.2.8	<i>Zusammenfassung der Simulationsergebnisse der Voruntersuchung</i> .....	69
4.2.9	<i>Fazit der Voruntersuchung</i> .....	72
4.3	DATENBASIS FÜR DIE CO <sub>2</sub> -SIMULATION FÜR HBEFA 4.1 .....	73
4.3.1	<i>Allgemeine Datenquellen</i> .....	73
4.4	ERSTELLUNG DURCHSCHNITTSFAHRZEUGE HBEFA 4.1 OTTO UND DIESEL .....	77
4.4.1	<i>Bestimmung von Fahrzeugmasse und Nennleistung</i> .....	77
4.4.2	<i>Bestimmung der Fahrwiderstände</i> .....	79
4.4.3	<i>Bestimmung weiterer Fahrzeugdaten</i> .....	82
4.4.4	<i>CO<sub>2</sub>-Kennfelderstellung für alle Euroklassen</i> .....	83
4.5	CO <sub>2</sub> -SIMULATION ALLER EUROKLASSEN UND VERGLEICH MIT SPRITMONITOR .....	86
4.6	ERSTELLUNG SCHADSTOFFKENNFELDER FÜR EURO 6AB OTTO-PKW .....	90
4.6.1	<i>Erstellung der Einzelkennfelder der vermessenen Fahrzeuge</i> .....	91
4.6.2	<i>Erstellung des Durchschnittskennfeldes für Euro 6ab</i> .....	92
4.6.3	<i>Emissionsfaktoren von HBEFA 4.1 und HBEFA 3.3 im Vergleich</i> .....	93
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b> .....	<b>97</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>98</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>100</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>103</b>
	<b>ANHANG</b> .....	<b>105</b>

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$A_{\text{Querschnitt}}$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Fahrzeugs
$Abw_{\text{HBEFA}}$	[-]	Abweichung der HBEFA-Simulation zum NEDC-Typprüfwert
$Abw_{\text{Spritmonitor}}$	[-]	Abweichung des Spritmonitors zum NEDC-Typprüfwert
$C_{\text{NachKat}}$	[ppm]	Emissionskonzentration nach Katalysatorausgang
$c_{\text{NO}_x}$	[ppm]	NO <sub>x</sub> -Konzentration mit PEMS gemessen
$C_{\text{Rohabgas}}$	[ppm]	Emissionskonzentration vor Katalysatoreinlass
$c_w$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
$c_{w\_WLTC\_Low}$	[-]	WLTC-Low-Luftwiderstandsbeiwert
$c_{w\_WLTC-Mix}$	[-]	Mittelwert aus WLTC-Low und -High Luftwiderstandsbeiwert
$c_{w\_HBEFA}$	[-]	HBEFA-Luftwiderstandsbeiwert
$c_{w\_NEDC}$	[-]	NEDC-Luftwiderstandsbeiwert
$CF_{\text{Pollutant}}$	[-]	Conformity Factor
$CO_2$	[g/h]	CO <sub>2</sub> -Emissionen
$CO_2 \text{ norm}$	[g/kWh]	Normierte CO <sub>2</sub> -Emissionen
$D_{\text{dyn}}$	[mm]	Dynamischer Reifendurchmesser
$E_{\text{CO}_2}$	[g/km]	Grenzwert CO <sub>2</sub>
$E_{\text{Euro6}}$	[g/km]	Grenzwert Euro 6
$K_{Fr\_1,2,3}$	[-]	Erhöhungen des Fahrwiderstandes
$F_{\text{Rolle}}$	[N]	Fahrwiderstand
$Fr_0$	[-]	Statischer Rollwiderstandsbeiwert
$Fr_1$	[s/m]	Linearer Rollwiderstandsbeiwert
$Fr_4$	[s <sup>4</sup> /m <sup>4</sup> ]	Rollwiderstandsbeiwert der 4. Potenz
$Fr_{\text{NEDC}}$	[-], [s/m]	NEDC-Fahrwiderstandsbeiwerte
$Fr_{\text{HBEFA}}$	[-], [s/m]	HBEFA-Fahrwiderstandsbeiwerte
$Fr_{\text{WLTC\_Low}}$	[-], [s/m]	WLTC-Low-Fahrwiderstandsbeiwerte
$Fr_{\text{WLTC-Mix}}$	[-], [s/m]	Mittelwert aus WLTC-Low und -High Fahrwiderstandsbeiwerten
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$I_{\text{Engine}}$	[kg*m <sup>2</sup> ]	Motorträgheit
$I_{\text{Transmission}}$	[kg*m <sup>2</sup> ]	Getriebeträgheit
$K$	[%]	Konvertierungsrate im Katalysator
$K_{\text{Corr}}$	[-]	Korrekturfaktor für Spritmonitor-Verlauf
$K_{Cw\_1,2,3}$	[-]	Erhöhungen des Luftwiderstandes
$M_0$	[kg]	Fahrzeug-Leergewicht für die Bestimmung des CO <sub>2</sub> -Grenzwertes
$\dot{m}_{\text{Abgas}}$	[g/h]	Emittierter Abgasmassentstrom mit PEMS gemessen
$m_{\text{Bel\_Diesel}}$	[kg]	HBEFA-Beladung für Dieselfahrzeuge
$m_{\text{Bel\_Otto}}$	[kg]	HBEFA-Beladung für Ottofahrzeuge
$m_{\text{DIN}}$	[kg]	DIN-Leermasse
$m_{\text{ges}}$	[kg]	Masse des Fahrzeuges inkl. Beladung
$m_{\text{ML}}$	[kg]	Masse der maximalen Beladung
$\dot{m}_{\text{NO}_x}$	[g/h]	NO <sub>x</sub> -Massenstrom

$m_{\text{Opt}_E}$	[kg]	Masse der möglichen Zusatzausstattung
$m_{\text{Pers}}$	[kg]	Durchschnittliches Personengewicht
$m_{\text{red}}$	[kg]	Reduzierte Rädermasse
$M_{\text{ref}}$	[kg]	Fahrzeug-Leergewicht + 100 kg
$m_{\text{RO}}$	[kg]	Mass in Running Order - Masse im fahrbaren Zustand
$m_{\text{T\_HBEFA\_Diesel}}$	[kg]	HBEFA-Testmasse für Dieselfahrzeuge
$m_{\text{T\_HBEFA\_Otto}}$	[kg]	HBEFA-Testmasse für Ottofahrzeuge
$m_{\text{T\_High}}$	[kg]	Testmasse WLTC High
$m_{\text{T\_Low}}$	[kg]	Testmasse WLTC Low
$m_{\text{T\_NEDC}}$	[kg]	NEDC-Testmasse
$m_{\text{VL}}$	[kg]	Mass representative Vehicle load
$m_{\text{Zusatz}}$	[kg]	Durchschnittliche Zusatzausstattung
$n$	[1/min]	Aktuelle Motordrehzahl
$n_{\text{idle}}$	[1/min]	Leerlaufdrehzahl
$n_{\text{norm}}$	[-]	Normierte Motordrehzahl
$n_{\text{rated}}$	[1/min]	Nenn Drehzahl
$NTE_{\text{Pollutant}}$	[g/km]	No-to-Exceed-Limit)
$P$	[kW]	Aktuelle Motorleistung
$P_a$	[W]	Beschleunigungsleistung
$P_{\text{Getriebe}}$	[W]	Verlustleistung im Getriebe
$P_{\text{Luft}}$	[W]	Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes
$P_{\text{Nebenaggregate}}$	[W]	Leistungsbedarf der Nebenaggregate
$P_{\text{norm}}$	[-]	Normierte Leistung
$P_{\text{rated}}$	[kW]	Nennleistung
$P_{\text{Roll}}$	[W]	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstandes
$P_{\text{Schlupf}}$	[W]	Verlustleistung durch Reifenschlupf
$P_{\text{Steigung}}$	[W]	Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands
$P_{\text{Total}}$	[W]	Erforderliche Antriebsleistung
$R$	[mm]	Felgendurchmesser
$R_0$	[N]	Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandskoeffizient
$R_1$	[N/(km/h)]	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandskoeffizient
$R_2$	[Ns/m]	Rollwiderstandskoeffizient
	[N/(km/h) <sup>2</sup> ]	Luftwiderstand
	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	
$Stg$	[%]	Steigung der Fahrbahn
$U_{\text{dyn}}$	[mm]	Dynamischer Abrollumfang
$U_{\text{Gas}}$	[-]	Gasfaktor zur Beschreibung der Korrelation zwischen Konzentration und Massenstrom
$v$	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$V_{\text{HW}}$	[%]	Verhältnis Reifenhöhe zu Reifenbreite
$W$	[mm]	Reifenbreite

## Konstanten

### Griechische Formelzeichen

$\rho_L$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft
$\lambda$	[kg/kg]	Luftverhältnis

### Weitere Indices und Abkürzungen

(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	Harnstoff
AGR	Abgasrückführung
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Bariumnitrat
BaCO <sub>3</sub>	Bariumcarbonat
BAFU	Bundesamt für Umwelt Schweiz
BMW	Bayerische Motoren Werke
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CPC	Condensation Particle Counter
CVS	Constant Volume Sampling
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOC	Diesel-Oxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
ECE-R	Economic Commission for Europe Regelung
ECE-Tool	Emroad-CLEAR-Evaluation-Tool
EEA	European Environment Agency
EFM	Exhaust Flow Meter
ERMES	European Research group on Mobile Emission Sources
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GPF	Gasoline Particulate Filter – Ottopartikelfilter
GPS	Global Positioning System
H <sub>2</sub> O	Wasserdampf
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
HC	Kohlenwasserstoffe
HNCO	Isocyanensäure
ICCT	International Council on Clean Transportation
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
IUFV	Inrets Urbain Fuide Courte
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
M.O.V.E.	Mobile Vehicle Evaluation
N <sub>2</sub>	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Lachgas
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot Analysator
NDUV	Nichtdispersiver Ultraviolett Analysator
NEDC	New European Driving Cycle
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid

---

NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
NSK	NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator
NTE	Not-To-Exceed
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
OBD	On Board Diagnose
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger Car and Heavy duty Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PM1	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 1 µm
PM10	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
RWC	Real World Cycle
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
THC	Total Hydrocarbons
TU-Graz	Technische Universität Graz
UBA-D	Umweltbundesamt Deutschland
UBA-Ö	Umweltbundesamt Österreich
UV	Ultraviolett
u.a.	Unter anderem
VCDS	VAG-COM Diagnose-System
vs	Versus
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
z.B.	Zum Beispiel

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

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

Martin Opetnik

Graz, 14.02.2019

## Kurzfassung

Verbrennungskraftmaschinen haben durch die erzeugten Abgase einen Einfluss auf Mensch und Umwelt, der nicht vernachlässigbar ist. Mit neuen gesetzlichen Grenzwerten wird versucht, die vom Verkehrssektor produzierten CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen zu senken. Um auf die Auswirkungen von Änderungen der gesetzlichen Grenzwerte auf die Umwelt zu schließen, werden sogenannte Emissionsinventurmodelle erstellt. Das Ziel dieser Arbeit war es, für das HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr) den durchschnittlichen Verbrauch aller Euro-Klassen für Otto- und Diesel-PKW's in Deutschland abzubilden. Weiters soll auf Basis von Fahrzeugmessungen ein Schadstoff-Motorkennfeld, welches für das durchschnittliche europäische Euro 6ab-Otto-Fahrzeug repräsentativ sein soll, erstellt werden. Damit sollten wiederum Emissionsfaktoren der Schadstoffe für das HBEFA berechnet werden.

Einleitend werden in dieser Arbeit die theoretischen Grundlagen behandelt. Dazu zählen die relevanten Emissionskomponenten, die zeitliche Entwicklung der Emissionsgrenzwerte sowie die Möglichkeiten zur Abgasnachbehandlung. Weiters werden die Möglichkeiten zur Emissionsmessung und die dazugehörigen Fahrzyklen erklärt. Abschließend wird das Emissions-Inventurmodell HBEFA beschrieben.

Der experimentelle Teil beschreibt die Messung der Emissionen zweier PKW's auf dem Rollenprüfstand sowie mit einem Portable Emission Measurement System (PEMS) auf der Straße. Außerdem wurde mit einem der beiden Fahrzeuge ein Ausrollversuch durchgeführt, um die Fahrwiderstände bestimmen zu können.

Der simulative Teil kann wiederum in 3 Abschnitte unterteilt werden:

- Zunächst wird das Simulationsprogramm PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) erklärt und alle notwendigen Parameter für die Simulation erörtert.
- Anschließend wurde mit repräsentativen Fahrzeugen eine Analyse für die Kalibrierung der Fahrzeugparameter für repräsentative real world Betriebszustände für die HBEFA-Simulation durchgeführt. Zunächst wurde mit der Simulation des WLTC das verwendete CO<sub>2</sub>-Kennfeld und die WLTC-Fahrzeugeinstellungen für die Simulation überprüft. Davon wurden anschließend die Parameter für die HBEFA-Verbrauchs- bzw. CO<sub>2</sub>-Simulation abgeleitet. Anschließend wurde untersucht, ob mit den gewählten Fahrzeugeinstellungen der jeweilige durchschnittliche Realverbrauch bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Fahrzeuge erreicht wird. Der Realverbrauch je Fahrzeugmodell wurde dabei von der deutschen Website Spritmonitor.de entnommen. Der Vergleich zeigt, dass die HBEFA-Simulation nach erfolgter Kalibrierung die realen Verbrauchswerte der betrachteten Fahrzeuge gut trifft.
- Im letzten Abschnitt werden zunächst die Durchschnittsfahrzeuge aller Euro-Klassen für Otto und Diesel beschrieben. Die Erstellung der Durchschnittsfahrzeuge geschah auf Basis von Zulassungsdaten der EU-28-Länder, die von der European Environment Agency gesammelt wurden. Auf dieser Basis wurden mit den Daten der Voruntersuchung die Durchschnittsfahrzeuge aller Euro-Klassen für die HBEFA-Simulation erstellt und simuliert. Die Simulationsergebnisse wurden dann mit den durchschnittlichen Realverbräuchen bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen PKW-Flotte der letzten Jahre von Spritmonitor.de verglichen. Abschließend wurde mit Messdaten von 43 vermessenen Fahrzeugen ein durchschnittliches Schadstoff-Motorkennfeld für das Euro 6ab Otto-Fahrzeug erstellt. Dabei wurden die Einzelkennfelder der vermessenen Fahrzeuge auf Basis der Neuzulassungsanteile zu einem Durchschnittskennfeld gewichtet, mit dem dann wiederum die HBEFA-Zyklen simuliert wurden.

## Abstract

Due to the exhaust gases produced, combustion engines have an impact on people and the environment that cannot be neglected. New regulatory emission limits are being introduced to reduce CO<sub>2</sub> and pollutant emissions produced by the transport sector. So-called emission inventory models are created in order to draw conclusions about the effects of changes in the legal limits. The aim of this work was to generate vehicle parameters and fuel consumption maps for all Euro classes for petrol and diesel vehicles for the HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport). Furthermore, on the basis of vehicle measurements, a pollutant engine map representative for the average European Euro 6ab petrol vehicle was created. This in turn should provide emission factors for the pollutant emissions from cars for the HBEFA.

In the introduction, this thesis deals with the theoretical basics. This includes the relevant emission components, the temporal development of the emission limits as well as the possibilities for exhaust aftertreatment. Furthermore, the possibilities for emission measurement and the associated driving cycles are explained. Finally, the emission inventory model HBEFA is described.

The experimental part describes the measurement of the emissions of two passenger cars on the chassis dynamometer and with a Portable Emission Measurement System (PEMS) on the road. In addition, a roll-out test was carried out with one of the two vehicles in order to determine the driving resistances.

The simulative part can again be divided into 3 sections:

- First the simulation program PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) is explained and all necessary parameters for the simulation are discussed.
- Then the simulation of the WLTC was used to check the CO<sub>2</sub> map and the WLTC vehicle settings for the simulation. The parameters for the HBEFA fuel consumption and CO<sub>2</sub> simulation were then derived from this data set by calibration towards real world driving situations. Subsequently, it was examined whether the selected vehicle settings achieve the respective average real consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the considered vehicles. The real consumption was taken from the German website Spritmonitor.de for the single vehicle models. The comparison shows that the HBEFA simulation meets the real consumption values of the vehicles quite well.
- In the last section, the average vehicles of all Euro classes for petrol and diesel are described. The average vehicles were created on the basis of registration data for the EU-28 countries collected by the European Environment Agency. On this basis, the average calibration factors for real world settings elaborated from the analysis of the single vehicles were used to create and simulate the average vehicles of all Euro classes for the HBEFA simulation. The simulation results were then compared with the average real consumption and CO<sub>2</sub> emissions of Spritmonitor.de for the passenger car fleet in recent years. Finally, an average pollutant engine map for the Euro 6ab petrol vehicle was created with measurement data from 43 measured vehicles. The vehicle-specific maps of the measured vehicles were weighted on the basis of the new registrations to an average emission map, which in turn was used to simulate the HBEFA cycles.

## Povzetek

Motorji z notranjim zgorevanjem vplivajo na človeka in okolje, kar ni zanemarljivo zaradi nastopajočih izpušnih plinov. Z novimi zakonskimi omejitvami skušajo zmanjšati emisije škodljivih snovi in CO<sub>2</sub>, ki jih povzroča prometni sektor. Za ugotavljanje učinkov ob spremembah zakonskega limita se izdelujejo modeli emisijskih inventur. Namen tega diplomskega dela je sestaviti parametre vozil in spoznavne ploskve uporabe vseh emisijskih standardov za bencinska in dizelska vozila za HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport - Priročnik za faktorje emisij v cestnem prometu). Poleg tega je treba na podlagi meritev vozil pripraviti spoznavne ploskve škodljivih snovi, ki predstavlja povprečno evropsko bencinsko vozilo Euro 6ab. S tem naj bi ustvarili emisijske faktorje za HBEFA.

V uvodu obravnavamo teoretične osnove. Te vključujejo glavne sestavine emisij, časovni potek omejitev emisij in možnosti za naknadno obdelavo izpušnih plinov. Poleg tega so pojasnjene možnosti za merjenje emisij in s tem povezani vozniki cikli. Opisan je tudi model emisij HBEFA.

Eksperimentalni del opisuje merjenje izpušnih plinov dveh avtomobilov na dinamometru, kot tudi z mobilnim sistemom za merjenje emisij (PEMS). Tako so bile dejanske emisije (RDE) merjene v realnem prometu. Poleg tega je bil z enim vozilom izveden preizkus za določitev voznega upora.

Simulativni del se lahko ponovno razdeli na tri dele:

- Najprej je pojasnjen simulacijski program PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) in obravnavani so vsi potrebni parametri za simulacijo vozila.
- Nato je bila izvedena predhodna študija s štirimi vozili, izmerjenimi na Inštitutu za motorje z notranjim zgorevanjem in termodinamiko za izpeljavo parametrov vozila za simulacijo HBEFA. Najprej je bila uporabljena simulacija WLTC za preverjenje uporabljene spoznavne ploskve uporabe/CO<sub>2</sub>. Iz tega so izpeljani parametri za simulacijo uporabe/emisij CO<sub>2</sub> v HBEFA. Pozneje je bilo preverjeno, ali model ustrezno predstavlja povprečno dejansko porabo/emisije CO<sub>2</sub> štirih vozil z uporabljenimi parametri. Dejanska poraba je bila vzeta iz nemške spletne strani Spritmonitor.de. Primerjava kaže, da simulacija HBEFA ustreza dejanskim vrednotam porabe vozil.
- Zadnji del najprej opisuje, kako so se naredila povprečna vozila vseh euro-razredov za bencin in dizel. Povprečna vozila so bila proizvedena na podlagi podatkov o registraciji držav EU-28, ki jih je zbrala Evropska agencija za okolje. Na podlagi predhodne preiskave so bila sestavljena in simulirana povprečna vozila vseh standardov Euro za simulacijo HBEFA. Rezultati simulacije so bili nato primerjani s povprečno realno porabo zadnjih oziroma emisij CO<sub>2</sub> let s strani podjetja Spritmonitor.de. Ob koncu je bila iz podatkovne zbirke 43 izmerjenih vozil sestavljena povprečna spoznavna ploskev škodljivih snovi za bencinsko vozilo Euro 6ab. Posamezne spoznavne ploskve izmerjenih vozil so bile na podlage novih registracij razvrščene na povprečno spoznavno ploskev, s katero so bili simulirani cikli HBEFA.



# 1 Einleitung

Seit der Mensch mit der Industrialisierung begonnen hat, hat er damit Einfluss auf das Klima der Erde genommen. Einen großen Anteil an dem sogenannten Klimawandel hat der vom Mensch verursachte CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Der vom Menschen verursachte Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre liegt u.a. an der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und dem Abholzen von Wäldern, die das Kohlendioxid wieder binden. In den letzten Jahren gerieten PKW mit Verbrennungskraftmotoren immer stärker in den Fokus der Öffentlichkeit. Der Grund dafür ist der Wunsch, die dadurch verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern. Die Europäische Union strebt daher das Ziel an, die vom Menschen verursachten Treibhausgase bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95% im Vergleich zu 1990 zu verringern. Als großer Verursacher soll auch der Verkehrssektor mit einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 60 % dazu beitragen.

Als Grundlage für das Vorhaben, ist es unumgänglich, die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im realen Betrieb für das Verkehrsaufkommen vom Verhalten auf einzelnen Straßentypen bis hin zum Durchschnitt eines ganzen Landes abzuschätzen. Aus diesem Grund wurden von den Umweltbundesämtern Modelle zur Abschätzung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sowie der Schadstoffe in Abhängigkeit von Verkehrssituationen finanziert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Messung und Simulation von PKW mit Verbrennungsmotor. Ein Augenmerk ist auf die gegenwärtige und künftige Gesetzgebung zur Limitierung von Abgasemissionen im Straßenverkehr befindlicher PKW gelegt. Zudem werden die limitierten Schadstoffe sowie die Verfahren, mit denen diese gemessen werden können, diskutiert. Diese theoretischen Grundlagen sind in Kapitel 2 beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 2 Otto-PKW sowohl auf der Straße als auch auf dem Rollenprüfstand vermessen und diese Daten für die Simulation herangezogen. Die Messungen der Fahrzeuge sind in Kapitel 3 beschrieben. Weiters wurden für die neue Version des HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr) Modelle für Durchschnittsfahrzeuge gebildet, die den Europäischen Flottendurchschnitt im realen Fahrbetrieb repräsentieren sollen. Zum Vergleich ist für die selbe Flotte auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoß nach Euro-Abgasklassen im NEDC Typprüfstand berechnet worden. Diese Simulationsergebnisse wurden anschließend mit dem Realverbrauch in Deutschland verglichen. Außerdem wurde auf Basis von 43 gemessenen Euro 6ab Otto-Fahrzeugen die Grundlage für die zusätzliche Simulation der Schadstoffe des durchschnittlichen europäischen Euro 6ab Otto-Fahrzeuges gebildet. Dieses Themengebiet wird unter Kapitel 4 beschrieben.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Emissionskomponenten

Die vollständige Verbrennung des Kraftstoffes in einem Verbrennungsmotor liefert ein Abgas, das aus folgenden Komponenten besteht:

- Stickstoff  $N_2$
- Wasserdampf  $H_2O$
- Kohlendioxid  $CO_2$
- Sauerstoff  $O_2$

Diese Abgase sind für Menschen, Tiere und Pflanzen unschädlich. Das Kohlendioxid trägt als Treibhausgas aber zur Erwärmung der Erde bei. (Vgl.[7] S.131)

Da die vollständige Verbrennung in der Realität jedoch nicht erzielt werden kann, kommen die Produkte der unvollständigen Verbrennung hinzu, die sogenannten Schadstoffe. Diese Stoffe sind für Mensch und Tier gefährlich, machen aber nur etwa 1 % der Masse des Abgases aus:

- Kohlenmonoxid  $CO$
- Kohlenwasserstoffe  $HC$
- Partikel  $PM$
- Stickoxide  $NO_x$

(Vgl.[7] S.131f)

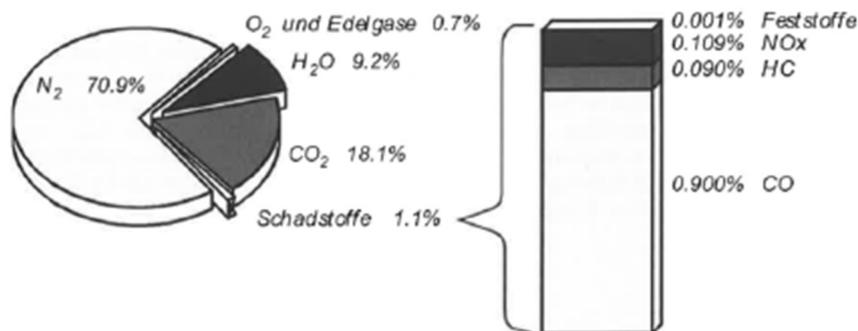


Abbildung 2-1 Zusammensetzung des Rohabgases von Ottomotoren ([6] S.156)

#### 2.1.1 Kohlenstoffdioxid $CO_2$

Kohlenstoffdioxid ist ein geruchloses, farbloses und ungiftiges Gas, welches bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in Verbindung mit Sauerstoff gebildet wird. Kohlenstoffdioxid wird nicht als Schadstoff eingestuft, ist aber ein Mitverursacher des Treibhauseffektes und damit auch verantwortlich für den Klimawandel. Des Weiteren kann der  $CO_2$ -Ausstoß direkt in den Kraftstoffverbrauch umgerechnet werden. (Vgl. [10] S.14)

## **2.1.2 Limitierte Schadstoffe**

### **2.1.2.1 Stickoxide NO<sub>x</sub>**

Bei Stickoxiden handelt es sich um einen Überbegriff für Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Stickstoffmonoxid (NO). Stickoxide sind das Produkt der Oxidation von Stickstoff bei sehr hohen Temperaturen und bei Anwesenheit von Sauerstoff, wobei hauptsächlich NO als Rohemission gebildet wird. Das im Motor entstehende Atem- und Reizgift Stickoxid NO oxidiert in der Atmosphäre zu noch giftigerem Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>. Neben den Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid trägt es unter Sonneneinstrahlung zur Ozonbildung bei. (Vgl. [6] S.132, [10] S.17f)

### **2.1.2.2 Kohlenmonoxid CO**

Kohlenmonoxid entsteht bei der unvollständigen Verbrennung, genauer gesagt, bei der unvollständigen Oxidation von Kohlenstoff bei Luftmangel. Es ist ein farb- und geruchloses Gas und ein Atemgift, da es beim Einatmen die Sauerstoffaufnahme-fähigkeit des Blutes verringert. Es geht eine viel stärkere Bindung mit dem Hämoglobin ein als Sauerstoff und reichert sich im Blut an, was zu einer verminderten Sauerstoffsättigung führt. CO ist nur wenig klimarelevant, da im Gegensatz zu anderen Schadstoffen nur geringe Konzentrationen in der Luft vorhanden sind. Außerdem besitzt CO nur eine mittlere Lebensdauer von etwa zwei Monaten. (Vgl. [10] S.17)

### **2.1.2.3 Kohlenwasserstoffe HC**

Kohlenwasserstoffe entstehen bei der unvollständigen Verbrennung bei Luftmangel. Bei der motorischen Verbrennung werden mehr als 1000 verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen erzeugt, der Grund dafür ist die Fähigkeit des Kohlenstoffs, Ringe und Ketten zu bilden. Während die meisten Kohlenwasserstoffe relativ harmlos sind, wie etwa Methan, entstehen auch solche, die eine stark gesundheitsschädliche Wirkung haben. Sie sind unter anderem kanzerogen und starke Geruchserreger. (Vgl.[7] S.17)

### **2.1.2.4 Partikel und Ruß**

Früher waren Partikel ein reines Problem der dieselmotorischen Verbrennung, durch den Vormarsch von direkteinspritzenden Systemen sind sie mittlerweile jedoch auch beim Ottomotor relevant. Partikel bestehen prinzipiell aus festen Kohlenstoffkernen („Ruß“) sowie angelagerten festen und flüssigen Stoffen (Kohlenwasserstoffe, Stickstoff- oder Schwefelverbindungen, Wasser oder Schwermetalle). Humanmedizinisch relevant sind Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm (PM10). Als gefährlich gelten Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 1 µm (PM1), da diese bis in die Alveolen der Lunge vordringen können. Ein weiterer Faktor, der gesundheitlich relevant ist, ist die chemische Zusammensetzung der Partikel. (Vgl. [10] S.18)

### **2.1.3 Nicht limitierte Schadstoffe**

#### **2.1.3.1 Schwefeldioxid SO<sub>2</sub>**

Schwefeldioxid entsteht durch die Verbrennung von Schwefel, welcher sowohl im Kraftstoff als auch im Öl in geringen Mengen vorhanden ist. Schwefeldioxid ist in der Abgasgesetzgebung nicht beschränkt, jedoch ist der maximale Schwefelgehalt im Kraftstoff und im Öl gesetzlich geregelt. Eine Reduktion der SO<sub>2</sub>-Emissionen ist erwünscht, da es zur Bildung von saurem Regen beiträgt. Des Weiteren führt es zur Bildung von Sulfaten, welche sich mit Ruß zu Partikeln binden können oder sich u.a. im NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator ablagern und die Speicherfähigkeit hemmen. (Vgl. [10] S.18, [28] S.82)

#### **2.1.3.2 Ammoniak NH<sub>3</sub>**

Ammoniak wird bei der Reduktion von Stickoxiden im Zuge der selektiven katalytischen Reduktion benötigt. Es ist ein farbloses, giftiges, stechend riechendes Gas, welches die Lunge und Schleimhäute verätzt. Es ist im Wasser schnell löslich und bildet eine Lauge. Es ist als Abgaskomponente nicht limitiert, trotzdem wird z.B. mit einem NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysator nach dem Diesel-Partikelfilter versucht, die Emissionen so gering wie möglich zu halten. (Vgl. [6] S.192)

#### **2.1.3.3 Lachgas N<sub>2</sub>O**

N<sub>2</sub>O gehört zu den Stickoxiden und kann bei Verbrennungskraftmaschinen in geringen Mengen vor allem bei der selektiven katalytischen Reduktion bzw. bei der unvollständigen Reduktion von NO und NO<sub>2</sub> im 3-Wegekatalysator frei werden. Lachgas ist ein sehr relevantes Treibhausgas. Es ist insofern relevant, da es eine viel höhere Aktivität hat als CO<sub>2</sub>. Diese Aktivität wird als CO<sub>2</sub>-Äquivalent bezeichnet und beschreibt, wie viel kg CO<sub>2</sub> dieselbe Erwärmung zur Folge hätten, wie ein kg des beschriebenen Stoffes, wobei N<sub>2</sub>O ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 290 hat. (Vgl. [11] S.28)

## 2.1.4 Abgasnachbehandlung

Seit Jahren werden unterschiedliche Systeme im Abgasstrang von Fahrzeugen verwendet, um die Emissionen weitgehend zu minimieren. Bei Ottomotoren hat sich der Dreiwegekatalysator durchgesetzt. Da beim Dieselmotor die Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Emissionen schwieriger ist als beim Ottomotor, werden für diesen immer neue Technologien zur Abgasnachbehandlung erforscht.

### Aufbau von Katalysatoren

Die Einteilung von Katalysatoren erfolgt in:

- Vollkatalysatoren sowie
- katalytisch beschichtete Trägerkatalysatoren.

Bei Vollkatalysatoren ist die Struktur des Katalysators komplett aus der aktiven Komponente aufgebaut. Trägerkatalysatoren hingegen bestehen aus einem Trägerkörper, einer Zwischenschicht und der katalytisch aktiven Schicht. (Vgl. [9] S. 6)

Gehalten wird der Katalysator in einem Gehäuse, dem so genannten Canning. Eine Matte oder Drahtgeflecht dient zum Ausgleich der unterschiedlichen Wärmedehnung. Der Trägerkörper besteht aus stranggepresster Keramik, oder gewelltem und gewickeltem Stahlblech. Dabei entsteht eine wabenförmige Struktur mit parallel verlaufenden Kanälen, durch die das Abgas strömt. Die Zellenanzahl liegt bei Keramikträgern typischerweise bei 400 cpsi (Zellen pro Quadratzoll = Quadratinch; 1 Inch = 25,4 mm). Hochzellige Versionen weisen eine Zellendichte von bis zu 900 cpsi auf. Die Wandstärke beträgt dann etwa 0,3 mm. Bei Metallträgern lassen sich mittlerweile Wandstärken von 30  $\mu\text{m}$  und Zellendichten von 1000 cpsi verwirklichen. Mit der Zellendichte steigt die geometrische Oberfläche, auf der die Zwischenschicht aufgebracht werden kann. ([9] S.6f)



Abbildung 2-2 Aufbau eines Abgaskatalysators [9]

Damit die Oberfläche nochmals erhöht wird, werden Katalysatoren mit einem Washcoat beschichtet. Aufgrund der bevorzugten Anlagerung in den Kanälecken werden die ursprünglich quadratischen Kanäle dadurch annähernd kreisförmig. Das katalytisch aktive Substrat (bei Abgaskatalysatoren im Wesentlichen Platin, Rhodium und Palladium) sitzt in den Poren des Washcoats in Form kleiner Partikel. Als Washcoat wird hauptsächlich Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) verwendet, bei 3-Wegekatalysatoren sind auch Ceriumoxid und Zirkoniumoxid als Sauerstoffspeicherkomponenten enthalten. ([9] S.7f)

### 2.1.4.1 Abgasnachbehandlung beim Dieselmotor

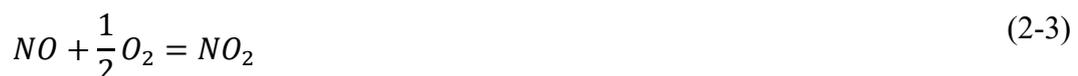
Da der Dieselmotor mit Luftüberschuss arbeitet, besteht keine Möglichkeit, den Dreiwegekatalysator wie beim Ottomotor zur  $\text{NO}_x$ -Reduktion einzusetzen. Bei Luftüberschuss reagieren das HC und das CO am Katalysator nicht mit  $\text{NO}_x$ , sondern mit dem Restsauerstoff im Abgas. Aus diesem Grund ist eine Kombination von mehreren Abgasnachbehandlungssystemen erforderlich. (Vgl. [28] S.60)

#### Diesel-Oxidationskatalysator (DOC)

Der Diesel-Oxidationskatalysator steht im Abgasstrang des Dieselmotors meist an erster Stelle nach dem Turbolader. Wie der Name schon sagt, ist der vorherrschende Prozess im DOC die Oxidation. Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) werden im DOC zu Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) oxidiert. (Vgl. [28] S.78, [35])



Je nach Strömungsgeschwindigkeit, Abgaszusammensetzung und Katalysatoraufbau findet diese Reaktion ab 170-200 °C statt. Der Umsatz steigt innerhalb von 20-30 °C auf mehr als 90 % an. Des Weiteren wird im DOC Partikelmasse reduziert. Dies geschieht durch Absorption von Kohlenwasserstoffen, die Bestandteil der Partikelmasse sind. Dadurch kann die Partikelmasse um 15-30 % gesenkt werden. Eine weitere Funktion des DOC ist die Oxidation von NO zu  $\text{NO}_2$  (Gleichung (2-3)). Für nachfolgende Abgasnachbehandlungskomponenten (Partikelfilter, SCR) ist ein hoher Anteil an  $\text{NO}_2$  sehr wichtig. Da in den meisten Betriebspunkten des Motors der  $\text{NO}_2$ -Anteil nur ca. 1:10 ausmacht, muss das  $\text{NO}_2$ -Verhältnis erhöht werden. Je nach Abgaszusammensetzung und Katalysatorbeschichtung gelingt dies ab 180-230 °C. (Vgl. [28] S.78)



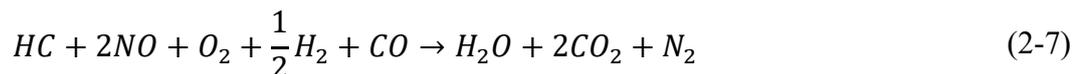
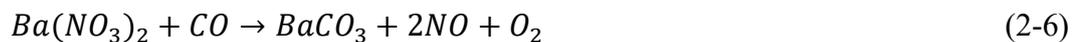
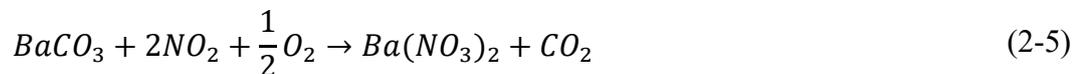
### NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator (NSK)

Der NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator bietet die Möglichkeit, Stickoxide im Gegensatz zum SCR (siehe nächster Abschnitt) ohne Mitführung eines weiteren Betriebsmittels abzubauen. Dieser Speicherkatalysator kommt bei mageren Brennverfahren mit Luftüberschuss zum Einsatz. Er ist vom Prinzip her aufgebaut wie ein Dreiwegekatalysator, weist jedoch eine zusätzliche Schicht aus schweren Alkali- bzw. Erdalkalimetallen auf, wobei Barium die bevorzugte Variante darstellt.

Die Reduktion von NO<sub>x</sub> im NSK erfolgt in zwei Schritten:

- Beladungsphase: kontinuierliche NO<sub>x</sub>-Speicherung in die Speicherkomponenten während Abgasphasen mit Luftüberschuss. (Dauer: 30-300 s)
- Regenerationsphase: periodische Ausspeicherung und Konvertierung von NO<sub>x</sub> in Abgasphasen mit Luftmangel. (Dauer: 2-10 s) (Vgl.[28] S.61)

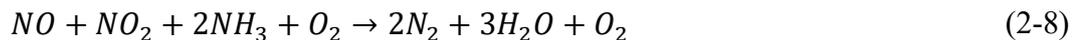
Während der Beladung wird Bariumcarbonat unter Freisetzung von CO<sub>2</sub> zu Bariumnitrat umgewandelt (Gleichung (2-4),(2-5)). So speichert der NSK die Stickoxide. Je mehr Stickoxide der NSK speichert, desto schlechter kann er weitere Stickoxide binden und die Menge an Stickoxiden, die den NSK passieren, steigt an. Deshalb muss der NSK regeneriert werden. Während der Regeneration wird Bariumnitrat mit CO wieder zu Bariumcarbonat (Gleichung (2-6)). Es ist jedoch zu beachten, dass die freigesetzten Stickoxide wieder mit CO reduziert werden müssen (Gleichung (2-7)). In den folgenden Gleichungen werden die ablaufenden Prozesse dargestellt. (Vgl. [26] S.511)



Mit dem NSK können Konvertierungsraten > 90 % erreicht werden. Dazu muss die Abgastemperatur jedoch in einem schmalen Fenster zwischen 300 °C und 400 °C liegen. Liegt die Temperatur darunter, so ist die Konvertierung von NO zu NO<sub>2</sub> bei Weitem geringer. Bei höheren Temperaturen wird die Konvertierungsrate jedoch durch fehlende thermische Stabilität der Nitrats reduziert. Gelangt jedoch Schwefel als SO<sub>2</sub> in den NSK, so kommt es zu einer sogenannten Vergiftung, da Schwefel mit Barium zu Bariumsulfat wird. Die Oxidation und damit der Abbau des Schwefeldioxids ist nur in fetten Betriebspunkten bei Temperaturen > 650 °C möglich. Nachteil des NSK ist, dass durch die fetten Regenerationsphasen der Kraftstoffverbrauch steigt. (Vgl. [26] S.512)

### Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Im Gegensatz zum NSK-Verfahren arbeitet die selektive katalytische Reduktion kontinuierlich. Der Katalysator greift nicht in den Motorbetrieb ein und gewährleistet niedrige  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei geringem Kraftstoffverbrauch. Jedoch benötigt der SCR ein Reduktionsmittel um selektiv  $\text{NO}_x$  zu reduzieren. Selektiv bedeutet, dass die Oxidation des Reduktionsmittels bevorzugt mit dem Sauerstoff der  $\text{NO}_x$  erfolgt (Gleichung (2-8)). Als Reduktionsmittel hat sich hierbei Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) bewährt. Bei stationären Großanlagen wird Ammoniak direkt ins Abgas eingebracht. Da es jedoch giftig und ätzend ist, wird es für PKW und LKW in Form einer wässrigen Harnstofflösung (32,5 Gew.-% Harnstoff in Wasser), welche unter dem Namen AdBlue vertrieben wird, zugeführt. Harnstoff ist sowohl grundwasserverträglich als auch chemisch stabil und wird auch als Dünge- und Futtermittel verwendet. (Vgl. [28] S.65)



Die Umwandlung von  $\text{NO}_x$  ist im SCR temperaturabhängig. Diese Abhängigkeit wird in Abbildung 2-3 gezeigt. Die effektive Umwandlung beginnt erst bei 150 °C. Ab Temperaturen oberhalb von 450 °C oxidiert das Reduktionsmittel mit Sauerstoff, wodurch die  $\text{NO}_x$ -Reduktion wieder sinkt. Über einen breiten Temperaturbereich ist eine Reduktion von ca. 90 % erreichbar. (Vgl. [12] S.3)

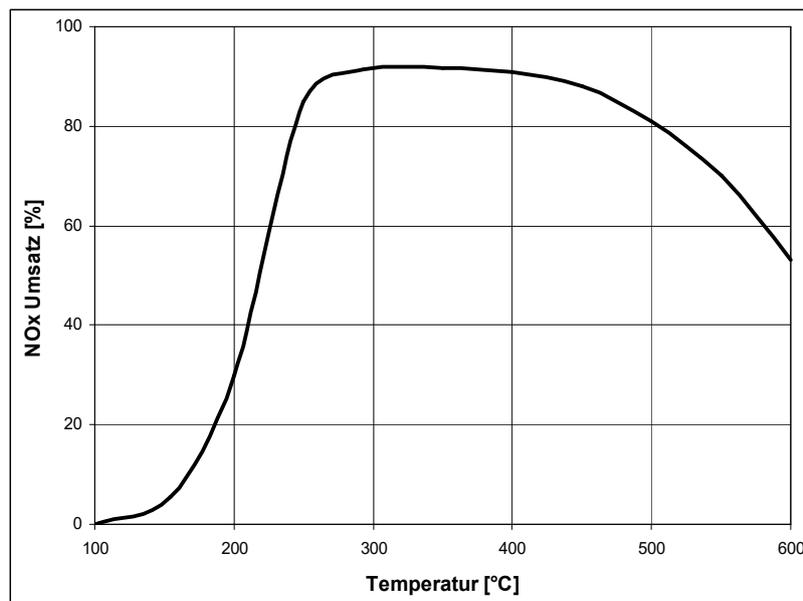


Abbildung 2-3: Umsatz von  $\text{NO}_x$  mittels SCR-Verfahren ([12] S.3)

Damit der SCR-Prozess im Kraftfahrzeug möglich ist, müssen weitere Maßnahmen getroffen werden. Die Prozesskette wird in Abbildung 2-4 dargestellt.

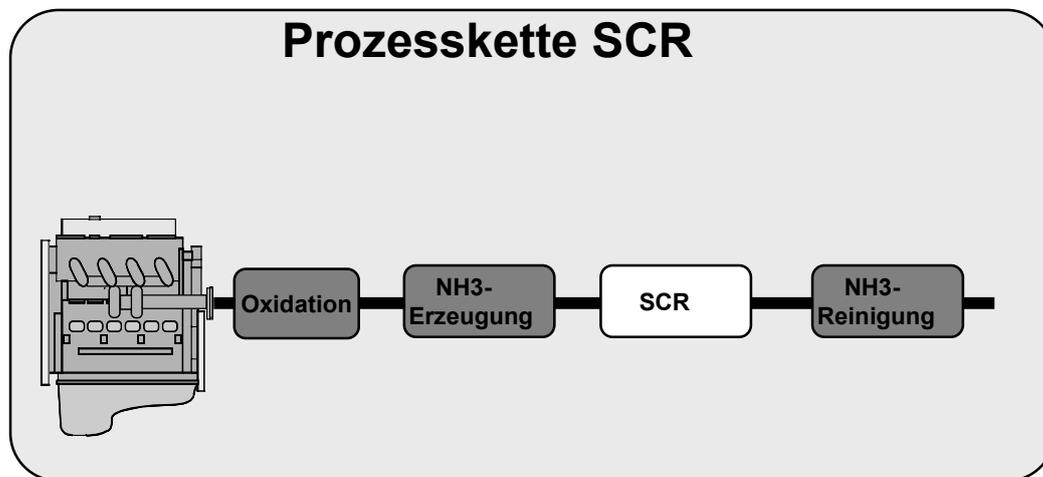
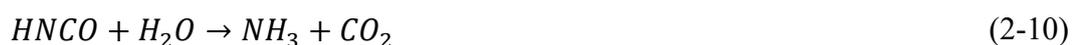
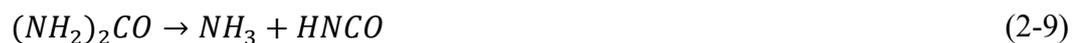


Abbildung 2-4: Prozesskette des SCR-Verfahrens für die mobile Anwendung ([12] S.4)

In der Oxidationsstufe wird NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert (näheres siehe Diesel-Oxidationskatalysator). Vor der SCR-Reaktion wird aus dem Harnstoff Ammoniak gebildet. Die Dosierung des Harnstoffs wird in einer eigenen Regelungseinheit durchgeführt. Wichtige Parameter, die die Dosierung beeinflussen sind Luftmassenstrom, λ-Verhältnis, Abgastemperatur sowie NO<sub>x</sub>-Signale vor und ggf. nach dem SCR. Zur NH<sub>3</sub>-Erzeugung sind zwei Reaktionsschritte notwendig. In der Thermolyse werden NH<sub>3</sub> und HNCO gebildet (Gleichung (2-9)). Daraufhin wird in der Hydrolyse das HNCO mit H<sub>2</sub>O zu NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> umgesetzt. (Gleichung (2-10)) Diese zwei Schritte werden zusammengefasst als Hydrolysereaktion bezeichnet. (Vgl. [28] S.65, Vgl. [12] S.11) )



Zur Vermeidung von festen Ablagerungen ist es erforderlich, dass die zweite Reaktion durch die Wahl geeigneter Katalysatoren und genügend hoher Temperaturen (ab 250 °C) ausreichend schnell erfolgt. Moderne SCR-Reaktoren übernehmen gleichzeitig die Funktion des Hydrolysekatalysators, sodass ein (früher üblicher) vorgelagerter Hydrolysekatalysator entfallen kann. Das durch die Thermohydrolyse entstandene Ammoniak reagiert am SCR-Katalysator nach den folgenden Gleichungen: ([28] S.65)



Man unterscheidet die Standard-SCR-Reaktion (Gleichung (2-11)), die schnelle SCR-Reaktion (Gleichung (2-12)) und die langsame SCR-Reaktion (Gleichung (2-13)). Die Standard-SCR-Reaktion tritt nur bei niedrigen Temperaturen und bei hoher  $\text{NH}_3$ -Beladung auf der Katalysatoroberfläche auf. Bei Temperaturen unter  $300\text{ °C}$  und einem  $\text{NO}_2:\text{NO}$  – Verhältnis von 0,5 läuft die  $\text{NO}_x$ -Reduktion dominant über die schnelle SCR-Reaktion. Um einen guten Umsatz im niedrigen Temperaturbereich zu erreichen, ist ein  $\text{NO}_2:\text{NO}$  – Verhältnis von ungefähr 1:1 erforderlich. Wenn dies eingehalten wird, ist die schnelle SCR-Reaktion bereits bei Temperaturen ab  $170\text{-}200\text{ °C}$  möglich. Bei  $\text{NO}_2:\text{NO}$ – Verhältnissen über 0,5 tritt die langsame SCR-Reaktion auf. Wenn es zu einer zu starken Dosierung des Reduktionsmittels kommt, so kann es zu einem  $\text{NH}_3$ -Schlupf kommen. Das somit austretende Ammoniak würde eine Belästigung der Umwelt darstellen. Die Entfernung des  $\text{NH}_3$  erfolgt mittels des Oxidationskatalysators hinter dem SCR, auch genannt Sperrkatalysator. (siehe Abbildung 2-4). Der Sperrkatalysator wird später näher behandelt. (Vgl. [28] S.65, Vgl. [26] S.510)

### **Partikelfilter DPF**

Zur Entfernung von Rußpartikeln aus dem Abgas des Dieselmotors werden Dieselpartikelfilter (DPF) aus poröser Keramik eingesetzt. Man unterscheidet geschlossene und offene Partikelfilter. Im nachfolgenden wird die Funktionsweise des geschlossenen Filters beschrieben, da dieser derzeit am häufigsten verwendet wird.

Geschlossene Partikelfilter sind wabenähnlich aufgebaut und bestehen aus Siliziumkarbid oder Cordierit. Diese Wabenform weist eine Vielzahl von parallelen Kanälen auf, mit Wandstärken von  $300\text{-}400\text{ }\mu\text{m}$ . Durch abwechselnde Verschließung der Kanäle muss das Gas die porösen Wände durchströmen, wobei die Rußpartikel an den Porenwänden (im Inneren der Keramikwände) haften bleiben (Tiefenfilterung) (siehe Abbildung 2-5). Die anhaftenden Rußpartikel bilden eine Rußschicht, die zunächst zur Filterung beiträgt. Wird diese Rußschicht jedoch zu dick, muss der Filter regeneriert werden. Geschlossene Partikelfilter können Rückhaltegrade von mehr als 95 % für Partikel zwischen  $10\text{ nm}$  und  $1\text{ }\mu\text{m}$  erreichen. Offene Partikelfilter werden nur von einem Teil des Abgases durchströmt, während der Rest des Abgases ungefiltert vorbei strömt. Bei solchen Filtern werden nur Abscheidegrade zwischen 30 und 80 % erreicht. (Vgl. [28] S.69f)

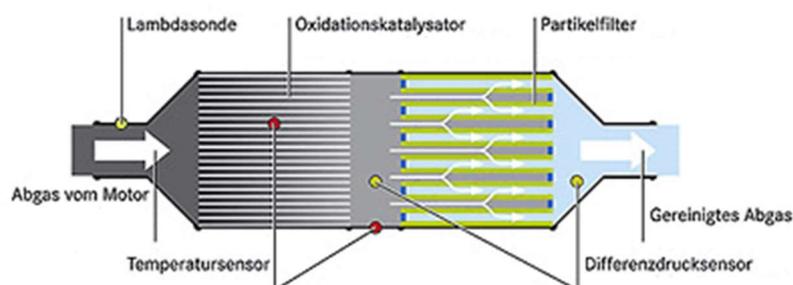


Abbildung 2-5: Funktionsweise des Partikelfilters

Wie bereits erwähnt, muss der Partikelfilter in periodischen Abständen regeneriert werden. Bei Unterlassung würde der Abgasgegendruck immer weiter steigen und somit der Motor in seinem Betrieb gestört werden. Bei der Regeneration spricht man von gezieltem Abbrennen des Rußes im Filter. Diese muss in regelmäßigen Abständen von ca. 500 km durchgeführt werden, wobei dieser Wert in Abhängigkeit von Filtergröße und Rohemissionen stark schwankt. Die Regeneration dauert ungefähr 15 Minuten, bei Einsatz eines Additivs kann sie noch gesenkt werden. Der Kohlenstoff im Ruß wird bei Temperaturen  $> 600\text{ °C}$  zu  $\text{CO}_2$  oxidiert. Da solche Temperaturen nur bei Nennleistung herrschen, wird entweder durch Beschichtung des Filters mit Platin der Abbrand verbessert oder mit Hilfe eines Additivs (Cer- oder Eisenverbindungen) die Ruß-Oxidationstemperatur auf  $450\text{-}500\text{ °C}$  gesenkt. Letztere Methode ist häufiger im Einsatz. (Vgl. [28] S.71)

### Sperrkatalysator

Als Sperrkatalysator wird ein Oxidationskatalysator bezeichnet, der in einem Abgasnachbehandlungssystem mit SCR hinter dem SCR-Katalysator eingebaut ist (siehe Abbildung 2-4). Durch diesen Katalysator soll durch Schlupf im SCR-Katalysator vorhandenes Ammoniak im Abgas zu  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  oxidiert werden.

#### 2.1.4.2 Abgasnachbehandlung beim Ottomotor

##### Dreiwege-Katalysator

Der Dreiwegekatalysator findet bei qualitätsgeregelten Motoren Anwendung, welche die überwiegende Zeit stöchiometrisch betrieben werden. In diesem Fall kann der Oxidations- und der Reduktionskatalysator in einem Katalysatorbett zusammengefasst werden und es findet eine gleichzeitige Oxidation von HC und CO sowie eine Reduktion von NO statt. ([26] S.503)



NO kann durch mehrere Abgaskomponenten reduziert werden, z.B.:



Der Dreiwege-Katalysator benötigt  $\lambda = 1$ -Verhältnis. Da der Ottomotor um den Wert 1 geregelt wird, werden Abweichungen im Katalysator selbst durch Sauerstoffspeicherung (z.B. an Ceroxid) gepuffert. Die Sauerstoffspeicherung wird in Gleichung (2-17) beschrieben und ein Beispiel der Sauerstoffabgabe ist in Gleichung (2-18) dargestellt.



Die Wirksamkeit des Katalysators wird mit der Konvertierungsrate  $k$  beschrieben, die in Gleichung (2-19) definiert ist. Sie ist ein Maß für die Verminderung der Konzentration  $C$  einer Schadstoffkomponente im Abgas. (Vgl. [9] S.5)

$$K = \frac{C_{\text{Rohabgas}} - C_{\text{NachKat}}}{C_{\text{Rohabgas}}} \quad (2-19)$$

$K$	.....	Konvertierungsrate im Katalysator [-]
$C_{\text{Rohabgas}}$	.....	Emissionskonzentration vor Katalysatoreinlass [ppm]
$C_{\text{NachKat}}$	.....	Emissionskonzentration nach Katalysatorausgang [ppm]

CO, HC und NO<sub>x</sub> werden nur in einem engen Bereich um Lamda = 1 gleichzeitig vermindert. Bei Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) kann NO und NO<sub>2</sub> nicht ausreichend reduziert werden, bei Luftmangel ( $\lambda < 1$ ) können HC und CO nicht vollständig oxidiert werden. In Abbildung 2-6 sind die Konvertierungsraten im geregelten Dreiwegekatalysator über  $\lambda$  dargestellt.

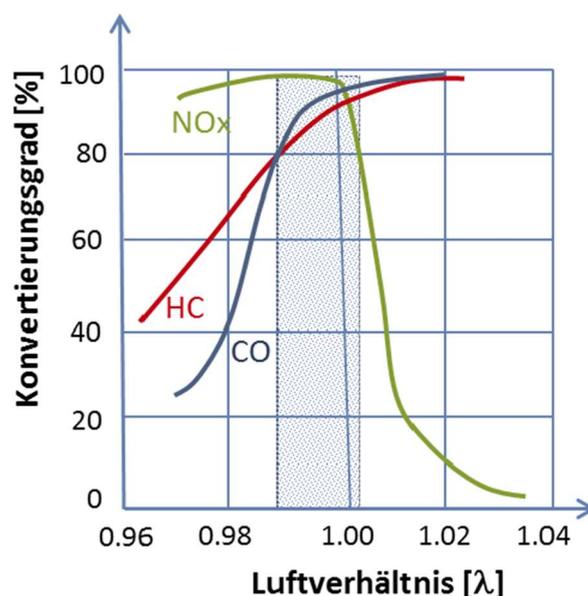


Abbildung 2-6: Konvertierungsrate im geregelten Dreiwegekatalysator über  $\lambda$  [9]

Weiters muss im Dreiwegekatalysator eine bestimmte Temperatur herrschen, damit die Reaktionen ablaufen können. Die Light-Off-Temperatur bezeichnet jene Temperatur, bei der die Schadstoffe zu 50 % konvertiert werden.

### **Otto-Partikelfilter (Gasoline Particulate Filter – GPF)**

Seit September 2017 gilt für neue Fahrzeugtypen die Abgasnorm Euro 6c. Für den Ottomotor bedeutet das einen Grenzwert von  $6 \times 10^{11}$  in Anzahl der Partikel je Kilometer. Je nach Kraftstoff und Brennverfahren kann die Verwendung von GPFs beim Ottomotor unausweichlich sein, um die gesetzlichen Grenzwerte einhalten zu können. (Vgl. [20])

Der GPF ist vom Aufbau her dem DPF sehr ähnlich. Auch dieser weißt einen keramischen Träger mit wechselseitig verschlossenen Kanälen für die Aufnahme der Partikel auf. Der Unterschied liegt jedoch in der höheren Abgastemperatur sowie einem geringeren Sauerstoffanteil im Abgas im Vergleich zum Diesel. Effektiv bedeutet dies eine thermisch robustere Ausführung des GPF sowie Maßnahmen in der Motorsteuerung, um eine ausreichende Sauerstoffmenge für den Abbrand der angelagerten Partikel zu erreichen. (Vgl. [20])

## 2.2 Abgasgesetzgebung

In dieser Arbeit werden neben der aktuellen Gesetzgebung auch vorherige sowie mögliche zukünftige Gesetzgebungen beschrieben. Aktuell gilt für Typprüfungen seit 1. September 2017 die Abgasnorm Euro 6d-Temp sowie für Erstzulassungen seit 1. September 2018 die Norm Euro 6c. Die Einführung der nächsten Abgasnorm (Euro 6d) ist mit 1. Januar 2020 geplant. In den Abgasnormen sind Grenzwerte für diverse Schadstoffe festgelegt. Die Grenzwerte unterscheiden sich nach der Art des Motors (Otto oder Diesel) bzw. nach dem Fahrzeugtyp (PKW, LKW, Motorräder, Leichte Nutzfahrzeuge). Bei Neueinführung einer Abgasnorm gilt diese zunächst für alle Typprüfungen und nach einer gewissen Übergangszeit für alle neuzugelassenen Fahrzeuge.

### 2.2.1 Verlauf der Euro-Klassen

In den folgenden Tabellen ist ein Verlauf der Euro-Klassen mit Einführungszeitpunkt und Grenzwerten für die Schadstoffe dargestellt.

Tabelle 2-1: Verlauf der Abgasnormen von Euro 0 bis Euro 4 [2]

	Normreihe	ECE 15/04	Euro 1 (EC 93)	Euro 2 (EC 96)	Euro 3 (EC 2000)	Euro 4 (EC 2005)
	Typisierung	1982	7/1992	1/1996	1/2000	1/2005
	Neuzulassung		1/1993	1/1997	1/2001	1/2006
	Fahrzyklus	NEDC				
		Otto				
HC	[mg/km]	-	-	-	200	100
NOx	[mg/km]	-	-	-	150	80
HC+NOx	[mg/km]	3560	970	500	-	-
CO	[mg/km]	16500	2720	2200	2300	1000
PM	[mg/km]	-	-	-	-	-
PN	[#/km]	-	-	-	-	-
		Diesel				
HC	[mg/km]	-	-	-	-	-
NOx	[mg/km]	-	-	-	500	250
HC+NOx	[mg/km]	5100	970	700	560	300
CO	[mg/km]	16500	2720	1000	640	500
PM	[mg/km]	-	140	80	50	25
PN	[#/km]	-	-	-	-	-

Die Regulierung ECE 15/04 wird im Rahmen der Arbeit als Euro 0 bezeichnet.

Tabelle 2-2: Verlauf der Abgasnormen von Euro 5a bis Euro 6d [2]

	Normreihe	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c	Euro 6d- Temp	Euro 6d
	Typisierung	9/2009	9/2011	9/2014		9/2017	1/2020
	Neuzulassung	1/2011	1/2013	9/2015	9/2018	9/2019	1/2021
	Fahrzyklus	NEDC			WLTC		
		Otto					
THC	[mg/km]	100	100	100	100	100	100
NMHC	[mg/km]	68	68	68	68	68	68
NOx	[mg/km]	60	60	60	60	60	60
CO	[mg/km]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
PM	[mg/km]	5	5	5	5	5	5
PN	[#/km]	-	-	$6 \times 10^{11}$	$6 \times 10^{11}$	$6 \times 10^{11}$	$6 \times 10^{11}$
		Diesel					
HC	[mg/km]	-	-	-	-	-	-
NOx	[mg/km]	180	180	80	80	80	80
HC+Nox	[mg/km]	230	230	170	170	170	170
CO	[mg/km]	500	500	500	500	500	500
PM	[mg/km]	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
PN	[#/km]	-	$6 \times 10^{11}$				

<i>HC</i>	.....	Kohlenwasserstoffe
<i>HC+NOx</i>	.....	Summe der Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide
<i>NOx</i>	.....	Stickstoffoxide
<i>CO</i>	.....	Kohlenstoffmonoxid
<i>THC</i>	.....	„Total Hydrocarbons“, ergibt sich als Summe von NMHC und Methan
<i>NMHC</i>	.....	Nichtmethankohlenwasserstoffe
<i>PM</i>	.....	Partikelmasse
<i>PN</i>	.....	Partikelanzahl

### 2.2.2 CO<sub>2</sub>-Grenzwerte

Im Jahr 2012 wurden erstmals Grenzwerte für die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuzugelassenen PKW eingeführt. Die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer PKW müssen im Flottendurchschnitt (gewichteter Mittelwert des Herstellers) die folgenden Vorgaben einhalten: (Vgl. [11] S.20)

$$E_{CO_2} = 130 + 0,0457 * (M_{ref} - M_0) \quad (2-20)$$

$E_{CO_2}$	.....	Grenzwert CO <sub>2</sub> [g/km]
$M_{ref}$	.....	DIN-Leergewicht + 100 kg [kg]
$M_0$	.....	1372 kg (bis 2015, ab 2016 aus dem durchschnittlichen DIN-Leergewicht + 100 kg der letzten 3 Jahre aller in der EU neu zugelassenen PKW) [kg]

Durch den Term  $M_{ref} - M_0$  können auch bei steigendem durchschnittlichen Fahrzeugleergewicht alle Hersteller das Ziel von 130 g/km einhalten. Da eine solche Regelung von der Einführung bis zur marktweiten Einhaltung Zeit benötigt, gibt es eine Übergangsphase, durch welche der Flottendurchschnitt aller Neuzulassungen erst im Jahr 2015 den Grenzwert einhalten muss. Bis zum Jahr 2021 ist geplant, den Zielwert auf 95 g/km zu senken. (Vgl. [11] S.21)

Sobald es zu einer Überschreitung kommt, wird statt dem Entzug der Typgenehmigung eine Strafzahlung an die EU eingeräumt. Bis 2019 beträgt die Strafe für jeden verkauften PKW zwischen €5.- für das erste Gramm Überschreitung des Grenzwertes und € 95.- ab dem 4. Gramm. Ab dem Jahr 2019 beträgt die Strafe € 95.- je Gramm Überschreitung des Grenzwertes und verkauften PKW. (Vgl. [11] S.21)

### 2.2.3 Fahrzyklen

Die Emissionen werden in der Typprüfung auf einem Rollenprüfstand gemessen. Der Prüfstandsfahrer erhält durch ein Fahrerleitsystem eine dem Zyklus entsprechende Geschwindigkeitsvorgabe, die er innerhalb einer Toleranz einzuhalten hat. Die Schadstoffe werden mittels einer CVS-Anlage (Constant Volume Sampling) gemessen. Rollenprüfstand sowie CVS-Anlage sind in Kapitel 2.3 näher beschrieben. Bis Euro 6b wurde als Prüfzyklus der NEDC (New European Driving Cycle) herangezogen und seit Euro 6c ist es der WLTC (Worldwide Harmonized Light-duty Vehicle Test Cycle). Der NEDC besteht aus einem Stadt- und einem Überlandanteil mit einer Gesamtfahrstrecke von 11 km. Der Zyklus dauert 1180 s und daraus ergibt sich eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 33,6 km/h. Der NEDC ist im Vergleich zum realen Fahrverhalten sehr moderat, was sich in einer maximalen Beschleunigung von 1 m/s<sup>2</sup> zeigt.

Aus diesem Grund wurde mit Euro 6c der WLTC eingeführt. Dieser Zyklus beschreibt in einer Zeitspanne von 1800 s eine Distanz von 23 km. Die Durchschnittsgeschwindigkeit steigt damit auf 46,3 km/h und die maximale Beschleunigung ist mit 1.6 m/s<sup>2</sup> auch deutlich höher. Die beiden Zyklen sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

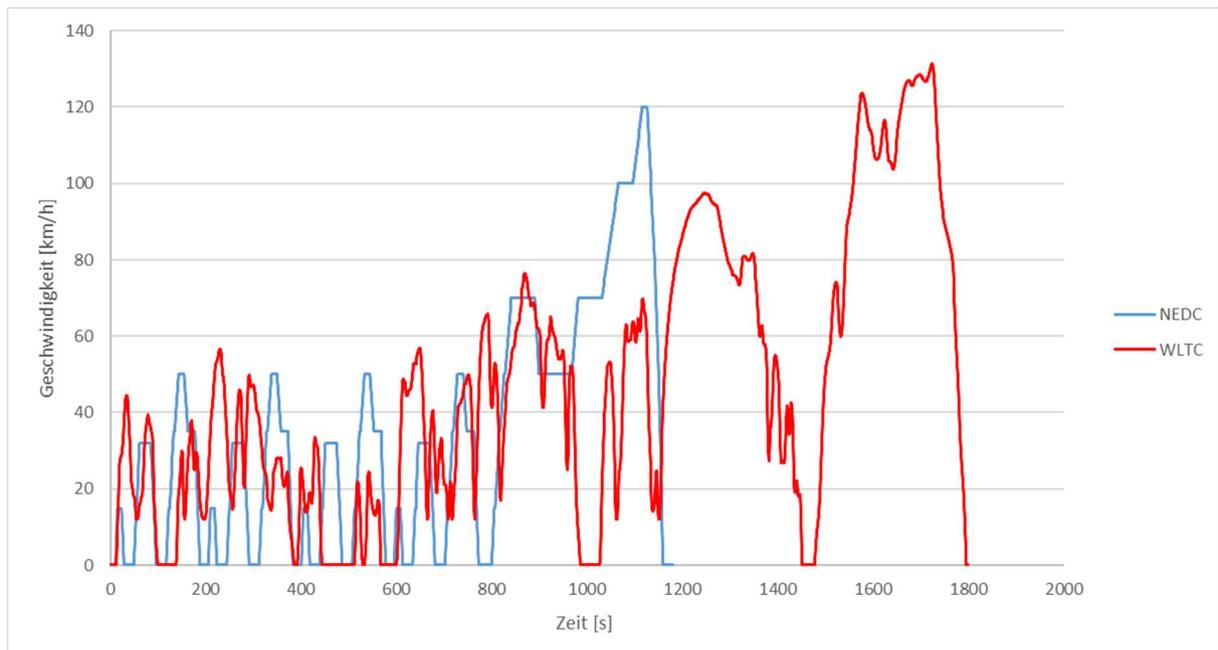


Abbildung 2-7 Geschwindigkeitsverlauf von NEDC und WLTC

Zusätzlich zu diesen beiden Zyklen gibt es noch weitere Zyklen, die in dieser Arbeit relevant sind, da Messdaten davon in die Arbeit eingeflossen sind. Diese Zyklen, die jedoch keine Relevanz für die Typisierung eines Fahrzeugs haben, sind nachfolgend beschrieben:

- CADC  
CADC steht für „Common Artemis Driving Cycle“ und besteht aus den 3 Phasen urban (Stadt), road (Überland) und motorway (Autobahn). Ein 1/3-Mix der Durchschnittswerte der einzelnen Phasen ergibt einen repräsentativen Wert für reales Fahren. Der Autobahn-Teil ist mit einer Spitzengeschwindigkeit von 130 km/h oder 150 km/h verfügbar. Die Dauer des Zykluses beträgt in Summe 3143 s.
- ERMES-Zyklus  
Dieser Zyklus stammt von der „European Research group on Mobile Emission Sources“. Er ist von der Dynamik dem CADC ähnlich, jedoch kürzer. Die Dauer des Zykluses beträgt 1110 s.
- RWC  
RWC steht für „Real World Cycle“ und ist aus realen Fahrten aus RDE Tests an der TU-Graz zusammengestellt. Der Zyklus enthält auch Fahrbahnsteigungen und wird mit aktivierten Nebenverbrauchern gefahren. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Zyklus primär in der Simulation verwendet wird und nur in Ausnahmefällen auf der Rolle gemessen wird. Die Dauer des Zykluses beträgt 6131 s.
- IUFC  
IUFC steht für „Inrets Urbain Fluide Courte“ und ist ein Zyklus, welcher aus 10 Mikrozyklen besteht, die ein ständiges Anfahren und wieder Stehenbleiben darstellen. Dieser Zyklus dient zur Analyse des Kaltstartverhaltens von Fahrzeugen, da die zeitliche Entwicklung bis zum betriebswarmen Zustand über die einzelnen Mikrozyklen gut zu erkennen ist. Die Dauer des Zykluses beträgt 945 s.

## 2.2.4 RDE-Messung

Zusätzlich zum WLTC muss seit Euro 6c auch eine Messung im realen Straßenverkehr durchgeführt werden, auch RDE-Messung (Real Drive Emissions) genannt. Bei einer solchen Messung wird das Fahrzeug mit einem PEMS (Portable Emission Measurement System) ausgerüstet, wodurch die Emissionen im realen Fahrbetrieb gemessen werden. Der Aufbau eines PEMS ist in Kapitel 2.3.3 beschrieben. Für die RDE-Messungen gelten sogenannte Not-To-Exceed-Limits (NTE-Limits), die sich aus den Grenzwerten der jeweiligen Norm und aus einem CF (Conformity Factor) ergeben. [2]

$$NTE_{\text{Pollutant}} = CF_{\text{Pollutant}} * E_{\text{Euro 6}} \quad (2-21)$$

$NTE_{\text{Pollutant}}$  ..... Not-To-Exceed-Limit [g/km]

$CF_{\text{Pollutant}}$  ..... Conformity Factor [-]

$E_{\text{Euro 6}}$  ..... Grenzwert im Typprüfzyklus [g/km]

Die Conformity Faktoren sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 2-3 Conformity Faktoren für RDE-Messungen [2]

	Conformity-Factor	
	NO <sub>x</sub>	PN
Euro 6c	-	1,5
Euro 6d-Temp	2,1	1,5
Euro 6d	1,5	1,5

Für Euro 6c werden die RDE-Messung nur für Überwachungszwecke durchgeführt. Dabei gibt es kein NTE-Limit für NO<sub>x</sub>. Für PN muss bereits das NTE-Limit mit dem Conformity Factor 1,5 eingehalten werden. Ab Euro 6d-Temp müssen die NTE-Limits für NO<sub>x</sub> und PN eingehalten werden.

Weiters gibt es folgende Regelungen, die zu berücksichtigen sind, wenn eine RDE-Messung durchgeführt wird:

- Die Fahrt soll aus 34 % Stadtanteil, 33 % Überlandanteil und 33 % Autobahnanteil zusammengestellt sein. Dieser Wert bezieht sich auf die gefahrene Strecke, zugeteilt nach der Geschwindigkeit im jeweiligen Zeitschritt (Stadt:  $v < 60$  km/h / Überland:  $60 < v < 90$  km/h / Autobahn:  $v > 90$  km/h).
- Start- und Endpunkt dürfen nicht mehr als 100 m Höhendifferenz zueinander haben.
- Die maximale Stillstandszeit mit Geschwindigkeiten  $< 1$  km/h ist beschränkt.
- Die Klimaanlage und sonstige Nebenverbraucher müssen den normalen Bedingungen auf der Straße entsprechen. (Wenn Heizungssysteme verwendet werden, sollte die Klimaanlage „aus“ sein).
- Die positiv kumulierten Höhenmeter dürfen die Grenze von 1200 m / 100 km nicht überschreiten.
- Kein übermäßig moderates oder aggressives Fahren.
- Die Umgebungstemperatur darf zu keinem Zeitpunkt höher als 35 °C oder niedriger als -2 °C sein (bis September 2019, danach nicht niedriger als -7 °C).

Neben diesen Kriterien, die definieren, ob ein gemessener Zyklus als gültig definiert ist, gibt es für Umgebungstemperatur und Höhenlage noch einen „Extended-Bereich“. Der Extended-Bereich liegt in den Temperaturbereichen  $-2 \leq T < 3$  °C (bis September 2019, danach  $-7 \leq T < 0$  °C) und  $30 < T \leq 35$  °C und im Höhenbereich  $700 < h \leq 1300$  m.

Im Extended-Bereich gelten Zustände, die eine Erhöhung der Schadstoffemissionen bewirken können. Wenn sich in einer Zeitspanne während der Messung die Kriterien in den Extended-Bereichen befinden, so werden die gemessenen Werte von NO<sub>x</sub>, PN und CO während dieser Zeitspanne durch einen Korrekturfaktor dividiert. Dieser Korrekturfaktor ist für Euro 6d-Temp und Euro 6d mit 1,6 definiert.

Die gemessenen RDE-Fahrten werden mit dem sogenannten ECE-Tool im Zusammenhang der gesetzlichen Rahmenbedingungen auf Gültigkeit überprüft. Mit diesem Werkzeug können die Emissionen auch in Abhängigkeit des Fahrstils nach Emroad ( in der Gesetzgebung auch als Moving Average Windows genannt) oder CLEAR (in der Gesetzgebung auch als Power-Binning-Methode genannt) gewichtet werden. Für nähere Informationen wird auf entsprechende Literatur verwiesen.

## 2.3 Emissionsmesstechnik

Die Emissionsmesstechnik kann in vielen Bereichen eingesetzt werden, zum einen wenn es darum geht, vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte einzuhalten, oder wenn wichtige Erkenntnisse in der Motorenentwicklung erwünscht sind. Diese Messdaten bilden weiters die Grundlage von Simulationsmodellen. Emissionsmessungen können am Motorprüfstand, Rollenprüfstand und im realen Straßenverkehr durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird der Motorprüfstand nicht näher beschrieben, da dieser nicht verwendet wurde. Nach Art der Probenentnahme aus dem Abgas unterscheidet man zwischen:

- Vollstromverdünnung
- Teilstromverdünnung
- Unverdünnte Entnahme

### 2.3.1 Rollenprüfstand

Ein Rollenprüfstand liefert u.a. die Möglichkeit, unter streng definierten Bedingungen ein Fahrzeug annähernd wie im realen Straßenverkehr zu betreiben. Das Fahrzeug wird mit den angetriebenen Rädern auf Rollen aufgespannt. Es gibt sowohl Prüfstände für eine angetriebene Achse als auch Prüfstände für Allrad-Fahrzeuge. (Vgl. [34] S. 66)

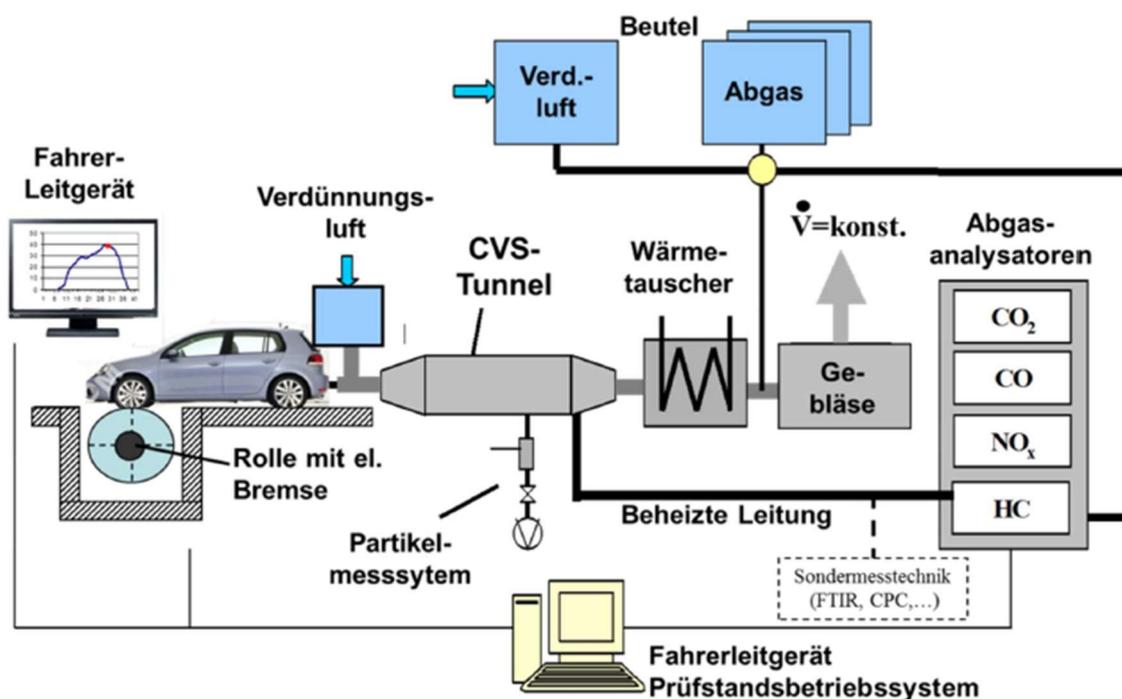


Abbildung 2-8: Funktionsschema PKW-Rollenprüfstand

Die Rolle wird über eine Gleichstrommaschine angetrieben und gebremst. Dabei wird die Bremskraft so geregelt, dass sie den Fahrwiderständen des jeweiligen Fahrzeugs entspricht. Die Massenträgheiten des Fahrzeugs können durch die rotatorische Masse der Rollen und z.B. durch einen zuschaltbaren Massensatz dargestellt werden. Der Prüfstandsfahrer bekommt die vorgegebene Geschwindigkeit über ein Fahrerleitgerät angezeigt. Die Schadstoffemissionen werden nach dem Constant-Volume-Sampling-Verfahren gemessen (siehe Kapitel 2.3.2), wobei zusätzlich zur CVS-Anlage auch andere Messgeräte (PEMS, FTIR - Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) verwendet werden können. (Vgl. [34] S. 66)

Der Prüfstand der TU-Graz hat folgende Eckdaten:

- Bremse: 56 kW Gleichstrommaschine / 100 kW Wechselstrommaschine
- Temperatur: regelbar von -30 bis 40 °C
- Geschwindigkeit: max. 160 km/h
- Fahrzeugmasse: 567 bis 2325 kg
- Regelbare Luftfeuchte

(Vgl. [9] S.1)

### 2.3.1.1 Theorie der Fahrwiderstände

Die erforderliche Antriebsleistung, die vom Fahrzeug überwunden werden muss, ergibt sich mit folgender Gleichung.

$$P_{Total} = P_{Roll} + P_{Luft} + P_a + P_{Steigung} + P_{Schlupf} + P_{Getriebe} + P_{Nebenaggregate} \quad (2-22)$$

$P_{Total}$	.....	Erforderliche Antriebsleistung [W]
$P_{Roll}$	.....	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstandes [W]
$P_{Luft}$	.....	Leistung zur Überwindung des Luftwiderstandes [W]
$P_a$	.....	Beschleunigungsleistung [W]
$P_{Steigung}$	.....	Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands [W]
$P_{Schlupf}$	.....	Verlustleistung durch Reifenschlupf [W]
$P_{Getriebe}$	.....	Verlustleistung im Getriebe [W]
$P_{Nebenaggregate}$	.....	Leistungsbedarf der Nebenaggregate [W]

(Vgl. [11] S. 31)

$P_{Schlupf}$ ,  $P_{Getriebe}$ , und  $P_{Nebenaggregate}$  müssen nicht vom Prüfstand aufgebracht werden, da sie immer auftreten. Die Simulation des Beschleunigungswiderstandes ( $P_a$ ) erfolgt am Prüfstand der TU-Graz durch Schwungmassen. Roll- und Luftwiderstand werden von der Gleichstrommaschine aufgebracht. Die Leistungen zur Überwindung von Roll- und Luftwiderstand ergeben sich nach folgenden Gleichungen:

$$P_{Roll} = m_{ges} * g * (Fr_0 + Fr_1 * v + Fr_4 * v^4) * v \quad (2-23)$$

$m_{ges}$	.....	Masse des Fahrzeuges inkl. Beladung [kg]
$g$	.....	Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
$Fr_0$	.....	Statischer Rollwiderstandsbeiwert (aus Ausrollversuch) [-]
$Fr_1$	.....	Linearer Rollwiderstandsbeiwert (aus Ausrollversuch) [s/m]
$Fr_4$	.....	Rollwiderstandsbeiwert der 4. Potenz (aus Ausrollversuch) [ $s^4/m^4$ ]
$v$	.....	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

$$P_{Luft} = C_w * A_{Querschnitt} * \frac{\rho_L}{2} * v^3 \quad (2-24)$$

$C_w$	.....	Luftwiderstandsbeiwert [-]
$A_{Querschnitt}$	.....	Querschnittsfläche des Fahrzeuges [ $m^2$ ]
$\rho_L$	.....	Dichte der Luft [ $1,2 \text{ kg/m}^3$ im Normzustand]

(Vgl. [11] S. 32)

Die Leistung zur Überwindung des Höhenwiderstandes kann aus der Arbeit zur Überwindung der Höhendifferenz ermittelt werden. Rechnerisch ist dies etwa gleichzusetzen mit der aus Fahrzeugmasse und Fahrbahnsteigung resultierenden Kraftkomponente parallel zur Fahrbahn.

$$P_{Steigung} = m_{ges} * g * Stg * 0,01 * v \quad (2-25)$$

$Stg$	.....	Steigung der Fahrbahn [%]
-------	-------	---------------------------

(Vgl. [11] S. 60)

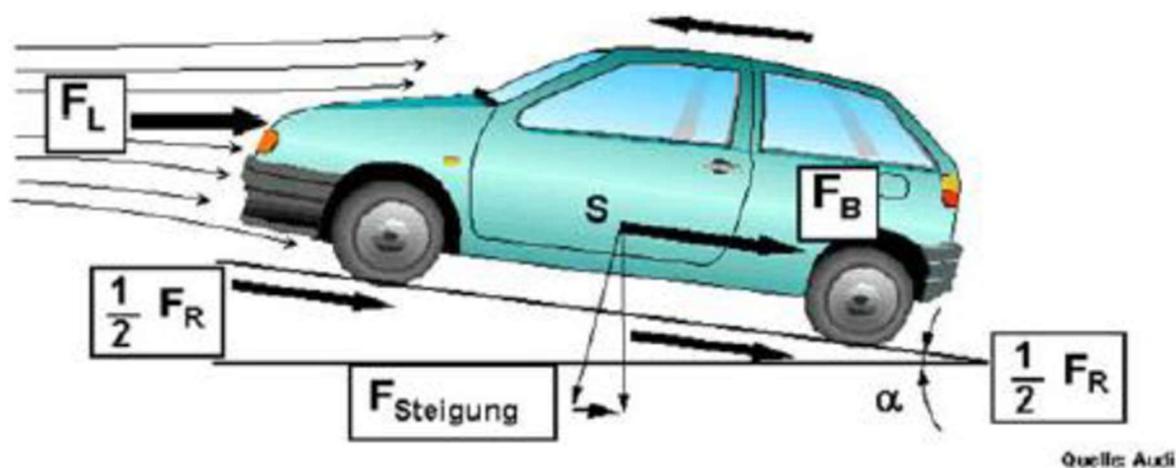


Abbildung 2-9: Fahrwiderstände an einem Kfz [11]

### 2.3.1.2 Messtechnische Bestimmung der Fahrwiderstände

Luftwiderstand und Rollwiderstand können als ein Fahrwiderstandspolynom dargestellt werden. Dieses Polynom kann aus Ausrollversuchen oder Konstantfahrten bei verschiedenen Geschwindigkeiten ermittelt werden.

Bei einem Ausrollversuch wird das Fahrzeug auf einer ebenen und möglichst gerade verlaufenden Fahrbahn auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt (PKW 120 km/h). Bei Erreichen der Geschwindigkeit wird das Fahrzeug ausgekuppelt und so lange ohne Bremsenwirkung geradeaus gefahren, bis eine Grenzggeschwindigkeit (PKW ca. 20 km/h) erreicht wird. Der Geschwindigkeitsverlauf (Ausrollkurve) wird aufgezeichnet und dient zur Bestimmung der Fahrwiderstände (siehe Abbildung 2-10). Die Trägheitskraft des PKW entspricht nämlich der Summe aus Luft- und Rollwiderstandskraft. (Vgl. [11] S. 33)

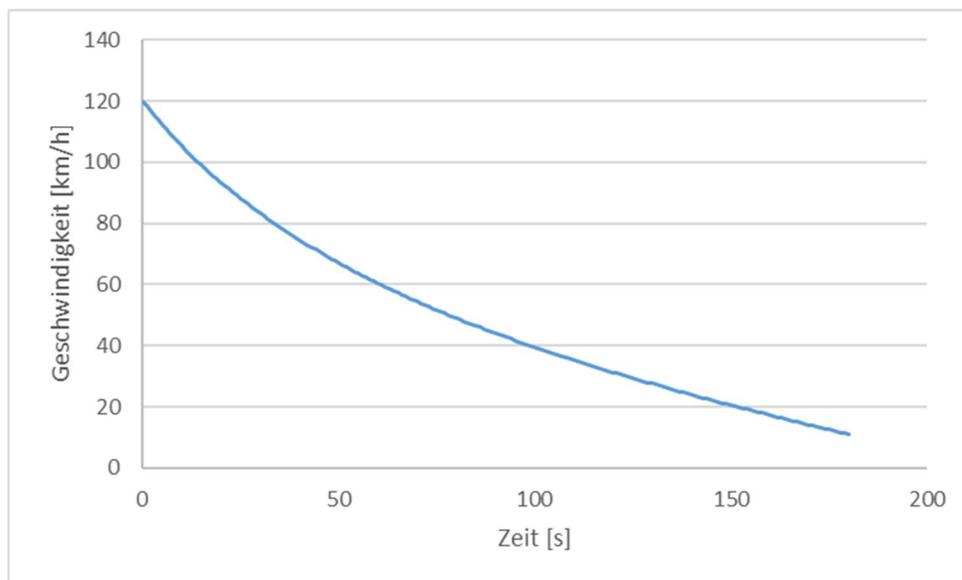


Abbildung 2-10: Geschwindigkeitsverlauf bei einem Ausrollversuch

Anhand der Ausrollkurve kann die sekundliche Verzögerung berechnet und über der Geschwindigkeit aufgetragen werden. Wenn man die Beschleunigung mit der Fahrzeugmasse multipliziert, ergibt sich die Summe aus Luft- und Rollwiderstand. Der Verlauf kann mit einem Polynom 2. Ordnung ausreichend gut beschrieben werden (siehe Abbildung 2-11).

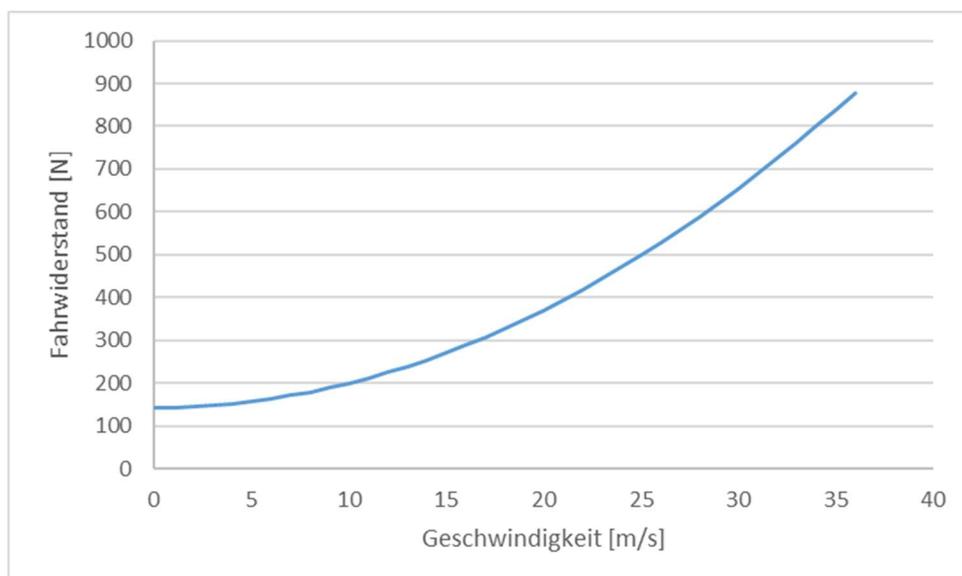


Abbildung 2-11: Fahrwiderstandspolynom aus einem Ausrollversuch

Das Fahrwiderstandspolynom würde in diesem Fall wie folgt aussehen:

$$F_{\text{Rolle}} = (R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2) \quad (2-26)$$

$$F_{\text{Rolle}} = (142,92 + 0 * v + 0,5674 * v^2) \quad (2-27)$$

$F_{\text{Rolle}}$	.....	Fahrwiderstand [N]
$R_0$	.....	Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandskoeffizient [N]
$R_1$	.....	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandskoeffizient [N/(km/h)]
$R_2$	.....	Luftwiderstand [N/(km/h) <sup>2</sup> ]

Durch eine Division der Rollwiderstandskoeffizienten durch die Fahrzeugmasse und Erdbeschleunigung können die Rollwiderstandskoeffizienten in Rollwiderstandsbeiwerte (Gleichung (2-23)) umgewandelt werden.

Der Ausrollversuch nach diesem Ansatz setzt jedoch ideale Messbedingungen voraus:

- Ebene Strecke ohne Kurven
- Windstille
- Normtemperatur und Norm-Luftdruck (20 °C und 1,013 bar)

Da diese Bedingungen selten auftreten, muss der Einfluss abweichender Bedingungen bei der Bestimmung der Fahrwiderstände korrigiert werden. Für weitere Details wird auf [11] verwiesen. (Vgl. [11] S. 34)

### 2.3.2 CVS – Constant Volume Sampling

Wie bereits erwähnt, wird der Auspuff des Fahrzeuges während einer Rollenmessung an eine CVS-Anlage angeschlossen. Das Abgas wird im CVS-Tunnel mit einem Luftstrom verdünnt. Durch die Verdünnung soll eine Kondensation und chemische Reaktionen in der Abgasprobe gehemmt werden. Damit die Berechnung der absolut emittierten Mengen nicht verfälscht wird, wird mittels Drehkolbengebläse oder Venturidüsen ein konstanter Volumenstrom des Gemisches aus Abgas und Luft gebildet. Anschließend wird ein Teilstrom für die Emissionsmessung in mehrere Beutel geführt, während weitere Teilströme für zeitaufgelöste Messungen zu Analysatoren geführt werden. Die CVS-Anlage am IVT ist mit folgenden Messsystemen ausgestattet:(Vgl. [11] S.43f)

- NDIR (Nichtdispersive Infrarot-Analysator) für CO<sub>2</sub> und CO
- Chemolumineszenzmessung für NO<sub>x</sub>
- FID (Flammenionisationsdetektor) für C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>
- Gravimetrische Filtermessung für Partikelmasse
- CPC (Condensation Particle Counter) für Partikelanzahlmessung

(Vgl. [11] S.38ff)

Diese Messsysteme liefern meist eine Konzentration in Vol.-% oder ppm. Die Umrechnung in die Größen [g/h] oder [#h] für Partikelanzahl erfolgt über den bekannten CVS-Volumenstrom und die Dichte der einzelnen Abgaskomponenten. Da in der Verdünnungsluft bereits Schadstoffe vorhanden sind, müssen die Messergebnisse noch entsprechend hintergrundkorrigiert werden. Außerdem benötigen die Emissionen eine gewisse Zeit vom Motorauslass bis zu den Analysatoren. Dadurch und durch die unterschiedliche Ansprechzeit der Analysatoren sind die Schadstoffkomponenten zeitverschoben und müssen zeitlich richtig der Motorleistung zugeordnet werden. Oft reicht die Zeitverschiebung um eine konstante Transportzeit von Motor bis Analysator aus, bei dynamischen Messungen soll jedoch eine variable Zeitverschiebung durchgeführt werden. (Vgl. [11] S.46f)

### 2.3.3 PEMS – Portable Emission Measurement System

Neben der Rollenprüfstandsmessung besteht auch der Wunsch, Emissionen mobil im realen Straßenverkehr zu messen. Bei den Messungen kommt ein speziell für den mobilen Einsatz entwickeltes Gerät zum Einsatz. Mit einem PEMS können sowohl die gasförmigen Emissionen CO<sub>2</sub>, CO, HC und NO<sub>x</sub> (NO und NO<sub>2</sub>) als auch Ruß und Partikelanzahl gemessen werden. [1]

#### Analysatoren von PEMS

- CO<sub>2</sub> und CO: Nichtdispersiver Infrarot Analysator (NDIR)
- HC: Flammenionisationsdetektor (FID)
- NO<sub>x</sub>: Nichtdispersiver Ultraviolett Analysator (NDUV)
- Soot Sensor und Partikelanzahl PEMS

[1]

Das verwendete PEMS stammt von der AVL List GmbH, nennt sich AVL M.O.V.E. und wird unterschieden in ein Gas-PEMS und ein PN- (Particle Number) PEMS. Das Gas-PEMS erfasst gasförmige Emissionen. Das PN-PEMS ist ein Zusatzmodul, welches für die Erfassung der Partikelanzahl zuständig ist. Dieses Gerät erlaubt Messungen mit einer Frequenz von 10 Hz und wird mittels Akkus in einem eigenen Stromkreis betrieben. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die HC-Emissionen nicht gemessen, da das notwendige Messmodul nicht zur Verfügung stand. Für nähere Informationen bezüglich des PEMS-Aufbaus sowie die Messprinzipien sei auf entsprechende Fachliteratur [1] verwiesen.

### 2.3.4 FTIR – Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie

Die FTIR-Spektroskopie erlaubt eine kontinuierliche und für mehrere Komponenten gleichzeitige Messung von Gasen mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 5 Hz. Mit dem verwendeten Messgerät kann eine Vielzahl an Emissionskomponenten gemessen werden. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O und 1,3-Butadien gemessen. Das Messprinzip beruht auf der Absorption von Infrarotstrahlung durch Gase. Auf eine detaillierte Beschreibung wird auf die Literatur verwiesen.

## 2.4 Emissions-Inventurmodelle

Die Messung von Emissionen des Verkehrs in einem größeren Gebiet ist nicht durchführbar, da jedes Fahrzeug in diesem Gebiet gemessen werden müsste. Aus diesem Grund werden „Emissions-Inventuren“ erstellt (siehe Abbildung 2-12). Die Grundlage dieser Modelle ist simpel, problematisch ist jedoch die Bereitstellung und sinnigere Strukturierung der nötigen Daten. (Vgl. [11] S.49)

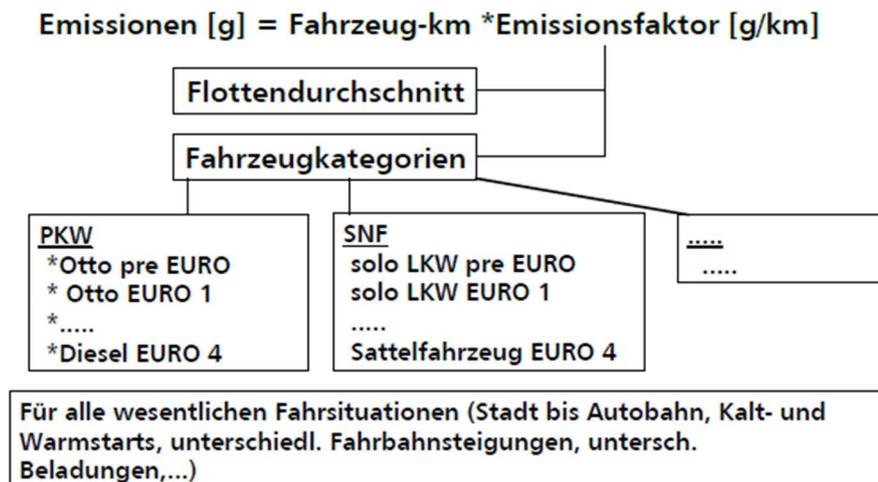


Abbildung 2-12 Berechnungsschema für Emissions-Inventurmodelle [11]

Inventurmodelle sind ein Werkzeug zur Darstellung der Emissionen des Straßenverkehrs in einem Gebiet. Dabei sollen alle Fahrleistungen aufsummiert werden. Aufgrund des unterschiedlichen Betriebsverhaltens wird zwischen den Straßenkategorien „Innerorts“, „Außerorts“ und „Autobahn“ unterschieden. Je nach dem, welches Ziel das Modell hat, können die Auflösungen sehr stark variieren. Die Anwendung reicht von technischer Optimierung von Energiesystemen, strategischer Planung vom Verkehrssektor bis hin zur Erstellung von Emissionsbilanzen ganzer Länder. (Vgl. [11] S.50)

Gesamtmodelle können meist in folgende Module unterteilt werden:

- Simulation der KFZ-Bestandsstruktur
- Simulation der spezifischen Fahrleistungen
- Simulation des Emissionsverhaltens
- Kalibrierung

(Vgl. [11] S.50)

Für die Berechnung des Emissionsverhaltens werden die Emissionen nach Fahrzeugkategorien dargestellt, innerhalb welcher ein homogenes Emissionsverhalten angenommen wird (z.B.: Otto-PKW Euro 6ab). Einige Modelle umfassen „nur“ die Darstellung der spezifischen Emissionen [g/km] der Fahrzeugkategorien. Diese spezifischen Emissionen werden auch „Emissionsfaktoren“ genannt. Daher werden diese Modelle „Emissionsfaktoren-Modelle“ genannt. Für die Berechnung der Fahrzeug-km werden z.B. die Bestandsstatistik (Anzahl der KFZ je Jahr) und Daten über die mittleren spezifischen Fahrleistungen verwendet. Bei den spezifischen Fahrleistungen spielen Alter und Fahrzeuggröße jedoch auch eine Rolle. So werden z.B. neue und größere Fahrzeuge mehr gefahren als alte und kleine. Oder wird z.B. der größere Diesel-PKW eher für Urlaubsfahrten verwendet als der kleine Otto-PKW. Die Basis für solche Emissionsfaktoren stellen Motor- sowie Fahrzeugmessungen dar. (Vgl. [11] S.50)

### 2.4.1 HBEFA – Handbook Emission Factors for Road Transport

Das Handbuch für Emissionsfaktoren im Straßenverkehr ist eine Datenbankanwendung, die Emissionsfaktoren für alle gängigen Straßenfahrzeugkategorien (PKW, LNF, LKW, Busse und Zweiräder) für eine hohe Vielfalt an Verkehrssituationen bereitstellt. Die Emissionsfaktoren werden für alle limitierten sowie die wichtigsten nicht regulierten Luftschadstoffe sowie für den Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub> angegeben. Der Nutzer kann aus einer Vielzahl von Parametern wählen und erhält eine Liste mit den gewünschten Emissionsfaktoren, angegeben in g/km. Es folgen die wichtigsten Parameter, aus denen der Nutzer wählen kann:

- PKW, LNF, LKW, Busse, Motorräder
- Limitierte sowie wichtigste unregulierte Luftschadstoffe
- Bezugsjahre 1990 bis 2030
- Straßenkategorien (Autobahn, Schnellstraße, Hauptstraße, ...)
- Verkehrsbelastung (freie Fahrt bis heavy stop & go)
- Fahrbahnlängsneigung – Steigung (0 % bis +/- 6 %)
- Alle Euro-Schadstoffklassen
- Berechnung von Kaltstart-Zusatzemissionen
- Berechnung von Verdampfungsemissionen
- Berücksichtigung von Klimaanlage und Partikelfilter /SCR /AGR

Vgl. [13]

Die erste Version des HBEFA (HBEFA 1.1) wurde im Dezember 1995 veröffentlicht. Seitdem wurden in 4- bis 5-Jahresabständen Updates mit den aktuellen technologischen Entwicklungen unter Anbetracht der neuesten Regulierungen veröffentlicht. Mit jedem Update wurden auch die neuesten Methoden der Emissionsmessung und –Modellierung implementiert, sowie die aktuellsten Flottenzusammenstellungen und Verkehrssituationen berücksichtigt. Die aktuelle Version (HBEFA 3.3) wurde im April 2017 veröffentlicht und hat die Emissionsfaktoren für Diesel-Fahrzeuge mit ersten Messdaten bis EURO 6ab aktualisiert. Die letzte Aktualisierung der Emissionsfaktoren für Otto-Fahrzeuge hat mit dem HBEFA 3.2 im Jahr 2013 stattgefunden. Zu diesem Zeitpunkt stand jedoch nur 1 Otto-Fahrzeug der Klasse Euro 6ab zur Verfügung. Aufgrund dessen wurden die CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen größtenteils von Euro 5 abgeleitet. Dies sowie die Ereignisse der letzten Jahre, die Lücken in der Typisierung an den Tag legten, führten zum Druck nach einem neuen Update der Emissionsfaktoren für PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Darüber hinaus sind der Kraftstoffverbrauch und die zunehmende Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeuge ein Hauptthema, da der Unterschied zwischen den Testergebnissen und den realen Emissionen kontinuierlich anzusteigen scheint. Aus diesem Grund werden in der neuen Fassung nun auch RDE-Messungen in die Emissionsfaktoren einfließen. Auch alternative Antriebe sollen im neuen Update berücksichtigt werden. (Vgl. [23] S.5)

Das HBEFA wurde ursprünglich von den Umweltbundesämtern Deutschlands (UBA-D), der Schweiz (BAFU) und Österreichs (UBA-Ö) in Auftrag gegeben. Mittlerweile haben sich auch Frankreich, Norwegen und Schweden beteiligt.

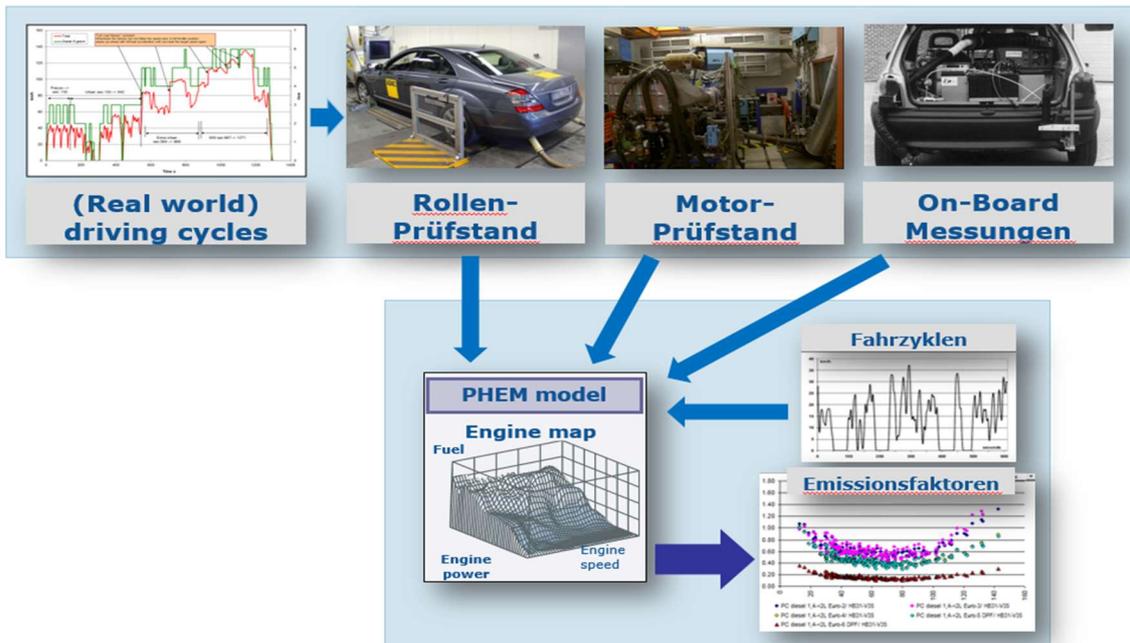


Abbildung 2-13: Prinzip der Erstellung von Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren im HBEFA basieren auf einer Vielzahl von Fahrsituationen. Diese Fahrsituationen werden aus einer Auswahl von Fahrzyklen zusammengestellt. Die Zyklen reichen von normalen Fahrten im Überland, über starke Stausituationen in der Stadt bis hin zu Extremfahrten auf der Autobahn. Jeden Zyklus gibt es mit Steigungen von -6 % bis +6 % in Schritten von 2 %. Abbildung 2-14 zeigt exemplarisch die simulierten CO<sub>2</sub>-Werte für alle HBEFA-Zyklen mit der Steigung 0 %. Im Vergleich dazu ist ein simulierter Real-World-Zyklus, der aus einer RDE-Fahrt im Grazer Umland abgeleitet wurde, dargestellt. Die Zyklen werden einer Gewichtung unterzogen, welche das durchschnittliche Emissionsniveau, passend zu den gewählten Parametern und betrachteten Ländern, darstellt. Durch die Gewichtung der Zyklen wird ein absoluter Emissionswert in g/km (für Partikel #/km) gebildet. Die Simulation dieser Zyklen wurde mit dem Simulationsprogramm PHEM durchgeführt, welches im Kapitel 4.1 beschrieben wird.

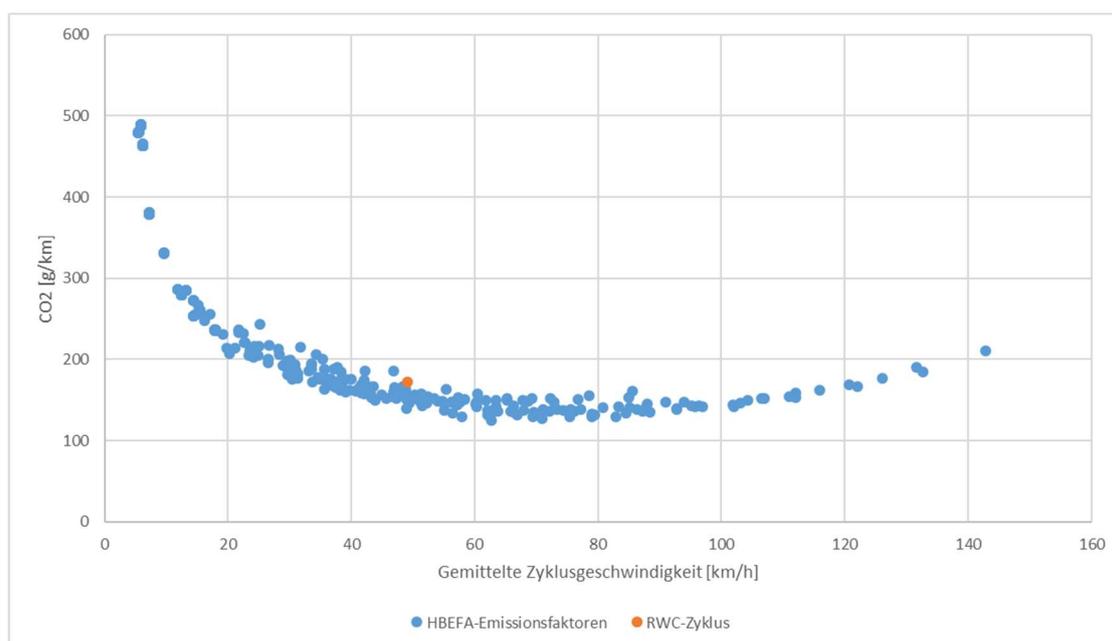


Abbildung 2-14: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für Steigung 0 % im Vergleich mit einem RWC-Zyklus

### **3 Messungen für HBEFA 4.1**

Ein Bestandteil dieser Arbeit war die Emissionsmessung von folgenden 2 Otto-Fahrzeugen:

- Euro 6b Fahrzeug; auf der Straße vermessen
- Euro 6d-Temp Fahrzeug, auf der Straße sowie am Prüfstand vermessen

Dieses Kapitel beschäftigt sich daher mit den technischen Daten der 2 vermessenen Fahrzeuge, dem Messaufbau, Messprogramm sowie den durchgeführten Messungen. Anschließend wird eine Auswertung der zeitaufgelösten Messdaten durchgeführt. Beide Fahrzeuge sind in verschiedenen Punkten in diese Masterarbeit eingeflossen.

#### **3.1 Messungen mit dem Euro 6b Fahrzeug**

##### **3.1.1 Fahrzeugbeschreibung**

Bei dem untersuchten Fahrzeug handelte es sich um einen Otto-PKW mit Vorderradantrieb. Das Fahrzeug ist für die Fahrzeugklasse Euro 6b zugelassen. Die Fahrzeugdaten sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Daten Fahrzeug Euro 6b [31]

<b>Motor</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Motorbauart	-	Reihen-Dreizylinder-Ottomotor
Hubraum	[cm <sup>3</sup> ]	1499
Verdichtung	[-]	11:1
Anzahl der Zylinder	[-]	3
Aufladung	[-]	Ja
Abgasklasse	[-]	Euro 6b
CO <sub>2</sub> -Emission laut Hersteller	[g/km]	124
Nennleistung	[kW]	100
Nenndrehzahl	[1/min]	4400
Leerlaufdrehzahl	[1/min]	800
Abgasnachbehandlung	[-]	3-Wegekat, Lamdasonde
<b>Antrieb</b>		
Antriebsart	[-]	Vorderradantrieb
Getriebe	[-]	6-Gang Manuell
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5/6/R	[-]	3,615/1,952/1,241/0,969/0,806/0,683/3,538
Achsübersetzung	[-]	3,882
Bereifung bei Messungen	[-]	225/50 R18 95H M+S (Winterreifen)
<b>Karosserie/Abmessungen</b>		
Stirnfläche	[m <sup>2</sup> ]	2,46
Luftwiderstandsbeiwert lt. Hersteller	[-]	0,28
Leergewicht nach DIN	[kg]	1440
<b>Weitere Daten</b>		
Baujahr	[-]	2016
Erstzulassung	[-]	21.11.2016
Kilometerstand bei Messserienstart	[km]	5900

### 3.1.2 RDE-Messung

#### 3.1.2.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau des PEMS am Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Für die Messung wurde ein zusätzliches Rohrsystem angebracht. In diesem Rohrsystem ist die Entnahmestelle für das Gas- und PN-PEMS sowie ein Exhaust Flow Meter (EFM) zur Messung des Abgasmassenstromes verbaut.

Für eine Messung sind neben Gas- und PN-PEMS weitere Geräte notwendig. Auf dem Dach des Fahrzeuges ist eine Wetterstation sowie ein GPS-Empfänger angebracht. Diese dienen zur Erfassung von Umgebungstemperatur, Luftdruck und -feuchte sowie zur Erfassung von Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Das EFM wird benötigt, um aus den gemessenen Schadstoffkonzentrationen auf die Massenemissionen schließen zu können.

Sämtliche Daten werden in der „System Control“ aufgezeichnet und in einer Messdatei ausgegeben. Im Betrieb wird das PEMS mittels Batterien energieautark betrieben. Über den OBD-Stecker (On Board Diagnose) werden weitere Fahrzeugdaten (Motordrehzahl, Fahrzeuggeschwindigkeit, Kühlmitteltemperatur, ...) ausgelesen und mittels einem Windows-basierten Diagnoseprogramm, genannt VCDS, ausgewertet.



Abbildung 3-1: Aufbau des PEMS am Fahrzeug

### 3.1.2.2 RDE-Messung

Die RDE-Messungen wurden auf der sogenannten „Ries-Route“ durchgeführt. Diese Route wurde ausgewählt, da mit dieser Strecke die RDE-Tripparameter eingehalten werden können.

Die Route führt nach einer Stadtrunde in Graz über die Ries-Bundesstraße B65 nach Gleisdorf und dann weiter nach Sinabelkirchen (B54). In Sinabelkirchen wird auf die Autobahn A2 aufgefahen, die dann zurück nach Graz führt. Abbildung 3-2 zeigt die eingezeichnete Strecke auf der Karte. Orange und gelbe Streckenabschnitte kennzeichnen Bereiche mit niedriger Seehöhe, rote und violette Streckenabschnitte hingegen Bereiche höherer Lagen. (Vgl. [8] S.30)

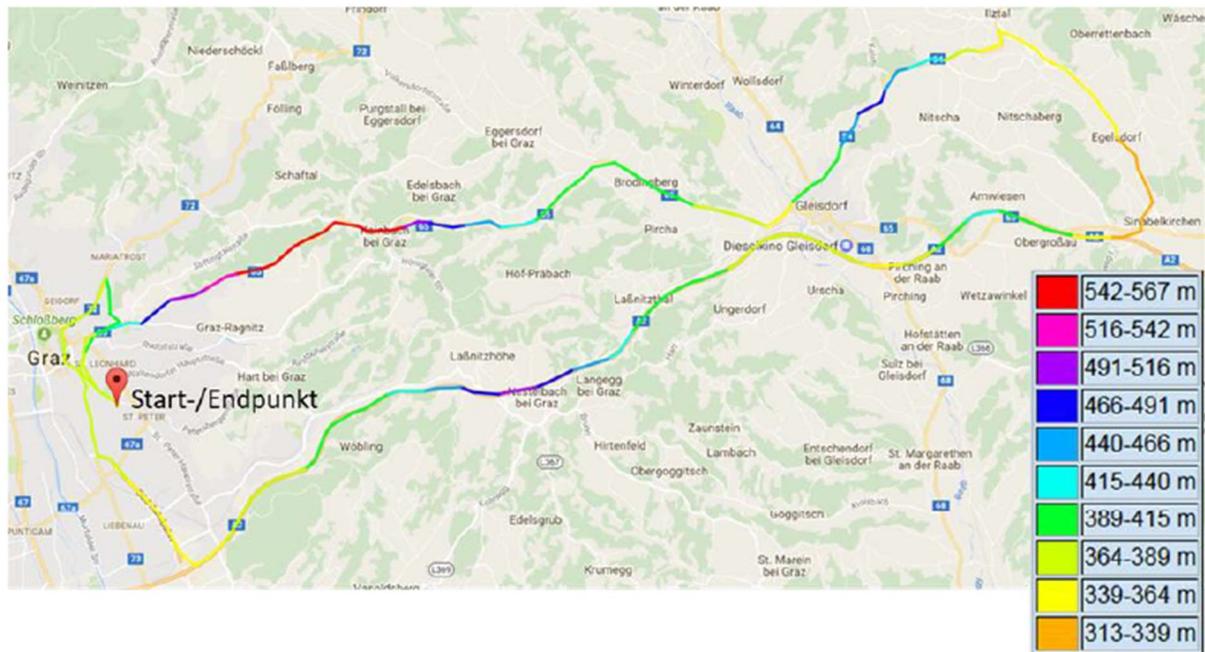


Abbildung 3-2: Streckenverlauf der Ries-Route [17]

Die Länge der Strecke beträgt etwa 84 km, die Zeit, die für die Strecke benötigt wird, ist unter anderem vom Verkehrsaufkommen abhängig. Die kumulierten Höhenmeter belaufen sich auf ca. 770 m/ 100 km. Die Route hat eine maximale Seehöhe von 580 m und eine minimale Seehöhe von 300 m, die maximale Steigung beträgt 11 %. Abbildung 3-3 zeigt den Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf der ersten gemessenen RDE-Fahrt auf der Ries-Strecke mit diesem Fahrzeug. (Vgl. [8] S.30)

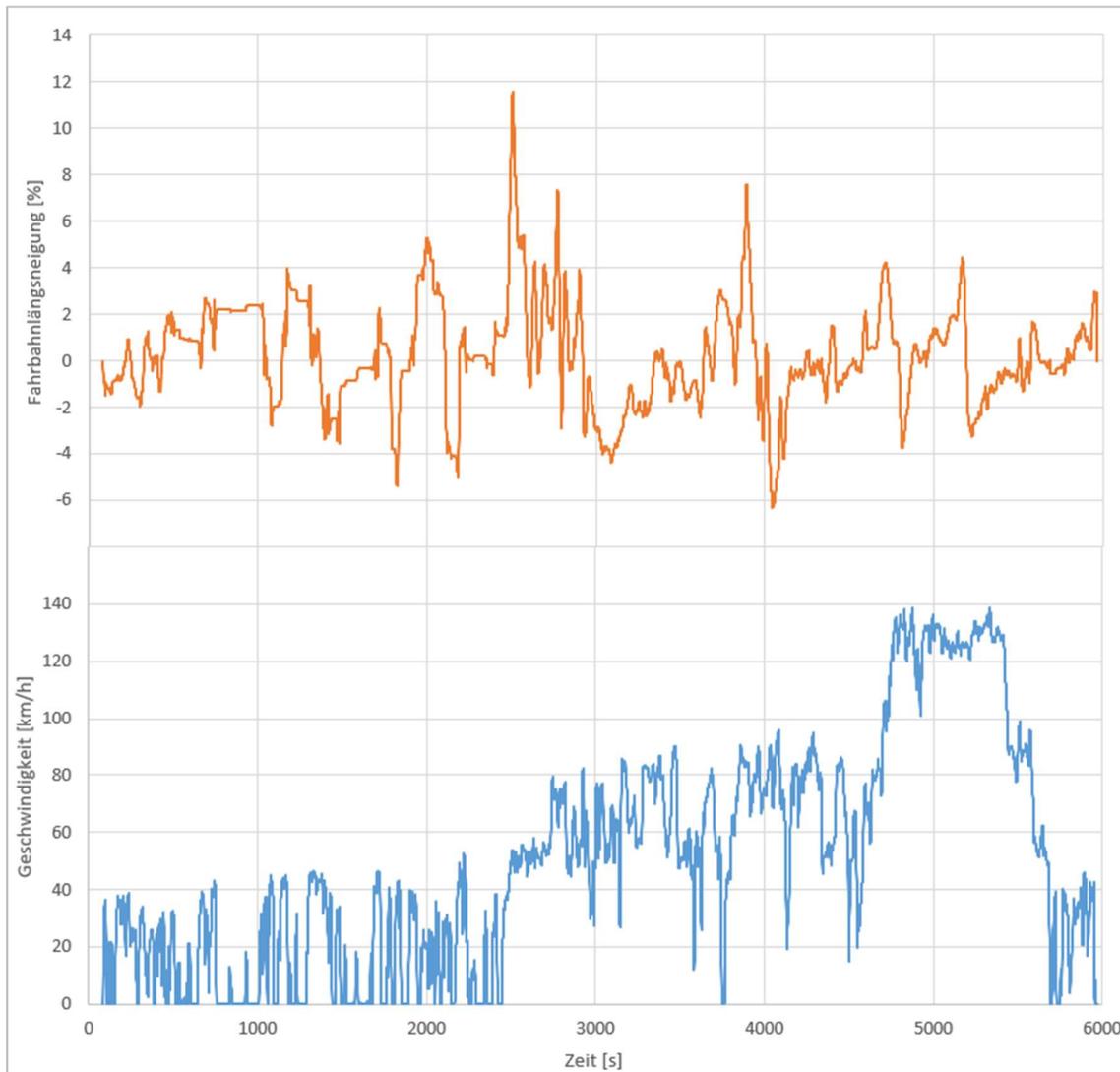


Abbildung 3-3: Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf einer RDE-Fahrt auf der Ries-Route

Mit dem Versuchsfahrzeug wurden im Mai 2018 Messungen mit normalem Fahrstil auf der Ries-Route durchgeführt.

### 3.1.3 Auswertung der Messungen

Die Auswertung der Messungen erfolgt mit Hilfe des ERMES-Tools. Das ERMES-Tool dient zur Berechnung von Emissionsmassenströmen. Dazu werden gemessene Emissionskonzentrationen, Massenströme und der sogenannte  $U_{\text{Gas}}$ -Faktor benötigt. Die Emissionsmassenströme werden für alle Abgaskomponenten gleich berechnet, einziger Unterscheidungsfaktor ist der  $U_{\text{Gas}}$ -Faktor. Außerdem können mit dem ERMES-Tool Messdaten zeitverschoben werden. Dies korrigiert die Laufzeit der Emissionen vom Motorausgang bis zu den Analysatoren. Für eine genaue Beschreibung der Zeitverschiebung sei auf [22] verwiesen.

Gleichung (3-1) zeigt exemplarisch eine Berechnung der Massenemission für  $\text{NO}_x$ . (Vgl. [22] S.16ff)

$$\dot{m}_{\text{NO}_x} = \dot{m}_{\text{Abgas}} * \frac{c_{\text{NO}_x}}{1\,000\,000} * U_{\text{Gas\_NO}_x} \quad (3-1)$$

$$U_{\text{Gas}} = \frac{\text{Dichte Gaskomponente}}{\text{Dichte Abgas}} \quad (3-2)$$

$\dot{m}_{\text{NO}_x}$	.....	$\text{NO}_x$ -Massenstrom [g/h]
$\dot{m}_{\text{Abgas}}$	.....	Emittierter Abgasmassentstrom mit PEMS gemessen [g/h]
$c_{\text{NO}_x}$	.....	$\text{NO}_x$ -Konzentration mit PEMS gemessen [ppm]
$U_{\text{Gas}}$	.....	Gasfaktor zur Beschreibung der Korrelation zwischen Konzentration und Massenstrom [g Gaskomponente/g Abgas]

In Tabelle 3-2 sind  $U_{\text{Gas}}$ -Faktoren emissionsrelevanter Abgaskomponenten dargestellt. Für NO wird  $U_{\text{Gas}}$  von  $\text{NO}_2$  verwendet, da NO als  $\text{NO}_2$  äquivalent angegeben wird. NO und  $\text{NO}_2$  werden unter  $\text{NO}_x$  zusammengefasst.

Tabelle 3-2:  $U_{\text{Gas}}$ -Faktoren

Komponente	$U_{\text{Gas}}$ -Faktor
$\text{NO}_2$	1,587
CO	0,966
HC	0,499
$\text{CO}_2$	1,518
$\text{CH}_4$	0,553

Die Überprüfung der Gültigkeit von gemessenen RDE-Fahrten in Bezug auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen wurde durchgeführt und zeigte diesbezüglich keine Auffälligkeiten. In Tabelle 3-3 sind auszugsweise Tripparameter der RDE-Fahrten aufgelistet.

Tabelle 3-3: Tripparameter der RDE-Fahrten Fahrzeug Euro 6b

Zyklusname	Kühlmitteltemp. bei Zyklusstart	Bemerkung	Masse	Fahrstil	Dauer	Strecke	Umg. temp.
[-]	[-]	[-]	[kg]	[-]	[min]	[km]	[°C]
Ries 01	Umgebungstemp.	Licht + Radio, Klima 22°C	1739	Normal	100	83,6	28,4
Ries 02	Umgebungstemp.	Licht + Radio, Klima 22°C	1739	Normal	101,3	83,8	21,9

In Tabelle 3-4 sind die Messergebnisse der RDE-Messungen dargestellt.

Tabelle 3-4: Auswertung der RDE-Messung Fahrzeug Euro 6b

Emission	Einheit	NTE-Limit	Ries 01	Ries 02
CO <sub>2</sub>	[g/km]	[-]	170,0	175,5
CO	[mg/km]	[-]	655	563
NO <sub>x</sub>	[mg/km]	126	30	40
PN	[#/km]	9E+11	1,27E+11	3,42E+11

Beim CO<sub>2</sub> ist ersichtlich, dass beide Fahrten auf ähnlichem Niveau liegen. Wenn man diese Werte mit den WLTC-Daten vergleicht, liegen diese mit durchschnittlich 172 g/km etwas höher, als der WLTC high.

Das gemessene CO der RDE-Fahrten zeigt keine Auffälligkeiten und liegt mit dem Maximalwert von 655 mg/km unter dem WLTC-Grenzwert von 1000 mg/km. Für die CO-Emissionen gibt es bei RDE-Fahrten keine NTE-Limits.

Das NTE-Limit für die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegt laut Gesetzgebung bei 126 mg/km (60 g/km WLTC-Grenzwert \* Conformity Faktor von 2,1). Dieses NTE-Limit wurde bei beiden Messungen deutlich eingehalten.

Das NTE-Limit für die Partikelemissionen liegt laut Gesetzgebung bei  $9 \times 10^{11}$  #/km ( $6 \times 10^{11}$  #/km WLTC-Grenzwert \* Conformity Faktor 1,5). Beide Fahrten des Fahrzeugs Euro 6b lagen unter diesem Limit.

Abbildung 3-4 zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeugs für NEDC laut Typprüfschein, WLTC-Messung und die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten RDE-Messungen. Weiters sind die Testmassen bei den jeweiligen Messungen hinterlegt. Es ist erkennbar, dass ähnliche Testmassen für WLTC-High und den Ries-Fahrten vorliegen. Allerdings sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen doch unterschiedlich. An dieser Stelle sei aber auch zu erwähnen, dass die RDE-Messungen mit Winterreifen durchgeführt wurden, der PEMS-Aufbau den Luftwiderstand erhöht und auch Nebenverbraucher aktiv waren, was alles zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Die niedrigeren Emissionen des NEDC zum WLTC-Low liegen an den verschiedenen Einstellungen bei der Messung (Testmasse, Fahrwiderstände, Nebenverbraucher) und an der Tatsache, dass der WLTC dynamischer als der NEDC ist.

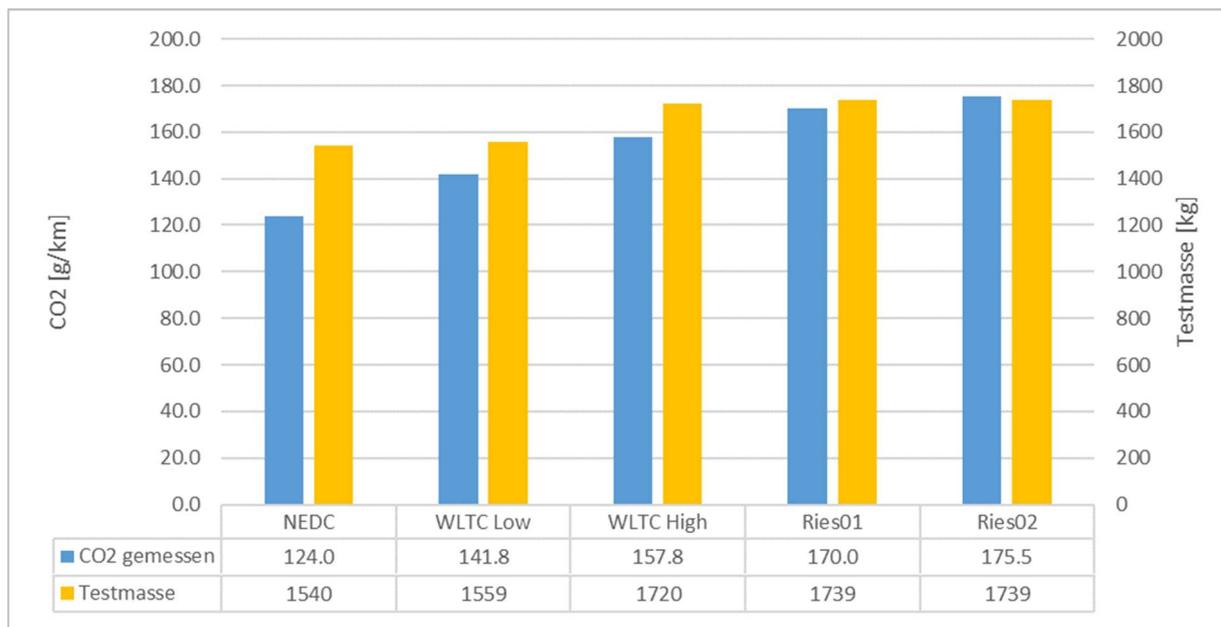


Abbildung 3-4: CO<sub>2</sub>-Emissionen und Testmassen des Fahrzeugs Euro 6b im Vergleich

## **3.2 Messungen mit dem Euro 6d-Temp Fahrzeug**

In diesem Kapitel werden Fahrzeug, Messaufbau und Messung beschrieben. Mit dem Fahrzeug wurden sowohl RDE-Messungen als auch Rollenprüfstandsmessungen durchgeführt. Weiters wurde zur Bestimmung der Fahrwiderstände ein Ausrollversuch durchgeführt.

### **3.2.1 Fahrzeugbeschreibung**

Bei untersuchten Fahrzeug handelte es sich um einem Peugeot 208 mit Vorderradantrieb. Das Fahrzeug ist für die Fahrzeugklasse Euro 6d-Temp zugelassen. Die Fahrzeugdaten sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-5: Fahrzeugdaten Peugeot 208

<b>Motor</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Motorbauart	-	Reihen-Dreizylinder-Ottomotor
Hubraum	[cm <sup>3</sup> ]	1199
Verdichtung	[-]	11:1
Anzahl der Zylinder	[-]	3
Aufladung	[-]	Nein
Abgasklasse	[-]	Euro 6d-temp
CO <sub>2</sub> -Emission lt. Hersteller (WLTP)	[g/km]	107 (129)
Nennleistung	[kW]	61
Nenndrehzahl	[1/min]	5750
Leerlaufdrehzahl	[1/min]	750
Abgasnachbehandlung	[-]	3-Wegekat, GPF
<b>Antrieb</b>		
Antriebsart	[-]	Vorderradantrieb
Getriebe	[-]	5-Gang Manuell
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5/R	[-]	3,416/1,809/1,281/0,975/0,767/3,583
Achsübersetzung	[-]	4,538
Bereifung bei Messungen	[-]	195/55 R156
<b>Karosserie/Abmessungen</b>		
Stirnfläche	[m <sup>2</sup> ]	2,1
Luftwiderstandsbeiwert lt. Hersteller	[-]	0,31
Leergewicht nach DIN	[kg]	975
<b>Weitere Daten</b>		
Baujahr	[-]	2018
Erstzulassung	[-]	09.08.2018
Kilometerstand bei Messserienstart	[km]	300

### 3.2.2 Ausrollversuch

Mit diesem Fahrzeug wurde ein Ausroller auf der Straße durchgeführt, um die Fahrwiderstände für die Rollenmessungen zu bestimmen.

Der Versuchsaufbau beim Ausrollversuch bestand aus einer Wetterstation sowie einem GPS-Empfänger, welche auf dem Dach des Fahrzeugs montiert wurden. Da die Fahrwiderstände ohne PEMS-Messsystem bestimmt werden sollten, war beim Ausrollversuch kein PEMS am Fahrzeug montiert.

Der Ausrollversuch setzt eine möglichst gerade Strecke mit kleinstmöglicher Höhendifferenz voraussetzt. Dafür wurde die B67 zwischen Spielfeld und Vogau gewählt. Diese Strecke hat auf einer Länge von 2,5 km eine Höhendifferenz von 7 m, das entspricht einer durchschnittlichen Steigung von 0,28 %. [16]



Abbildung 3-5: Strecke für den Ausrollversuch [18]

Die Auswertung des Ausrollversuches entspricht der Vorgehensweise, wie in Kapitel 2.3.1.2 erwähnt. In Tabelle 3-6 sind die Fahrwiderstände, die durch den Ausrollversuch ermittelt wurden, dargestellt. Daraus wurden mithilfe der bekannten Testmassen die Fahrwiderstände für NEDC und WLTC abgeleitet, die für die Rollenprüfstandsmessung verwendet wurden.

Tabelle 3-6: Fahrwiderstände aus Ausrollversuch Peugeot 208

Größe	Einheit	Ausrollversuch Straßenwerte	WLTC (berechnet)	NEDC (berechnet)
Bezugsmasse	[kg]	1056	1167	1142
R <sub>0</sub>	[N]	119,6	132,2	129,4
R <sub>1</sub>	[Ns/m]	0	0	0
R <sub>2</sub>	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	0,3663	0,3663	0,3663

### 3.2.3 RDE-Messung

Der Aufbau für die RDE-Messung des Peugeot 208 entspricht dem Aufbau, wie er bereits in Kapitel 3.1.2.1 beschrieben wurde.

Die RDE-Messungen mit normalem Fahrstil wurden ebenfalls auf der Ries-Route durchgeführt, die in Kapitel 3.1.2.2 beschrieben wurde. Die Messungen sind laut Gesetzgebung gültig.

### 3.2.4 Messung am Rollenprüfstand

Der Versuchsaufbau dieser Messung entsprach im Grunde dem Aufbau, wie er in Kapitel 2.3.1 bzw. 2.3.2 beschrieben ist. Gleichzeitig wurde eine FTIR-Messung zur Bestimmung weiterer Emissionskomponenten durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.4). Das Messprogramm ist in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7: Messprogramm Rollenmessungen Peugeot 208

Zyklus	Kühlmitteltemperatur bei Zyklusstart	Anzahl der Messungen	Umgebungstemperatur
NEDC	Umgebungstemperatur	1	25 °C
WLTC	Umgebungstemperatur	1	23 °C
Ermes	Betriebstemperatur	2	1x 23 °C, 1x 5 °C
CADC urban	Betriebstemperatur	1	23 °C
CADC road	Betriebstemperatur	1	23 °C
CADC motorway	Betriebstemperatur	1	23 °C
IUFC	Umgebungstemperatur	2	1x 20 °C, 1x 5 °C

Die Prüfstandseinstellungen, also Massen und Fahrwiderstände unterscheiden sich zwischen den Testzyklen. So wurden auf der Rolle im NEDC NEDC-Fahrwiderstände und im WLTC, Ermes, CADC und IUFC WLTC-Fahrwiderstände eingestellt.

### 3.2.5 Auswertung der Rollenmessungen

Das Fahrzeug wurde auf der Rolle sowohl mit der CVS-Anlage als auch mit dem FTIR gemessen, da mit dem FTIR zusätzliche Emissionskomponenten erfasst werden können. Abbildung 3-6 zeigt das gemessene CO<sub>2</sub> im Abgleich zwischen CVS und FTIR. Bei der Messung des NEDC ist das FTIR ausgefallen, weshalb kein CO<sub>2</sub>-Wert vorliegt. Der Vergleich zeigt ähnliche Messergebnisse. Laut Zulassungsschein hat das Fahrzeug einen Kraftstoffverbrauch von 4,7 l/100 km und einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 107 g/km im WLTC. Vergleicht man den Zulassungswert mit dem WLTC-Messwert, so liegt die Messung etwa 12 % über dem Zulassungswert. Diese Abweichung kann u.a. durch Unsicherheiten in der Ableitung der Fahrwiderstände aus dem Ausrollversuch sowie einer nicht durchgeführten SOC-Korrektur hervorgerufen werden. Außerdem wurde das Fahrzeug mit 300 km Laufleistung vermessen, laut Gesetz muss im Rahmen einer Typisierung die Laufleistung des Fahrzeugs zwischen 3000 und 15000 km betragen. [5]

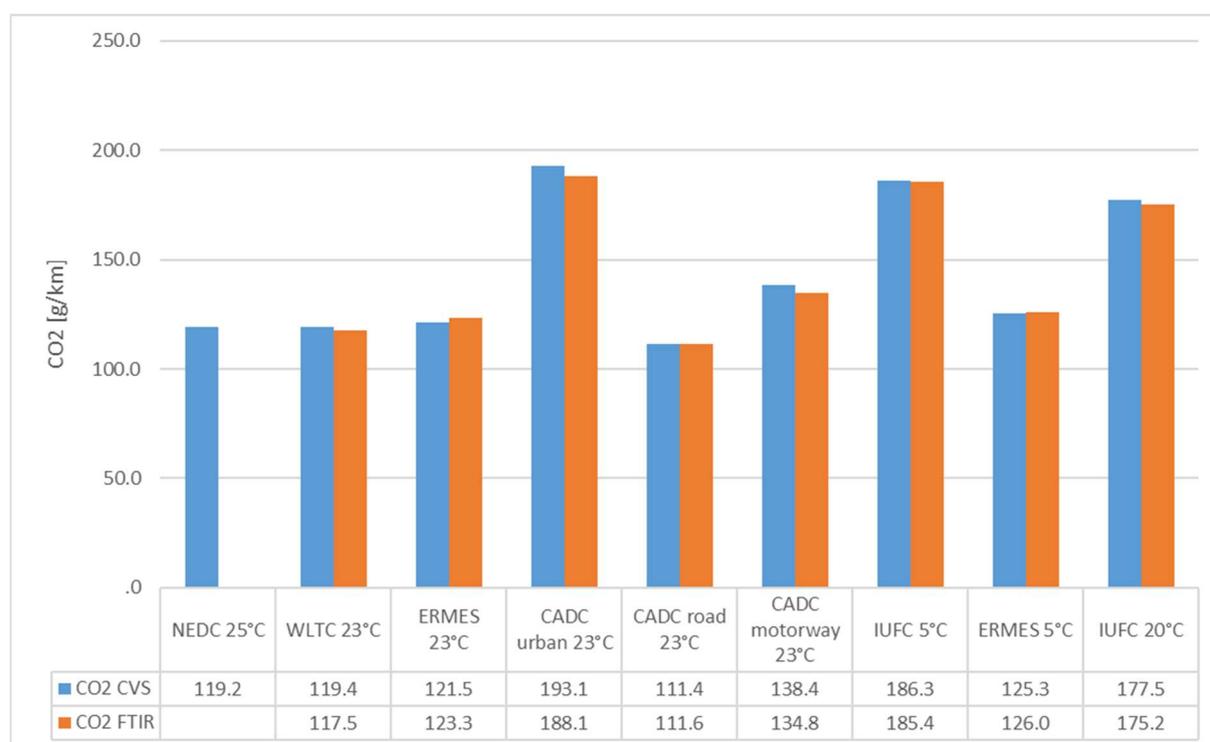


Abbildung 3-6: Gemessenes CO<sub>2</sub> bei Rollenmessungen Peugeot 208

Die gemessenen NO und NO<sub>2</sub> in den Rollenzyklen sind in Abbildung 3-7 dargestellt. Der Grenzwert für Euro 6d-Temp Fahrzeuge mit Ottomotor beträgt für den WLTC 60 mg/km. Dieser Wert wurde im WLTC mit 63 mg/km geringfügig überschritten, allerdings sei hier nochmals auf die Unsicherheiten der Fahrwiderstände verwiesen. Die mit Abstand höchsten NO<sub>x</sub>-Emissionen weist der CADC motorway mit 141 mg/km auf, was zu erwarten ist, da dieser Zyklus eine hohe Dynamik bei höheren Motorbetriebspunkten aufweist.

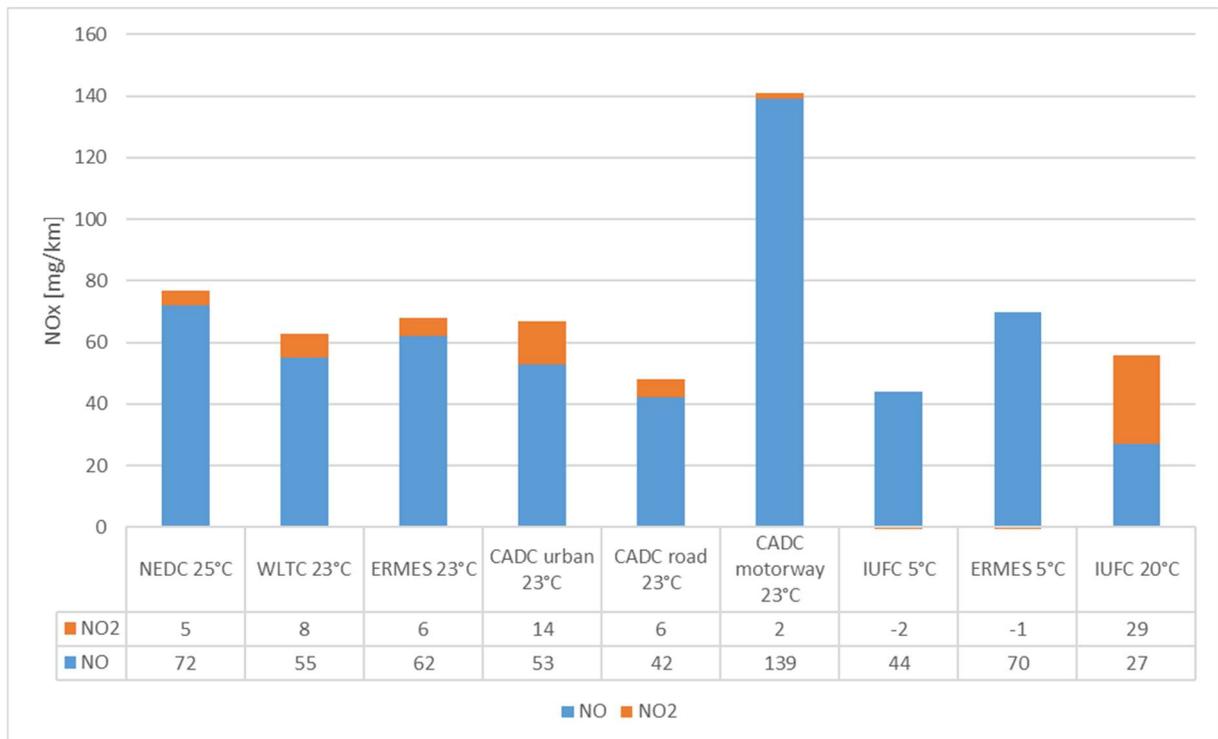
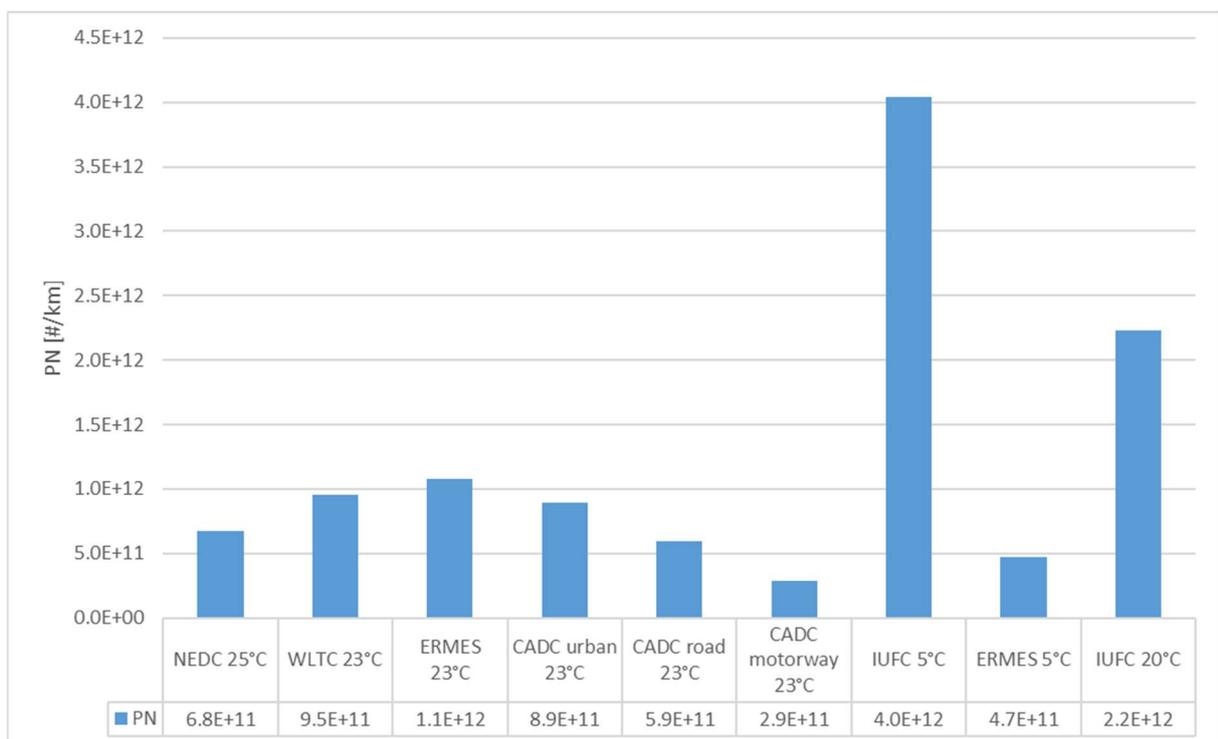
Abbildung 3-7: Gemessenes NO<sub>x</sub> bei Rollenmessungen Peugeot 208

Abbildung 3-8: Gemessenes PN bei Rollenmessungen Peugeot 208

In Abbildung 3-8 ist die gemessene Partikelanzahl für die Rollenmessungen dargestellt. Der Grenzwert für Euro 6d-Temp Fahrzeuge mit Ottomotor beträgt für den WLTC  $6 \times 10^{11}$  #/km. Damit ist der Grenzwert bei der Messung mit  $9,5 \times 10^{11}$  #/km um etwa 1,6-fach überschritten. Dies könnte auf einen möglichen Degreening-Prozess des Ottopartikelfilters zurückzuführen sein. Der IUFC hat bei beiden Messungen (vor allem bei 5 °C Prüfraumtemperatur mit  $4,04 \times 10^{12}$  #/km) mit Abstand die höchsten Partikelemissionen, was u.a. auch ein schlechtes Kaltstartverhalten des Fahrzeuges vermuten lässt.

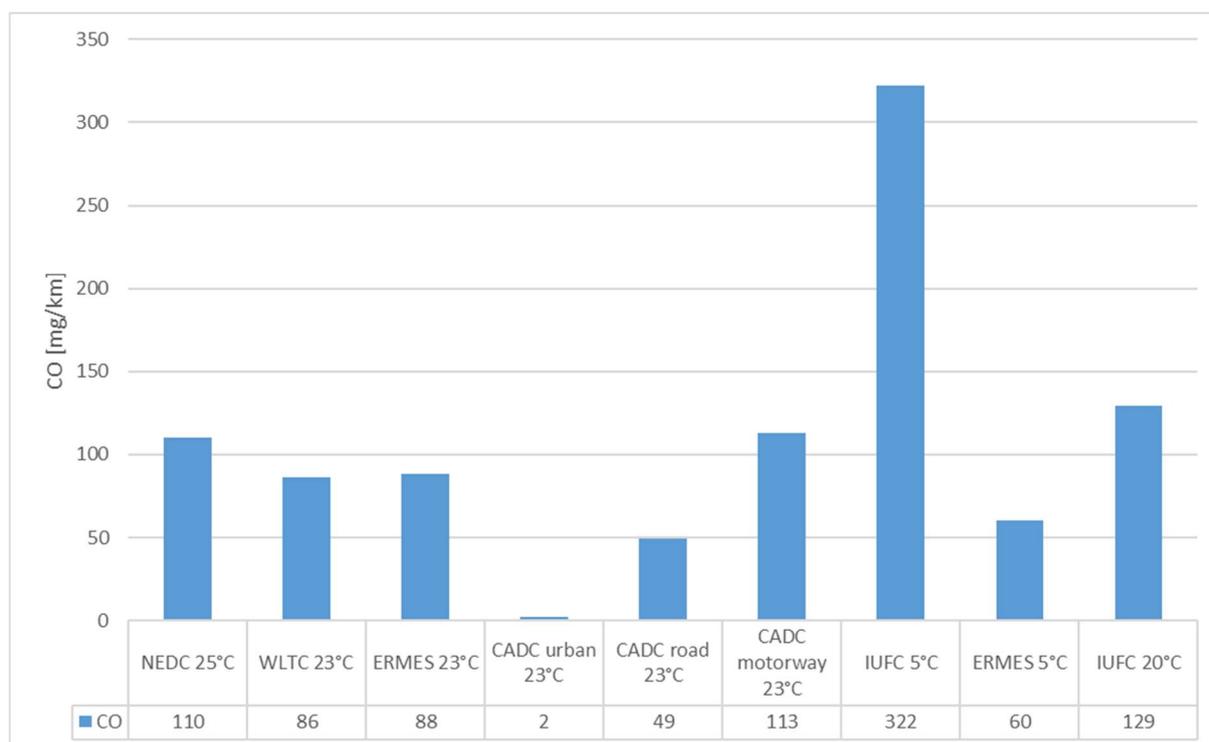


Abbildung 3-9: Gemessenes CO bei Rollenmessungen Peugeot 208

Das CO hatte, wie Abbildung 3-9 zeigt, den höchsten gemessenen Wert beim IUFC mit 322 mg/km. Der Grenzwert für Euro 6d-Temp mit 1000 mg/km wurde im WLTC eingehalten.

Die detaillierte Auswertung der CVS-Messung ist im Anhang in Tabelle 0-1 dargestellt. Tabelle 0-2 im Anhang zeigt die Auswertung der FTIR-Messung der nicht limitierten Schadstoffe.

### 3.2.6 Auswertung der RDE-Messungen

Die Tripparameter zu den Messungen auf der Straße sind in Tabelle 3-8 aufgelistet. 2 Fahrten wurden mit Kaltstart durchgeführt (Kühlmitteltemperatur = Umgebungstemperatur) und eine Fahrt mit betriebswarmem Motor. Die unterschiedliche Dauer bei gleicher Strecke zeigt, wie groß u.a. der Einfluss des unterschiedlichen Verkehrsaufkommens ist.

Tabelle 3-8: Tripparameter der RDE-Fahrten Peugeot 208

Zyklus-name	Kühlmitteltemp. bei Zyklusstart	Bemerkung	Masse	Fahrstil	Dauer	Strecke	Umg. temp.
[-]	[-]	[-]	[kg]	[-]	[min]	[km]	[°C]
Ries 01	Betriebstemp.	Licht + Radio, Klima 22°C	1175	Normal	96,3	83,8	28,1
Ries 02	Umgebungstemp.	Licht + Radio, Klima 22°C	1175	Normal	100,1	83,8	20,9
Ries 03	Umgebungstemp.	Licht + Radio, Klima 22°C	1175	Normal	98,6	83,7	29,1

In Tabelle 3-9 ist die Auswertung der RDE-Messungen des Peugeot 208 dargestellt. Zusätzlich sind die NTE-Limits für die jeweilige Emission vermerkt.

Tabelle 3-9: Auswertung der RDE-Messung Peugeot 208

Emission	Einheit	NTE-Limit	Ries 01	Ries 02	Ries 03
CO <sub>2</sub>	[g/km]	-	140,8	130,8	131,2
CO	[mg/km]	-	96	72	79
NO <sub>x</sub>	[mg/km]	126	276	134	122
PN	[#/km]	9E+11	2,44E+11	2,45E+11	1,95E+11

Beim CO<sub>2</sub> ist ersichtlich, dass alle 3 Fahrten auf ähnlichem Niveau liegen. Wenn man diese Werte mit den Ergebnissen der Rollenmessungen vergleicht, liegen diese mit durchschnittlich 134 g/km in etwa auf dem gleichen Niveau wie die Real-World-Zyklen (Ermes und CADC 1/3-Mix), was plausibel erscheint.

Das gemessene CO der RDE-Fahrten zeigt keine Auffälligkeiten und liegt mit dem Maximalwert von 96 mg/km sogar deutlich unter dem WLTC-Grenzwert von 1000 mg/km. Für die CO-Emissionen gibt es bei RDE-Fahrten keine gesetzlichen NTE-Limits.

Das NTE-Limit für die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegt laut Gesetzgebung bei 126 mg/km (60 g/km WLTC-Grenzwert \* Conformity Faktor von 2,1). Der Peugeot 208 hat dieses NTE-Limit nur bei der Messung Ries 03 eingehalten. Bei den anderen Messungen wurde das Limit jeweils überschritten, bei Ries 01 war der Messwert mit 276 mg/km sogar mehr als doppelt so hoch wie das Limit. Allerdings können nach dem gesetzlich vorgeschriebenen Gewichtungsprozess, der das unterschiedliche Fahrverhalten kompensieren soll, die Emissionen unter dem NTE-Limit liegen. Die gewichteten Emissionen sind relevant, wenn es um die Typisierung geht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber keine Gewichtung durchgeführt.

Das NTE-Limit für die Partikelemissionen liegt laut Gesetzgebung bei  $9 \times 10^{11}$  #/km ( $6 \times 10^{11}$  #/km WLTC-Grenzwert \* Conformity Faktor 1,5). Die Messwerte aller 3 Fahrten des Peugeot 208 lagen unter dem Limit, womit auch davon auszugehen ist, dass nach dem Gewichtungsprozess die Werte ebenfalls unter dem NTE-Limit liegen.

## **4 Simulationen für HBEFA 4.1**

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Simulation sowie der Herleitung der Simulationsinputdaten für Otto-PKW. Das Kapitel wird in folgende Unterpunkte aufgeteilt:

- Beschreibung des Simulationsprogramms PHEM – Passenger Car and Heavy-duty Emission Model
- Voruntersuchungen für die CO<sub>2</sub>-Simulation
- Datenbasis für die CO<sub>2</sub>-Simulation
- Erstellung der Durchschnittsfahrzeuge für die CO<sub>2</sub>-Simulation
- CO<sub>2</sub>-Simulation aller Euroklassen für Diesel- und Otto-Fahrzeuge
- Emissionskennfelderstellung Euro 6ab Otto-PKW
- Vergleich der Emissionen des Euro 6ab Otto-Fahrzeugs zwischen HBEFA 3.3 und 4.1

## 4.1 Simulationssoftware PHEM

Die Simulation erfolgte mithilfe des vom IVT entwickelten Simulationsprogrammes PHEM (Passenger Car and Heavy-duty Emission Model). Dieses Programm basiert auf einem Längsdynamikmodell und berechnet zeitaufgelöst mit Motorleistung und –drehzahl den Kraftstoffverbrauch sowie Emissionen aus einem Motorkennfeld.

### 4.1.1 Funktionsprinzip PHEM

Bei gegebenem Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit wird mittels des Längsdynamikmodells die Radleistung berechnet. Außerdem können Motordrehzahl und Fahrbahnsteigung zusätzlich zu dem Geschwindigkeitsverlauf vorgegeben werden. Vom Rad wird dann unter Berücksichtigung der Verlustleistung durch Reibung und der translatorischen und rotatorischen Beschleunigungsleistung aller Bauteile zwischen Rad und Motor die Motorleistung berechnet. Diese Rechenvariante wird in PHEM „Standard Modus“ genannt. Wenn die Motordrehzahl nicht vorgegeben wird, wird diese aus der Fahrzeuggeschwindigkeit mit dem dynamischen Raddurchmesser sowie Achs- und Getriebeübersetzung des eingelegten Gangs berechnet. Sind die Gänge ebenfalls nicht bekannt, so kann das in PHEM implementierte Schaltmodell zur Berechnung der Gänge verwendet werden. Mit Motorleistung und –drehzahl interpoliert PHEM aus Motorkennfeldern Verbrauch sowie die Emissionen für jeden Zeitschritt. Weiters können in PHEM auch Abgasnachbehandlungssysteme berücksichtigt werden. Da Simulationen mit detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlungssysteme in dieser Arbeit jedoch nicht nötig waren, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

Eine weitere Simulationsvariante in PHEM ist die Simulation unter Vorgabe von Leistung und Drehzahl an der Kupplung. Diese Simulationsvariante wird in PHEM auch als „Engine-Only-Modus“ bezeichnet.

Eine grafische Veranschaulichung des Funktionsprinzips von PHEM ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

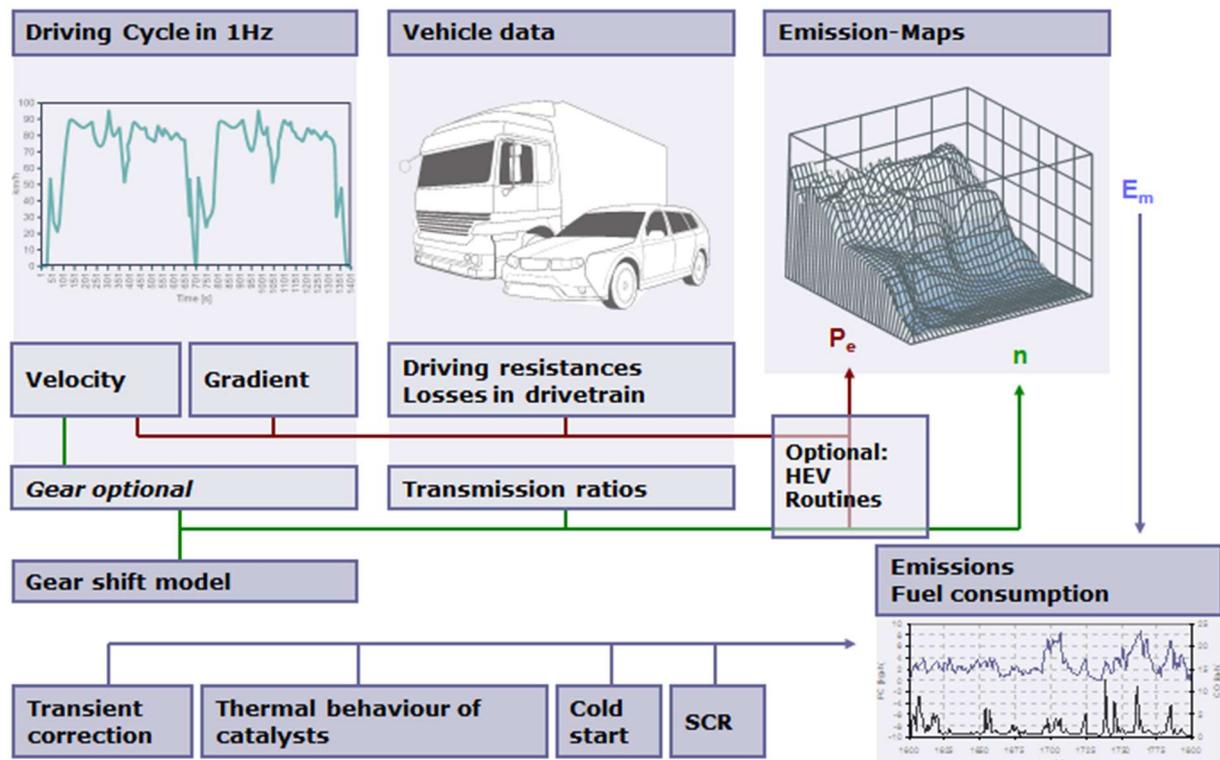


Abbildung 4-1 PHEM Funktionsprinzip

### 4.1.2 Eingabefiles

Alle Inputfiles für PHEM sind \*.csv-Files, wodurch ein bearbeiten nicht nur mit PHEM, sondern auch mit z.B. Notepad oder Microsoft Excel einfach möglich ist. Die Inputfiles sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4-1: Eingabedaten in PHEM

Daten	Abkürzung / Dateiendung	Inhalt
Fahrzeugdaten	VEH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeugmasse</li> <li>• Beladung</li> <li>• Red. Rädermasse</li> <li>• Dyn. Raddurchmesser</li> <li>• Luftwiderstandsbeiwert</li> <li>• Querschnittsfläche</li> <li>• Rollwiderstandsbeiwerte</li> <li>• Nebenverbraucherleistung</li> <li>• Nennleistung</li> <li>• Nenndrehzahl</li> <li>• Leerlaufdrehzahl</li> <li>• Motorträgheit</li> <li>• Getriebeträgheit</li> <li>• Getriebeübersetzungen</li> <li>• Schaltmodellparameter</li> </ul>
Motorkennfeld	MAP	Emissionskennfeld (Verbrauch, Emissionen)
Lastkurven	FLD	Volllastkurve und Schleppkurve des Motors
Zyklus	DRI	Fahrzyklus (Geschwindigkeit, Steigung, Drehzahl,...)
	NPI	Messzyklus (Motordrehzahl, Verbrauch, Emissionen,...)

#### 4.1.2.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugmasse und Beladung müssen in Summe der gesamten im Betrieb befindlichen Fahrzeugmasse entsprechen. In den folgenden Berechnungen wurde für die Fahrzeugmasse jeweils die DIN-Leermasse herangezogen, die restliche Masse wurde in der Beladung aufgeschlagen. Die Werte für reduzierte Rädermasse, Motorträgheit und Getriebeträgheit werden aus vorgegebenen Formel aus DIN-Masse bzw. Nennleistung berechnet. Die Formeln für Motor- und Getriebeträgheit wurden in vorangegangenen Arbeiten empirisch am IVT ermittelt. Die Berechnung der reduzierten Rädermasse wurde der ECE/TRANS/WP.29/2017/140 [5] entnommen.

$$m_{\text{red}} = (m_{\text{DIN}} + 100) * 0,03 \quad (4-1)$$

$m_{\text{red}}$  ..... Reduzierte Rädermasse [kg]

$m_{\text{DIN}}$  ..... DIN-Leermasse [kg]

$$I_{\text{Engine}} = P_{\text{rated}} * 0,006604395 \quad (4-2)$$

$I_{\text{Engine}}$  ..... Motorträgheit [kg\*m<sup>2</sup>]

$P_{\text{rated}}$  ..... Nennleistung [kW]

$$I_{\text{Transmission}} = P_{\text{rated}} * 0,0007252747 \quad (4-3)$$

$I_{\text{Transmission}}$  ..... Getriebeträgheit [kg\*m<sup>2</sup>]

Die Berechnung des dynamischen Reifendurchmessers bezieht sich auf die Strecke, die ein Rad bei einer vollen Umdrehung zurücklegt. Er hängt u.a. von den geometrischen Maßen des Rades ab. Die Formel dafür wurde ebenfalls aus ECE/TRANS/WP.29/2017/140 [5] entnommen.

$$U_{\text{dyn}} = 3,05 * \left( 2 * \frac{V_{\text{HW}}}{100} * W + R \right) \quad (4-4)$$

$$D_{\text{dyn}} = \frac{U_{\text{dyn}}}{\pi} \quad (4-5)$$

$U_{\text{dyn}}$  ..... Dynamischer Abrollumfang [mm]

$V_{\text{HW}}$  ..... Verhältnis Reifenhöhe zu Reifenbreite [%]

$W$  ..... Reifenbreite [mm]

$R$  ..... Felgendurchmesser [mm]

$D_{\text{dyn}}$  ..... Dynamischer Reifendurchmesser [mm]

Wie bereits in Kapitel 2.3.1.2 erwähnt, können die Rollwiderstandsbeiwerte ( $Fr_0$ ,  $Fr_1$ ) aus den Rollwiderstandskoeffizienten ( $R_0$ ,  $R_1$ ) vom Ausroller berechnet werden. Der Luftwiderstandskoeffizient ( $C_w$ ) kann ebenfalls aus dem quadratischen Rollwiderstandskoeffizienten berechnet werden.

$$Fr_0 = \frac{R_0}{9,81 * m} \quad (4-6)$$

$$Fr_1 = \frac{R_1}{9,81 * 3,6 * m} \quad (4-7)$$

$$C_w = \frac{R_2}{A} * \frac{2}{\rho} * 3,6 * 3,6 \quad (4-8)$$

Obige Formeln gelten, wie bereits in Kapitel 2.3.1.1 und 2.3.1.2 beschrieben, wenn  $R_0$  in [N],  $R_1$  in [N/(km/h)] und  $R_2$  in [N/(km/h)<sup>2</sup>] eingesetzt wird. Die Fläche  $A$  des Fahrzeuges kann aus Datenblättern zum Fahrzeug entnommen werden.

Nennleistung und -drehzahl sowie Getriebeübersetzungen können ebenfalls aus Datenblättern entnommen werden. Falls nicht angegeben, kann die Leerlaufdrehzahl aus den modalen Messdaten mit betriebswarmem Motor abgeleitet werden. Wurde die Nebenverbraucherleistung nicht mitgemessen, werden entsprechende Default-Werte herangezogen. Diese wurden anhand Literaturrecherche über Leistungsaufnahme von einzelnen Nebenverbrauchern wie z.B. Klimaanlage, Radio usw. ermittelt. Die Schaltparameter sind bereits in PHEM hinterlegt und sollen das durchschnittliche Schaltverhalten widerspiegeln. Für Details wird auf die Dissertation von Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Zallinger [36] verwiesen.

Des Weiteren kann im PHEM die Verwendung eines Start-Stopp-Systems vorgegeben werden. Wenn dies der Fall ist, können die Start-Stopp-Emissionen als Anteil definiert werden. Diese werden als Zahl zwischen 0 und 1 vorgegeben werden. Je kleiner die Zahl ist, desto größer ist der Start-Stopp-Anteil und desto weniger Emissionen werden bei Fahrzeugstillstand emittiert. 0 bedeutet, dass keine Emissionen auftreten, bei 1 wird mit einem nicht aktivierten Start-Stopp-System gerechnet.

#### 4.1.2.2 Kennfelder

Emissionskennfelder in PHEM werden benötigt, um für Zyklen die entsprechenden Emissionen berechnen zu können. Im Motorkennfeld sind Stützstellen als Funktion von Motorleistung und –drehzahl vorhanden. Jede dieser Stützstellen beinhaltet Angaben zu Größen wie z.B. Kraftstoffverbrauch, Emissionen, Massenstrom, Abgastemperatur und weitere Komponenten. Folgende Tabelle liefert einen Überblick über enthaltene Größen im Motorkennfeld:

Tabelle 4-2: Im Motorkennfeld enthaltene Größen

Bezeichnung	Einheit	Inhalt
$n_{\text{norm}}$	[-]	Normierte Motordrehzahl
$P_{\text{norm}}$	[-]	Normierte Motorleistung
$\text{CO}_2_{\text{norm}}$	[g/kWh]	Normierte $\text{CO}_2$ -Emissionen
$\text{NO}_x, \text{NO}, \text{CO}, \text{HC}, \text{PM}, \dots$	[g/h]	Schadstoffemissionen
PN	[#/h]	Partikelanzahl
Massenfluss	[kg/s]	Abgasmassenstrom
Abgastemperatur	[°C]	Abgastemperatur nach Turbolader
...		

Damit Kennfelder für verschiedene Fahrzeuge mit gleicher Motortechnologie verwendet werden können, sind Motorleistung und -drehzahl, Verbrauch sowie CO<sub>2</sub> im Kennfeld normiert. Für die Normierung werden folgende Formeln verwendet:

$$n_{\text{norm}} = \frac{n - n_{\text{idle}}}{n_{\text{rated}} - n_{\text{idle}}} \quad (4-9)$$

$n_{\text{norm}}$  ..... Normierte Motordrehzahl [-]

$n$  ..... Aktuelle Motordrehzahl [1/min]

$n_{\text{idle}}$  ..... Leerlaufdrehzahl [1/min]

$n_{\text{rated}}$  ..... Nenndrehzahl [1/min]

$$P_{\text{norm}} = \frac{P}{P_{\text{rated}}} \quad (4-10)$$

$P_{\text{norm}}$  ..... Normierte Leistung [-]

$P$  ..... Aktuelle Leistung [1/min]

$P_{\text{rated}}$  ..... Nennleistung [1/min]

$$CO_{2\text{ norm}} = \frac{CO_2}{P_{\text{rated}}} \quad (4-11)$$

$CO_{2\text{ norm}}$  ..... Normierte CO<sub>2</sub>-Emissionen [g/kWh]

$CO_2$  ..... CO<sub>2</sub>-Emissionen [g/h]

Die Normierung des Verbrauchs erfolgt analog zur CO<sub>2</sub>-Normierung. Betriebspunkte des Motors, die nicht auf den hinterlegten Kennfeldstützstellen liegen, werden interpoliert. Als Interpolationsroutine wird die Delaunay-Triangulation bzw. die Shepard-Interpolation verwendet. Die Routine hängt von der zu interpolierenden Komponente ab, kann aber auch manuell in PHEM eingestellt werden. Defaultmäßig werden Verbrauch und CO<sub>2</sub> mit Delaunay gerechnet, alle anderen Komponenten mit Shepard. Zu näheren Informationen zu diesen Interpolationsroutinen wird auf einschlägige Literatur verwiesen.

### 4.1.2.3 Vollastkurven

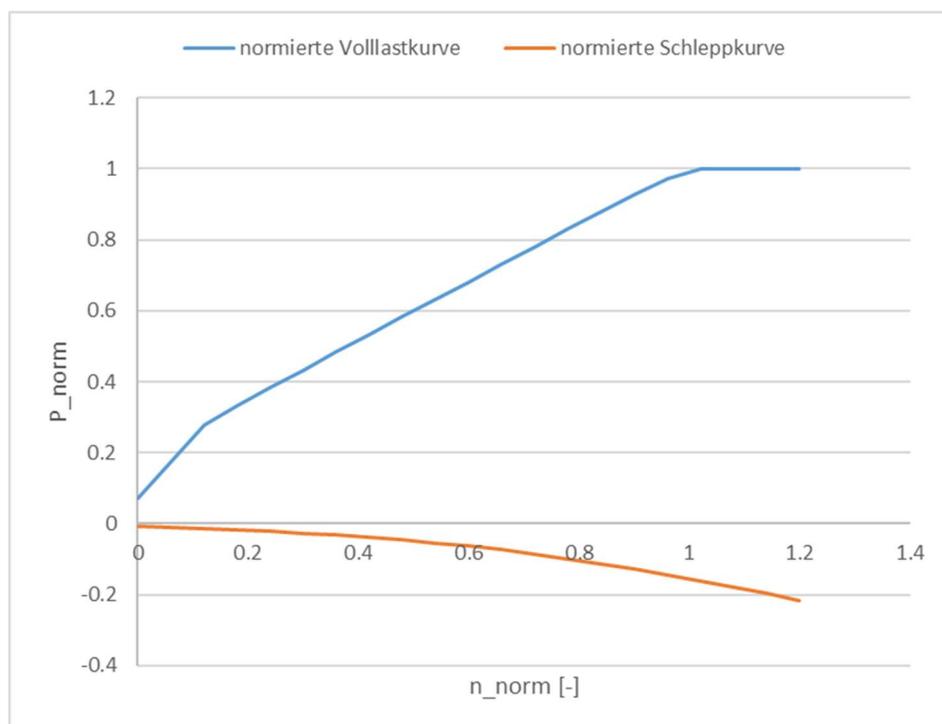


Abbildung 4-2: Normierte Volllast- und Schleppkurve eines Otto-Fahrzeuges

Volllast- und Schleppkurve des Fahrzeuges sind in einer separaten Datei hinterlegt, damit verschiedene Kombinationen von Kennfeld und Lastkurven vorgegeben werden können. Auch die Lastkurven können normiert werden.

### 4.1.2.4 Zyklen

Wie bereits erwähnt, stehen 2 Simulationsvarianten, der Standard-Modus und der Engine-Only-Modus, zur Verfügung. Passend dazu gibt es 2 Arten von Zyklen, die eingelesen werden können. Im Engine-Only-Modus wird ein sogenannter „NPI-Zyklus“ benötigt, darin werden der sekundliche Verlauf von Leistung und Drehzahl an der Kupplung vorgegeben. Im Standard-Modus wird ein sogenannter „DRI-Zyklus“ vorgegeben, welcher statt der Leistung die Geschwindigkeit und bei Bedarf Fahrbahnsteigung, Motordrehzahl und eingelegten Gang enthalten kann.

Tabelle 4-3: In Zyklen enthaltene Größen

Bezeichnung	Einheit	Inhalt
t	[s]	Zeit
v	[km/h]	Geschwindigkeit
n	[1/min]	Motordrehzahl
P	[kW]	Leistung
gear	[-]	Eingelegter Gang
grd	[%]	Fahrbahnsteigung
CO <sub>2</sub>	[g/h]	CO <sub>2</sub> -Emission
...		Weitere Komponenten

#### 4.1.3 Kennfelderstellung mithilfe der CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode in PHEM

Da Emissionskennfelder von Fahrzeugen meist nicht vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden, müssen diese in der Regel erzeugt werden. Bei Fahrzeugen, die sich bereits im Betrieb befinden, stellt dies einen enormen Arbeitsaufwand dar. Der Motor muss zunächst samt der Steuerelektronik und Abgasnachbehandlung aus dem Fahrzeug ausgebaut und auf einem Prüfstand aufgebaut werden. Um diesen Aufwand zu umgehen, bietet PHEM die Möglichkeit, Emissionskennfelder aus Rollenprüfstandsmessungen oder RDE-Messungen zu erstellen.

Die sekundlich gemessenen Emissionen werden in Abhängigkeit von Leistung und Drehzahl in das Kennfeld eingerastert (siehe Abbildung 4-3). Es ist jedoch darauf zu achten, dass eine möglichst große Abdeckung des Motorbetriebsbereichs gegeben ist. Bei der Simulation mit PHEM gibt es noch die Möglichkeit, mit Hilfe des BATCH-Modus die Messdaten aus mehreren Zyklen in ein Kennfeld zusammenzufassen. Dadurch wird das Motorkennfeld geglättet und die Abdeckung im Kennfeld steigt. Es kann jedoch vorkommen, dass die Emissionen in einzelnen Zyklen über- oder unterschätzt werden.

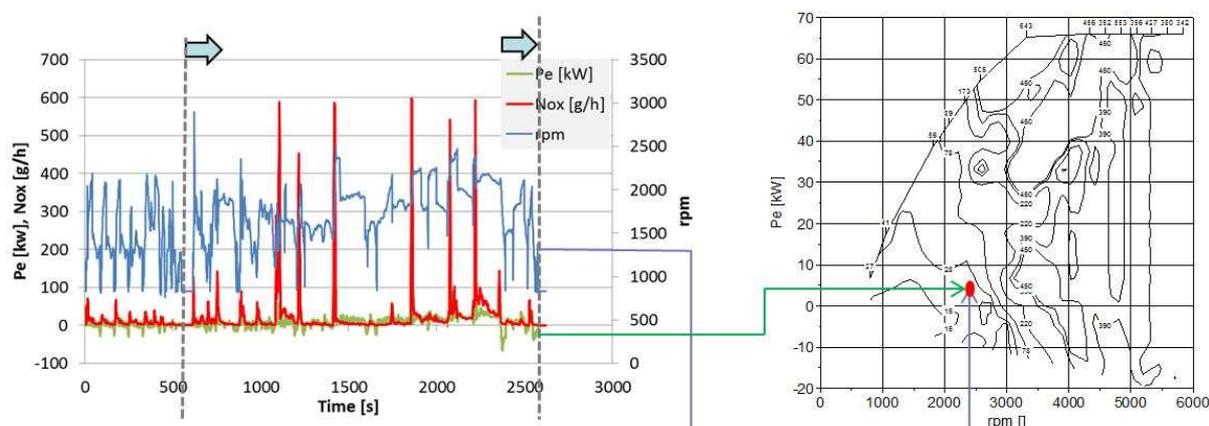


Abbildung 4-3: Einrastung der Emissionen in das Motorkennfeld

Wie bereits vorhin erwähnt, können aus Kennfeldern Emissionen als Funktion von Motorleistung und -drehzahl abgelesen werden. Das heißt umgekehrt auch, dass Motorleistung und -drehzahl sowie Emissionen bekannt sein müssen, um ein Kennfeld zu erstellen. Die Motorleistung ist allerdings in vielen Fällen – vor allem bei RDE-Fahrten – nicht bekannt. Um dennoch ein Kennfeld erstellen zu können, wurde am IVT die sogenannte CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode entwickelt. Dazu wird die Leistung sekundlich aus einem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld mittels gemessener Drehzahl und gemessener CO<sub>2</sub>-Emission interpoliert (siehe Abbildung 4-4). [39]

Die generischen CO<sub>2</sub>-Kennfelder wurden in einer Studie aus Messungen von Verbrauchskennfeldern am Motorprüfstand entwickelt. [37] Neben den gemessenen Emissionskomponenten inklusive CO<sub>2</sub> muss also nur die Motordrehzahl gemessen werden, was über einen OBD (On-Board-Diagnose) -Zugang einfach möglich ist.

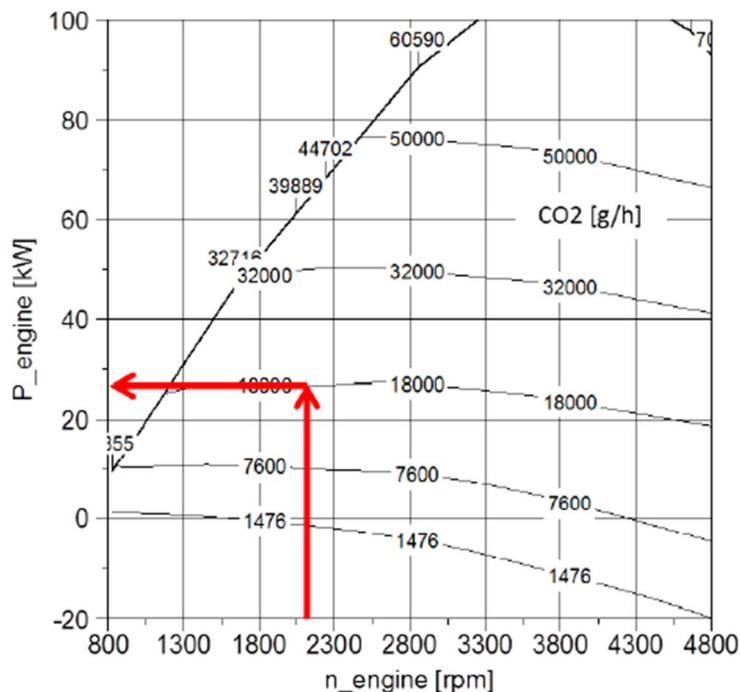


Abbildung 4-4: Leistungsinterpolation aus einem CO<sub>2</sub>-Kennfeld

Die CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode ist in PHEM implementiert und wurde somit im Rahmen dieser Arbeit auch zur Kennfelderstellung herangezogen.

## 4.2 Voruntersuchungen für HBEFA-Settings

Ziel dieser Voruntersuchung war es, zu überprüfen, ob durch die Simulation die realen Verbrauchs- bzw. CO<sub>2</sub>-Werte von PKWs in Deutschland nachgebildet werden können. Die Erkenntnisse daraus wurden in weiterer Folge für die CO<sub>2</sub>-Simulation für HBEFA 4.1 herangezogen.

Für die Voruntersuchung wurden 4 Fahrzeuge näher betrachtet. Mit diesen 4 Fahrzeugen wurden jeweils folgende Zyklen simuliert:

- NEDC
- WLTC-Low und High<sup>1</sup>
- gemessene RDE-Fahrten
- HBEFA 3.3-Zyklen

Die Simulationseinstellungen für WLTC waren bekannt, da für die neue Abgasgesetzgebung der Hersteller Fahrwiderstände sowie Testmassen und CO<sub>2</sub> sowie limitierte Emissionen ausweisen muss. Nach einer Validierung der Simulationsinputs für WLTC erfolgte eine Ableitung von Fahrzeugparametern für NEDC, RWC und HBEFA, die anschließend auch simuliert und mit den recherchierten NEDC- und RWC-Messwerten verglichen wurden. Die simulierten CO<sub>2</sub>-Werte in den HBEFA-Zyklen wurden auf einen CO<sub>2</sub>-Wert zusammengewichtet, der für das jeweilige Fahrzeug repräsentativ für Deutschland ist. Als realer CO<sub>2</sub>-Wert für das jeweilige Fahrzeug in Deutschland wurde für die Validierung der Spritmonitor-Wert herangezogen. Der Spritmonitor wird im Kapitel 4.2.2 beschrieben

In dieser Arbeit wurde die Voruntersuchung für 4 Fahrzeuge mit Ottomotor durchgeführt. Die Abschätzung der Dieselfahrzeuge wurde parallel dazu in der Bachelorarbeit von Nicolas Politschnig am IVT durchgeführt. [27] Die Endresultate beider Arbeiten werden am Ende dieses Kapitels verglichen, da in weiterer Folge auch die Erkenntnisse der Voruntersuchung für Dieselfahrzeuge für die HBEFA 4.1 CO<sub>2</sub>-Simulation in dieser Arbeit verwendet wurden.

---

<sup>1</sup> Der WLTC low bezeichnet jene Fahrzeugausstattung einer Modellreihe, welche die geringsten Verbrauchswerte im WLTC liefert. Vice versa für WLTC high.

### 4.2.1 Ausgewählte Fahrzeuge für die Voruntersuchung

Bei der Auswahl der Fahrzeuge für die Voruntersuchung wurde darauf geachtet, dass genügend Einträge des jeweiligen Modells im Spritmonitor vorhanden waren. So wurde ein Modell nur zugelassen, wenn mindestens 10 Einträge mit mindestens je 1500 km an Betankungen hinterlegt waren, um einen möglichst repräsentativen Vergleichswert zu erhalten. In Tabelle 4-4 sind Eckdaten zu den 4 untersuchten Fahrzeugen angegeben. Alle Fahrzeuge sind nach Euro 6b zugelassen. Die Fahrzeuge wurden zwischen Dezember 2017 und Mai 2018 am IVT im Zuge von RDE-Fahrten vermessen. Die Messungen von Fahrzeug 1, 3 und 4 waren nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Tabelle 4-4: Eckdaten der Otto-Fahrzeuge für die Voruntersuchung

		Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4
Motorart	[-]	Otto	Otto	Otto	Otto
Euro-Norm	[-]	Euro 6b	Euro 6b	Euro 6b	Euro 6b
Leistung	[kW]	135	100	135	185
DIN-Masse	[kg]	1735	1440	1600	1425
Zeitraum der RDE-Messung	[-]	Oktober 2017	Mai 2018	März 2018	April 2018

#### 4.2.2 Website Spritmonitor.de

Wie bereits kurz erwähnt, ist Spritmonitor.de eine deutsche Website, auf der Informationen über den realen Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen gesammelt und zur Verfügung gestellt werden. Die Datensammlung entsteht dabei durch die Eingabe der Daten durch die Nutzer selbst. So kann ein Nutzer über einen längeren Zeitraum für sein Fahrzeug Betankungsdaten (gefahren km seit letzter Betankung, Fahrstil, getankter Kraftstoff in l, ...) angeben und daraus den durchschnittlichen Verbrauch für sein Fahrzeug ermitteln. Auf Spritmonitor.de sind mehr als 720.000 Fahrzeuge von mehr als 485.000 Nutzern hinterlegt. [21]

Für die 4 ausgewählten Fahrzeuge liegen folgende Einträge unter Spritmonitor.de vor:

Tabelle 4-5: Anzahl der Spritmonitor-Einträge der Modelle für Voruntersuchung [21]

		Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4
Anzahl der Einträge Spritmonitor	[-]	23	25	39	10
CO <sub>2</sub> -Spritmonitor <sup>2</sup>	[g/km]	231,0	172,9	180,1	186,0
CO <sub>2</sub> -Typprüfwert NEDC	[g/km]	168	124	132	130
CO <sub>2</sub> -Typprüfwert WLTC low	[g/km]	nicht verfügbar	141,8	153	155,4
CO <sub>2</sub> -Typprüfwert WLTC high	[g/km]	186,5	157,8	173,1	173
Abweichung Realverbrauch zu NEDC	[%]	37,5	39,4	36,5	43,1
Abweichung Realverbrauch zu WLTC low	[%]	nicht verfügbar	21,9	17,7	19,7
Abweichung Realverbrauch zu WLTC high	[%]	23,9	9,6	4,0	7,5

Zusätzlich ist in Tabelle 4-5 der NEDC- sowie WLTC-Typprüfwert angegeben, um auch zu zeigen, welcher Unterschied zwischen Realverbrauch und NEDC bzw. WLTC vorliegt. Im Mittel ergibt sich als Abweichung Spritmonitor zu NEDC ca. 40 %, zu WLTC-Low ca. 20 % und zu WLTC-High ca. 10 %. Für das Fahrzeug 1 wurde jedoch nur der WLTC-High-Typprüfwert übermittelt.

<sup>2</sup> Hier ist anzumerken, dass die Daten vom Spritmonitor eine Sammlung von Einträgen von 2015 bis 2018 darstellen, während die 4 ausgewählten Fahrzeuge Motortechnologie von 2018 enthalten. Aus diesem Grund sind die hier gezeigten Werte vom Spritmonitor um 3 % gesenkt, um einen plausiblen Vergleich darzustellen.

### 4.2.3 Simulation WLTC

Wie bereits erwähnt, waren für die 4 Fahrzeuge Daten zum WLTC-Low und WLTC-High verfügbar. Für das Fahrzeug 1 jedoch nur Daten des WLTC-High.

Zusätzlich zu den emittierten CO<sub>2</sub>-Werten waren auch die Testmassen als auch die Fahrwiderstände für jede Messung verfügbar.

Die unterschiedlichen Testmassen für WLTC-Low und -High repräsentieren die Fälle der Fahrzeuge mit der Standard- und besten Ausstattung. Die Formeln zur Berechnung der Testmassen für WLTC Low und High sind der Vollständigkeit halber im Folgenden dargestellt. Sie wurden aus [4] entnommen.

$$m_{T\_High} = m_{RO} + 25 + m_{Opt\_E} + 0,15 * m_{VL} \quad (4-12)$$

$$m_{T\_Low} = m_{RO} + 25 + 0,15 * m_{VL} \quad (4-13)$$

$$m_{RO} = m_{DIN} + 75 \quad (4-14)$$

$$m_{VL} = m_{ML} - (m_{RO} + 25 + m_{Opt\_E}) \quad (4-15)$$

$m_{T\_High}$	.....	Testmasse WLTC High [kg]
$m_{T\_Low}$	.....	Testmasse WLTC Low [kg]
$m_{RO}$	.....	Masse im fahrbaren Zustand [kg]
$m_{Opt\_E}$	.....	Masse der möglichen Zusatzausstattung [kg] Wenn keine Daten vorhanden, wird defaultmäßig $m_{Opt\_E} = 0,1 * m_{DIN}$ angenommen
$m_{VL}$	.....	Massenrepräsentative Fahrzeuglast [kg]
$m_{ML}$	.....	Masse der maximalen Beladung [kg]

Weitere verwendete Daten und Einstellungen für die WLTC-Simulation der 4 untersuchten Fahrzeuge:

- Die Nebenverbraucher wurden mit 600 W gewählt. Im WLTC sind Nebenverbraucher, die durch den Nutzer eingestellt werden können (wie z.B. Klimaanlage, Radio), deaktiviert. Allerdings muss der WLTC State-of-Charge neutral gefahren werden. D.h. alle für den WLTC-Betrieb notwendigen Nebenverbraucher wie z.B. Versorgung der Motorsteuerung müssen im Verbrauch berücksichtigt sein.
- Es wurde ein kalibriertes CO<sub>2</sub>-Kennfeld verwendet. Die Kalibrierung erfolgte in einem vorangegangenen Projekt und war nicht Bestandteil dieser Arbeit. [39] Da in dem vorangegangenen Projekt Fahrzeuge mit gleicher Motortechnologie verwendet wurden, kann das kalibrierte Kennfeld für diese Untersuchung als Basis verwendet werden.
- Da Volllast- und Schleppkurven von den 4 Fahrzeugen nicht bekannt waren, wurden passend zu der vorliegenden Motortechnologie Defaultkurven verwendet.
- Getriebe- und Achsübersetzung wurden auf der Website von [automobile-catalog.com](http://automobile-catalog.com) abgerufen.
- Da in der aktuellen PHEM-Version noch keine Kaltstartberücksichtigung möglich ist, wird als Postprocessing ein Kaltstartfaktor von 1,03 auf den CO<sub>2</sub>-Wert aufgeschlagen. Dieser Wert wurde von [37] entnommen.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, treffen die Simulationen die Messungen recht genau. Mit einer maximalen positiven Abweichung von 2,7 %, einer maximalen negativen Abweichung von -4,4 % und einer durchschnittlichen Abweichung von 0,1 % ist die Simulation als ausreichend genau und erfahrungsgemäß gut validiert anzusehen.

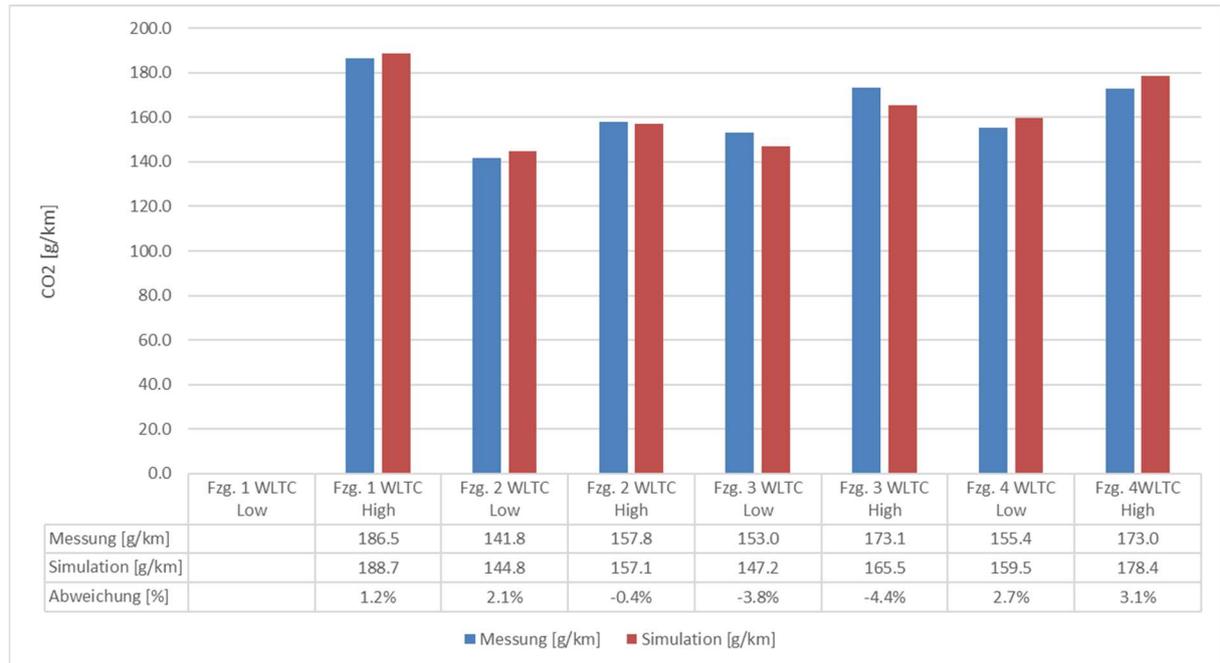


Abbildung 4-5: Vergleich von Messung und Simulation des WLTC der Voruntersuchung

#### 4.2.4 Ableitung von Simulationsparametern für Voruntersuchung

Für die Herleitung der Simulationseinstellungen für den NEDC, RWC und HBEFA wurden die WLTC-Einstellungen als Basis gewählt, da dieser der aktuelle Typprüfzyklus ist und Testmassen sowie Fahrwiderstände laut Gesetz vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden müssen.

##### 4.2.4.1 Simulationsparameter NEDC und RWC für Voruntersuchung

Die Testmasse für den NEDC ergibt sich aus der DIN-Leermasse plus 100 kg (75 kg für den durchschnittlichen Insassen + 25 kg Beladung), siehe Gleichung (4-16). [32]

$$m_{T\_NEDC} = m_{DIN} + m_{Pers} + 25 \text{ kg} \quad (4-16)$$

$m_{T\_NEDC}$  ..... NEDC-Testmasse [kg]

$m_{Pers}$  ..... Durchschnittliches Personengewicht von 75 kg

Die Testmasse für die RWC-Simulation muss nicht berechnet werden, da die Testmasse der vom IVT durchgeführten RDE-Messungen bekannt ist.

Die Fahrwiderstände und der  $C_w$ -Wert des NEDC können aus den Werten für den WLTC-Low berechnet werden, da WLTC-Low wie der NEDC ähnliche Fahrzeugkonfiguration hat (z.B. keine Zusatzausstattungen).

Die Zusammenhänge basieren auf Erfahrungswerten, die aus vorangegangenen Messungen am IVT resultieren. Nachfolgend sind die hier gewählten Einstellungen für die Simulation ersichtlich:

$$C_{w\_NEDC} = C_{w\_WLTC\_Low} * 0,83 \quad (4-17)$$

$$Fr_{NEDC} = Fr_{WLTC\_Low} * 0,8 \quad (4-18)$$

$C_{w\_NEDC}$	.....	NEDC-Luftwiderstandsbeiwert [-]
$C_{w\_WLTC\_Low}$	.....	WLTC-Low-Luftwiderstandsbeiwert [-]
$Fr_{NEDC}$	.....	NEDC-Rollwiderstandsbeiwerte [-], [s/m]
$Fr_{WLTC\_Low}$	.....	WLTC-Low-Rollwiderstandsbeiwerte [-], [s/m]

Für die Simulation der RDE-Fahrten wurden die Fahrwiderstände vom WLTC-High verwendet. Die Gründe dafür lauten:

- Offene Heckklappe und veränderter Luftwiderstand durch PEMS-Aufbau
- Höheres Gewicht durch PEMS-Aufbau
- Die 4 Fahrzeuge wurden mit Winterreifen gemessen → erhöhter Fahrwiderstand

Die Nebenverbraucher wurden für den NEDC mit 100 W mechanischer Leistung festgelegt. Das soll die Verlustleistung der Lichtmaschine widerspiegeln. Im NEDC dürfen die Nebenverbraucher noch durch die Fahrzeugbatterie versorgt werden. Bei der Simulation der RDE-Messungen müssen die eingeschalteten Nebenverbraucher (Klima, Licht, Radio) berücksichtigt werden. Das entspricht in etwa 1,5 kW mechanischer Leistung an der Lichtmaschine.

#### 4.2.4.2 Simulationsparameter HBEFA für Voruntersuchung

Bei der Herleitung der Parameter für die HBEFA-Simulation ist ein möglichst großer Bereich an Einflüssen, die Testmasse, Luft- und Fahrwiderstände verändern, zu berücksichtigen. Nur so kann eine möglichst genaue Simulation des realen Durchschnittsfahrzeugs erfolgen. Obwohl in der Voruntersuchung nur Otto-Fahrzeuge betrachtet wurden, wird die Herleitung der Parameter für Diesel-Fahrzeuge auch behandelt, da beide im späteren Verlauf der Arbeit benötigt werden.

Bei der Berechnung der HBEFA-Masse wurden mehrere Parameter berücksichtigt. So wurde die durchschnittliche Zusatzausstattung für Otto und Diesel-Fahrzeuge mit 5 % der DIN-Leermasse angenommen. Bei der Berechnung der Beladung wurden Tendenzen der Nutzer von Diesel- und Otto-Fahrzeugen unterschieden. Eine Tatsache, die dabei maßgebend war, ist, dass das durchschnittliche Diesel-Fahrzeug größer und stärker motorisiert ist, als das durchschnittliche Otto-Fahrzeug.

Basierend darauf wurde angenommen, dass Urlaubsfahrten, welche eine höhere Beladung mit sich bringen, tendenziell eher mit Diesel-Fahrzeugen durchgeführt werden. Des Weiteren bieten die größeren Diesel-Fahrzeuge mehr Stauraum, weshalb Beladung eher im Fahrzeug verbleibt.

So wurden für das durchschnittliche Diesel-Fahrzeug jährlich 3000 km mit 4 Personen und 100 kg Beladung (Urlaubsfahrten, längere Strecken) und 10000 km mit 1,5 Personen und 50 kg (täglicher Verkehr) angenommen. Für das durchschnittliche Otto-Fahrzeug wurden im Jahresdurchschnitt 10000 km mit 1,2 Personen und 30 kg Beladung (täglicher Verkehr) angenommen.

Die aus den genannten Annahmen folgende Berechnung der Testmasse ist in den folgenden Gleichungen dargestellt.

$$m_{T\_HBEFA\_Diesel} = m_{DIN} + m_{Zusatz} + m_{Bel\_Diesel} \quad (4-19)$$

$$m_{Zusatz} = m_{DIN} * 0,05 \quad (4-20)$$

$$m_{Bel\_Diesel} = \frac{3000 \text{ km} * (4 * m_{pers} + 100 \text{ kg}) + 10000 \text{ km} * (1,5 * m_{pers} + 50 \text{ kg})}{13000 \text{ km}} \quad (4-21)$$

$$m_{Bel\_Diesel} = 215 \text{ kg}$$

$$m_{T\_HBEFA\_Otto} = m_{DIN} * 1,05 + m_{Bel\_Otto} \quad (4-22)$$

$$m_{Bel\_Otto} = \frac{10000 \text{ km} * (1,2 * m_{pers} + 30 \text{ kg})}{10000 \text{ km}} \quad (4-23)$$

$$m_{Bel\_Otto} = 120 \text{ kg}$$

$m_{T\_HBEFA\_Diesel}$  ..... HBEFA-Testmasse für Dieselfahrzeuge [kg]

$m_{T\_HBEFA\_Otto}$  ..... HBEFA-Testmasse für Ottofahrzeuge [kg]

$m_{Zusatz}$  ..... Durchschnittliche Zusatzausstattung [kg]

$m_{Bel\_Diesel}$  ..... HBEFA-Beladung für Dieselfahrzeuge [kg]

$m_{Bel\_Otto}$  ..... HBEFA-Beladung für Ottofahrzeuge [kg]

Bei der Herleitung von  $C_w$ -Wert und Fahrwiderstandsbeiwerten für die HBEFA-Simulation wird auch von den Werten für WLTC ausgegangen. Als Basis dient der Mittelwert von WLTC-Low und -High. Diese Werte wurden durch Aufschlag mehrerer Faktoren erhöht, um das reale Durchschnittsverhalten darzustellen. Die Aufschläge basieren auf Erfahrungswerten und wurden abgeschätzt.

Der  $C_w$ -Wert wird, wie in Gleichung (4-24) beschrieben, bezüglich folgender Einflüsse korrigiert:

- Verwendung von Dachträgern und Anhängern  $K_{Cw\_1}$ ; dieser Faktor wurde abgeschätzt
- Seitenwindeffekten  $K_{Cw\_2}$ ; dieser Faktor wurde abgeschätzt
- Korrektur von Realumgebungstemperatur vs. Normtemperatur  $K_{Cw\_3}$

Wie in Gleichung (2-24) beschrieben, hängt der Luftwiderstand von der Luftdichte ab. Mit der idealen Gasgleichung können die unterschiedlichen Dichten bei Normverhältnissen (20 °C) und dem deutschen Jahresdurchschnitt (12 °C) ins Verhältnis gesetzt werden. Dieses Verhältnis stellt den Korrekturfaktor dar.

Bei der Herleitung der Rollwiderstände vom WLTC, die in Gleichung (4-25) zusammengefasst sind, werden ebenfalls folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Anteil der Regentage und daraus resultierender erhöhter Rollwiderstand  $K_{Fr_1}$ . Es wurden 6% als Anteil der Stunden mit nasser Fahrbahn ermittelt. Die Erhöhung des Rollwiderstandes um 30 % wurde abgeschätzt.
- Anteil der Tage, an denen Winterreifen verwendet werden und daraus resultierender erhöhter Rollwiderstand  $K_{Fr_2}$ . Der Anteil der Tage mit verwendeten Winterreifen sowie der erhöhte Rollwiderstand wurden abgeschätzt.
- Verwendung von größeren/breiteren Reifen als beim WLTC → gilt nur für Diesel-Fahrzeuge  $K_{Fr_D}$

Tabelle 4-6: HBEFA-Korrekturfaktoren für Luft- und Rollwiderstände

$K_{Cw_1} = 1,025$	$K_{Fr_1} = 0,06 * 0,3$
$K_{Cw_2} = 1,03$	$K_{Fr_2} = 0,3 * 0,15$
$K_{Cw_3} = \frac{20 + 273,15}{12 + 273,15} = 1,028$	$K_{Fr_D} = 1,05$

Alle Korrekturfaktoren zusammen ergeben folgende Korrektur für Roll- und Luftwiderstand:

$$c_{w\_HBEFA} = c_{w\_WLTC-Mix} * K_{Cw_1} * K_{Cw_2} * K_{Cw_3} \quad (4-24)$$

$$F_{r\_HBEFA} = F_{r\_WLTC-Mix} * (1 + K_{Fr_1}) * (1 + K_{Fr_2}) * K_{Fr_D} \quad (4-25)$$

$c_{w\_HBEFA}$	.....	HBEFA-Luftwiderstandsbeiwert [-]
$c_{w\_WLTC-Mix}$	.....	Mittelwert aus WLTC-Low und -High Luftwiderstandsbeiwert [-]
$K_{Cw_1}$	.....	Erhöhung des Luftwiderstandes durch Anteil an Dachträgern und Anhängern [-]
$K_{Cw_2}$	.....	Erhöhung des Luftwiderstandes durch Seitenwindeffekte [-]
$K_{Cw_3}$	.....	Korrektur des Luftwiderstandes für Realtemperatur vs. Norm [-]
$F_{r\_HBEFA}$	.....	HBEFA-Fahrwiderstandsbeiwerte [-], [s/m]
$F_{r\_WLTC-Mix}$	.....	Mittelwert aus WLTC-Low und -High Fahrwiderstandsbeiwerten [-], [s/m]

$K_{Fr_1}$	.....	Erhöhung durch Anteil Regentage im Jahr * Erhöhung Fahrwiderstand [-]
$K_{Fr_2}$	.....	Erhöhung durch Anteil Winterreifen * Erhöhung Fahrwiderstand [-]
$K_{Fr_D}$	.....	Erhöhung des Fahrwiderstandes durch breitere/größere Reifen [-] → gilt nur für Diesel-Fahrzeuge!

Die Nebenverbraucher für die HBEFA-Simulation wurden analog zur RWC-Simulation mit 1,5 % der Nennleistung definiert.

#### 4.2.5 Simulation NEDC

Die 4 Fahrzeuge wurden mit den in Kapitel 4.2.4.1 genannten Parametern im NEDC simuliert. Da PHEM derzeit noch keinen Kaltstart simulieren kann, wurde als Kaltstartfaktor für CO<sub>2</sub> 1,08 gewählt. [37] Als Vergleichswert dient der NEDC-Typprüfwert aus dem Zulassungsschein der Fahrzeuge. Der Vergleich zwischen Typprüfwerten und der Simulation ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

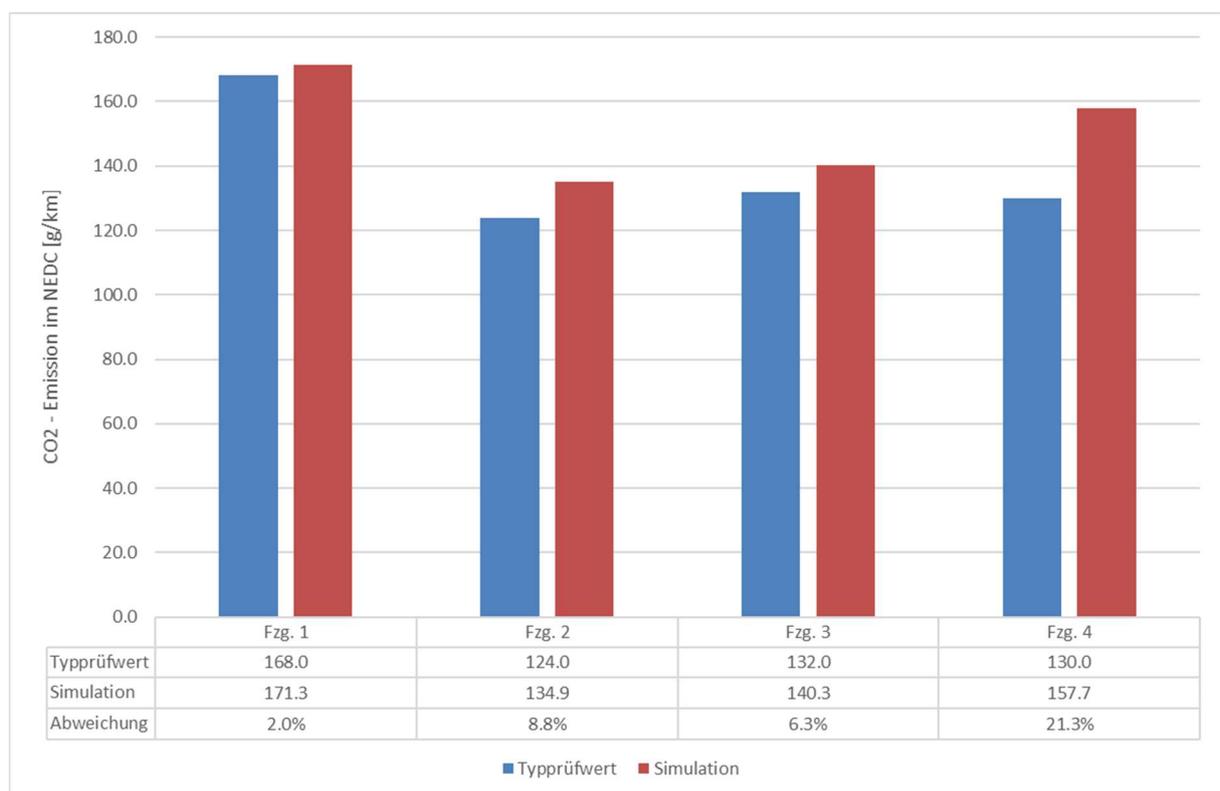


Abbildung 4-6: Vergleich von NEDC-Typprüfwerten und NEDC-Simulation für Voruntersuchung

Wie daraus ersichtlich ist, wird bei allen Fahrzeugen ein zu hoher Wert simuliert. Bei Fahrzeug 4 ist die Abweichung mit 21,3 % am höchsten. Für die Abweichungen können mehrere Gründe vorliegen. Ein Grund für die Überschätzung könnte der vorgegebene NEDC-Geschwindigkeitsverlauf für die Simulation sein. Am Prüfstand hat der Prüfstandsfahrer ein sogenanntes Toleranzband, um die Sollkurve nachfahren zu können. Abbildung 4-7 zeigt das Toleranzband mit der Soll-Geschwindigkeitskurve.

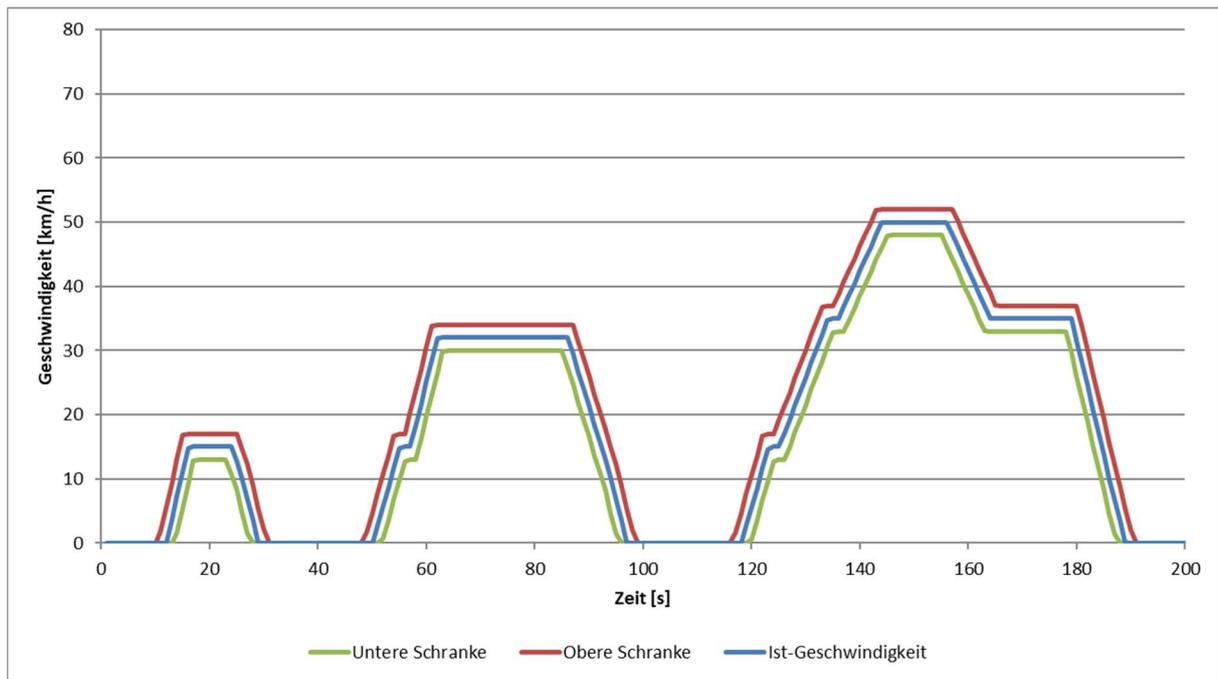


Abbildung 4-7: Geschwindigkeitstoleranzband im NEDC

Nutzt man nun absichtlich das Toleranzband aus, um die Beschleunigung in jedem Zeitpunkt minimal zu halten sowie die langen Verzögerungsstrecken möglichst verbrauchsgünstig zu fahren, so könnte ein Ist-Geschwindigkeitsverlauf, wie in Abbildung 4-8 gezeigt, vorliegen. Der NEDC wäre nach wie vor gesetzeskonform.

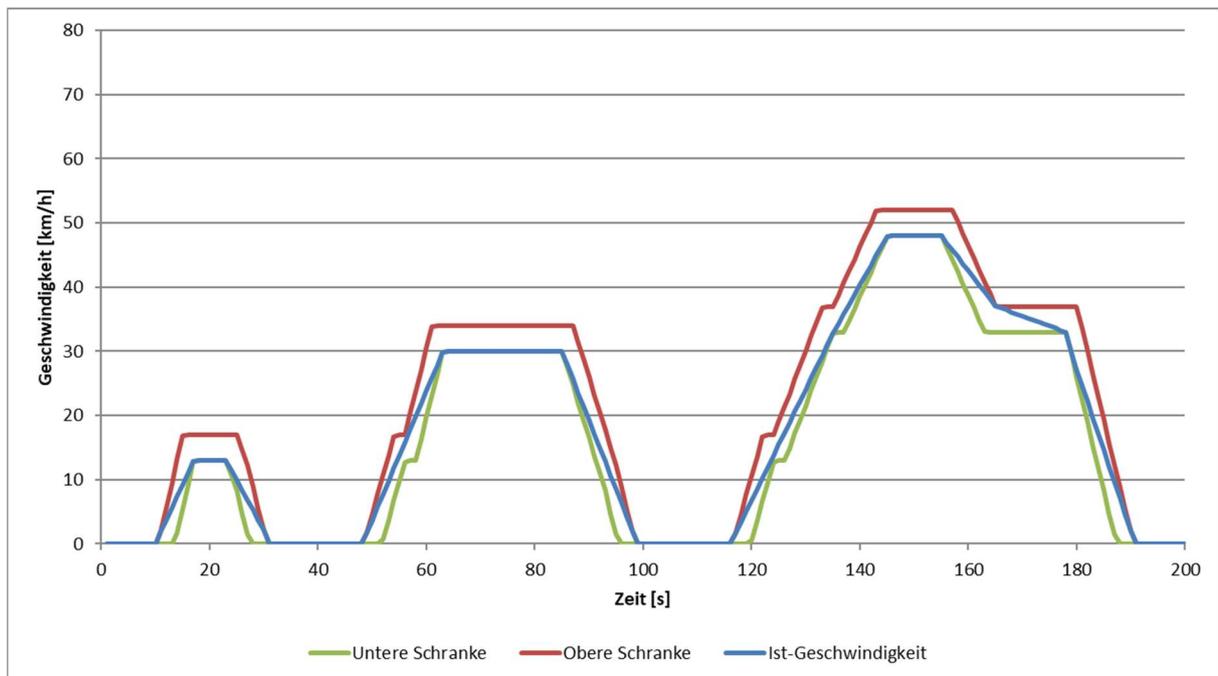


Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsschranken des NEDC mit sparsamem Fahrstil

Die Ergebnisse der Simulation des NEDC mit sparsamem Fahrstil sind in Abbildung 4-9 dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, kann durch einen sparsamen Fahrstil die CO<sub>2</sub>-Emission wesentlich gesenkt werden. Die Simulation der CO<sub>2</sub>-Emissionen stimmt nun weitaus besser mit den Typprüfwerten überein. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen konnten im Vergleich zum normalen Fahrstil im Durchschnitt um 3,5 % gesenkt werden. Jedoch ist trotz der Verbesserung die Simulation von Fahrzeug 4 noch immer 17,9 % von dem Zielwert entfernt. Ein weiterer Grund für diese Abweichung könnte sein, dass für dieses Fahrzeug die empirischen Zusammenhänge der Prüfstandseinstellungen zwischen NEDC und WLTC nur eingeschränkt gelten und bei der Typisierung die Toleranzen für die Prüfstandssettings (Ausrollzeiten, Drehmomentsteuerung, CVS-Volumenstrom und CO<sub>2</sub>-Analysatoren) überdurchschnittlich ausgenutzt wurden.

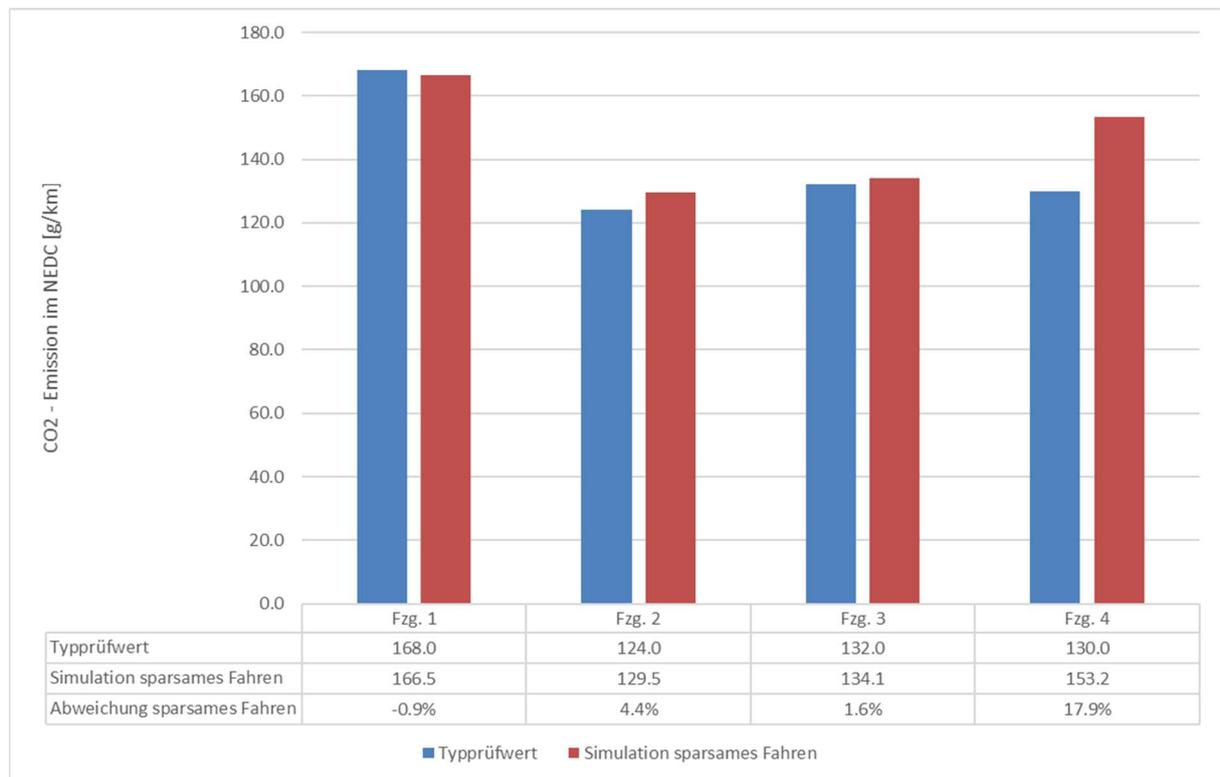


Abbildung 4-9: Vergleich von Typprüfwerten und NEDC-Simulation mit sparsamem Fahrstil für Voruntersuchung

#### 4.2.6 Simulation RWC

Weiters wurden die gefahrenen RDE-Routen nachsimuliert. Dabei wurden der Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf vorgegeben. Da die Messungen jeweils mit Kaltstart durchgeführt wurden, musste dieser wieder als Faktor auf die simulierten CO<sub>2</sub>-Werte aufgeschlagen werden. Für RDE-Zyklen liegt der Kaltstartfaktor ebenfalls bei 1,04. In Abbildung 4-10 sind Messung und Simulation der RDE-Fahrten gegenübergestellt. Für jedes Fahrzeug ist der Mittelwert der jeweiligen RDE-Fahrten dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, hat die Simulation geringe Abweichungen gegenüber der Messung. Im Mittelwert liegt die Simulation jedoch nur -0,1 % unter den Messdaten. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Luft- und Rollwiderstände vom WLTC hergeleitet wurden, ist die Simulation jedoch als ausreichend genau anzusehen.

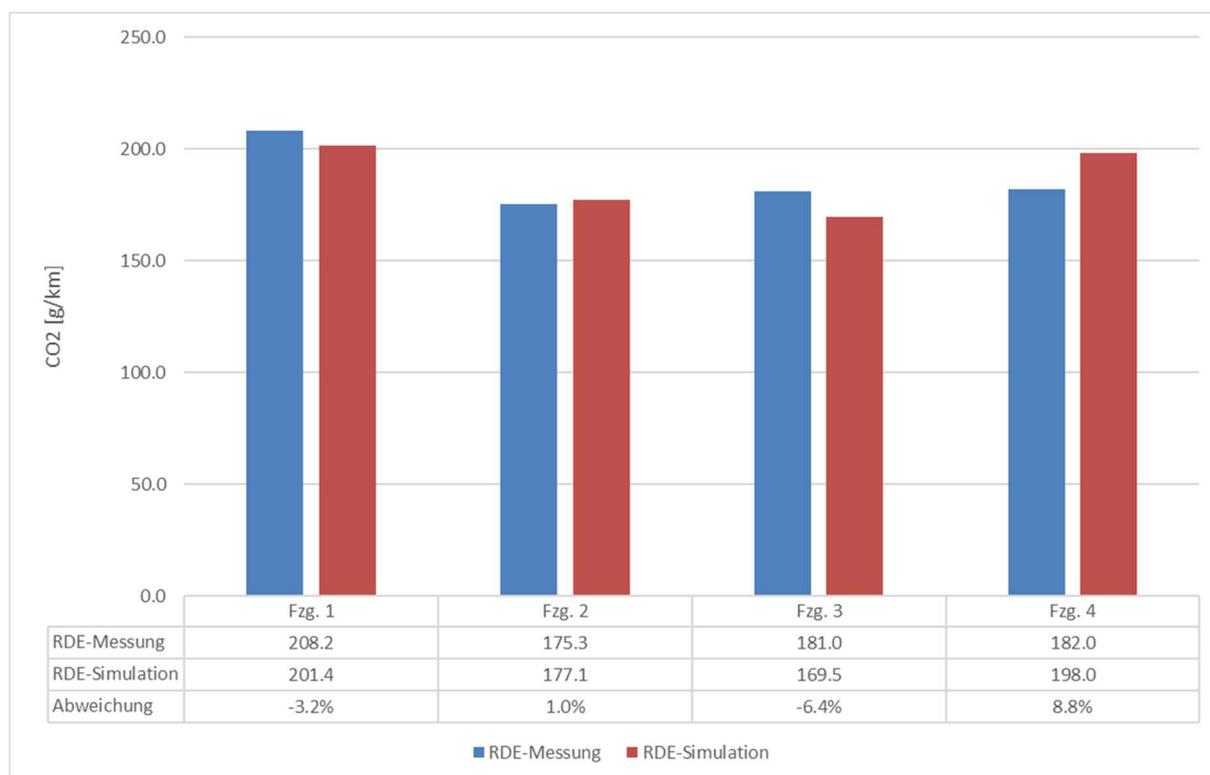


Abbildung 4-10: RWC-Simulation der Voruntersuchung

#### 4.2.7 Simulation HBEFA und Vergleich mit Spritmonitor

Unter diesem Kapitel wird die Simulation der HBEFA-Zyklen mit den 4 ausgewählten Fahrzeugen beschrieben. Wie bereits erwähnt, sollen die HBEFA-Zyklen repräsentative reale Fahrzyklen für ganz Europa darstellen. Daher können sie für die Validierung auch mit den Spritmonitor-Werten verglichen werden.

Bei der HBEFA-Simulation der 4 Otto-Fahrzeuge wurden für dieses Kapitel einige Abweichungen zur früher gezeigten Parameterherleitung durchgeführt. Der Grund dafür ist, dass die 4 Fahrzeuge von Masse, Größe und Nennleistung eher dem durchschnittlichen Diesel-Fahrzeug entsprechen. Deshalb wurden sowohl Fahrzeugbeladung als auch Fahrwiderstandsbeiwerte mit der Herleitung für Diesel-Fahrzeuge berechnet.

Da die HBEFA-Zyklen eine Vielzahl an einzelnen Verkehrssituationen darstellen, müssen sie zu einem Durchschnittswert zusammengewichtet werden. Diese Gewichtung wurde für Deutschland durchgeführt, da sich Spritmonitor ebenfalls auf Deutschland bezieht. Zusätzlich wurde wiederum ein Kaltstartfaktor von 1,04 aufgeschlagen. Dieser wurde von HBEFA 3.3 übernommen.

In Abbildung 4-11 sind die gewichteten HBEFA-Werte im Vergleich mit den Spritmonitor-Werten dargestellt. Mit Ausnahme von Fahrzeug 1 werden die Spritmonitor-Werte von der HBEFA-Simulation gut getroffen. Der Grund für diese Abweichung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht eruiert werden, eventuell wurden die auf Spritmonitor.de eingetragenen Werte mit überdurchschnittlich sportlichem Fahrstil gefahren.

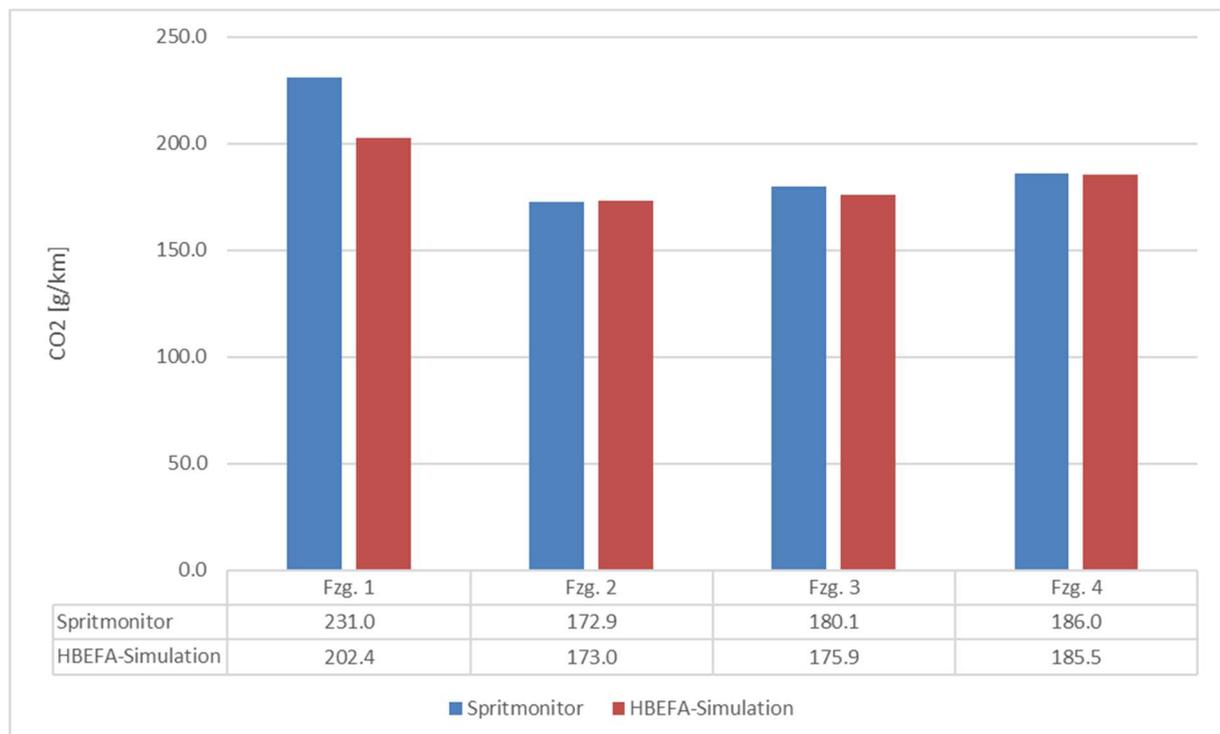


Abbildung 4-11: Vergleich der Absolutwerte von HBEFA-Simulation mit Spritmonitor.de

#### 4.2.8 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse der Voruntersuchung

In Abbildung 4-12 ist eine Zusammenfassung der Absolutemissionen der Voruntersuchung gezeigt. Darin ist für jeden Eintrag der Mittelwert der 4 Fahrzeuge gebildet. Es ist zu erkennen, dass die Simulation größtenteils die Messung gut reproduziert. Weiters ist ersichtlich, dass der Spritmonitor-Wert höher liegt, als die vom IVT durchgeführten RDE-Fahrten. Dies könnte u.a. an einem dynamischeren Fahrverhalten liegen. Weiters könnten die gefahrenen Strecken kürzer sein, was einen höheren Anteil an den Kaltstartemissionen bewirkt. Die HBEFA-Simulation hat eine Abweichung von  $-4,3\%$  zu dem Spritmonitor-Wert. Es sei hier jedoch anzumerken, dass die simulierten Zyklen noch von HBEFA 3.3 stammen. Erst in der Schlussphase dieser Arbeit wurden die neuen Zyklen für HBEFA 4.1 übermittelt, die durch eine erhöhte Dynamik höhere  $\text{CO}_2$ -Emissionen liefern.

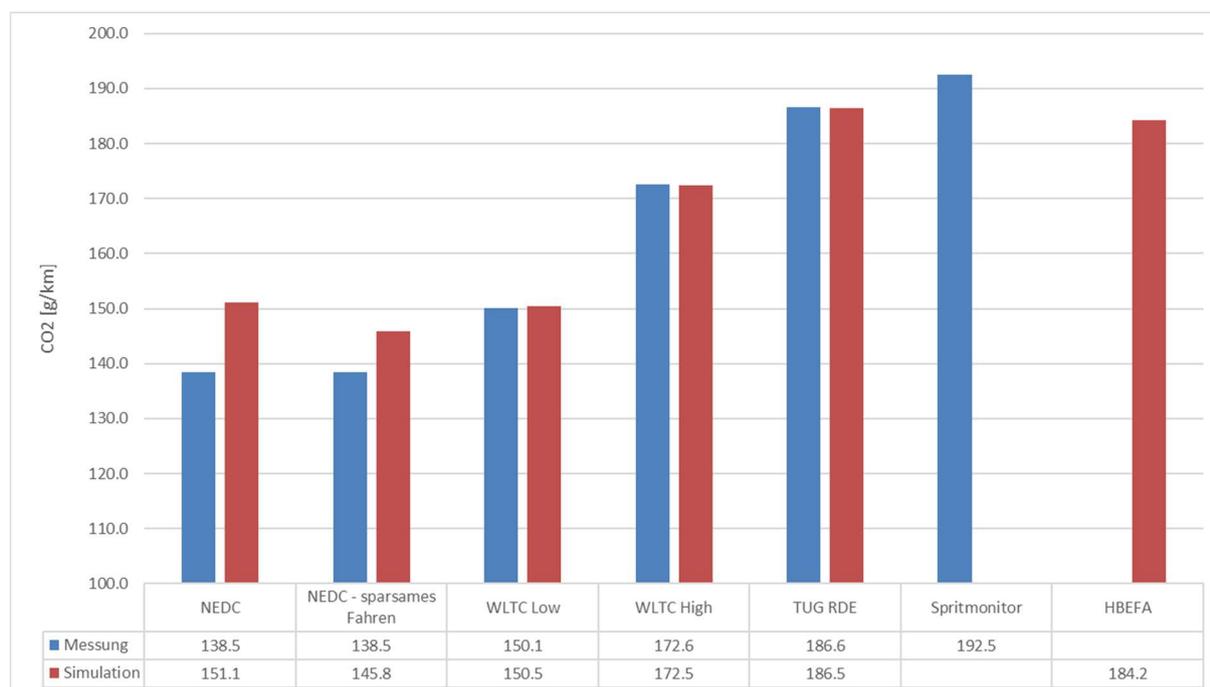


Abbildung 4-12: Mittelwerte der Absolutemissionen für Otto-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung

In Abbildung 4-13 sind die Mittelwerte der Abweichungen zum NEDC für die 4 Otto-Fahrzeuge dargestellt.

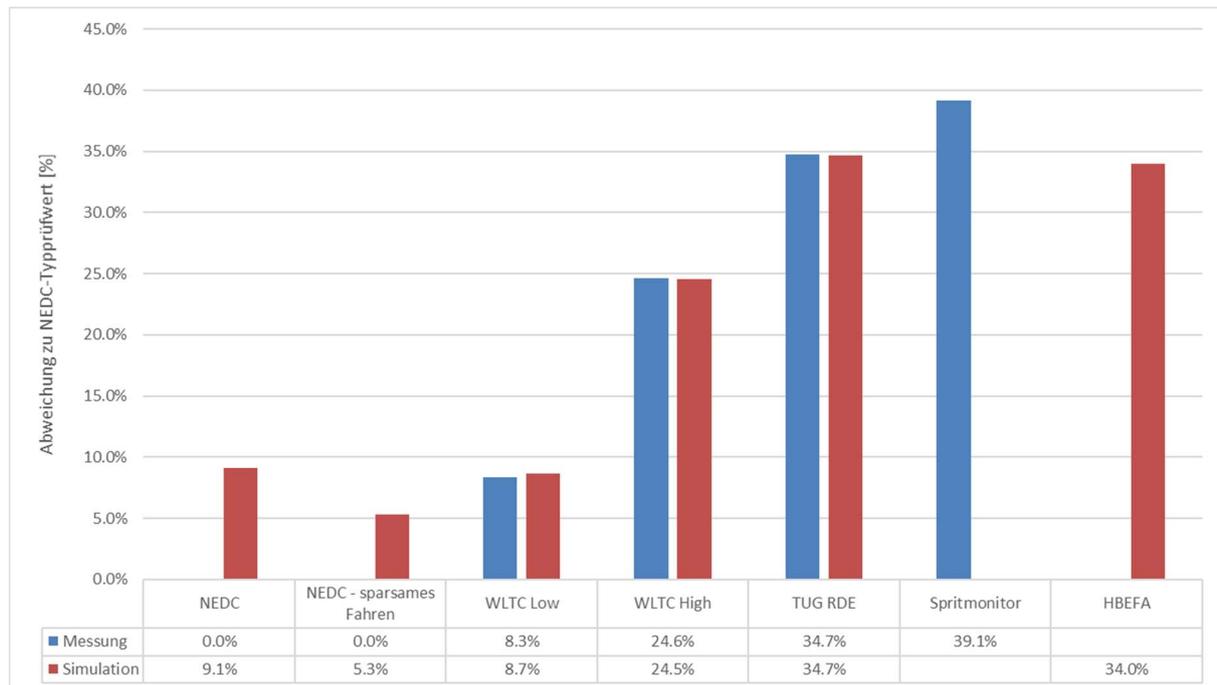


Abbildung 4-13: Mittelwerte der Abweichungen zum NEDC für Otto-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung

Parallel dazu wurde von Herrn Nicolas Politschnig im Rahmen seiner Bachelorarbeit am IVT die selbe Aufgabenstellung für Diesel-PKW durchgeführt.[27] Es wurden ebenfalls 4 Fahrzeuge betrachtet. Die Daten zu den betrachteten Fahrzeugen sind in Tabelle 4-7 aufgelistet.

Tabelle 4-7: Eckdaten der Diesel-Fahrzeuge für die Voruntersuchung

		Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4
Motorart	[-]	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
EU-Norm	[-]	Euro 6b	Euro 6b	Euro 6b	Euro 6b
Leistung	[kW]	66	88	90	140
DIN-Masse	[kg]	1305	1445	1475	1532
NEDC-Typprüfwert	[g/km]	106.3	104	108	120.5

Die Herleitung der Parameter für die Diesel-Fahrzeuge sowie die Simulation verlief analog zu den Otto-Fahrzeugen. (siehe Kapitel 4.2.3 und Kapitel 4.2.4). In Abbildung 4-14 sind die Ergebnisse der Simulation der Diesel-Fahrzeuge in Absolutwerten dargestellt. Wie bereits bei den Otto-Fahrzeugen sind hier die Mittelwerte der 4 Fahrzeuge dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, trifft die Simulation den NEDC-Wert ziemlich genau. Im Gegensatz zu den Otto-Fahrzeugen wurde hier der durchschnittliche WLTC (Mittelwert aus Low und High) betrachtet. Dieser wurde von der Simulation überschätzt. Die RDE-Fahrten konnten gut dargestellt werden. Die genannten Punkte sprechen für ein durchaus kalibriertes Fahrzeug bzw. Kennfeld.

Der Spritmonitor liegt hier, wie auch bei den Otto-Fahrzeugen über den RDE-Messungen. Im Fall der Diesel-Fahrzeuge liegt die HBEFA-Simulation ebenfalls unter dem Spritmonitor. Hier ist die Abweichung mit - 13,6 % jedoch höher als bei den Otto-Fahrzeugen.

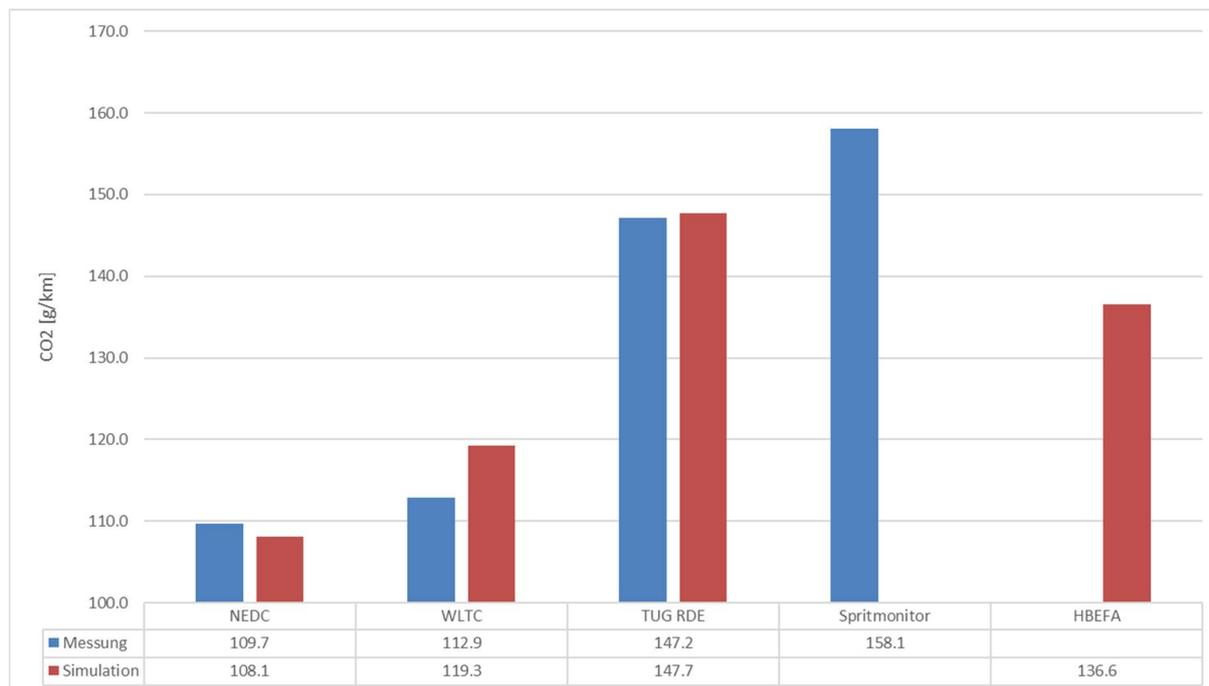


Abbildung 4-14: Mittelwerte der Absolutemissionen für Diesel-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung

In Abbildung 4-15 sind die Mittelwerte der Abweichungen zum NEDC für die 4 Diesel-Fahrzeuge dargestellt.

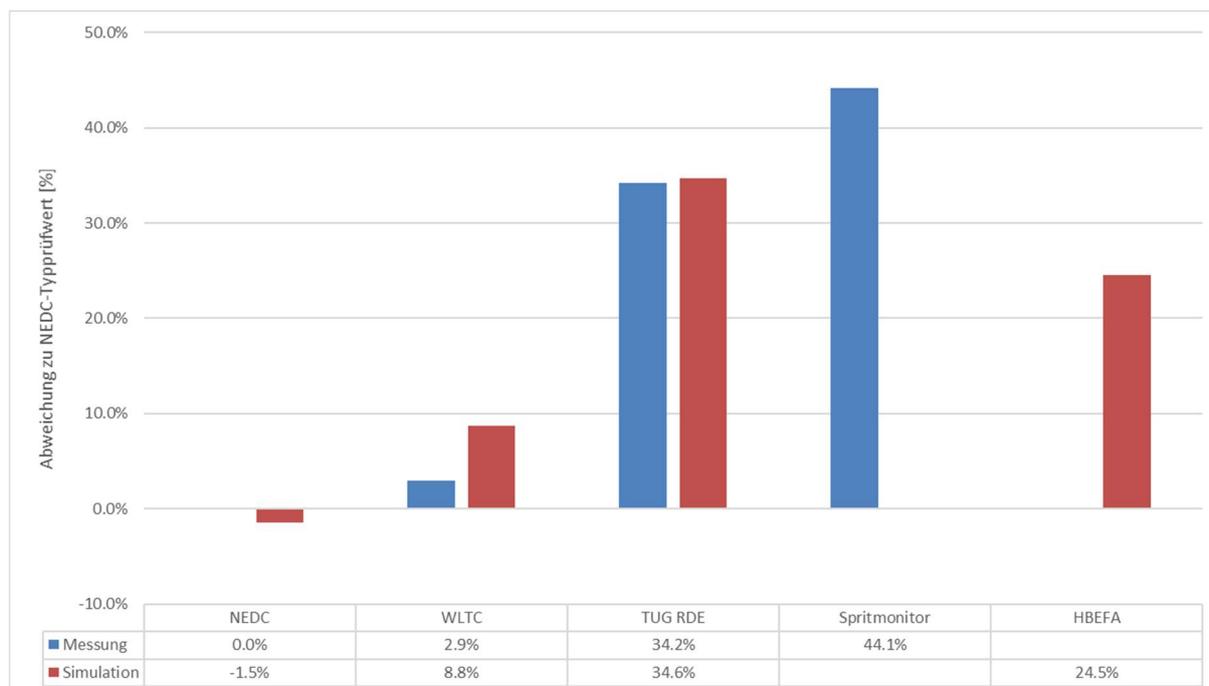


Abbildung 4-15: Mittelwerte der Abweichungen zum NEDC für Diesel-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung

#### **4.2.9 Fazit der Voruntersuchung**

Die Voruntersuchung zeigt, dass die Simulation ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Die Parameterherleitung für HBEFA ist nachvollziehbar und berücksichtigt die wichtigsten Einflussfaktoren. Für die Simulation von NEDC, WLTC und RWC liefern die verwendeten Simulationseinstellungen gute Ergebnisse. Die HBEFA-Simulation weicht vom Zielwert etwas ab, das könnte u.a. an den HBEFA-Zyklen bzw. deren Gewichtung liegen. Mit den Erkenntnissen der Voruntersuchungen wurden neue HBEFA 4.1-Zyklen für den Autobahnabschnitt erstellt, die durch eine erhöhte und vor allem realitätsnähere Fahrdynamik höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen liefern. Mit den gesammelten Erkenntnissen aus der Voruntersuchung wurde die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit den neuen HBEFA-Zyklen für HBEFA 4.1 durchgeführt.

### 4.3 Datenbasis für die CO<sub>2</sub>-Simulation für HBEFA 4.1

Da an dem Handbuch für Emissionsfaktoren mehrere Institutionen mitarbeiten, gab es viele Daten, die zusammengeführt werden mussten.

#### 4.3.1 Allgemeine Datenquellen

Für die Erstellung der HBEFA-Durchschnittsfahrzeuge ist eine Vielzahl an Parametern notwendig. Im Zuge dieser Arbeit wurden die Durchschnittsfahrzeuge aller Euro-Klassen für Otto und Diesel für Deutschland erstellt. Für die Erstellung der Fahrzeuge mussten den einzelnen Euro-Klassen Durchschnittswerte für Masse, Motorleistung sowie NEDC-Typrüfwert und Spritmonitor-Wert ermittelt werden.

Vom IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) aus Deutschland wurden aus diesem Grund nach Neuzulassungen gewichtete Jahresmittelwerte für DIN-Leermasse, Nennleistung und CO<sub>2</sub> der Typrüfung im NEDC bereitgestellt. Diese Werte waren nach Otto und Diesel getrennt verfügbar. In Abbildung 4-16 sind die Verläufe von Nennleistung und DIN-Leergewicht aller Neuzulassungen für Otto- und Diesel-Fahrzeuge dargestellt. Gut zu erkennen ist dabei der Einbruch von Masse und Leistung im Jahr 2009, als durch die Wirtschaftskrise der Wunsch nach kleineren und leistungsärmeren Fahrzeugen vorherrschte.

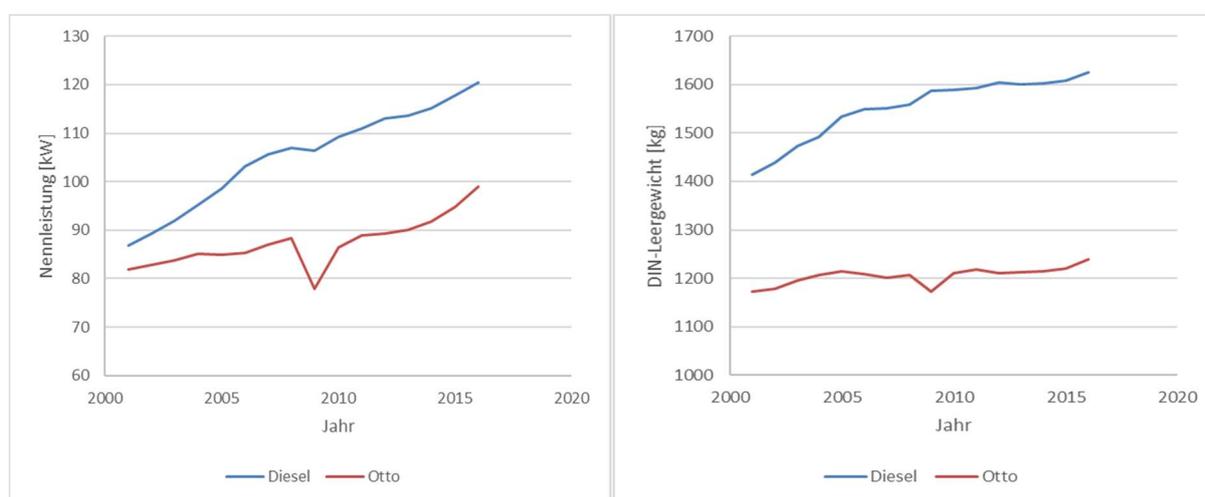


Abbildung 4-16: Verlauf von Nennleistung und DIN-Leergewicht aller Neuzulassungen für Otto- und Diesel-Fahrzeuge in Deutschland

In Abbildung 4-17 sind die Verläufe der CO<sub>2</sub>-Emissionen im NEDC aller neu zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland für Otto- und Diesel-Fahrzeuge dargestellt. Daraus ist der Trend nach Fahrzeugen mit verringertem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, zumindest im NEDC-Typrüfzyklus, deutlich ersichtlich. Diese Daten sind im Anhang in Tabelle 0-3 tabellarisch dargestellt.

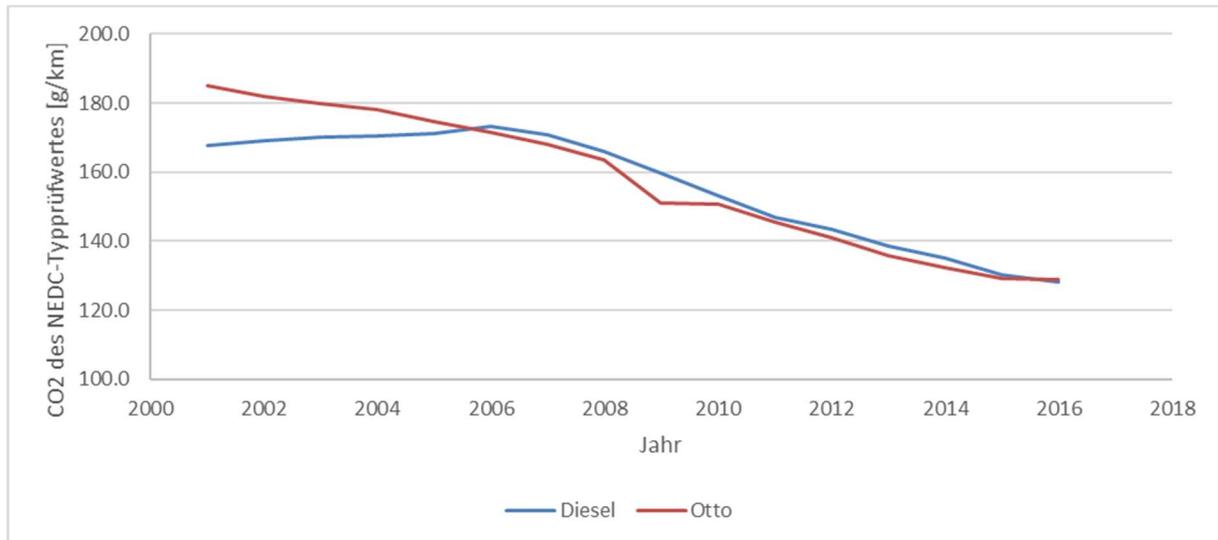


Abbildung 4-17: Jährlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Emissionen im NEDC für Otto- und Diesel-Fahrzeuge in Deutschland, gewichtet nach Neuzulassungen

Vom ICCT (International Council on Clean Transportation) in Deutschland wurden die Verläufe der Spritmonitor-Daten für Otto- und Diesel-Fahrzeuge zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten die Abweichungen der Spritmonitor-Werte zum NEDC-Typprüfwert, ebenfalls gewichtet nach Neuzulassungen (siehe Abbildung 4-18). Die Daten zu den Verläufen sind im Anhang in Tabelle 0-3 aufgelistet.

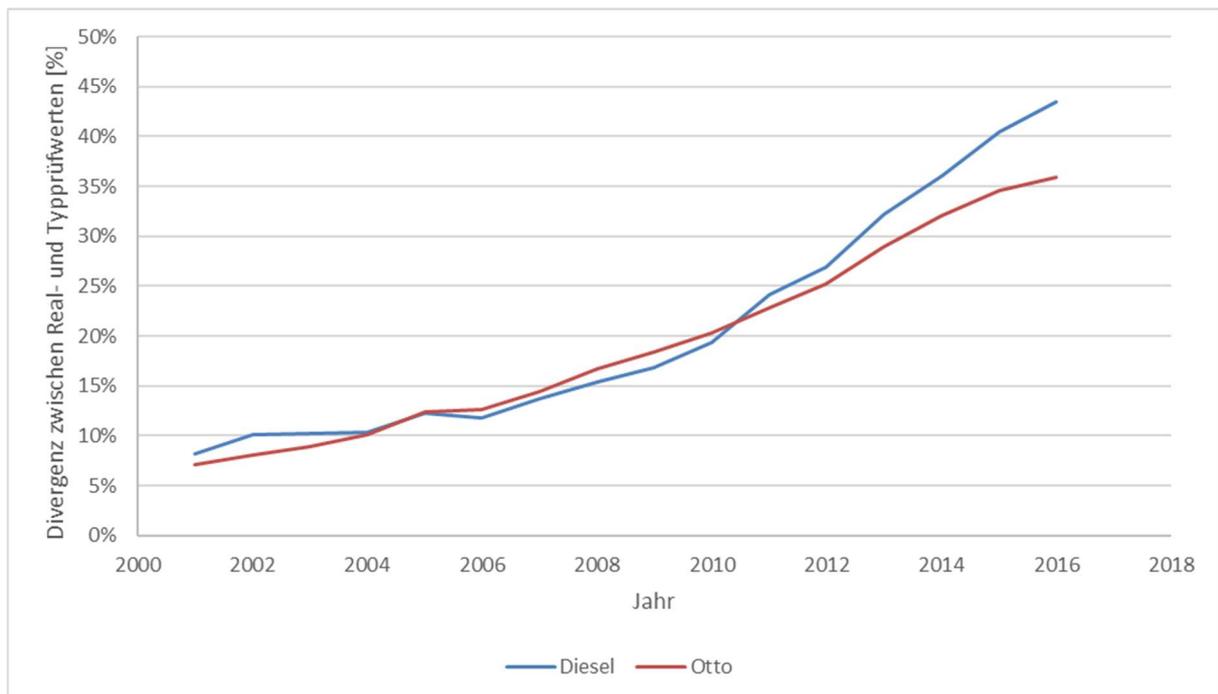


Abbildung 4-18: Zeitlicher Verlauf der Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für Otto und Diesel

Damit die jährlichen Verläufe den einzelnen Euro-Klassen zugeteilt werden konnten, musste die Durchdringung der Euro-Klassen von den Neuzulassungen für das jeweilige Kalenderjahr bestimmt werden (siehe Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20). Diese wurden zusammen mit MK Consulting GmbH für Fahrzeuge von Euro 3 aufsteigend für Otto- und Diesel-Fahrzeuge bestimmt. Die Daten zu den Verläufen sind im Anhang in Tabelle 0-4 und Tabelle 0-5 aufgelistet.

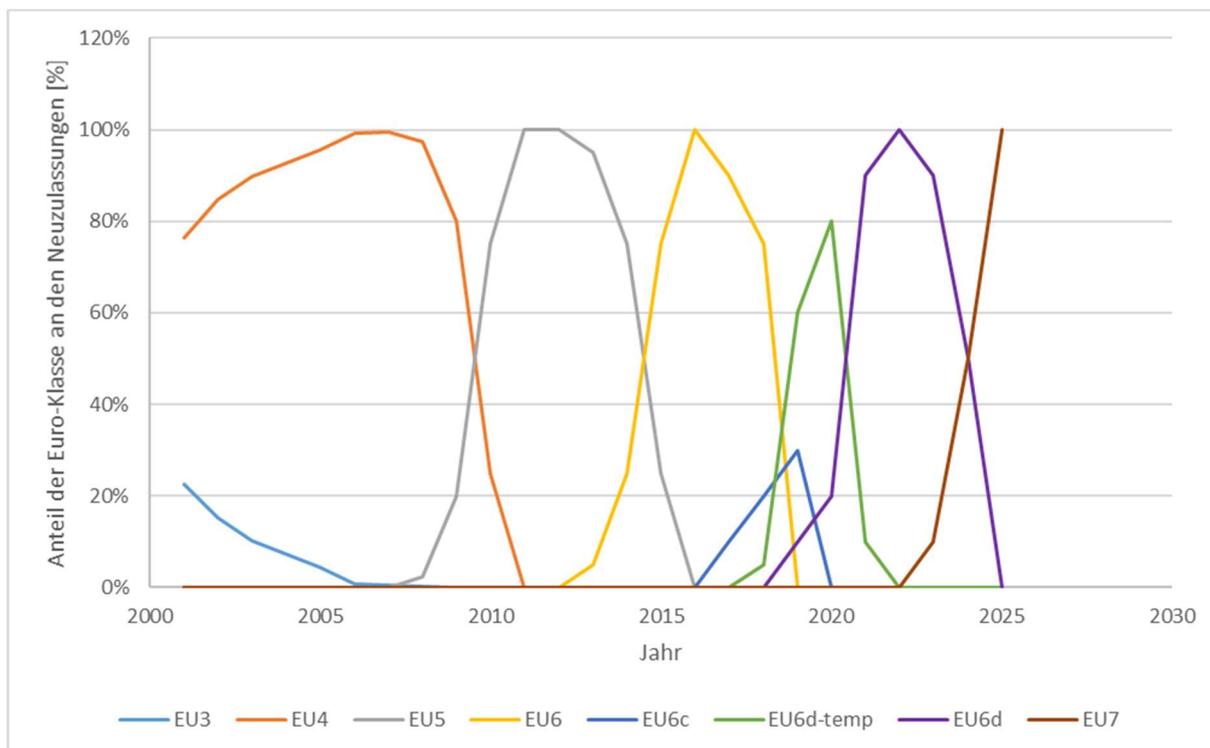


Abbildung 4-19: Jährlicher Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen für Otto-Fahrzeuge

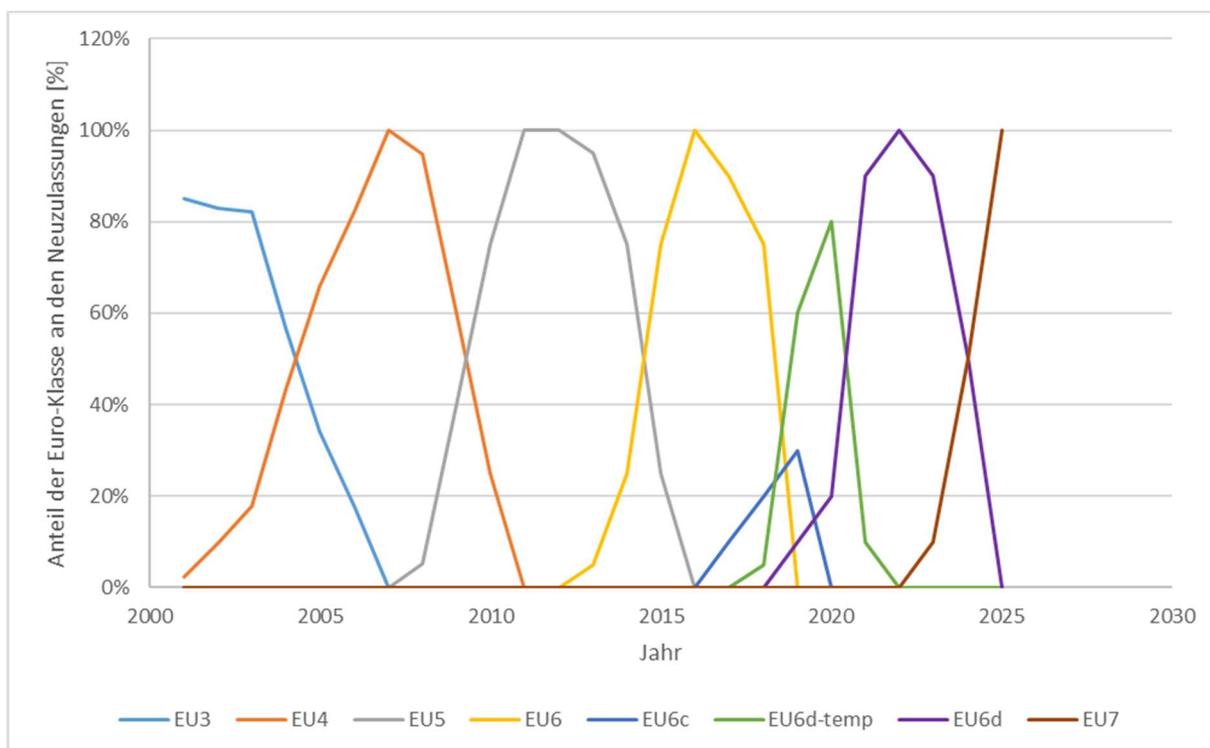


Abbildung 4-20: Jährlicher Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen für Diesel-Fahrzeuge

Nach der Voruntersuchung wurden aufgrund teilweiser Abweichungen zwischen Spritmonitor und HBEFA neue Zyklen für Autobahnabschnitte für die HBEFA-Simulation eingeführt. Diese wurden von Heinz Steven von HS Datenanalysen und Gutachten entwickelt. Die zugehörigen Gewichtungen, um mit den Zyklusmittelwerten auf den deutschen Flottendurchschnitt zu kommen, wurden vom IFEU übermittelt. In Abbildung 4-21 ist der Vergleich zwischen zwei Autobahnzyklen aus HBEFA 3.3 und den neuen Zyklen für HBEFA 4.1 dargestellt, die jeweils die selbe Verkehrssituation darstellen sollen. Die neuen Zyklen und deren Gewichtungen ergeben insgesamt eine CO<sub>2</sub>-Emissionserhöhung für den Deutschland-Mix um etwa 4,5 %. Für den direkten Vergleich wurden die Fahrzeugparameter von Kapitel 4.2.7 für HBEFA einmal mit den alten Zyklen und einmal mit den neuen Zyklen simuliert. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liefern die neuen Zyklen eine Steigerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von ungefähr 4,5 %, was sich auch gut mit den Erkenntnissen aus der Voruntersuchung deckt.

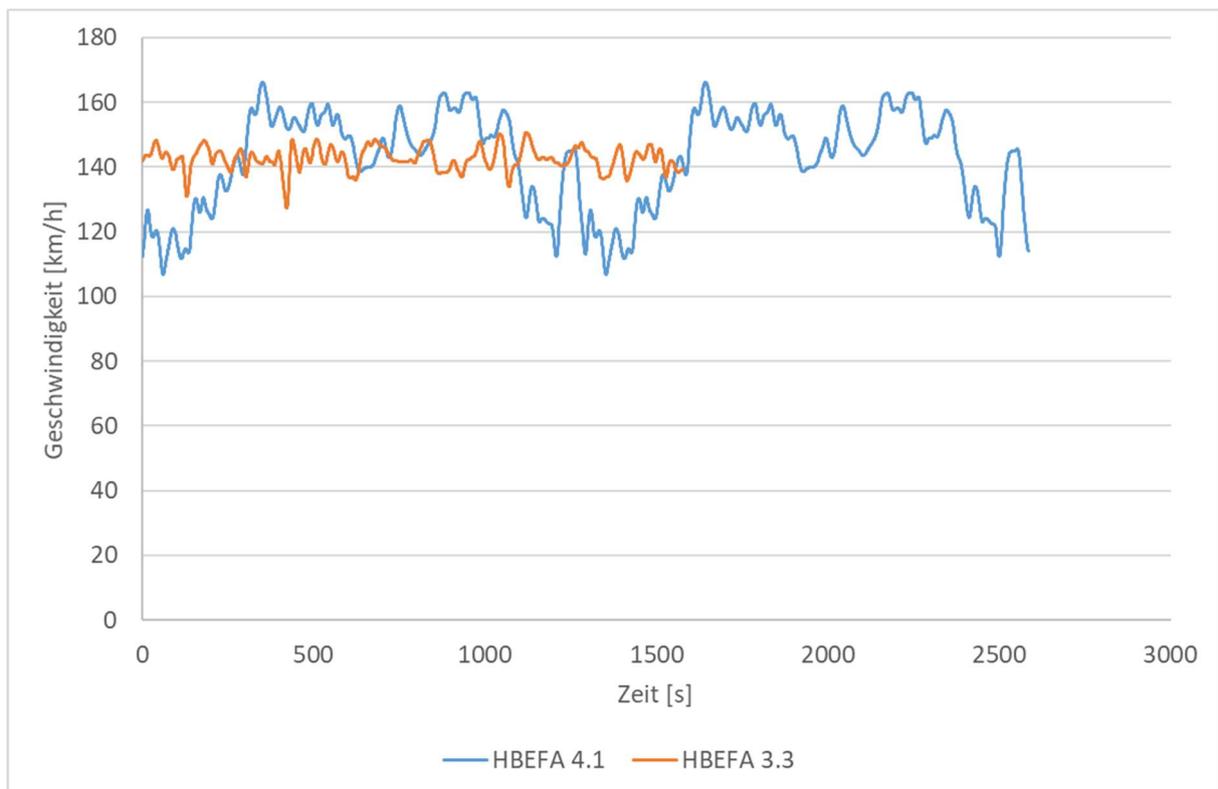


Abbildung 4-21: Geschwindigkeitsverlauf eines gleichwertigen Autobahnzyklus von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1

## 4.4 Erstellung Durchschnittsfahrzeuge HBEFA 4.1 Otto und Diesel

In diesem Unterkapitel wird die Erstellung der Durchschnittsfahrzeuge für Otto und Diesel von Euro 0 bis Euro 7 gezeigt. Dabei sei erwähnt, dass derzeit noch kein Gesetz für Euro 7 verabschiedet wurde. Simulation für Euro 7 sind nach derzeitigem Wissensstand durchgeführt worden und sollen nur eine Abschätzung zeigen, wie sich Euro 7 entwickeln könnte. Ebenfalls eine Abschätzung soll Euro 6d zeigen, da diese Abgasgesetzgebung erst mit Jänner 2020 in Kraft tritt.

### 4.4.1 Bestimmung von Fahrzeugmasse und Nennleistung

Die Bestimmung von Fahrzeugmasse und Nennleistung der Durchschnittsfahrzeuge aller Euro-Klassen erfolgte auf Basis der Gewichts- und Massenverläufe der neu zugelassenen Fahrzeuge (siehe Abbildung 4-16) und der Durchdringung der Euro-Klassen (siehe Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20). Als Vergleichsbasis wurden die Daten von HBEFA 3.3 herangezogen. Da die Werte der neu zugelassenen Fahrzeuge nur von 2001 bis 2016 reichen, konnten nur die Klassen Euro 3 bis Euro 6ab direkt bestimmt werden. Für Euro 0 bis Euro 2 wurde der Verlauf von HBEFA 3.3 um die Differenz von HBEFA 4.1 zu HBEFA 3.3 der Klasse Euro 3 parallelverschoben. Die Klassen ab Euro 6ab wurden als zeitliche Weiterentwicklung von Euro 6ab abgeleitet. Dabei wurde Euro 7 gebildet, indem das Verhältnis von Euro6ab/Euro5 auf Euro 6ab aufgeschlagen wurde (Anstieg je ganzer Euro-Klasse). Mit den repräsentativen Jahren 2016 für Euro 6ab und 2025 für Euro 7 wurden die Euro-Klassen dazwischen mittels der repräsentativen Jahre interpoliert. Diese Herangehensweise wurde für die Bestimmung von DIN-Leermasse und Nennleistung gleichermaßen angewendet. Die Ergebnisse dieser Herleitung im Vergleich zu den Daten von HBEFA 3.3 sind in den Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-25 dargestellt.

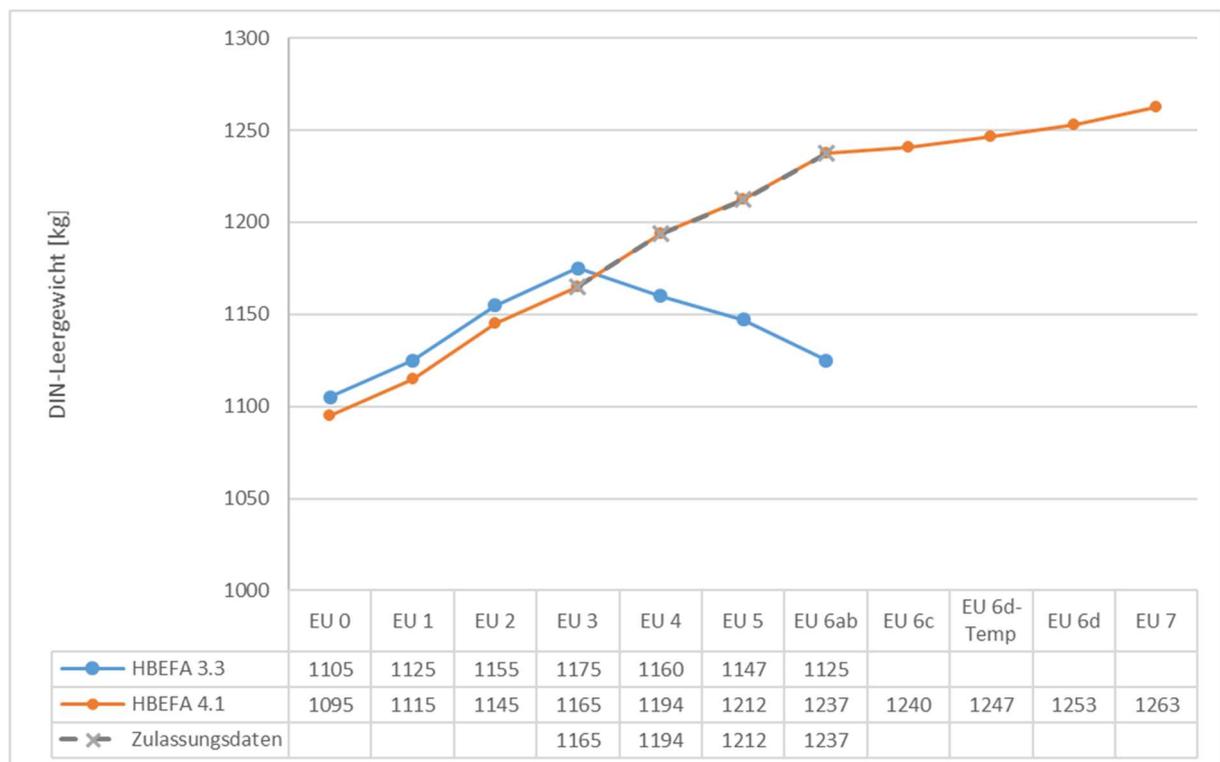


Abbildung 4-22: Herleitung des DIN-Leergewichtes je Euro-Klasse für Otto-PKW

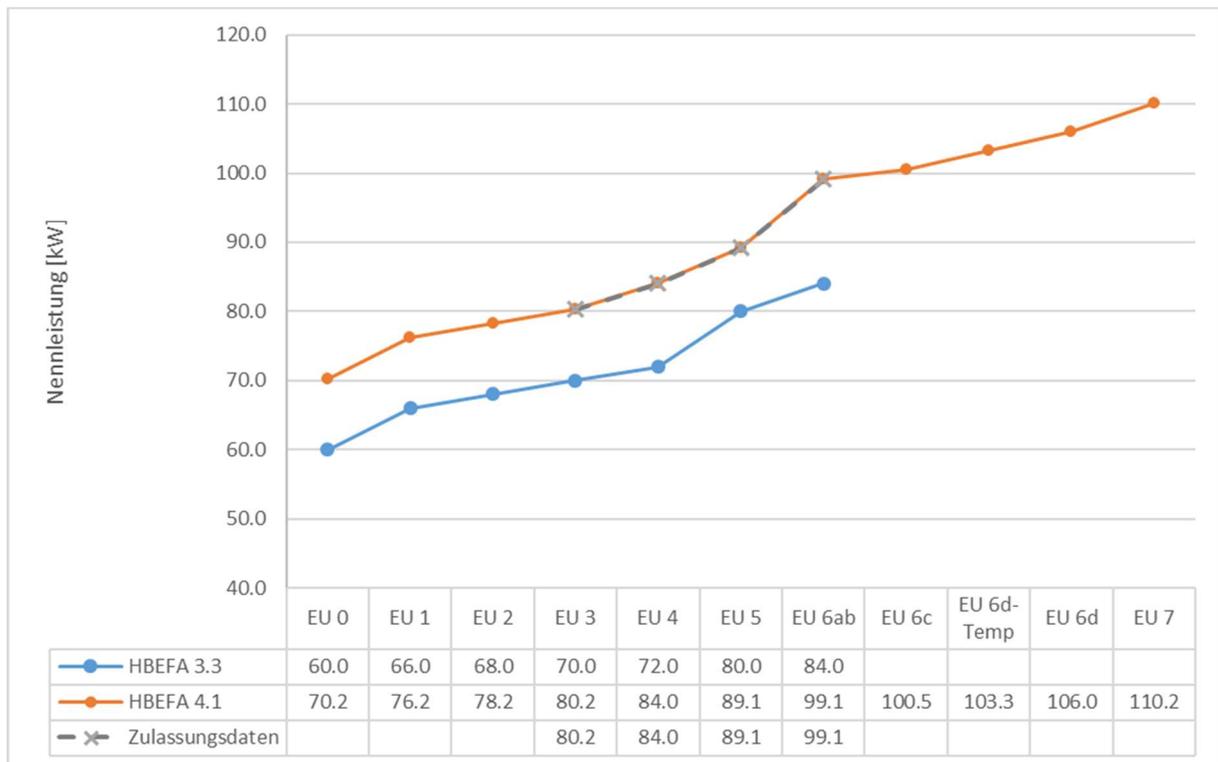


Abbildung 4-23: Herleitung der Nennleistung je Euro-Klasse für Otto-PKW

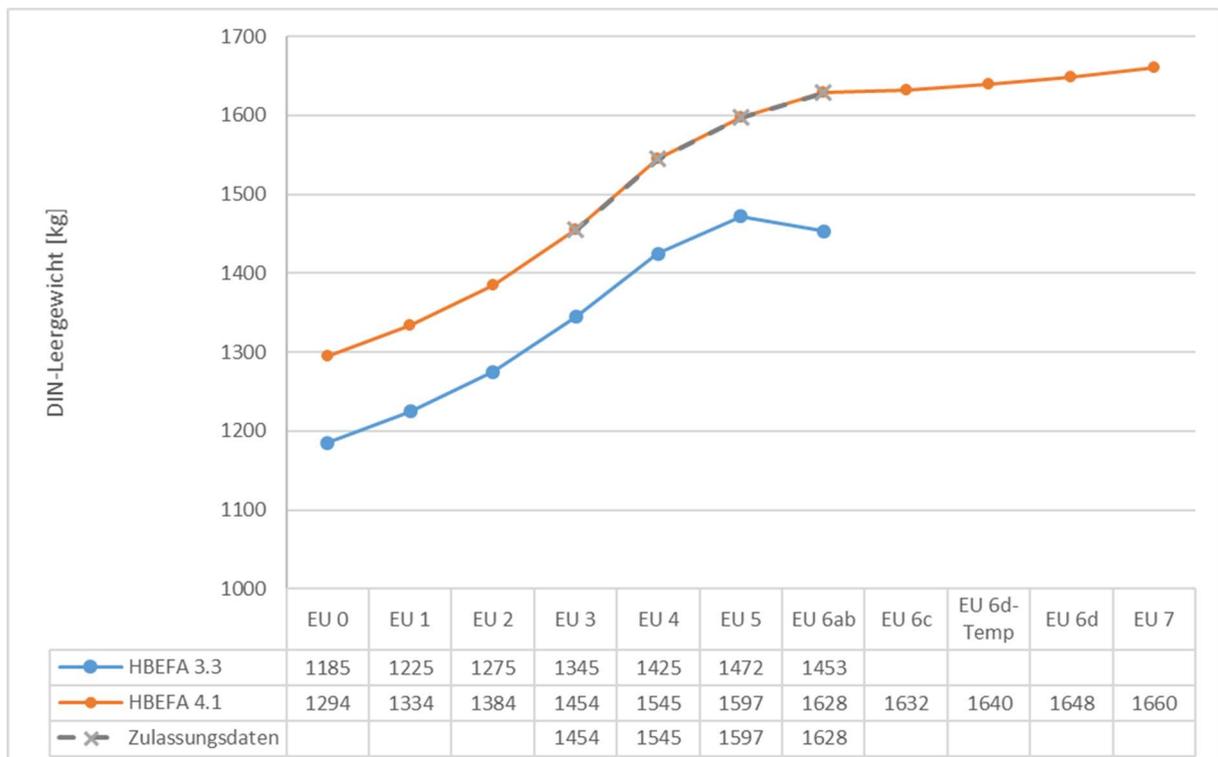


Abbildung 4-24: Herleitung des DIN-Leergewichtes je Euro-Klasse für Diesel-PKW

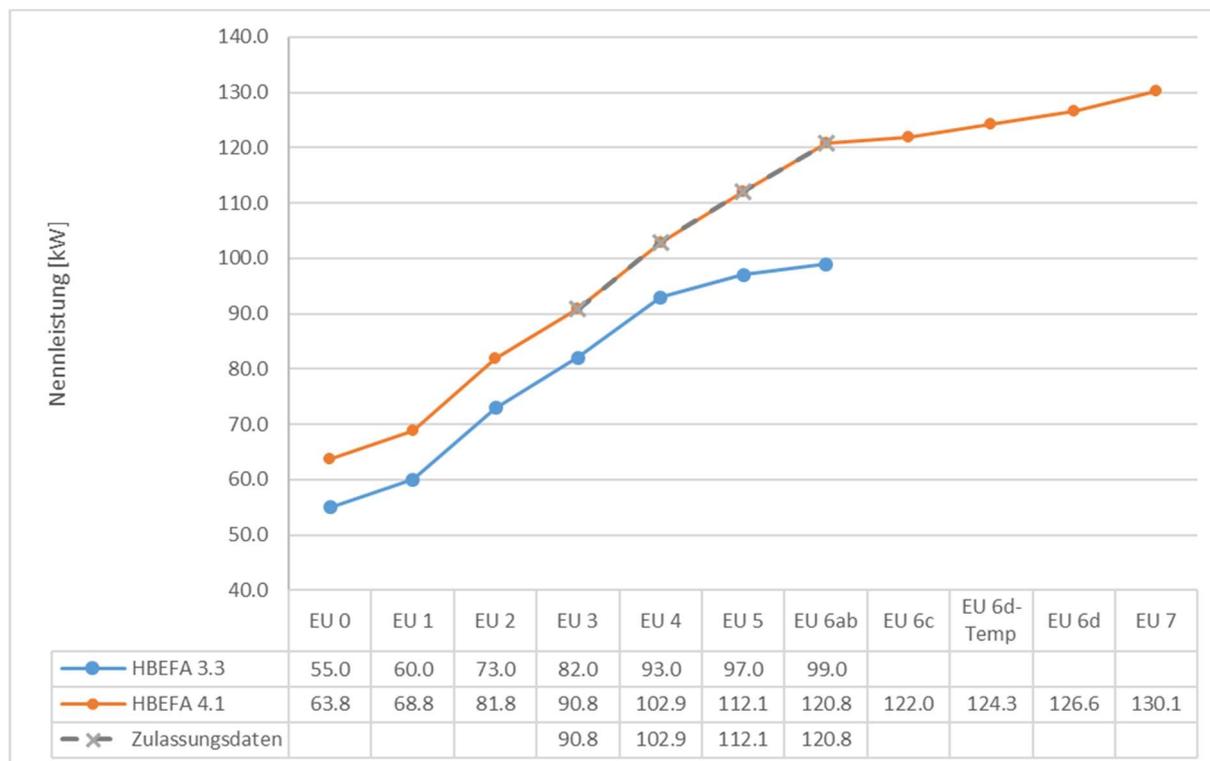


Abbildung 4-25: Herleitung der Nennleistung je Euro-Klasse für Diesel-PKW

#### 4.4.2 Bestimmung der Fahrwiderstände

Die Herleitung der Fahrwiderstände erfolgte auf Basis eines VW Golf mit Ottomotor. Der Golf entspricht einem C-Segment Fahrzeug, was wiederum einen Mittelklassewagen entspricht und für die Bestimmung der Fahrwiderstände somit repräsentativ ist.

Die Rollwiderstände wurden als Mix dreier Reifenlabels gebildet und sollen den WLTC-Mix (Mittelwert aus Low und High) darstellen. Der Anteil des jeweiligen Labels wurde abgeschätzt, da keine Statistik der verwendeten Reifen in Europa zur Verfügung stand. Die Fahrwiderstände der einzelnen Reifenlabels sowie die Anteile für den Reifenmix sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Diese wurden von [38] entnommen.

Tabelle 4-8: Rollwiderstände der Reifenlabels

	$Fr_0$	$Fr_1$	Anteil
	[-]	[s/m]	[%]
Label „E“	0,0081	0,0000603	20 %
Label „C“	0,006966	0,000051858	50 %
Label „B“	0,005913	0,000044019	30 %

Diese Werte wurden noch wie folgt korrigiert, um die Verluste zwischen Rad und Getriebe ebenfalls miteinzubeziehen. Weitere Verluste im Getriebe sowie zwischen Getriebe und Motor sind bereits in PHEM berücksichtigt,

- Erhöhung Rollwiderstand Radlager bis Getriebe  $Fr_0$ : 30 %
- Erhöhung Rollwiderstand Radlager bis Getriebe  $Fr_1$ : 30 %

Die 30 %-Erhöhung beruhen auf Messwerten vom IVT.

Die daraus resultierenden Fahrwiderstände sind in Tabelle 4-9 aufgelistet.

Tabelle 4-9: Fahrwiderstände mit Reifenmix

$Fr_0$	$Fr_1$
[-]	[s/m]
0,00893997	6,65531E-05

Aus Datenblättern der Website „alle-autos-in.de“ wurden die Werte für  $C_w$  und  $A$  für den VW Golf recherchiert, welche dem WLTC-Mix für dieses Fahrzeug entsprechen. ([15], [14])

Tabelle 4-10: Fahrwiderstände Default Golf-Segment Euro 6ab

$Fr_0$	$Fr_1$	$C_w$	$A$
[-]	[s/m]	[-]	[m <sup>2</sup> ]
0,00893997	6,65531E-05	0,304124861	2,34

Zur Überprüfung der hergeleiteten Fahrwiderstände wurden diese mit den gemessenen WLTC-Fahrwiderständen (ebenfalls Mittelwert aus Low und High) des vermessenen Euro 6b-Fahrzeuges verglichen. Die Fahrwiderstandspolynome sind in Abbildung 4-26 dargestellt. Die Fahrwiderstände zwischen den 2 Fahrzeugen sind plausibel, insbesondere, wenn man auch bedenkt, dass das Euro 6b-Fahrzeug schwerer ist und größere Abmessungen als der VW Golf hat.

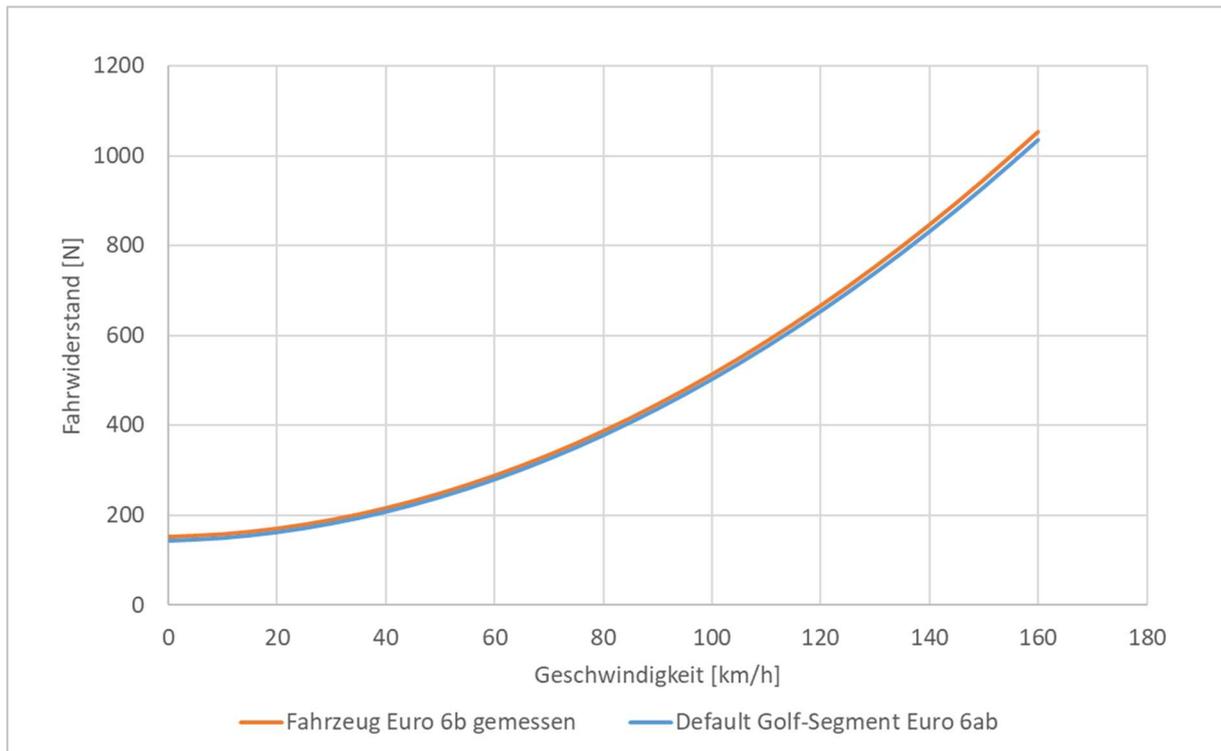


Abbildung 4-26: Vergleich der Fahrwiderstandspolynome vermessenes Euro 6b-Fahrzeug und Default Golf-Segment Euro 6ab

Um nun  $C_w$  und  $A$  der anderen Euro-Klassen ermitteln zu können, wurde das Verhältnis der Luftwiderstände von Euro 0 bis Euro 6ab von HBEFA 3.3 übernommen. Das Verhältnis der Luftwiderstände der Klassen ab Euro 6ab wurde als zeitliche Weiterentwicklung von Euro 6ab abgeleitet. Dabei wurde Euro 7 gebildet, indem das Verhältnis von Euro6ab/Euro5 auf Euro 6ab aufgeschlagen wurde (Verbesserung je ganzer Euro-Klasse). Mit den repräsentativen Jahren 2016 für Euro 6ab und 2025 für Euro 7 wurden die Euro-Klassen dazwischen mittels der repräsentativen Jahre interpoliert.

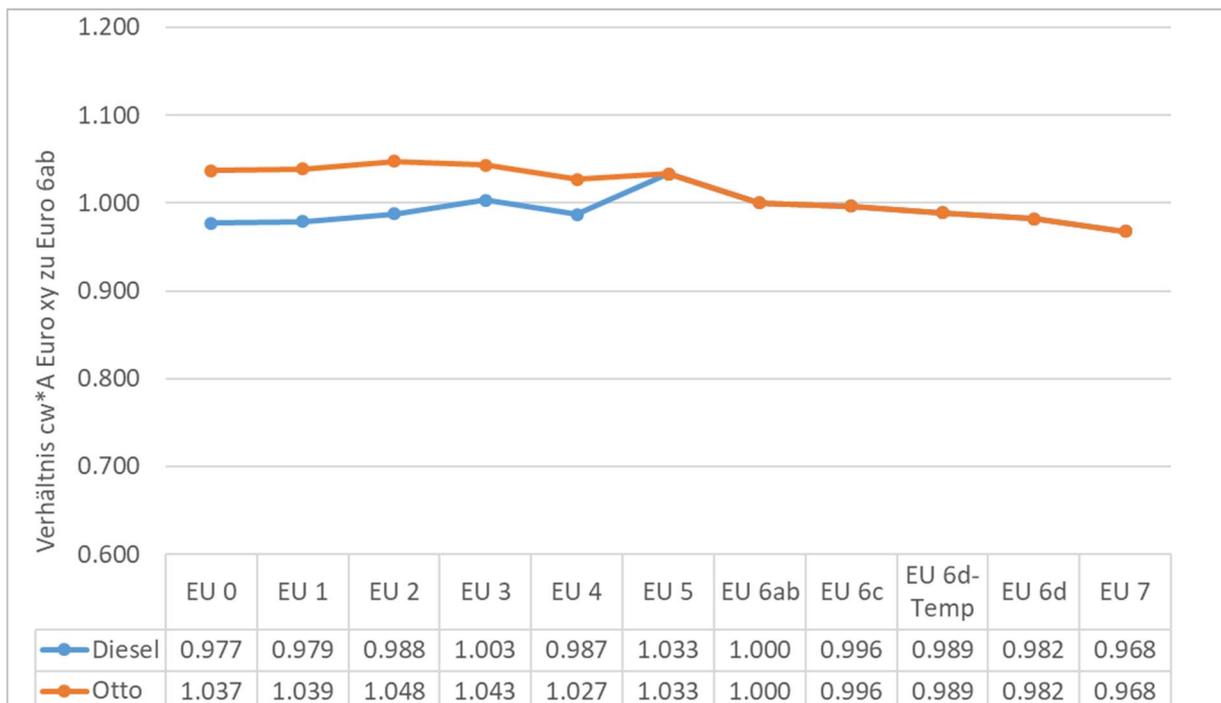


Abbildung 4-27: Verhältnis des Luftwiderstandes von Euro xy zu Euro 6ab

Die Fahrwiderstände für die HBEFA-Durchschnittsfahrzeuge wurden von den WLTC-Mix-Daten des VW Golf Otto Euro 6ab abgeleitet. Die Ableitung erfolgte anhand der Aufschläge, die in Kapitel 4.2.4.2 bestimmt wurden. Die Fläche für Diesel-Fahrzeuge wurde aus dem Verhältnis von  $C_w \cdot A$  von Diesel/Otto mit 1,06 berechnet. Da das Verhältnis die Produkte von  $C_w$  und  $A$  vergleicht, wurde  $C_w$  bei Otto und Diesel gleich gelassen und die Fläche anhand des Verhältnisses erhöht.

Damit ergeben sich für das durchschnittliche Euro 6ab-Fahrzeug für Otto und Diesel folgende Fahrwiderstände:

Tabelle 4-11: HBEFA-Fahrwiderstände der Euro 6ab Durchschnittsfahrzeuge Otto und Diesel

	$Fr_0$	$Fr_1$	$C_w$	A
	[-]	[s/m]	[-]	[m <sup>2</sup> ]
Otto	0,009510429	7,07999E-05	0,330070057	2,34
Diesel	0,009985951	7,43399E-05	0,330070057	2,48

Bei der Ableitung aller anderen Euro-Klassen wurde für Euro 0 bis Euro 5 die Fläche von HBEFA 3.3 übernommen bzw. ab Euro 6ab als konstant angenommen. Der  $C_w$ -Wert der übrigen Euro-Klassen wurde über das Verhältnis von  $C_w \cdot A$  von Euro xy/Euro 6ab aus Abbildung 4-27 bestimmt. Die Fahrwiderstandsbeiwerte  $Fr_0$  und  $Fr_1$  wurden als konstant über alle Euro-Klassen definiert, da man davon ausgeht, dass sowohl an neuen als auch an alten Fahrzeugen aktuelle Reifenmodelle montiert sind.

#### 4.4.3 Bestimmung weiterer Fahrzeugdaten

Fahrzeugdaten, die zusätzlich zu bestimmen waren, sind nachfolgend aufgelistet. Folgende Daten wurden, wie in Kapitel 4.2.4.2 beschrieben, für die Durchschnittsfahrzeuge hergeleitet:

- Beladung
- Motor- und Getriebeträgheit
- Äquivalente Rädermasse
- Nebenverbraucherleistung

Des Weiteren wurden auch Fahrzeugdaten von HBEFA 3.3 übernommen, da diesbezüglich die neuen Daten die gleichen Ergebnisse lieferten. Dazu zählen:

- Leerlauf- und Nenndrehzahl
- Effektiver Raddurchmesser
- Getriebeübersetzungen von Euro 0 bis Euro 5 für Otto-PKW
- Getriebeübersetzungen von Euro 0 bis Euro 6ab für Diesel-PKW. Ab Euro 6ab wurden die Übersetzungen von Euro 6ab verwendet.

Für folgende Daten wurde ein repräsentatives Fahrzeug als Basis herangezogen:

- Getriebeübersetzungen, Nenn- und Leerlaufdrehzahl sowie effektiver Raddurchmesser ab Otto Euro 6ab: Für Euro 6ab wurden die Getriebeübersetzungen von einem segmentähnlichen Fahrzeug übernommen, da ab dieser Euro-Klasse das durchschnittliche Otto-Fahrzeug für HBEFA 4.1 mit 6 Gängen statt der ursprünglichen 5 Gänge ausgestattet wurde. Die Getriebeübersetzungen wurden von einem Opel Astra mit einer Nennleistung von 92 kW und einer DIN-Leermasse von 1260 kg übernommen. Dies entspricht in etwa dem Euro 6ab Otto-Durchschnittsfahrzeug. Für Euro 6ab aufwärts wurden die Getriebeübersetzungen von Euro 6ab übernommen.

Da das Start-Stopp-System einen Unterschied an den Emissionen eines Fahrzeugs ausmachen kann, musste auch dies bei den Durchschnittsfahrzeugen berücksichtigt werden. Die Theorie zur Simulation des Start-Stopp-Systems im Durchschnittsfahrzeug wurde in Kapitel 4.1.2.1 beschrieben.

Die Start-Stopp-Anteile der Euro-Klassen wurden abgeschätzt und sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4-12: Start-Stopp-Emissionen der Euro-Klassen für Diesel- sowie Otto-PKW

Euro-Klasse	Zeitanteil laufender Motor bei Kfz-Stillstand [-]
Euro 0-4	Kein Start-Stopp
Euro 5	0,65
Euro 6ab	0,475
Euro 6c	0,446
Euro 6d-Temp	0,388
Euro 6d	0,329
Euro 7	0,213

In Tabelle 0-9 bis Tabelle 0-12 sind die Fahrzeugparameter aller Euro-Klassen für Otto und Diesel zusammengefasst.

#### 4.4.4 CO<sub>2</sub>-Kennfelderstellung für alle Euroklassen

Bisherige CO<sub>2</sub>-Kennfelder wurden in allen HBEFA-Versionen von Rollenprüfstandsmessungen abgeleitet. Aufgrund der Zeitzuordnungsprobleme zwischen Verbrauch und Motorleistung hatten die Isolinien im Verbrauchskennfeld teilweise unplausible Verläufe. Mit diesen Erkenntnissen und den neu verfügbaren Daten, wurden die CO<sub>2</sub>-Kennfelder für HBEFA 4.1 aller Euroklassen neu aufbereitet. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

1. Ausgangsbasis waren kalibrierte Euro 6ab-Kennfeld für den Diesel- sowie Ottomotor. Diese Kennfelder wurden von Messungen am Motorprüfstand abgeleitet. Somit ist die Zuordnung zwischen Verbrauch und Motorleistung korrekt. Wie bereits erwähnt, wurden diese Kennfelder in vorangegangenen Projekten [37], [39] erstellt. Da von den anderen Euroklassen großteils keine Prüfstandsmessungen vorlagen, war Euro 6ab die erwähnte Ausgangsbasis.
2. Ermittlung der Verhältnisfaktoren zwischen den Euroklassen mit den Kennfeldern von HEBFA 3.3. Dies wurde durchgeführt, indem man den realitätsnahen Zyklus CADC mit dem selben Fahrzeug simulierte. Die Simulationsergebnisse konnten dann ins Verhältnis gesetzt werden. In den HBEFA 3.3 CO<sub>2</sub>-Kennfeldern lag zwar eine ungenaue Zuordnung vor, geht man allerdings davon aus, dass diese über die Euroklassen gleich ist, so ist das berechnete Verhältnis korrekt und kann verwendet werden. Abbildung 4-28 zeigt die berechneten Verhältnisse, bezogen auf Euro 6ab.

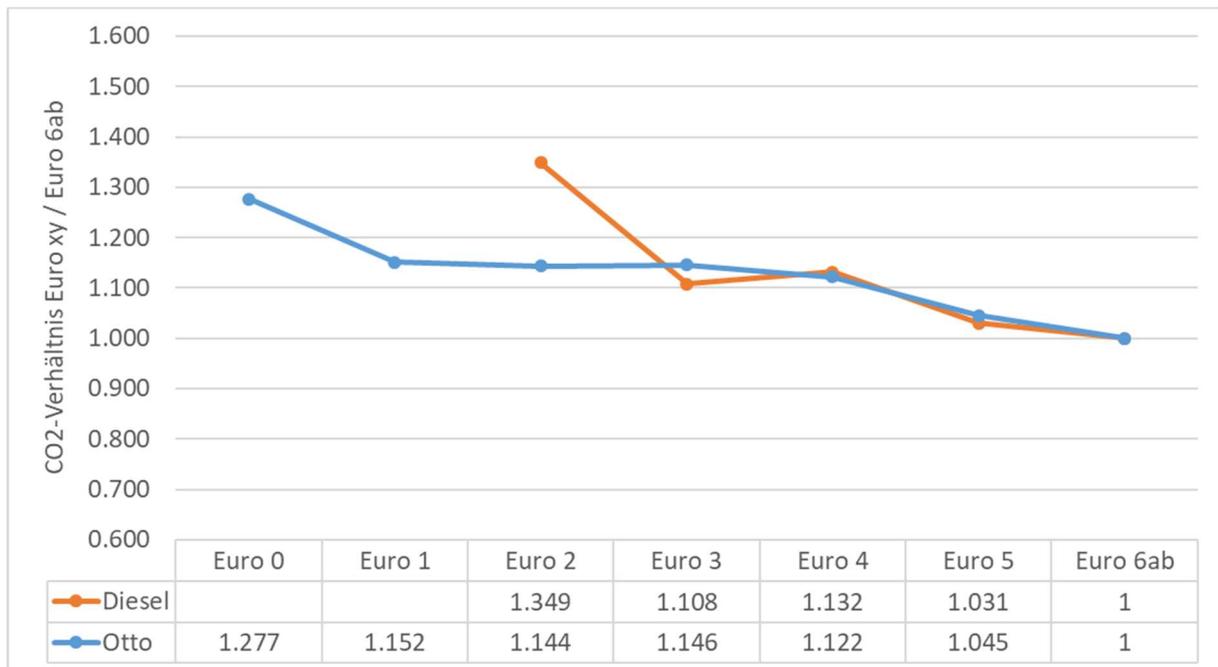


Abbildung 4-28: Verhältnis der HBEFA 3.3 CO<sub>2</sub>-Kennfelder von Euro 0 bis Euro 6ab

Der Abbildung 4-28 kann man entnehmen, dass die Verhältnisse für Diesel von Euro 0 und Euro 1 fehlen. Das hat den Grund, weil Euro 0 und Euro 1 sowie teilweise Euro 2 noch ein anderes Brennraumkonzept hatten. Das damals verwendete Wirbelkammerkonzept hatte einen merklich anderen Kennfeldverlauf, weshalb nicht von einem Euro 6ab Kennfeld auf das Euro 0 und Euro 1 Kennfeld geschlossen werden kann.

3. Aufbereiten der CO<sub>2</sub>-Kennfelder für Wirbelkammermotoren. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde im Jahr 1992 am IVT ein Wirbelkammermotor am Motorprüfstand vermessen [3]. Dieser ist der Euroklasse 1 zuzuordnen. Für Euro 0 wurde das CO<sub>2</sub>-Kennfeld von Euro 1 um 5 % verschlechtert. Da teilweise auch noch in Euro 2 Diesel-PKW Wirbelkammermotoren verwendet wurden, wurde das Euro 2 CO<sub>2</sub>-Kennfeld aus 50 % Euro 1 Wirbelkammermotor mit 5 % Verbesserung sowie 50 % Euro 2 Kennfeld aus Euro 6ab Ableitung zusammengewichtet.
4. Da für die Euroklassen von Euro 6ab aufwärts noch keine Messdaten verfügbar waren, mussten diese Kennfelder mit Erfahrungswerte der Verbrauchsentwicklung der letzten Jahre abgeschätzt werden. So wurde angenommen, dass von Euro 6ab bis Euro 6d Otto-Motoren im Schnitt eine jährliche Verbesserung von 1 % erhalten. Bei Diesel-Fahrzeugen wurde dieser Wert auf 0,8 % gesetzt. Von Euro 6d bis Euro 7 wurde für beide Motorarten eine jährliche Verbesserung von 0,5 %-Punkten prognostiziert. Mit den repräsentativen Jahren der Euro-Klassen wurden daraufhin die Verhältnisse der CO<sub>2</sub>-Kennfelder zu Euro 6ab berechnet.

Tabelle 4-13: Faktoren zur Ableitung der CO<sub>2</sub>-Kennfelder ab Euro 6ab

Euro-Klasse	Repräsentatives Jahr	CO <sub>2</sub> -Verhältnis Otto	CO <sub>2</sub> -Verhältnis Diesel
[-]	[-]	[-]	[-]
Euro 6ab	2016	1	1
Euro 6c	2017	0,99	0,992
Euro 6d-Temp	2019	0,97	0,976
Euro 6d	2021	0,95	0,96
Euro 7	2025	0,93	0,94

## 4.5 CO<sub>2</sub>-Simulation aller Euroklassen und Vergleich mit Spritmonitor

Mit den bisherigen Schritten waren nun alle Inputdaten für die HBEFA-Simulation bekannt. In den folgenden Schritten wurde die CO<sub>2</sub>-Simulation durchgeführt:

1. Aufbau einer Vergleichsbasis für HBEFA-Simulation. Die CO<sub>2</sub>-Kennfelder der einzelnen Euro-Klassen mussten mit den Daten vom Spritmonitor kalibriert werden. Dazu wurden die jährlichen Abweichungen des Realverbrauchs zum NEDC-Typprüfwert (in %, siehe Abbildung 4-18) und die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der NEDC-Typprüfung (in g/km, siehe Abbildung 4-17) auf die Euro-Klassen übertragen. Dies wurde in Kombination mit den Anteilen der Euro-Klassen an den jährlichen Neuzulassungen (siehe Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20) durchgeführt. Daraus wurden die Zielwerte (Spritmonitor-Abweichung sowie NEDC-Typprüfwert zur Berechnung der HBEFA-Abweichung) für Euro 3 bis Euro 6ab erstellt.
2. Simulation der HBEFA-Zyklen und Gewichtung nach dem Deutschland-Mix für Euro 3 bis Euro 6ab. Als Eingabeparameter wurden jene verwendet, wie sie in Kapitel 4.4 erstellt wurden. Die gewichteten simulierten Werte wurden mit den Spritmonitor-Daten verglichen.
3. Vergleich mit Spritmonitor und Kalibrierung. Nach der Simulation wurde der Deutschland-Mix der HBEFA-Simulation mit dem Spritmonitor verglichen. Durch Unsicherheiten in den Annahmen der Fahrzeugeinstellungen sowie im CO<sub>2</sub>-Kennfeld, lagen geringe Abweichungen zwischen Simulation und Spritmonitor vor. Daher entschied man sich, die Abweichungen durch Kalibrierung des Modells zu verringern. Da die große Unsicherheit in den CO<sub>2</sub>-Kennfeldern steckte, wurden diese wie folgt angepasst, um die Spritmonitor-Werte zu treffen:
  - Otto: Verbesserung um 3 %
  - Diesel: Verschlechterung um 4 %

Die CO<sub>2</sub>-Verhältnisse von Euro 3 bis Euro 6 für HBEFA 4.1, die in Abbildung 4-28 dargestellt sind, beziehen sich jeweils auf das kalibrierte Euro 6ab Kennfeld und wurden ebenfalls leicht angepasst, um den jeweiligen Zielwert der Euroklasse besser zu treffen. Bei der Simulation wurden die Default-Vollastkurven aus HBEFA 3.3 übernommen.

Für Euro 0 bis Euro 2 der Otto-Fahrzeuge lagen keine Daten vor und so wurden die Verhältnisse um den gleichen Wert verändert wie Euro 3 (siehe Abbildung 4-29 für Otto-Fahrzeuge und Abbildung 4-30 für Diesel-Fahrzeuge).

Eine Zusammenfassung der Verhältnisse zur Ableitung der CO<sub>2</sub>-Kennfelder aller Euro-Klassen aus Euro 6ab ist in Abbildung 4-29 für Otto-Fahrzeuge und in Abbildung 4-30 für Diesel-Fahrzeuge dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Kennfelder aus HBEFA 3.3 den Realverbrauch relativ gut dargestellt haben.

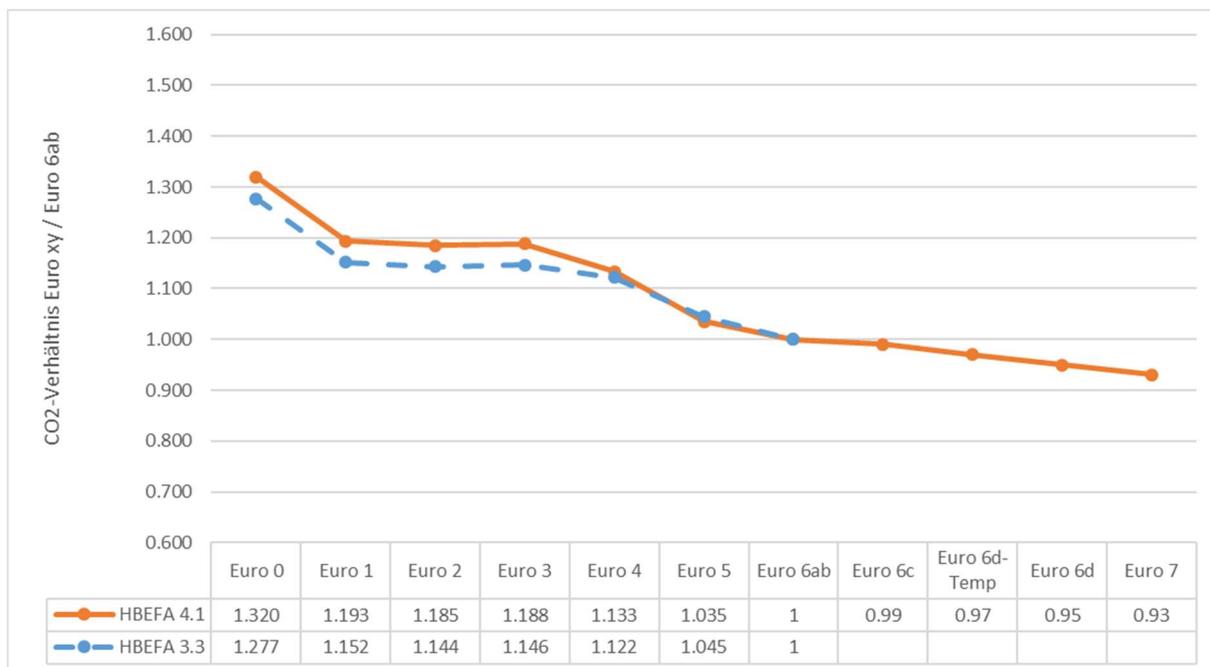


Abbildung 4-29: Verhältnis der HBEFA-CO<sub>2</sub>-Kennfelder aller Euro-Klassen für Ottokennfelder in dem normierten CADC Lastprofil (siehe Kap. 4.4.4)

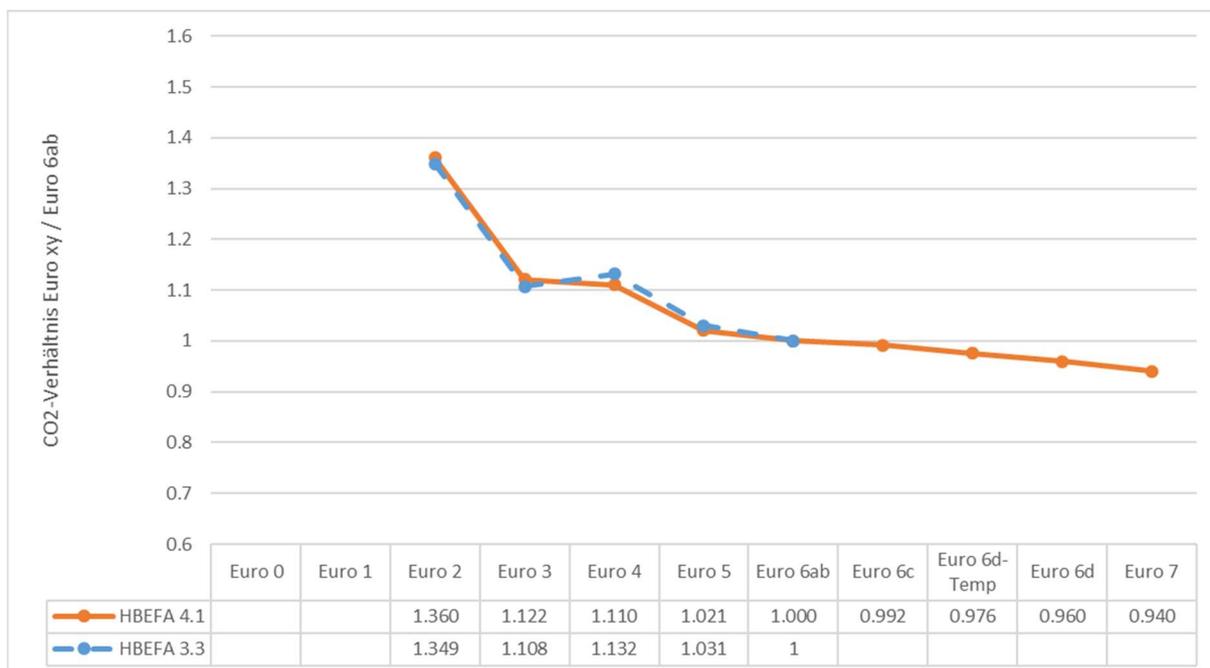


Abbildung 4-30: Verhältnis der HBEFA-CO<sub>2</sub>-Kennfelder aller Euro-Klassen für Dieselkennfelder in dem normierten CADC Lastprofil (siehe Kap. 4.4.4)

Die CO<sub>2</sub>-Simulationsergebnisse von Euro 3 bis Euro 6ab sind zusammen mit den Spritmonitorwerten in Abbildung 4-31 für Otto-Fahrzeuge und in Abbildung 4-32 für Diesel-Fahrzeuge dargestellt. Es sei jedoch anzumerken, dass diese Abweichungen jeweils die deutsche Flotte widerspiegeln. Mit einer maximalen Differenz von 1,1 %-Punkten sind die Kennfelder sowie die Fahrzeugdaten ausreichend gut aufbereitet.

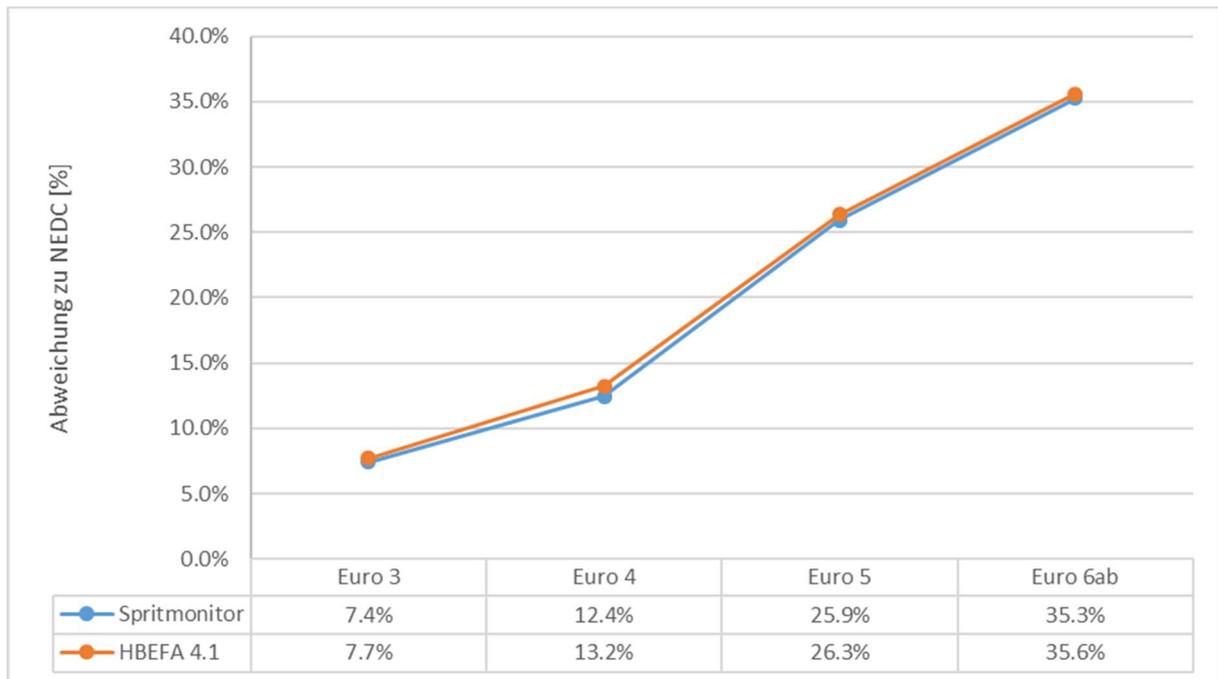


Abbildung 4-31: Abweichungen von Spritmonitor und HBEFA-Simulation zu NEDC-Typrüfwert für Otto-Fahrzeuge

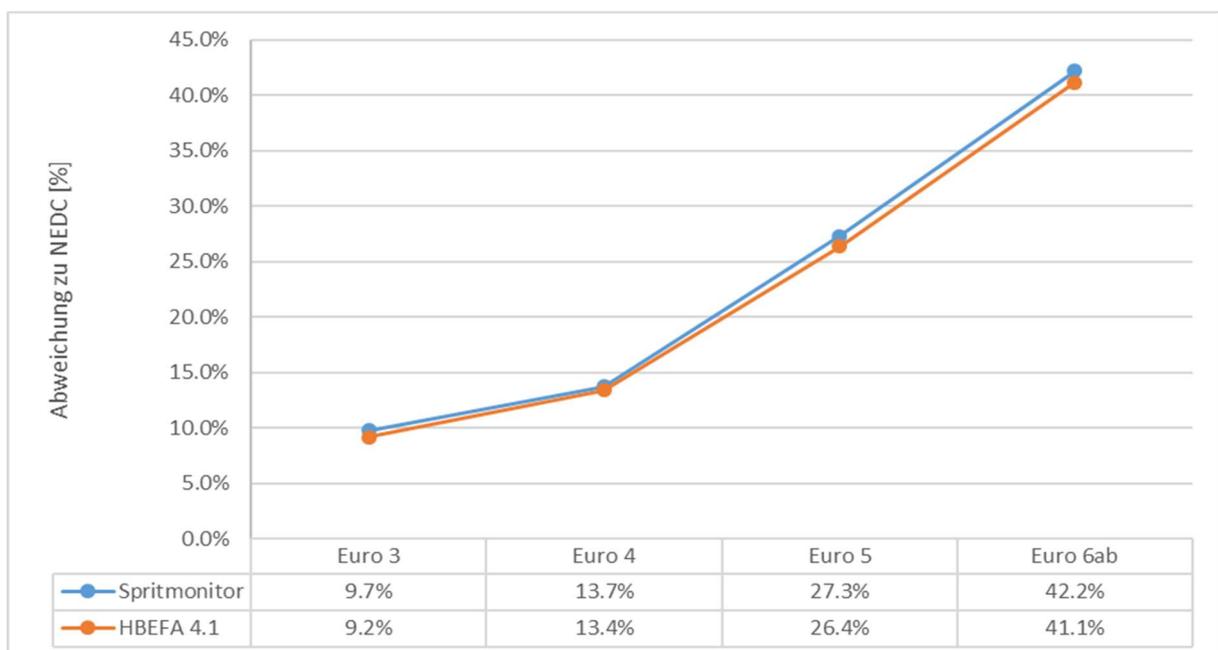


Abbildung 4-32: Abweichungen von Spritmonitor und HBEFA-Simulation zu NEDC-Typrüfwert für Diesel-Fahrzeuge

In Abbildung 4-33 sind abschließend die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Euro-Klassen dargestellt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Kennfelder sowie Fahrzeugdaten dabei auf den Durchschnittswert der deutschen Flotte abgestimmt sind. Bei der Verwendung der Kennfelder für einen anderen Länderdurchschnitt müssten diese mit einem CO<sub>2</sub>-Monitoring-Dienst des jeweiligen Landes kalibriert werden. Da das HBEFA 4.1 europaweit genutzt werden soll, werden HBEFA-intern die simulierten CO<sub>2</sub>-Werte der HBEFA-Zyklen durch Vorgabe länderspezifischer CO<sub>2</sub>-Monitoring-Werte für die anderen Länder entsprechend umgerechnet.

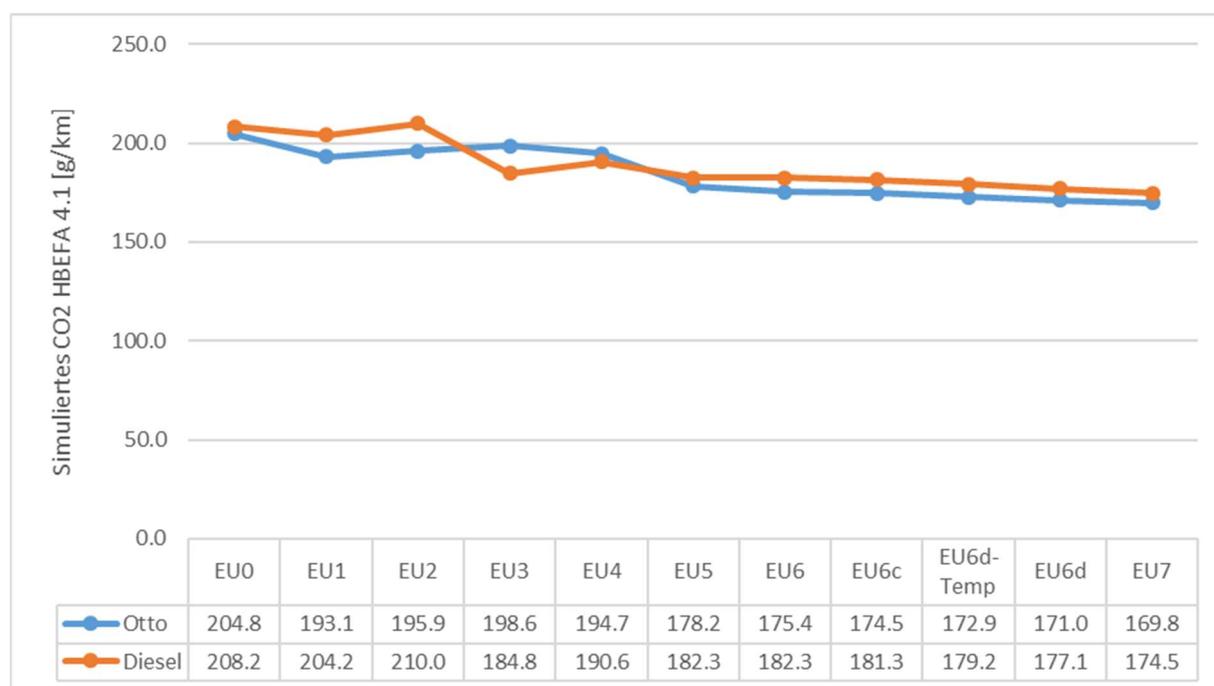


Abbildung 4-33: CO<sub>2</sub>-Emissionen aller Euro-Klassen von HBEFA 4.1 im gewichteten Deutschland-Mix

## 4.6 Erstellung Schadstoffkennfelder für Euro 6ab Otto-PKW

Der letzte Schritt in dieser Arbeit war die Erstellung des durchschnittlichen Schadstoffkennfeldes für Euro 6ab Otto-Fahrzeuge für HBEFA 4.1. Für die Erstellung eines Emissionskennfeldes, welches das europäische Durchschnittsfahrzeug repräsentativ darstellen soll, ist eine große Anzahl an Messungen nötig. Da eine so große Anzahl an Messungen von einer Institution nicht durchführbar ist, haben mehrere Forschungspartner Messdaten zur Verfügung gestellt. Beteiligt haben sich folgende Institutionen:

- Dekra – Deutsche Prüfgesellschaft
- EMPA – Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Schweiz
- JRC\_Vela2 – Gemeinsame Europäische Forschungsstelle
- TueVN-SE – TÜV Nord für Schwedische Fahrzeuge
- IVT TU Graz

In Tabelle 4-14 ist die Anzahl der gemessenen Euro 6ab Otto-Fahrzeuge aufgelistet. Eine detaillierte Auflistung der gemessenen Fahrzeuge ist im Anhang in Tabelle 0-6 und Tabelle 0-7 zu finden.

Tabelle 4-14: Gemessene Euro 6ab Otto-Fahrzeuge

Institution	Anzahl der vermessenen Fahrzeuge		Summe
	Rollenprüfstand	RDE-Messung	
Dekra	15	0	15
EMPA	6	1	7
JRC_Vela2	0	2	2
TueVN-SE	18	0	18
IVT TU Graz	1	0	1
<b>Summe</b>	<b>40</b>	<b>3</b>	<b>43</b>

Die Erstellung des durchschnittlichen Emissionskennfeldes erfolgte durch die Gewichtung der einzelnen Kennfelder der gemessenen Fahrzeuge nach den jeweiligen Neuzulassungen. Diese Zulassungszahlen wurden von Website der EEA – European Environment Agency entnommen. [19]

#### 4.6.1 Erstellung der Einzelkennfelder der vermessenen Fahrzeuge

Wie bereits erwähnt, wird für die Erstellung eines repräsentativen Durchschnittskennfeldes eine Vielzahl an Messungen benötigt. Die Kennfelderstellung selbst erfolgte mit PHEM nach der CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode, wie sie in Kapitel 4.1.3 beschrieben ist. Da bei der Einzelkennfelderstellung für jedes Fahrzeug eigene Eingabedaten erstellt werden müssen, stellte sich die Frage, ob dazu für jedes Fahrzeug die Vollast- und Schleppkurve recherchiert werden sollte. Da sich aber herausstellte, dass die Vollastkurven einzelner vorweg untersuchter Fahrzeuge ähnlich waren, entschloss man sich, auf die Euro 6ab-Vollastkurve von HBEFA 3.3 zurückzugreifen, die schon eine mittlere Vollastkurve von EU6ab-Fahrzeugen repräsentierte. Für die CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode wurden folgende Daten benötigt:

- Nennleistung
- Nenn- und Leerlaufdrehzahl
- Motorträgheit

Die Motorträgheit kann, wie bereits in Kapitel 4.1.2.1 beschrieben, aus der Nennleistung berechnet werden. Daher mussten nur noch Leistung und die Drehzahlen der Einzelfahrzeuge ermittelt werden. Falls keine Daten dazu eruiert werden konnten, wurden diese wie folgt bestimmt:

- Nennleistung auf 99,99 kW
- Nenndrehzahl auf 4999 1/min
- Leerlaufdrehzahl als Mittelwert aller Messdaten, in denen die Geschwindigkeit kleiner als 0,1 km/h und die Drehzahl zwischen 10 und 1500 1/min war. Wenn dabei keine Werte bestimmbar waren, wurde die Leerlaufdrehzahl auf 800 1/min gesetzt.

Des Weiteren wurden folgende Kontrollen der Messdaten durchgeführt:

- Ausschließliche Verwendung von Zyklen mit Umgebungstemperatur zwischen 15 °C und 30 °C
- Entfernung der Kaltstartphase (ersten 300 Sekunden), um keine Durchmischung im Emissionskennfeld von Emissionen bei betriebswarmem mit kaltem Motor zu haben.
- Kontrolle und bei Bedarf Korrektur der Zeitverschiebung zwischen Emissionen und Motorleistung über Beschleunigungsleistung
- Kontrolle und bei Bedarf Korrektur von extremen Ausreißern bei der Messung
- Kontrolle und bei Bedarf Korrektur von Ausfällen bzw. „eingefrorenen“ Messdaten

Wenn mit einem Fahrzeug RDE- und Rollenmessungen durchgeführt wurden, so wurden für RDE- und Rollenmessungen separate Kennfelder erstellt und diese dann mit einem 50:50-Mix gemittelt. Einzige Ausnahme dabei war PN. Aufgrund der großen (zulässigen) Messtoleranzen der PN-PEMS Messgeräte wurden ausnahmslos PN-Messwerte der Rollenmessungen herangezogen.

Die erstellten Einzelkennfelder wurden anschließend anhand der Leistungspunkte einer Kombination von CADC und Ermes im Kennfeld kontrolliert. Dazu wurde mit jedem Einzelkennfeld die Emissionen anhand des Leistungsanteils der jeweiligen Kennfeldstützstelle an der Gesamtleistung berechnet. Die prozentuelle Verteilung der Kombination von CADC und Ermes für den Kennfeld-Check ist in Abbildung 4-34 dargestellt.

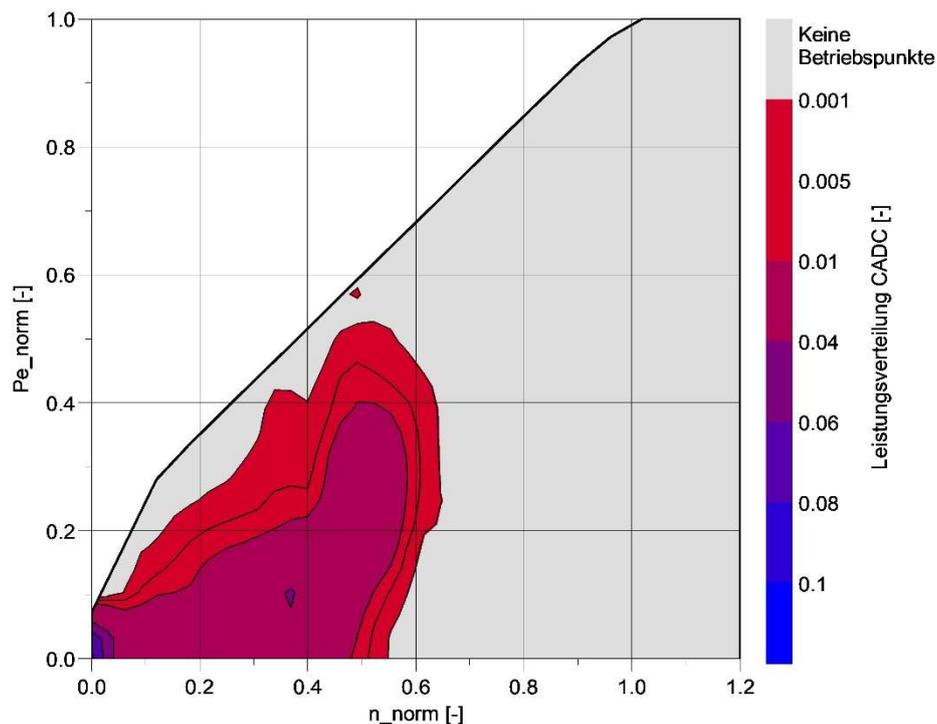


Abbildung 4-34: Leistungsverteilung der Kombination von CADC und Ermes im Kennfeld  
 Durch den Check konnten etwaige Fehler bei der Kennfelderstellung oder falsche Einheitenangaben ohne viel Aufwand auffindig gemacht und korrigiert werden.

#### 4.6.2 Erstellung des Durchschnittskennfeldes für Euro 6ab

Nach der Überprüfung der Einzelkennfelder wurden diese zu einem Durchschnittskennfeld zusammengewichtet. Zunächst wurde jedoch recherchiert, welche Fahrzeuge, die vermessen wurden, Direkteinspritzer und welche Fahrzeuge Saugrohreinspritzer waren. Auf Basis dessen wurde ein Durchschnittskennfeld für Direkteinspritzer und ein Durchschnittskennfeld für Saugrohreinspritzer erstellt. Wie bereits erwähnt, wurden die Zulassungszahlen von der Website der EEA ([19]) für die Jahre 2013 bis 2017 entnommen. Die Zulassungszahlen können außerdem dem Anhang (Tabelle 0-8) entnommen werden. Wenn ein Fahrzeug mehrfach vermessen wurde, so wurden die Zulassungszahlen für die betroffenen Kennfelder entsprechend aufgeteilt. Die 2 dadurch entstandenen Kennfelder für Direkteinspritzer und Saugrohreinspritzer wurden mit der Gewichtung 50:50 [30] zum Euro 6ab-Otto-Durchschnittskennfeld gemittelt.

Da bei den vorhandenen Messungen keine Partikelmasse gemessen wurde, wurde diese mit Hilfe des HBEFA 3.3 Euro 6ab-Otto-Emissionskennfeldes bestimmt. Dort wurde für jede Stützstelle das Verhältnis von Partikelmasse [g/h] zu Partikelanzahl [#h] bestimmt. Da in HBEFA 4.1 die Partikelanzahl vorhanden war, wurde mit dem aus HBEFA 3.3 erhaltenem Korrekturfaktor in [g/#] für jede Stützstelle die Partikelmasse für HBEFA 4.1 Euro 6ab-Otto berechnet.

### 4.6.3 Emissionsfaktoren von HBEFA 4.1 und HBEFA 3.3 im Vergleich

In den folgenden Abbildungen sind die Emissionsfaktoren des Euro 6ab-Kennfeldes von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 als Vergleich dargestellt. Zusätzlich wurde ein RWC-Zyklus, der von einer RDE-Fahrt in und rund um Graz abgeleitet wurde, simuliert und in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Damit das Simulationsergebnis des RWC vergleichbar ist, wurde dieser ebenfalls mit dem Euro 6ab HBEFA 4.1-Durchschnittsfahrzeug gerechnet. Wie ersichtlich ist, sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Gegensatz zum HBEFA 3.3 angestiegen, liegen aber im RWC mit 41 mg/km im Bereich von HBEFA 4.1.

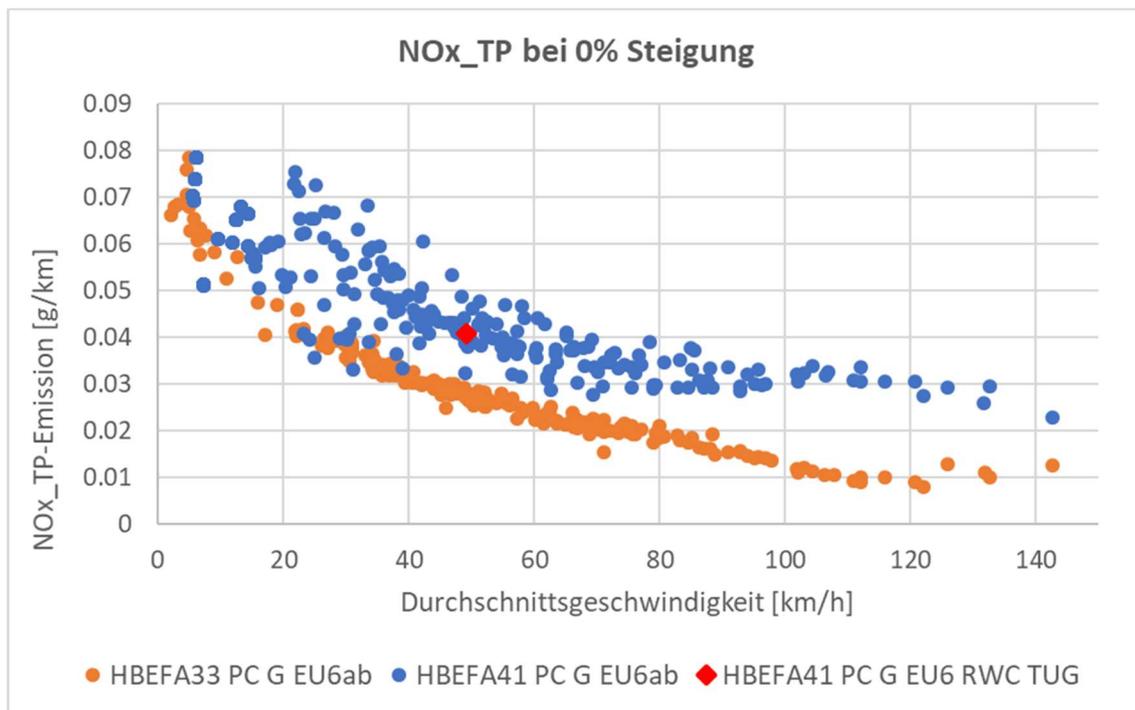


Abbildung 4-35:  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich

Die CO-Emissionen (siehe Abbildung 4-36) sind von HBEFA 3.3 auf HBEFA 4.1 weitgehend gleich geblieben. Die CO-Emissionen des RWC liegen mit 0,74 g/km über dem Emissionsniveau von HBEFA 4.1 und HBEFA 3.3.

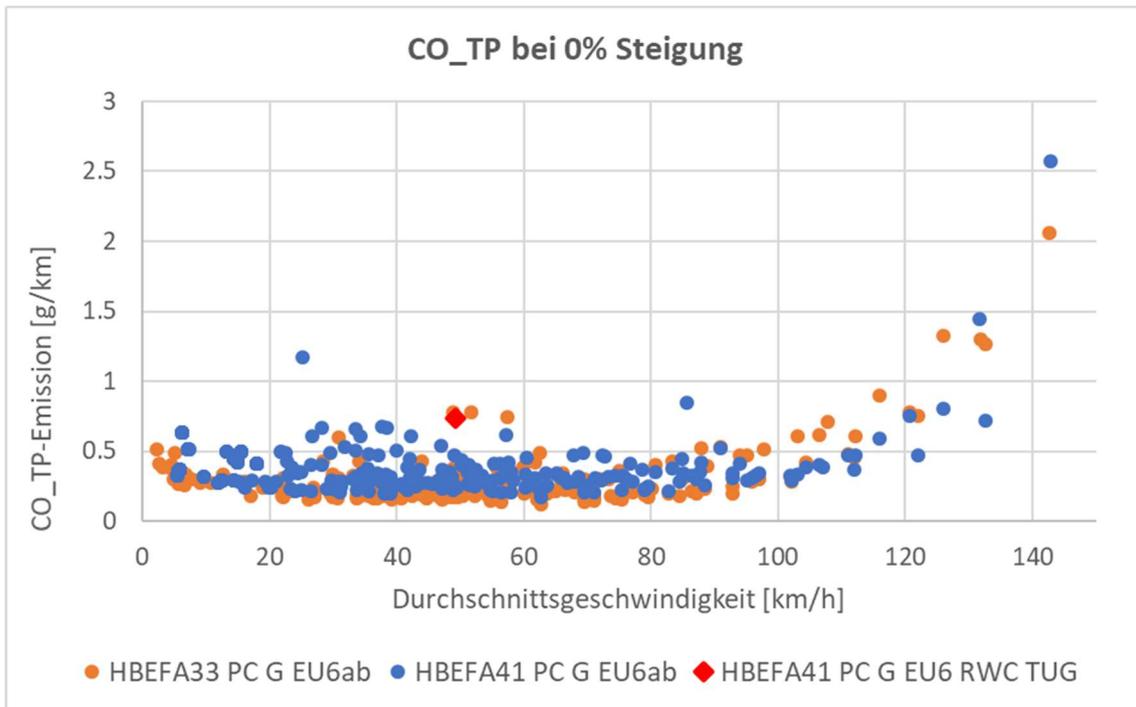


Abbildung 4-36: CO-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich

Wie aus Abbildung 4-37 ersichtlich ist, sind die HC-Emissionen gegenüber HBEFA 3.3 etwas gesunken. Die HC-Emissionen des RWC liegen mit 8 mg/km über dem Emissionsniveau von HBEFA 3.3.

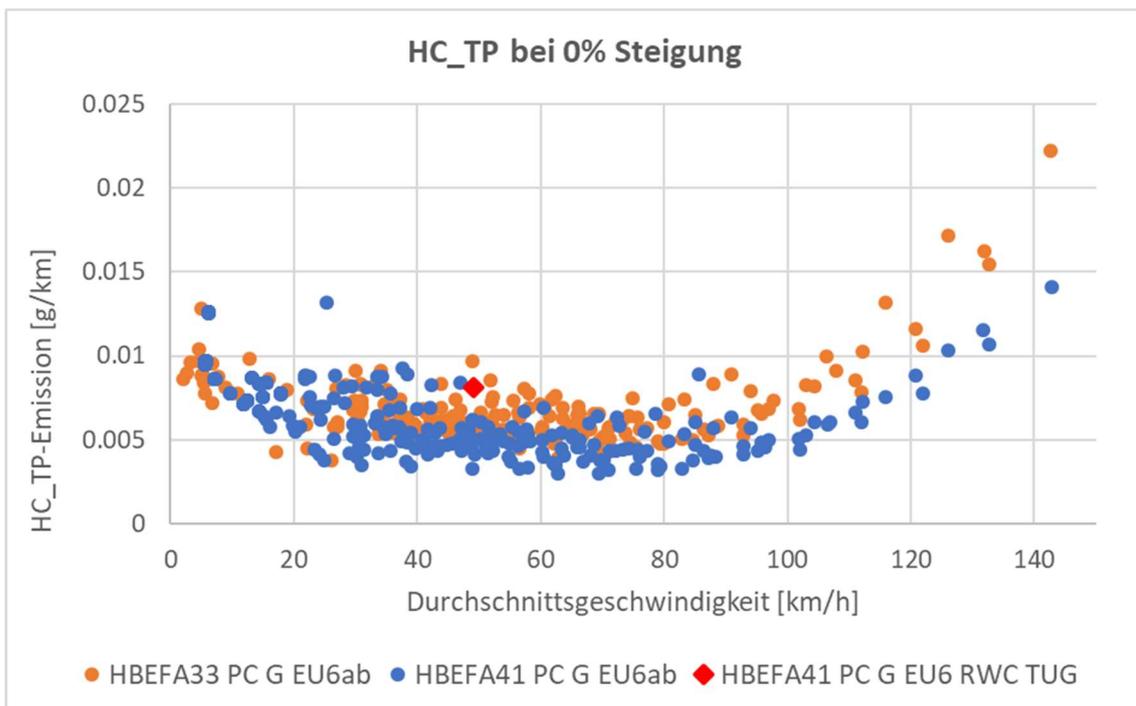


Abbildung 4-37: HC-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich

Die PM-Emissionen (siehe Abbildung 4-38) liegen bei HBEFA 4.1 unter HBEFA 3.3. Die PN-Emissionen des RWC liegen mit 1,2 mg/km zwischen dem Emissionsniveau von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1.

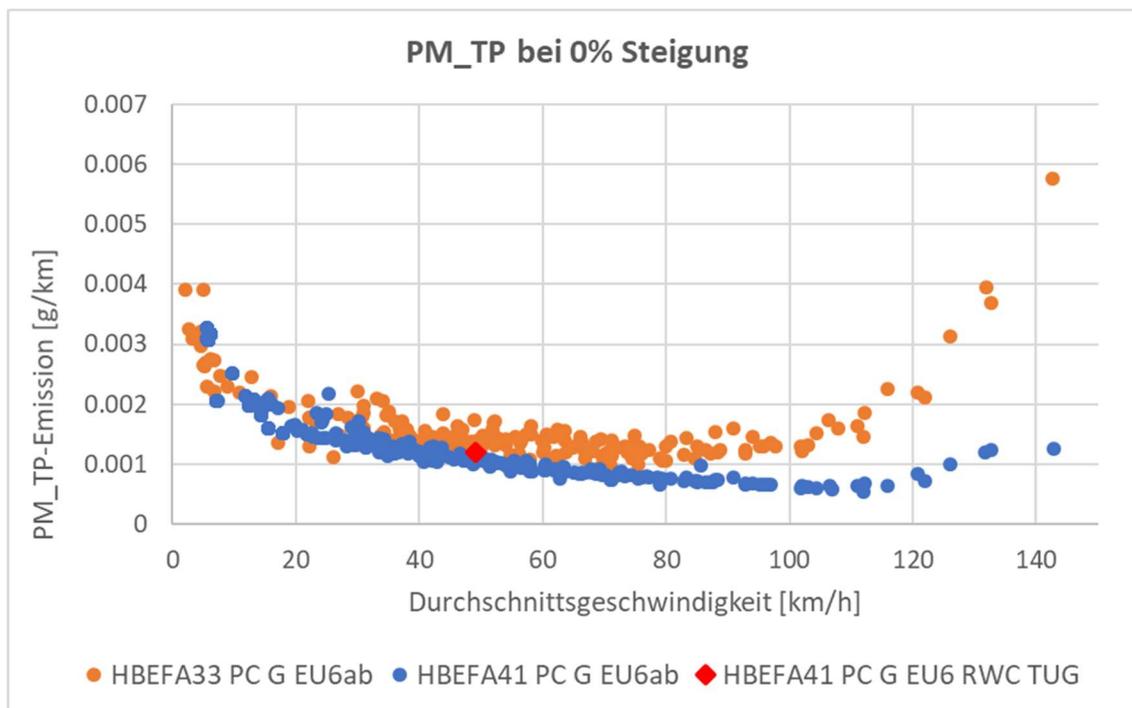


Abbildung 4-38: PM-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich

Die PN-Emissionen sind in Abbildung 4-39 dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, sind diese von HBEFA 3.3 auf HBEFA 4.1 vor allem bei höheren Geschwindigkeiten gesunken. Die PN-Emissionen vom RWC Zyklus liegen zwischen dem Emissionsniveau von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1.

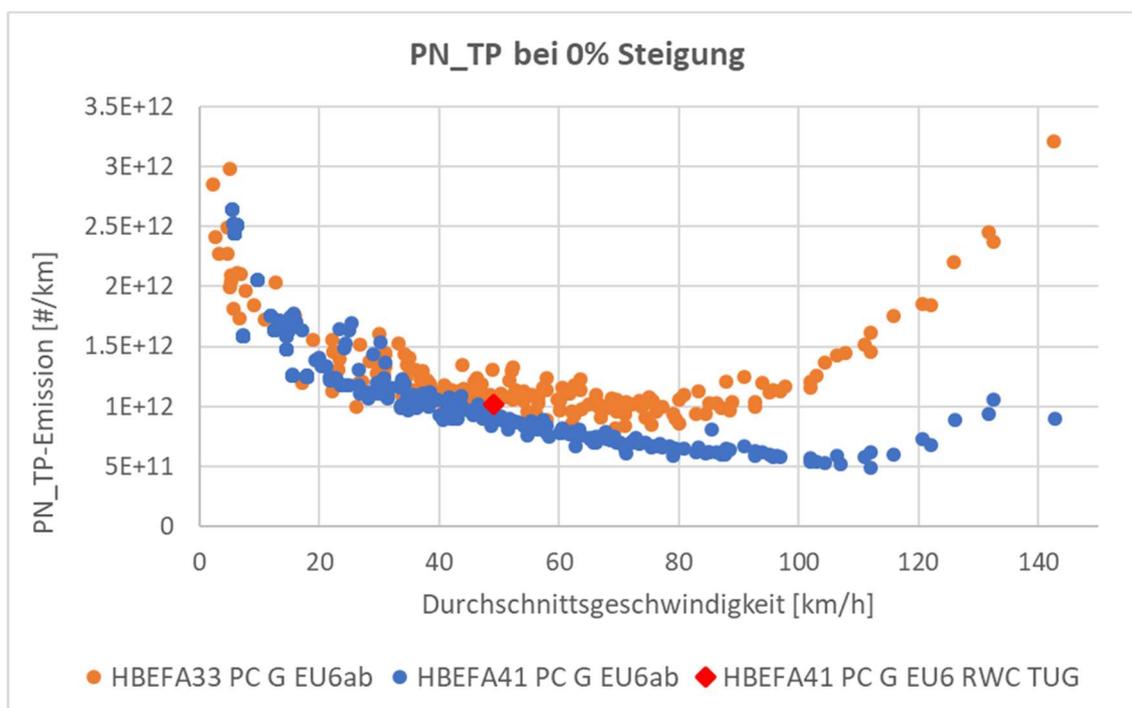


Abbildung 4-39: PN-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 auf HBEFA 4.1 für NO<sub>x</sub>, PM und PN geändert haben. Begründet wird das durch:

- Das neue Euro 6ab Durchschnittskennfeld, das gegenüber HBEFA 3.3 aus einer Vielzahl an Messungen erstellt wurde
- Das neue Durchschnittsfahrzeug
- Die neuen HBEFA 4.1 Zyklen, die dynamischer als jene vom HBEFA 3.3 sind

An dieser Stelle sei noch wichtig zu erwähnen, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Durchschnittskennfeld auf den Mix der Deutschen Flotte kalibriert wurden, während die Schadstoffemissionen im Durchschnittskennfeld den Europäischen Durchschnitt darstellen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden, wie bereits erwähnt, länderspezifisch im HBEFA 4.1 umgerechnet.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit Hilfe des kennfeldbasierten Simulationsprogramms PHEM lassen sich CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen plausibel darstellen. Durch die Struktur von PHEM können Prognosen- und Variantenrechnungen in kurzer Zeit durchgeführt werden. Dafür sind aber auch Messdaten als Simulationsinput notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Fahrzeuge vermessen:

- Euro 6b Otto-Fahrzeug auf der Straße mittels PEMS
- Euro 6d-Temp Otto-Fahrzeug am Prüfstand sowie auf der Straße mittels PEMS

Das Euro 6b Fahrzeug zeigte keine Auffälligkeiten hinsichtlich der Emissionen. Das vermessene Euro 6d-Temp Fahrzeug liegt bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen im WLTC knapp über den Grenzwerten und bei einigen RDE-Messungen über dem NTE-Limit. Bei den überschreitenden NO<sub>x</sub>-Emissionen der RDE-Messungen handelt es sich allerdings noch nicht um die nach dem RDE-Gesetz vorgeschriebenen und gewichteten NO<sub>x</sub>-Emissionen. Durch das Gewichten könnten die NO<sub>x</sub>-Werte noch unter dem NTE-Limit fallen. Eine Gewichtung war aber nicht Bestandteil dieser Arbeit. Des Weiteren ist aufgefallen, dass die PN-Emissionen des 6d-Temp Fahrzeugs im WLTC teilweise über dem Grenzwert lagen, allerdings handelte es sich hier auch um ein Neufahrzeug mit 300 km. Fahrzeuge für die Typisierung müssen Laufleistungen zwischen 3000 und 15000 km haben.

Die Voruntersuchung für die HBEFA-CO<sub>2</sub>-Simulation hat ergeben, dass mit einer gegebenen Datenbasis der reale Durchschnittsverbrauch bzw. die CO<sub>2</sub>-Emission eines Fahrzeugs plausibel simuliert werden kann. Auch die Simulation von NEDC und WLTC liefern mit den entsprechenden Fahrzeugsettings gute Ergebnisse. Als Neuerungen für die Simulation von Emissionsfaktoren, wurden dabei unter anderem die anteiligen Einflüsse von nasser Fahrbahn, Seitenwind und Dachaufbauten und Anhängern berücksichtigt.

Für die CO<sub>2</sub>-Simulation mussten auch Durchschnittsfahrzeuge für alle Euro-Klassen für Diesel- und Otto-Fahrzeuge erstellt werden. Diese Durchschnittsfahrzeuge sollen repräsentativ für die deutsche Fahrzeugflotte sein.

Mit den ebenfalls erstellten CO<sub>2</sub>-Kennfeldern wurden für Diesel- und Otto-Fahrzeuge aller Euro-Klassen die CO<sub>2</sub>-Emissionen mit den HBEFA-Zyklen simuliert. Die Simulationsergebnisse der HBEFA-Zyklen wurden nach deren Anteilen für Deutschland gewichtet und mit dem Spritmonitor verglichen. Auf [Spritmonitor.de](http://Spritmonitor.de) können Benutzer deren Verbrauch für das jeweilige Fahrzeugmodell eintragen. Mit einer großen Anzahl an Einträgen kann somit von adäquaten Spritverbräuchen bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgegangen werden. Ein Vergleich von Simulation mit den Spritmonitor-Werten zeigte eine gute Übereinstimmung.

Bestandteil dieser Arbeit war auch die Erstellung des Euro 6ab-Schadstoffkennfelds für Otto-Fahrzeuge. Mit einer großen Anzahl an vermessenen Fahrzeugen konnten fahrzeugspezifische Kennfelder erstellt werden. Diese wurden nach den Neuzulassungen der vermessenen Fahrzeuge zu einem Durchschnittskennfeld zusammengewichtet. Mit dem CO<sub>2</sub>- sowie Schadstoffdurchschnittskennfeld können mit dem Euro 6ab Otto-Durchschnittsfahrzeug repräsentative Emissionen simuliert werden. Diese werden für HBEFA 4.1 herangezogen.

Da die Erstellung des Schadstoffkennfelds für Euro 6ab Otto im Rahmen dieser Arbeit gut funktioniert hat, kann im Zuge weiterer Arbeiten die Kennfelderstellung aller anderen Euroklassen für Otto- und Diesel-Fahrzeug analog zu dieser Arbeit erfolgen. Daten der bereits für die CO<sub>2</sub>-Simulation erstellten Durchschnittsfahrzeuge können von dieser Arbeit übernommen werden. Ebenfalls können von dieser Arbeit auch die Messdaten des Euro 6d-Temp Fahrzeugs für das Euro 6d-Temp Schadstoffkennfeld übernommen werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] AVL List GmbH, AVL Gas PEMS und AVL Gas PEMS IX Product Guide, 2016.
- [2] DELPHI\_WorldwideEmissionsStandard\_2018\_2019.pdf
- [3] Dworschak J., Erweiterung und praktische Anwendung eines Motorprozeß-Rechenprogrammes für Wirbelkamer-Dieselmotoren, Technische Universität Graz, 1992
- [4] ECE/TRANS/180/Add.15, Mai 2014
- [5] ECE/TRANS/WP.29/2017/140, 2016
- [6] Eichlseder, H.: Kolbenmaschinen. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2014
- [7] Eichlseder, H.: Thermodynamik. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
- [8] Hainisch T., Messung und Simulation von PKW Real World Emissionen bei einem Euro 6 Dieselfahrzeug, Technische Universität Graz, 2017.
- [9] Hausberger S., Blassnegger J.: Rollenprüfstand PKW und LNF, Technische Universität Graz, 31.07.2018
- [10] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I, Technische Universität Graz, 2015
- [11] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I, Technische Universität Graz, 2018
- [12] Hausberger, S.; Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil III: SCR. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2012
- [13] <http://www.umweltbundesamt.at/en/hbefa> 26.11.2018 17:40 Uhr
- [14] [https://alle-autos-in.de/bmw/bmw\\_x1\\_sdrive18i\\_ktb5408.shtml](https://alle-autos-in.de/bmw/bmw_x1_sdrive18i_ktb5408.shtml), 28.08.2018, 12:00
- [15] [https://alle-autos-in.de/volkswagen/volkswagen\\_golf\\_variant\\_14\\_tsi\\_ktb4144.shtml](https://alle-autos-in.de/volkswagen/volkswagen_golf_variant_14_tsi_ktb4144.shtml)  
28.08.2018, 12:00
- [16] <https://gis.stmk.gv.at/atlas> 03.12.2018, 18:57 Uhr
- [17] [https://maplorer.com/view\\_gpx.html](https://maplorer.com/view_gpx.html) 20.11.2018 15:00 Uhr
- [18] <https://maps.google.com/> 15.11.2018 17:00 Uhr
- [19] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-14>, 29.08.2018, 13:00 Uhr
- [20] <https://www.iav.com/automotion-magazine/automotion-02-2017/der-ottopartikelfilter-kommt> 21.11.2018 10:35 Uhr

- [21] <https://www.spritmonitor.de/> 05.12.2018, 13:00 Uhr
- [22] IVT, ERMES-Tool; Documentation of evaluation algorithms, Technische Universität Graz, 2016.
- [23] Keller, M.: HBEFA Version 3.3 Background Documentation, Bern, 2017
- [24] Klell, M.: Höhere Thermodynamik. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
- [25] Matzer, C., Weller, K.: PHEM Training, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 2016
- [26] Merker, P., Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren. 7.Auflage, Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-03194-7, 2014
- [27] Politschnig N., Analyse des realen Emissionsverhaltens von EU6d PKW, Technische Universität Graz, 2019
- [28] Reif, K.: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren. Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-09521-5, 2015
- [29] Sams, T.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil I, Technische Universität Graz, 2010
- [30] Spicher, Ulrich: Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung. Deutschland, Springer Vieweg 2017
- [31] Technische Daten BMW X1 sDrive18i, Datenblatt, BMW, 2015
- [32] UN/ECE/R101, 2007
- [33] Vorlesung\_Schadstoffminderung\_Hausb\_2015.ppt
- [34] Wimmer, A.: Laborübung Motor und Umwelt, Skriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [35] [www.dieseln.net/tech/cat\\_doc.php](http://www.dieseln.net/tech/cat_doc.php) 20.11.2018 14:00 Uhr
- [36] Zallinger M., Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen, Technische Universität Graz, 2010.
- [37] N. Hill, E. Windisch, S. Hausberger, C. Matzer, I. Skinner, Improving understanding of technology and costs for CO<sub>2</sub> reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves CLIMA.C.2/FRA/2012/0006; Ricardo AEA, UK, 2015
- [38] Verordnung Nr. 1222/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, 2009
- [39] HBEFA update considering new measured data of Euro 6 petrol passenger cars, C. Matzer, M. Opetnik, S. Hausberger, Graz, 14.03.2018

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Zusammensetzung des Rohabgases von Ottomotoren ([6] S.156) .....	2
Abbildung 2-2 Aufbau eines Abgaskatalysators [9] .....	5
Abbildung 2-3: Umsatz von NO <sub>x</sub> mittels SCR-Verfahren ([12] S.3) .....	8
Abbildung 2-4: Prozesskette des SCR-Verfahrens für die mobile Anwendung ([12] S.4).....	9
Abbildung 2-5: Funktionsweise des Partikelfilters .....	10
Abbildung 2-6: Konvertierungsrate im geregelten Dreiwegekatalysator über $\lambda$ [9].....	12
Abbildung 2-7 Geschwindigkeitsverlauf von NEDC und WLTC .....	16
Abbildung 2-8: Funktionsschema PKW-Rollenprüfstand .....	19
Abbildung 2-9: Fahrwiderstände an einem KFZ [11].....	21
Abbildung 2-10: Geschwindigkeitsverlauf bei einem Ausrollversuch .....	22
Abbildung 2-11: Fahrwiderstandspolynom aus einem Ausrollversuch .....	22
Abbildung 2-12 Berechnungsschema für Emissions-Inventurmodelle [11] .....	26
Abbildung 2-13: Prinzip der Erstellung von Emissionsfaktoren .....	28
Abbildung 2-14: CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren für Steigung 0 % im Vergleich mit einem RWC- Zyklus.....	28
Abbildung 3-1: Aufbau des PEMS am Fahrzeug.....	31
Abbildung 3-2: Streckenverlauf der Ries-Route [17] .....	32
Abbildung 3-3: Geschwindigkeits- und Steigungsverlauf einer RDE-Fahrt auf der Ries-Route .....	33
Abbildung 3-4: CO <sub>2</sub> -Emissionen und Testmassen des Fahrzeugs Euro 6b im Vergleich .....	36
Abbildung 3-5: Strecke für den Ausrollversuch [18].....	39
Abbildung 3-6: Gemessenes CO <sub>2</sub> bei Rollenmessungen Peugeot 208 .....	41
Abbildung 3-7: Gemessenes NO <sub>x</sub> bei Rollenmessungen Peugeot 208 .....	42
Abbildung 3-8: Gemessenes PN bei Rollenmessungen Peugeot 208 .....	42
Abbildung 3-9: Gemessenes CO bei Rollenmessungen Peugeot 208.....	43
Abbildung 4-1 PHEM Funktionsprinzip .....	46
Abbildung 4-2: Normierte Volllast- und Schleppkurve eines Otto-Fahrzeuges .....	52
Abbildung 4-3: Einrasterung der Emissionen in das Motorkennfeld.....	53
Abbildung 4-4: Leistungsinterpolation aus einem CO <sub>2</sub> -Kennfeld .....	54
Abbildung 4-5: Vergleich von Messung und Simulation des WLTC der Voruntersuchung ...	60
Abbildung 4-6: Vergleich von NEDC-Typprüfwerten und NEDC-Simulation für Voruntersuchung .....	64
Abbildung 4-7: Geschwindigkeitstoleranzband im NEDC.....	65
Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsschranken des NEDC mit sparsamem Fahrstil.....	65
Abbildung 4-9: Vergleich von Typprüfwerten und NEDC-Simulation mit sparsamem Fahrstil für Voruntersuchung .....	66

Abbildung 4-10: RWC-Simulation der Voruntersuchung .....	67
Abbildung 4-11: Vergleich der Absolutwerte von HBEFA-Simulation mit Spritmonitor.de .	68
Abbildung 4-12: Mittelwerte der Absolutemissionen für Otto-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung .....	69
Abbildung 4-13: Mittelwerte der Abweichungen zum NEDC für Otto-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung .....	70
Abbildung 4-14: Mittelwerte der Absolutemissionen für Diesel-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung .....	71
Abbildung 4-15: Mittelwerte der Abweichungen zum NEDC für Diesel-PKW, Messung und Simulation der Voruntersuchung .....	71
Abbildung 4-16: Verlauf von Nennleistung und DIN-Leergewicht aller Neuzulassungen für Otto- und Diesel-Fahrzeuge in Deutschland .....	73
Abbildung 4-17: Jährlicher Verlauf der CO <sub>2</sub> -Emissionen im NEDC für Otto- und Diesel-Fahrzeuge in Deutschland, gewichtet nach Neuzulassungen.....	74
Abbildung 4-18: Zeitlicher Verlauf der Divergenz zwischen Real- und Typprüfwerten für Otto und Diesel.....	74
Abbildung 4-19: Jährlicher Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen für Otto-Fahrzeuge .....	75
Abbildung 4-20: Jährlicher Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen für Diesel-Fahrzeuge .....	75
Abbildung 4-21: Geschwindigkeitsverlauf eines gleichwertigen Autobahnzyklus von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 .....	76
Abbildung 4-22: Herleitung des DIN-Leergewichtes je Euro-Klasse für Otto-PKW .....	77
Abbildung 4-23: Herleitung der Nennleistung je Euro-Klasse für Otto-PKW .....	78
Abbildung 4-24: Herleitung des DIN-Leergewichtes je Euro-Klasse für Diesel-PKW .....	78
Abbildung 4-25: Herleitung der Nennleistung je Euro-Klasse für Diesel-PKW .....	79
Abbildung 4-26: Vergleich der Fahrwiderstandspolynome vermessen Euro 6b-Fahrzeug und Default Golf-Segment Euro 6ab.....	81
Abbildung 4-27: Verhältnis des Luftwiderstandes von Euro xy zu Euro 6ab .....	81
Abbildung 4-28: Verhältnis der HBEFA 3.3 CO <sub>2</sub> -Kennfelder von Euro 0 bis Euro 6ab .....	84
Abbildung 4-29: Verhältnis der HBEFA-CO <sub>2</sub> -Kennfelder aller Euro-Klassen für Ottokennfelder in dem normierten CADC Lastprofil (siehe Kap. 4.4.4).....	87
Abbildung 4-30: Verhältnis der HBEFA-CO <sub>2</sub> -Kennfelder aller Euro-Klassen für Dieselkennfelder in dem normierten CADC Lastprofil (siehe Kap. 4.4.4).....	87
Abbildung 4-31: Abweichungen von Spritmonitor und HBEFA-Simulation zu NEDC-Typprüfwert für Otto-Fahrzeuge .....	88
Abbildung 4-32: Abweichungen von Spritmonitor und HBEFA-Simulation zu NEDC-Typprüfwert für Diesel-Fahrzeuge.....	88
Abbildung 4-33: CO <sub>2</sub> -Emissionen aller Euro-Klassen von HBEFA 4.1 im gewichteten Deutschland-Mix .....	89
Abbildung 4-34: Leistungsverteilung der Kombination von CADC und Ermes im Kennfeld	92

- Abbildung 4-35: NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich.... 93
- Abbildung 4-36: CO-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich ..... 94
- Abbildung 4-37: HC-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich ..... 94
- Abbildung 4-38: PM-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich ..... 95
- Abbildung 4-39: PN-Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 und HBEFA 4.1 im Vergleich..... 95

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Verlauf der Abgasnormen von Euro 0 bis Euro 4 [2].....	13
Tabelle 2-2: Verlauf der Abgasnormen von Euro 5a bis Euro 6d [2] .....	14
Tabelle 2-3 Conformity Faktoren für RDE-Messungen [2].....	17
Tabelle 3-1: Daten Fahrzeug Euro 6b [31].....	30
Tabelle 3-2: $U_{\text{Gas}}$ -Faktoren.....	34
Tabelle 3-3: Tripparameter der RDE-Fahrten Fahrzeug Euro 6b .....	35
Tabelle 3-4: Auswertung der RDE-Messung Fahrzeug Euro 6b .....	35
Tabelle 3-5: Fahrzeugdaten Peugeot 208 .....	38
Tabelle 3-6: Fahrwiderstände aus Ausrollversuch Peugeot 208 .....	40
Tabelle 3-7: Messprogramm Rollenmessungen Peugeot 208 .....	40
Tabelle 3-8: Tripparameter der RDE-Fahrten Peugeot 208 .....	43
Tabelle 3-9: Auswertung der RDE-Messung Peugeot 208 .....	44
Tabelle 4-1: Eingabedaten in PHEM .....	47
Tabelle 4-2: Im Motorkennfeld enthaltene Größen.....	50
Tabelle 4-3: In Zyklen enthaltene Größen .....	53
Tabelle 4-4: Eckdaten der Otto-Fahrzeuge für die Voruntersuchung.....	56
Tabelle 4-5: Anzahl der Spritmonitor-Einträge der Modelle für Voruntersuchung [21].....	57
Tabelle 4-6: HBEFA-Korrekturfaktoren für Luft- und Rollwiderstände.....	63
Tabelle 4-7: Eckdaten der Diesel-Fahrzeuge für die Voruntersuchung.....	70
Tabelle 4-8: Rollwiderstände der Reifenlabels .....	79
Tabelle 4-9: Fahrwiderstände mit Reifenmix.....	80
Tabelle 4-10: Fahrwiderstände Default Golf-Segment Euro 6ab.....	80
Tabelle 4-11: HBEFA-Fahrwiderstände der Euro 6ab Durchschnittsfahrzeuge Otto und Diesel .....	82
Tabelle 4-12: Start-Stopp-Emissionen der Euro-Klassen für Diesel- sowie Otto-PKW .....	83
Tabelle 4-13: Faktoren zur Ableitung der CO <sub>2</sub> -Kennfelder ab Euro 6ab .....	85
Tabelle 4-14: Gemessene Euro 6ab Otto-Fahrzeuge.....	90
Tabelle 0-1: Auswertung der CVS-Messung Peugeot 208 .....	105
Tabelle 0-2: Auswertung der FTIR-Messung Peugeot 208 .....	105
Tabelle 0-3: Jährlicher Verlauf von CO <sub>2</sub> im NEDC-Typprüfwert, Spritmonitor-Abweichung zum NEDC, Nennleistung und –Masse der neu zugelassenen Otto- und Diesel-PKW.	106
Tabelle 0-4: Jährlicher Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen für Otto-Fahrzeuge .....	107
Tabelle 0-5 Jährlicher Anteil der Euro-Klassen an den Neuzulassungen für Diesel-Fahrzeuge .....	108
Tabelle 0-6: Eckdaten der Fahrzeuge für das Euro 6ab Otto-Durchschnittskennfeld Teil 1.	109

Tabelle 0-7: Eckdaten der Fahrzeuge für das Euro 6ab Otto-Durchschnittskennfeld Teil 2 .	110
Tabelle 0-8: Neuzulassungen der vermessenen Euro 6ab Fahrzeuge von 2013 bis 2017.....	111
Tabelle 0-9: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 0 bis Euro 4 der Otto-Fahrzeuge.....	112
Tabelle 0-10: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 5 bis Euro 7 der Otto-Fahrzeuge.....	113
Tabelle 0-11: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 0 bis Euro 4 der Diesel-Fahrzeuge..	114
Tabelle 0-12: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 5 bis Euro 7 der Diesel-Fahrzeuge..	115

## Anhang

Tabelle 0-1: Auswertung der CVS-Messung Peugeot 208

Zyklusname	Start- bedg,	Zeit	CO2	CO	HC	NOx	NO	NO2	PN
[-]	[-]	[s]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[mg/km]	[mg/km]	[g/km]	[#/km]
NEDC	Kalt	1180	119,17	0,111	0,033	77	72	5	6,77E+11
WLTC	Kalt	1800	119,36	0,086	0,021	63	55	8	9,54E+11
ERMES	Warm	1800	121,46	0,088	0,002	68	62	6	1,08E+12
CADC urban	Warm	1800	193,11	0,002	0,002	67	53	14	8,89E+11
CADC road	Warm	1110	111,43	0,049	0,001	48	42	6	5,93E+11
CADC mw	Warm	1110	138,42	0,113	0,010	141	139	2	2,89E+11
IUFC	Kalt	921	186,30	0,322	0,109	42	44	-2	4,04E+12
ERMES	Warm	981	125,32	0,060	0,001	69	70	-1	4,74E+11
IUFC	Kalt	736	177,49	0,129	0,044	56	27	29	2,23E+12

Tabelle 0-2: Auswertung der FTIR-Messung Peugeot 208

Zyklusname	Start- bedg,	Zeit	CO2	SO2	CH4	NH3	N2O	Benzol	1,3- Butadien
[-]	[-]	[s]	[g/km]	[mg/ /km]	[mg/ km]	[mg/k m]	[µg/km]	[g/km]	[µg/km]
WLTC	Kalt	1800	117,55	6,25	0,64	3,1	190	0	638
ERMES	Warm	1800	123,32	4,69	-0,16	1,4	34	0	314
CADC urban	Warm	1800	188,15	2,64	0,52	0,0	360	0	351
CADC road	Warm	1110	111,64	2,53	0,19	1,1	59	0	246
CADC mw	Warm	1110	134,82	5,62	-0,64	1,4	33	0	493
IUFC	Kalt	921	185,43	-0,68	3,83	0,7	150	0	922
ERMES	Warm	981	125,96	2,41	-0,38	0,8	69	0	474
IUFC	Kalt	736	175,15	1,81	1,17	0,4	380	0	-237

Tabelle 0-3: Jährlicher Verlauf von CO<sub>2</sub> im NEDC-Typprüfwert, Spritmonitor-Abweichung zum NEDC, Nennleistung und –Masse der neu zugelassenen Otto- und Diesel-PKW

Jahr	Diesel				Otto			
	CO <sub>2</sub> NEDC	Spritmonitor -Abw	Pe	m_DIN	CO <sub>2</sub> NEDC	Spritmonitor -Abw	Pe	m_DIN
	[g/km]	[%]	[kW]	[kg]	[g/km]	[%]	[kW]	[kg]
2001	167,7	8,1%	86,8	1413,2	185,2	7,1%	82,0	1173,3
2002	169,2	10,1%	89,2	1439,0	182,0	8,1%	82,9	1178,9
2003	170,1	10,2%	92,0	1472,2	179,7	8,9%	83,8	1195,6
2004	170,5	10,4%	95,3	1492,6	178,1	10,1%	85,0	1207,1
2005	171,1	12,3%	98,5	1534,2	174,6	12,4%	84,9	1213,7
2006	173,4	11,8%	103,1	1548,9	171,7	12,6%	85,4	1208,6
2007	171,0	13,7%	105,6	1551,6	168,1	14,4%	87,1	1201,8
2008	166,0	15,4%	106,9	1559,2	163,7	16,7%	88,4	1206,3
2009	159,7	16,9%	106,5	1587,6	150,9	18,4%	77,9	1171,9
2010	153,3	19,3%	109,2	1588,6	150,7	20,3%	86,5	1211,1
2011	146,9	24,1%	111,0	1593,4	145,6	22,9%	89,0	1218,3
2012	143,3	26,9%	113,0	1604,4	141,1	25,3%	89,3	1211,1
2013	138,7	32,2%	113,6	1600,5	135,7	29,0%	90,0	1213,5
2014	135,2	36,0%	115,0	1602,0	132,4	32,0%	91,8	1214,0
2015	130,4	40,5%	117,8	1607,2	129,4	34,6%	94,8	1220,7
2016	128,1	43,4%	120,4	1625,5	128,9	35,9%	99,0	1239,1





Tabelle 0-6: Eckdaten der Fahrzeuge für das Euro 6ab Otto-Durchschnittskennfeld Teil 1

ID Ermes-Datenbank	Hersteller	Modell	Nennleistung	Nenn-drehzahl	Ein-spritzung	Messdaten von
[-]	[Text]	[Text]	[kW]	[1/min]	[DI/MPI]	[-]
DEKRA						
480002	Opel	Astra	103	4999	DI	ERMES
480003	Mercedes-Benz	C-Klasse	135	4999	DI	ERMES
480004	Opel	Corsa	74	4999	DI	ERMES
480005	Seat	Ibiza	66	4999	DI	ERMES
480006	Mini	Cooper	75	4999	DI	ERMES
480007	Audi	A1	70	4999	DI	ERMES
480008	Audi	A3	110	4999	DI	ERMES
480009	Opel	Corsa	66	4999	MPI	ERMES
480010	Mercedes-Benz	B-Klasse	90	4999	DI	ERMES
480011	Nissan	Qashqai	120	4999	MPI	ERMES
480012	Hyundai	I20	74	4999	DI	ERMES
480013	Volkswagen	Up	55	4999	MPI	ERMES
480014	Toyota	Auris	85	4999	DI	ERMES
480015	Smart	Smart	66	4999	MPI	ERMES
480016	Volkswagen	Golf	110	4999	DI	ERMES
EMPA						
110462	Audi	A3	92	5000	DI	PEMS
110470	Volkswagen	Golf	221	5500	DI	ERMES, CADC
110471	BMW	4er	180	5000	DI	ERMES, CADC
110472	Alfa Romeo	Giulietta	125	5500	MPI	ERMES, CADC
110473	Fiat	500	77	5500	MPI	ERMES, CADC
110474	Skoda	Octavia	132	5100	DI	ERMES, 2 CADC
110475	Suzuki	SX4	92	5000	MPI	ERMES, CADC
JRC_Vela2						
440021	Fiat	Panda	51	5500	MPI	PEMS
440023	Opel	Astra	77	5500	DI	PEMS

Tabelle 0-7: Eckdaten der Fahrzeuge für das Euro 6ab Otto-Durchschnittskennfeld Teil 2

ID Ermes-Datenbank	Hersteller	Modell	Nennleistung	Nenn-drehzahl	Ein-spritzung	Messdaten von
[-]	[Text]	[Text]	[kW]	[1/min]	[DI/MPI]	[-]
TueVN-SE						
410561	Opel	Astra	92	4999	MPI	ERMES
410562	Opel	Astra	92	4999	MPI	ERMES
410563	Opel	Astra	92	4999	MPI	ERMES
410572	Citroen	C3	60	4999	MPI	ERMES
410585	Peugeot	308	96	4999	DI	ERMES
410586	Peugeot	308	96	4999	DI	ERMES
410589	Ford	Fiesta	74	4999	DI	ERMES
410590	Ford	Fiesta	74	4999	DI	ERMES
410593	Renault	Clio	66	4999	DI	ERMES
410594	Renault	Clio	66	4999	DI	ERMES
410595	Renault	Clio	66	4999	DI	ERMES
410606	Suzuki	Swift	69	4999	MPI	ERMES
410607	Suzuki	Swift	69	4999	MPI	ERMES
410608	Suzuki	Swift	69	4999	MPI	ERMES
410609	Suzuki	Swift	69	4999	MPI	ERMES
410619	Toyota	Avensis	108	4999	DI	ERMES
410620	Toyota	Avensis	108	4999	DI	ERMES
410621	Toyota	Avensis	108	4999	DI	ERMES
TUG						
200092	Mini	Cooper	100	4400	DI	2 CADC

Tabelle 0-8: Neuzulassungen der vermessenen Euro 6ab Fahrzeuge von 2013 bis 2017

		Neuzulassungen					
Marke	Modell	2013	2014	2015	2016	2017	Summe
Opel	Astra	90206	48455	101125	132675	121122	493583
Mercedes-Benz	C-Klasse	25753	29174	33397	39614	43893	171831
Opel	Corsa	169478	109785	226234	216349	199117	920963
Seat	Ibiza	63427	58867	90037	97859	106900	417090
Mini	Cooper	60362	36055	84673	94892	110393	386375
Audi	A1	49313	52218	53856	67809	64059	287255
Audi	A3	51568	66949	65014	69346	71347	324224
Mercedes-Benz	B-Klasse	35159	27605	27002	26871	24382	141019
Nissan	Qashqai	56889	33110	77968	80548	102227	350742
Hyundai	I20	61306	52880	70709	80159	89793	354847
Volkswagen	Up	114496	75920	96378	88476	93275	468545
Toyota	Auris	73035	65074	101789	89944	101269	431111
Smart	Smart	48860	46140	90867	102282	91397	379546
Volkswagen	Golf	223295	214476	271820	278804	302294	1290689
BMW	4er	3021	12232	16070	15943	18449	65715
Alfa Romeo	Giulietta	11766	9278	11405	11574	8419	52442
Fiat	500	156302	126383	196022	212901	209690	901298
Skoda	Octavia	44015	41679	48714	51764	72791	258963
Suzuki	SX4	23099	26988	20545	15761	26140	112533
Fiat	Panda	92157	82825	108859	130527	133646	548014
Renault	Twingo	66829	77176	95915	85079	78562	403561
Volkswagen	Polo	170159	155806	225738	244374	228452	1024529
Citroen	C3	75336	87566	87661	109825	166893	527281
Peugeot	308	14018	31303	50768	57289	50621	203999
Ford	Fiesta	211291	114295	243806	234465	200643	1004500
Renault	Clio	135244	124956	144510	167247	185980	757937
Suzuki	Swift	42859	29874	48982	41236	34468	197419
Toyota	Avensis	11367	8422	13656	13676	15578	62699

Tabelle 0-9: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 0 bis Euro 4 der Otto-Fahrzeuge

		Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4
DIN-Masse	[kg]	1095,1	1115,1	1145,1	1165	1193,7
Beladung	[kg]	174,8	175,8	177,3	178,3	179,7
Cw-Wert	[-]	0,4004	0,3914	0,3853	0,3805	0,3745
Fläche	[m <sup>2</sup> ]	2	2,05	2,1	2,12	2,12
Motorträgheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,46394	0,50357	0,51678	0,52999	0,55498
Äquiv. Rädermasse	[kg]	35,85	36,45	37,35	37,95	38,81
Getriebe- trägheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,05094	0,05530	0,05675	0,05820	0,06094
Nebenverbr.	[-]	0,015				
Nennleistung	[kW]	70,2	76,2	78,2	80,2	84,0
Nenn Drehzahl	[1/min]	5400	5723	5723	5723	5565
Leerlaufdr.	[1/min]	800	800	800	800	798
Fr0	[-]	0,0095104				
Fr1	[s/m]	7,079E-05				
Achsüber- setzung	[-]	3,925	3,9444	3,9444	3,9444	4,0826
Eff. Raddurchm.	[m]	0,5491	0,5989	0,5989	0,5989	0,6064
1. Gang	[-]	3,5	3,586	3,586	3,586	3,6298
2. Gang	[-]	1,95	1,9902	1,9902	1,9902	2,0523
3. Gang	[-]	1,295	1,3691	1,3691	1,3691	1,3801
4. Gang	[-]	0,9	1,0447	1,0447	1,0447	1,0477
5. Gang	[-]	0,73	0,8468	0,8468	0,8468	0,8423
6. Gang	[-]	0	0	0	0	0

Tabelle 0-10: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 5 bis Euro 7 der Otto-Fahrzeuge

		Euro 5	Euro 6ab	Euro 6c	Euro 6d- Temp	Euro 6d	Euro 7
DIN-Masse	[kg]	1212,3	1237,2	1240,4	1246,7	1253,1	1262,6
Beladung	[kg]	180,6	181,8	182,0	182,3	182,6	183,1
Cw-Wert	[-]	0,3729	0,3300	0,3288	0,3265	0,3241	0,3194
Fläche	[m <sup>2</sup> ]	2,14	2,34				
Motor- trägheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,588725	0,65454	0,66368	0,68197	0,70027	0,72771
Äquiv. Rädermasse	[kg]	39,37	40,11	40,21	40,40	40,59	40,87
Getriebe- trägheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,06465	0,07187	0,07288	0,07489	0,07690	0,07991
Nebenverbr.	[-]	0,015					
Nennleistung	[kW]	89,1	99,1	100,5	103,3	106,0	110,2
Nenn Drehzahl	[1/min]	5247					
Leerlaufdr.	[1/min]	706					
Fr0	[-]	0,0095104					
Fr1	[s/m]	7,079E-05					
Achsüber- setzung	[-]	3,876	3,348				
Eff. Raddurchm.	[m]	0,607					
1. Gang	[-]	3,672	4,273				
2. Gang	[-]	1,991	2,353				
3. Gang	[-]	1,334	1,571				
4. Gang	[-]	0,988	1,151				
5. Gang	[-]	0,789	0,943				
6. Gang	[-]	0	0,805				

Tabelle 0-11: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 0 bis Euro 4 der Diesel-Fahrzeuge

		Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4
DIN-Masse	[kg]	1294,5	1334,5	1384,5	1454,5	1544,9
Beladung	[kg]	279,7	281,7	284,2	287,7	292,2
Cw-Wert	[-]	0,40037	0,3913	0,38533	0,38052	0,37451
Fläche	[m <sup>2</sup> ]	2	2,05	2,1	2,16	2,16
Motorträgheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,421342	0,454364	0,540221	0,599661	0,679857
Äquiv. Rädermasse	[kg]	41,83	43,03	44,53	46,63	49,3
Getriebe- trägheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,04627	0,04989	0,05932	0,06585	0,0746
Nebenverbr.	[-]	0,015				
Nennleistung	[kW]	63,8	68,8	81,8	90,8	102,9
Nenn Drehzahl	[1/min]	4010	4010	4010	3930	4073
Leerlaufdr.	[1/min]	800	800	800	800	816
Fr0	[-]	0,009985951				
Fr1	[s/m]	7,43E-05				
Achsüber- setzung	[-]	3,7914	3,7914	3,7914	3,6546	3,7284
Eff. Raddurchm.	[m]	0,6136	0,6136	0,6136	0,6264	0,6264
1. Gang	[-]	3,5867	3,5867	3,5867	3,6022	3,7079
2. Gang	[-]	1,981	1,981	1,981	1,9719	2,0237
3. Gang	[-]	1,2286	1,2286	1,2286	1,2334	1,2784
4. Gang	[-]	0,8624	0,8624	0,8624	0,8751	0,9359
5. Gang	[-]	0,6781	0,6781	0,6781	0,679	0,7414
6. Gang	[-]	0	0	0	0	0,6162

Tabelle 0-12: HBEFA-Simulationsparameter für Euro 5 bis Euro 7 der Diesel-Fahrzeuge

		Euro 5	Euro 6ab	Euro 6c	Euro 6d- Temp	Euro 6d	Euro 7
DIN-Masse	[kg]	1597,3	1628,1	1632,1	1639,9	1647,8	1659,6
Beladung	[kg]	294,9	296,4	296,6	297,0	297,4	298,0
Cw-Wert	[-]	0,3729	0,3300	0,3288	0,3265	0,3241	0,3194
Fläche	[m <sup>2</sup> ]	2,27	2,48				
Motor- trägheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,740494	0,797792	0,805509	0,820942	0,836375	0,859525
Äquiv. Rädermasse	[kg]	50,92	51,84	51,96	52,20	52,43	52,79
Getriebe- trägheit	[kgm <sup>2</sup> ]	0,08131	0,087611	0,088458	0,090153	0,091848	0,094390
Nebenverbr.	[-]	0,015					
Nenn- leistung	[kW]	112,1	120,8	122,0	124,3	126,6	130,1
Nenn- drehzahl	[1/min]	4014	3672				
Leerlaufdr.	[1/min]	798	755				
Fr0	[-]	0,009985951					
Fr1	[s/m]	7,43E-05					
Achsüber- setzung	[-]	3,678					
Eff. Raddurchm.	[m]	0,6433					
1. Gang	[-]	3,798					
2. Gang	[-]	2,063					
3. Gang	[-]	1,312					
4. Gang	[-]	0,955					
5. Gang	[-]	0,743					
6. Gang	[-]	0,61					