



Dipl.-Ing. Claus Matzer, BSc.

Bestimmung von Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen von Pkw in realen Betriebszuständen mittels Messung und Simulation

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

1. Gutachter

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

2. Gutachter

Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Bernhard Geringer
Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
Technische Universität Wien

Graz, Dezember 2020



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

Der Autor möchte sich für die Ermöglichung dieses Projektes sowie für die gute Zusammenarbeit beim Umweltbundesamt Deutschland und Österreich recht herzlich bedanken. Ein weiterer Dank gilt auch den Förderorganisationen der ERMES-Gruppe, dem BAFU aus der Schweiz, ADEME aus Frankreich, Trafikverket aus Schweden und SFT aus Norwegen. Des Weiteren möchte sich der Autor bei den unabhängigen Labors in Europa bedanken, die wichtige Messdaten für dieses Projekt zur Verfügung stellten sowie bei den Kollegen von INFRAS, die hauptverantwortlich für die Aktualisierung und den Vertrieb des HBEFA sind.

Vorwort

Mein technisches Interesse von Kindheit an lenkte mich nach meiner Matura an der HTL Weiz zum Maschinenbau-Studium an der Technischen Universität Graz und anschließend zu meinem Dissertationsstudium am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz. Im Rahmen meiner 6-jährigen wissenschaftlichen Tätigkeit als Universitäts-Projektassistent durfte ich mir nicht nur entsprechendes Wissen im Fachbereich Emissionen aneignen, sondern auch viele Erfahrungen für meinen weiteren Lebensweg sammeln. Für die ausgezeichnete Betreuung während dieser Zeit und das angenehme Arbeitsklima im Fachbereich möchte ich mich bei Prof. Stefan Hausberger recht herzlich bedanken. Des Weiteren möchte ich auch einen recht herzlichen Dank an Prof. Helmut Eichlseder für die Ermöglichung dieser Arbeit und bei Prof. Bernhard Geringer für die Zeit und das Interesse an der Zweitbegutachtung dieser Arbeit aussprechen. Weiteren Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fachbereichs Emissionen sowie den EDV-Beauftragten für die Hilfsbereitschaft und Unterstützung während meiner Tätigkeit.

Ein großes Dankeschön gilt meiner Familie, die mir diesen Weg ermöglicht und mich dabei unterstützt hat sowie meiner Partnerin, meinen Freunden und Wegbegleitern während meines Studiums.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	X
VERÖFFENTLICHUNGEN	XI
KURZFASSUNG	XIII
ABSTRACT	XIV
1 EINLEITUNG	1
2 AUFGABENSTELLUNG	3
3 PKW-EMISSIONEN, EMISSIONSMESSUNG UND GESETZGEBUNG	4
3.1 PKW-EMISSIONEN	4
3.2 INNER- SOWIE AUßERMOTORISCHE MAßNAHMEN ZUR EMISSIONSREDUKTION	5
3.2.1 <i>Innere motorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion</i>	5
3.2.2 <i>Außere motorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion</i>	5
3.3 EMISSIONSMESSSYSTEME	10
3.3.1 <i>Rollenprüfstand mit CVS-Anlage</i>	10
3.3.2 <i>PEMS</i>	12
3.3.3 <i>Remote-Sensing-System</i>	13
3.4 EMISSIONSGESETZGEBUNG	14
3.5 PKW-ROLLENPRÜFSTANDZYKLEN	15
3.6 REAL DRIVING EMISSIONS	17
4 SIMULATIONSPROGRAMM PHEM	19
4.1 CO ₂ -LEISTUNGSINTERPOLATIONSMETHODE	20
4.1.1 <i>Methodenbeschreibung</i>	21
4.1.2 <i>Normierungs- und Entnormierungsoptionen der CO₂-Kennfelder</i>	24
4.1.3 <i>CO₂-Kennfeldjustierung</i>	26
4.1.4 <i>Validierung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode</i>	28
4.2 SIMULATION MIT DETAILLIERTER BERÜCKSICHTIGUNG DES ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEMS	33
4.2.1 <i>Temperaturmodell</i>	34
4.2.2 <i>Katalysatormodell</i>	34
4.2.3 <i>NH₃-Modell</i>	34
4.3 VALIDIERUNG GESAMTMODELL PHEM	39
5 ERSTELLUNG DER PKW-EMISSIONSFAKTOREN FÜR HBEFA 4.1	45
5.1 DATENBASIS	46
5.1.1 <i>ERMES-Datenbank</i>	46
5.1.2 <i>CO₂-Monitoring-Datenbank</i>	52
5.1.3 <i>Spritmonitor.de</i>	53
5.1.4 <i>Floating Car Data</i>	53
5.1.5 <i>CONOX-Datenbank</i>	55
5.2 PHEM-KRAFTSTOFFVERBRAUCHS- BZW. CO ₂ -KENNFELDER FÜR PKW	55
5.3 PHEM-SCHADSTOFFKENNFELDER FÜR PKW	57
5.4 PHEM-SCHADSTOFFKENNFELDER FÜR PKW MIT EA 189-SOFTWAREUPDATE	60
5.5 PHEM-EINGABEDATEN FÜR DAS NH ₃ -MODELL	62
5.5.1 <i>Engine-Out NO_x-Kennfeld</i>	62
5.5.2 <i>Abgastemperaturkennfeld</i>	64
5.5.3 <i>Abgasmassenstromkennfeld</i>	66
5.6 PHEM-FAHRZEUGDATEN	67
5.6.1 <i>Nennleistung, Nenn Drehzahl, DIN-Leermasse und Beladung</i>	67
5.6.2 <i>Rollwiderstand</i>	68
5.6.3 <i>Luftwiderstand</i>	69
5.6.4 <i>Leistungsbedarf von Nebenverbrauchern</i>	69
5.6.5 <i>Start-Stopp-System</i>	70
5.6.6 <i>Abgasnachbehandlungssysteme</i>	71
5.7 ANPASSUNG DER PHEM-FAHRZEUGDATEN AN DEN REALKRAFTSTOFFVERBRAUCH	72

5.8	ANPASSUNG DER PHEM-SCHADSTOFFKENNFELDER.....	75
5.9	KORREKTUR- UND ANTEILSFAKTOREN.....	77
5.9.1	<i>K_i-Faktoren zur Berücksichtigung von Partikelfilterregenerationen</i>	77
5.9.2	<i>Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Laufleistungseinflusses auf die Emissionen</i>	78
5.9.3	<i>Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen.....</i>	80
5.9.4	<i>Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen mit EA 189-Softwareupdate</i>	83
5.9.5	<i>Anteil NO₂ an NO_x.....</i>	85
5.10	EXEMPLARISCHE ERGEBNISSE DER HBEFA 4.1-EMISSIONSFAKTOREN FÜR KONVENTIONELLE PKW .	86
5.10.1	<i>Exemplarische Ergebnisse bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....</i>	86
5.10.2	<i>Exemplarische Ergebnisse bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung</i>	89
5.11	EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG DER UNTERSCHIEDE ZWISCHEN HBEFA 3.3 UND 4.1	90
5.11.1	<i>Exemplarische Darstellung der Unterschiede bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung</i>	90
5.11.2	<i>Exemplarische Darstellung der Unterschiede bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung</i>	92
5.11.3	<i>Exemplarische Darstellung der Unterschiede durch stufenweise Adaptierung der neuen PHEM-Eingabedaten</i>	93
5.12	EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG DER UNTERSCHIEDE DER EMISSIONSFAKTOREN FÜR UNTERSCHIEDLICHE NATIONALE PKW-FLOTTENZUSAMMENSETZUNGEN	99
6	VERGLEICH DER HBEFA 4.1-EMISSIONSFAKTOREN MIT EINER REMOTE-SENSING-MESSSTELLE	102
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	105
8	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	108
8.1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	108
8.2	TABELLENVERZEICHNIS	111
9	LITERATURVERZEICHNIS	114
10	ANHANG A	120
11	ANHANG B.....	122
12	ANHANG C	128
13	ANHANG D	130
14	ANHANG E.....	132
15	ANHANG F	137

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

$A_{\text{Querschnitt}}$	m^2	Querschnittsfläche des Fahrzeugs
CF	-	Conformity Factor (Konformitätsfaktor)
c_m	m/s	mittlere Kolbengeschwindigkeit
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
CO_2	g/h	Kohlendioxid
Efa	g/km	Emissionsfaktor
f_{r0}	-	Statischer Rollwiderstandsbeiwert
f_{r1}	s/m	Linearer Rollwiderstandsbeiwert
h	mm	Hub
k	-	Konvertierungsrate
KF	-	Korrekturfaktor
M	g/mol	Molare Masse
\dot{m}_{AdBlue}	g/h	Eindosierter AdBlue-Massenstrom
m_{gesamt}	kg	Masse des Fahrzeuges inklusive Beladung
n	$1/\text{min}$	Motordrehzahl
NH_3	g, mol/s	Ammoniak
n_{Leerlauf}	$1/\text{min}$	Leerlaufdrehzahl
$n_{\text{Nennleistung}}$	$1/\text{min}$	Motordrehzahl bei Nennleistung
NO_x	g	Stickoxide
NTE_{Limit}	g/km, \#/km	Not-To-Exceed-Limit
P_a	W	Beschleunigungsleistung
P_e	kW	Motorleistung
p_e	Pa	effektiver Mitteldruck
p_{emax}	Pa	maximaler effektiver Mitteldruck
P_{gesamt}	W	Erforderliche Antriebsleistung
P_{Getriebe}	W	Verlustleistung im Getriebe
P_{Luft}	W	Leistung zur Überwindung des Luftwiderstands
$P_{\text{Nebenaggregate}}$	W	Leistungsbedarf der Nebenaggregate
$P_{\text{Nennleistung}}$	kW	Motornennleistung
P_{Roll}	W	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstands
P_{Schlupf}	W	Verlustleistung durch Reifenschlupf
P_{Steigung}	W	Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands
q	-	Anzahl der Stützstellen im Kennfeld
Stg	$\%$	Steigung der Fahrbahn
t	s	AdBlue-Eindosierdauer
v	m/s	Fahrgeschwindigkeit
V_H	l	Hubraum

Konstanten

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

Griechische Formelzeichen

Δ	–	Differenz zweier Größen
ρ_{Luft}	kg/m ³	Luftdichte

Operatoren und Bezeichnungen

\sum	Summe
--------	-------

Weitere Indizes und Abkürzungen

EO	Engine-Out
i	Kennfeldstützstelle
korr	korrigiert
n	zum Zeitpunkt n
n+1	zum Zeitpunkt n+1
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxide
q	Anzahl der Stützstellen im Kennfeld
T _{km}	tausend Kilometer
TP	End-of-Tailpipe
x km	x Kilometer
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (Agency for Environment and Energy)
ASC	Ammonia Slip Catalyst
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
COPERT	Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport
CPC	Condensation Particle Counter
CVS	Constant Volume Sampling
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein
DI	Direkteinspritzung
DIN	Deutsches Institut für Normung
Distr	distributed
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel Particulate Filter
DUH	Deutsche Umwelthilfe
EEA	European Environment Agency
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-Pkw	Elektro-Personenkraftwagen
ERMES	European Research on Mobile Emission Sources
EU	Europäische Union
EU-28	28 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union
FCD	Floating Car Data
Fzg.	Fahrzeug
GPF	Gasoline Particulate Filter
GPS	Global Positioning System

H ₂ O	Wasser
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HC	Kohlenwasserstoffe
HNCO	Isocyansäure
HSDAC	Heinz Steven Data Analysis and Consultancy
iav	Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr
ICCT	International Council on Clean Transportation
ID	Identifikator
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
ISO	International Organization for Standardization
IUFC	Inrets Urbain Fluide Court
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
JRC	Joint Research Centre
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
LNf	Leichtes Nutzfahrzeug
LNT	Lean NO _x Trap
max.	maximal
N ₂	Stickstoff
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
NTE-Limit	Not-To-Exceed-Limit
O ₂	Sauerstoff
OBD	On-Board-Diagnose
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
pos.	positiv
RDE	Real Driving Emissions
RRC	Rolling Resistance Coefficient
RUR	rural
RWC	Real World Cycle
Satur.	saturated
SCR	Selective Catalytic Reduction
SFT	Statens forurensningstilsyn (Norwegian Climate and Pollution Agency)
SNf	Schweres Nutzfahrzeug
SU	Softwareupdate
TAP	Transport and Air Pollution
TDI	Turbocharged Direct Injection
TempKorr	Temperaturkorrektur
Tkm	tausend Kilometer
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research)
TREMOT	Transport Emission Model
TU Dresden	Technische Universität Dresden
TU Graz	Technische Universität Graz

TueVN	Technischer Überwachungsverein Nord
TWC	Three-Way-Catalyst
unabh.	unabhängig
URB	urban
UTAC	Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle
Veline	Vehicle Line
VW	Volkswagen
WLTC	Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Procedure

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Claus Matzer

Graz, Dezember 2020

Veröffentlichungen

Inhalte dieser Arbeit sind in den nachfolgend angeführten wissenschaftlichen Publikationen eingeflossen. Im Rahmen dieser Arbeit sind auch die angeführten Abschlussarbeiten entstanden.

Wissenschaftliche Publikationen:

Hausberger, S.; Matzer, C.; Lipp, S.; Weller, K.; Dippold, M.; Röck, M.; Rexeis, M.; Silberholz, G.: Consistent Emission Factors from PEMS and Chassis Dyno Tests for HBEFA 4.1. 23rd International Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki, 2019

Matzer, C.; Hausberger, S.; Lipp, S.; Rexeis, M.: A new approach for systematic use of PEMS data in emission simulation. 21st Transport and Air Pollution Conference, Lyon, 2016

Matzer, C.; Hausberger, S.; Rexeis, M.; Opetnik, M.; Ramsauer, M.; Mogg, O.; Weger, F.: Update of Emission Factors for EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA. 22nd Transport and Air Pollution Conference, Zurich, 2017

Matzer, C.; Weller, K.; Opetnik, M.; Hausberger, S.; Knörr, W.; Notter, B.: Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamts Deutschland; Forschungskennzahl 3715 51 1020, 2020

Mera, Z.; Matzer, C.; Hausberger, S.; Fonsecab, N.: Selective catalytic reduction (SCR) system performance of a diesel passenger car in real-world conditions. Applied Thermal Engineering, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115983>, 2020

Notter, B.; Hausberger, S.; Rexeis, M.; Dippold, M.; Matzer, C.; Lipp, S.; Weller, K.; Röck, M.; Schwingshackl, M.; et al.: Integrating recent developments in road transport in HBEFA 4.1. 23rd International Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki, 2019

Weller, K.; Lipp, S.; Röck, M.; Matzer, C.; Bittermann, A.; Hausberger, S.: Real world fuel consumption and emissions from LDVs and HDVs. Frontiers in Mechanical Engineering, DOI: [10.3389/fmech.2019.00045](https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00045), 2019

Abschlussarbeiten:

Enzi, M.: Validierung des Emissionsmodells PHEM für EURO 6 PKWs. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2018

Hainisch, T.: Messung und Simulation von PKW Real World Emissionen bei einem Euro 6 Dieselfahrzeug. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Hirt, H.-G.: Messung und Simulation von PKW-Emissionen mit Real World Zyklen und Vergleich von Interpolations-Routinen. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2019

Kapus, P.: Messung und Simulation der NO_x-Emission bei einem EURO 6 Diesel PKW mit SCR-Katalysator. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Klingler, R.: Messung und Simulation von Real World Emissionen beim PKW. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2016

Opetnik, M.: Messung und Simulation von Euro 6 Otto-PKW Emissionen für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2019

Politschnig, N.: Analyse des realen Emissionsverhaltens von Euro 6 Diesel – Personenkraftwagen. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2019

Present, S.: Messung und Simulation eines EURO 6d-TEMP Diesel-PKW. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2018

Ramsauer, M.: Messung und Simulation des Emissionsverhaltens eines Euro 6 Diesel-PKW's bei RDE-Fahrten und in Stausituationen. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Reinbacher, D.: Analyse von limitierten und nicht-limitierten Abgaskomponenten bei Diesel PKW's. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Schreck, S.: Messung und Simulation eines EURO 6 Diesel-PKW mit NSK. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2018

Stögmüller, A.: Umgebungstemperatureinflüsse auf das Emissionsniveau von betriebswarmen PKW. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Viehböck, M.: Simulative und messtechnische RDE-Untersuchung eines Diesel PKW's mit NOx Speicherkatalysator. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Zunhammer, M.: RDE-Messung und PHEM-Simulation eines Diesel-PKW's mit NOx-Speicherkatalysator. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017

Zöhner, A.: Simulative und messtechnische RDE-Untersuchung eines Diesel PKW mit SCR. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2016

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigte sich mit Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen von Pkw in realen Betriebszuständen im Rahmen der HBEFA-Aktualisierung. HBEFA ist die Abkürzung für Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs und wurde 1995 erstmals veröffentlicht. Das HBEFA enthält Emissionsfaktoren in g/km bzw. #/km für alle relevanten Straßenfahrzeugtypen und für eine Vielzahl von Verkehrssituationen. Zu den Verkehrssituationen zählen z. B. Stausituationen oder Fahrten auf der Autobahn ohne Geschwindigkeitsbegrenzung. Die Verkehrssituationen werden mit Fahrzeugen, die den Durchschnitt der Flotte repräsentieren, mittels des Simulationsprogramms PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) simuliert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Pkw-Emissionsfaktoren des HBEFA aufgrund neuer Erkenntnisse und neuer Messdaten aktualisiert. Für die Aktualisierung wurden auch neue Methoden entwickelt. Mit den neu erarbeiteten Methoden konnten folgende Punkte im HBEFA erstmals umgesetzt werden:

- a) Emissionsmessungen von Pkw im realen Straßenverkehr konnten mithilfe der entwickelten CO₂-Leistungsinterpolationsmethode berücksichtigt werden. Durch Einbeziehung solcher Messdaten kann die Anzahl an vermessenen Fahrzeugen erheblich erhöht und insbesondere die Repräsentativität der Emissionsfaktoren durch die gemessenen Fahrzustände entscheidend verbessert werden.
- b) Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf das NO_x-Emissionsniveau von Diesel-Pkw konnte abgebildet werden. Messungen haben gezeigt, dass niedrige Umgebungstemperaturen zu erheblich höheren NO_x-Emissionen führen können.
- c) Das Softwareupdate EA 189 der VW-Konzernfahrzeuge konnte abgebildet werden. Durch den EA 189-Pflichtrückruf änderten sich nicht nur die Emissionen im Typprüfzyklus, sondern auch im realen Straßenverkehr.
- d) Das Auskühlen des zur NO_x-Reduktion eingesetzten SCR (Selective Catalytic Reduction)-Systems von Diesel-Pkw in speziellen Fahrsituationen (z. B. Stau) konnte berücksichtigt werden. Dadurch wurde das Emissionsverhalten für HBEFA-Niederlastzyklen erstmals physikalisch korrekt abgebildet.
- e) Die PHEM-Fahrzeugdaten (z. B. Rollwiderstand, Luftwiderstand und Beladung) konnten anhand realer Kraftstoffverbrauchsdaten genauer an die durchschnittlichen Umwelt- und Fahrsituationen angepasst werden.

Durch Fahrzeugmessungen, die im Rahmen dieser Arbeit sowie auch von anderen Labors in Europa durchgeführt wurden, konnten repräsentative Emissionsfaktoren für das HBEFA, unter Anwendung der erarbeiteten Methoden, erstellt werden. Als Grundlage dazu wurde das Messprogramm der Labors koordiniert und unter anderem einheitliche Mindeststandards für Fahrzeugauswahl, Messinhalte, Auswertung und Datenformate ausgearbeitet.

Schlagwörter: HBEFA, Kraftstoffverbrauch, Emissionen, Emissionsfaktoren, Emissionsmodell, PHEM, Pkw

Abstract

This thesis dealt with fuel consumption and emissions of passenger cars in real operating conditions in the context of the HBEFA update. HBEFA is the handbook of emission factors for road transport and was first published in 1995. The HBEFA contains emission factors in g/km or #/km for all relevant road vehicle types and for a variety of traffic situations from urban cycles to driving on the motorway without speed limits. The traffic situations are simulated with average fleet vehicles using the simulation model PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model). Within the scope of this work, the emission factors of HBEFA were revised based on new knowledge and new available measurement data. For the update of the emission factors several new methods were developed. With the developed methods the following points could be realized in HBEFA for the first time:

- a) Emission measurements of passenger cars in real driving conditions could be considered by the developed CO₂ power interpolation method. By including such measurement data, the number of measured vehicles can be increased considerably and, in particular, the representativeness of the measured driving conditions can be improved significantly.
- b) The influence of the ambient temperature on the NO_x emissions of diesel passenger cars could be considered in HBEFA. Measurements show, that low ambient temperatures can lead to significantly higher NO_x emissions.
- c) The software update EA 189 of diesel passenger cars of the VW group could be considered. Due to the EA 189 mandatory recall the emission behaviour changed in the type approval cycle and in real driving conditions.
- d) The cooling of the SCR (Selective Catalytic Reduction) system of diesel passenger cars in special driving situations (e.g. traffic jams) could be taken into account. The cooling effects may result in higher end-of-tailpipe NO_x emissions. With the consideration of these cooling effects the emission behaviour for HBEFA low-load cycles could be reproduced physically correct for the first time.
- e) PHEM vehicle data (e.g. rolling resistance, air resistance and load) could be adapted more accurately to the average real world driving conditions using real fuel consumption data.

The emission measurements of vehicles carried out within this work as well as by other laboratories in Europe made it possible to establish representative emission factors for HBEFA using the methods developed. As basis for the data usability, the measurement program of all laboratories involved was coordinated and minimum requirements concerning vehicle selection, measurement program, evaluation methods and data forms have been elaborated.

Keywords: HBEFA, Fuel consumption, Emissions, Emission factors, Emission model, PHEM, Passenger Car

1 Einleitung

Der steigende Wohlstand der Bevölkerung in den Industrieländern ist ein wesentlicher Grund für die steigende Mobilität und führt somit auch zu einem Anstieg der durch den Verkehr verursachten Emissionen. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft die Entwicklung des Kfz-Bestandes in Österreich seit 1950. Von 1970 bis 2010 nahm der Kfz-Bestand um über 200 % zu. Die Bestandsdaten der Otto- und Diesel-Pkw beinhalten auch die hybridisierten Pkw. [56]

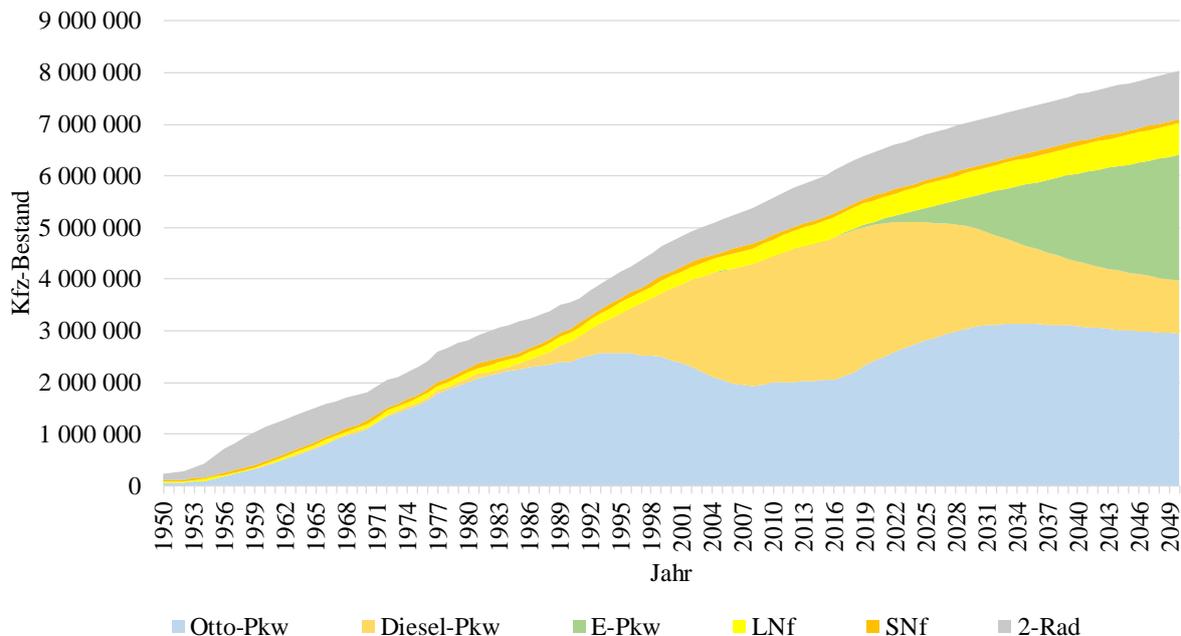


Abbildung 1.1: Entwicklung des Kfz-Bestands in Österreich [14]

Die gesamten Emissionen, die durch den Verkehr verursacht werden, sind nicht direkt messbar, da nicht jedes Kfz messtechnisch verfolgt werden kann. Daher besteht der dringende Bedarf an zuverlässigen Emissionsfaktoren in g/km bzw. #/km, um Emissionen, verursacht durch den Verkehr, für folgende Aufgabenstellungen abschätzen zu können: [31]

- Erstellung von Energie- und Emissionsbilanzen (Inventurberechnungen)
- Szenarienrechnungen
- Eingabedaten für Luftqualitätsmodelle
- Folgenabschätzungen für z. B. neue Infrastrukturprojekte
- Eruierung der Abweichungen zwischen Typprüfzyklus und realen Straßenfahrten
- Akademische Nutzung in Form von Lehre und angewandter Forschung

Dafür sind eine harmonisierte Methode und eine regelmäßig aktualisierte Datenbank mit Emissionsmessdaten notwendig. Die harmonisierte Methode findet sich in sogenannten Emissionsmodellen wieder, welche die sogenannten Emissionsfaktoren enthalten. Bekannte und behördlich anerkannte Emissionsmodelle sind z. B.: [14]

- COPERT
- HBEFA
- VERSIT+

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Emissionsmodell HBEFA, auch als Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs bezeichnet. Die Emissionsfaktoren sind für die Straßenfahrzeugtypen 2-Rad, Pkw, leichte sowie schwere Nutzfahrzeuge für alle Abgasnormen und für eine Vielzahl an Verkehrssituationen seit 1995 verfügbar. Die Verkehrssituationen inkludieren den Gebietstyp von der Ortstraße bis Autobahn mit verschiedenen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Ebenfalls berücksichtigt ist der Verkehrszustand von flüssig bis zu Stausituationen. [31]

Die Emissionsfaktoren basieren auf Emissionsmessungen von Fahrzyklen auf Pkw-Rollenprüfständen sowie Messungen im realen Straßenverkehr. Mithilfe der Messdaten werden die Emissionsfaktoren für alle Kombinationen von Fahrzeugsegmenten und Verkehrssituationen mit dem Simulationsprogramm PHEM (Passenger Car and heavy duty Emission Model) berechnet. Emissionsmessungen werden von unabhängigen Labors in ganz Europa durchgeführt. Um eine hohe Repräsentativität der Emissionsfaktoren in HBEFA zu gewährleisten, werden regelmäßige Messkampagnen zur Aktualisierung der zugrundeliegenden Messdatenbank durchgeführt. Hauptverantwortlich für die Aktualisierung und den Vertrieb des HBEFA ist INFRAS in der Schweiz. Daten für die HBEFA-Aktualisierung werden z. B. vom ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) oder der TU Graz (Technische Universität Graz) an INFRAS übermittelt. [31]

Abbildung 1.2 zeigt die chronologische Entwicklung von HBEFA von 1995 bis 2019. Seit 1995 finanzieren und verwenden die Umweltämter der Länder Deutschland, Österreich und Schweiz HBEFA zur gesetzlich vorgeschriebenen Inventurberechnung. Seit 2010 nutzen und finanzieren auch die Länder Schweden und Norwegen HBEFA. Frankreich arbeitet seit 2014 mit HBEFA und ist seither auch an der Finanzierung beteiligt. [31]



Abbildung 1.2: Chronologische Entwicklung des HBEFA [31]

2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung geeigneter Methoden und deren Umsetzung um Kraftstoffverbrauch und Emissionen aktueller Pkw in beliebigen Fahrsituationen berechnen zu können. Die neuen Methoden wurden danach im Rahmen dieser Arbeit zur Aktualisierung der Emissionsfaktoren von konventionellen Diesel- und Otto-Pkw im HBEFA 4.1 verwendet.

Seit der letzten HBEFA-Version 3.3 gab es infolge der Euro 6c und Euro 6d Gesetzgebung wesentliche Änderungen in den Emissionsminderungstechnologien. Dazu wurden auch neue Messungen an Euro 6b und Euro 6d-Temp Pkw durchgeführt und weitere Messdaten EU-weit gesammelt. Die neuen Messdaten beinhalten vor allem Messungen im realen Straßenverkehr bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, Messungen von Pkw mit behördlich vorgeschriebenen Softwareupdates von Motorsteuerungen und Messungen in Niedriglastzyklen (z. B. Stausituationen). Wegen der sehr unterschiedlichen Emissionsniveaus verschiedener Pkw-Modelle, braucht die Entwicklung von Emissionsfaktoren, die repräsentativ für die Fahrzeugflotte sein sollen, eine breite Datenbasis. Daher galt es, all diese Daten für die Aktualisierung des HBEFA, soweit sinnvoll, zu verwenden.

Damit einhergehend lagen folgende Forschungsfragen vor, die im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet wurden:

- Wie können Messungen im realen Straßenverkehr ausreichend korrekt für die Emissionsfaktorenerstellung berücksichtigt werden?
- Gibt es einen Einfluss der Umgebungstemperatur auf das NO_x-Emissionsverhalten und wie kann dieser gegebenenfalls im HBEFA abgebildet werden?
- Wie beeinflussen Softwareupdates der Motorsteuerung das Emissionsverhalten von Pkw und wie kann gegebenenfalls eine dadurch vorliegende Emissionsänderung in HBEFA berücksichtigt werden?
- Wie können PHEM-Fahrzeugdaten (z. B. Rollwiderstand, Luftwiderstand und Beladung) angepasst werden, damit der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen im HBEFA die realen Fahrbedingungen besser widerspiegeln?
- Steigen bei Niederlastzyklen (z. B. Stausituationen) die NO_x-Emissionen bei Diesel-Pkw mit SCR-Systemen an und wie können diese gegebenenfalls abgebildet werden?
- Mit welchem Emissionsniveau kann für zukünftige Pkw (Post-Euro 6) gerechnet werden?

In dieser Arbeit wird zuerst auf die wichtigsten theoretischen Grundlagen eingegangen, welche die Grundvoraussetzung für die Beantwortung der oben angeführten Forschungsfragen sind. Danach werden die neu entwickelten Methoden beschrieben sowie die aktualisierten Emissionsfaktoren für konventionelle Pkw gezeigt. Zum Abschluss wird eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick für mögliche Arbeiten in der Zukunft gegeben.

3 Pkw-Emissionen, Emissionsmessung und Gesetzgebung

Nachfolgend wird auf die wichtigsten theoretischen Grundlagen bezüglich Pkw-Emissionen, Emissionsmessung, Emissionsminimierung sowie die Emissionsgesetzgebung eingegangen. Da im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf den limitierten Emissionen lag, wird auf die nicht-limitierten Schadstoffe nicht eingegangen.

3.1 Pkw-Emissionen

Bei einer vollständigen Verbrennung des Kraftstoffs in einem Verbrennungsmotor, im nachfolgenden vereinfacht als Motor bezeichnet, liegen als Abgas folgende Komponenten vor: [43]

- Stickstoff (N_2)
- Wasserdampf (H_2O)
- Kohlendioxid (CO_2)
- Sauerstoff (O_2)

Diese Abgaskomponenten sind für Mensch, Tier und Pflanzenwelt nicht schädlich. Das Kohlendioxid trägt allerdings als Treibhausgas zur Erwärmung der Erde bei. [43]

Da in der Realität allerdings keine vollständige Verbrennung vorliegt, werden auch Produkte durch die unvollständige Verbrennung gebildet. Zudem wird Luftstickstoff bei hohen Temperaturen zu NO_x umgewandelt. Diese Abgaskomponenten werden als Schadstoffe bezeichnet und sind für Mensch, Tier und Pflanzenwelt mehr oder weniger gefährlich. Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch die Rohemissionen eines Ottomotors. Die Schadstoffe machen in der Regel etwa 1 Volumenprozent des Abgases aus. Nach Einsatz eines funktionierenden Abgasnachbehandlungssystems liegt der Anteil darunter. Für Pkw sind folgende Schadstoffe limitiert, die im Rahmen einer Zulassung des Fahrzeuges für den europäischen Markt eingehalten werden müssen: [43]

- Stickoxide (NO_x)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Kohlenwasserstoffe (HC)
- Partikelanzahl (PN) und Partikelmasse (PM)

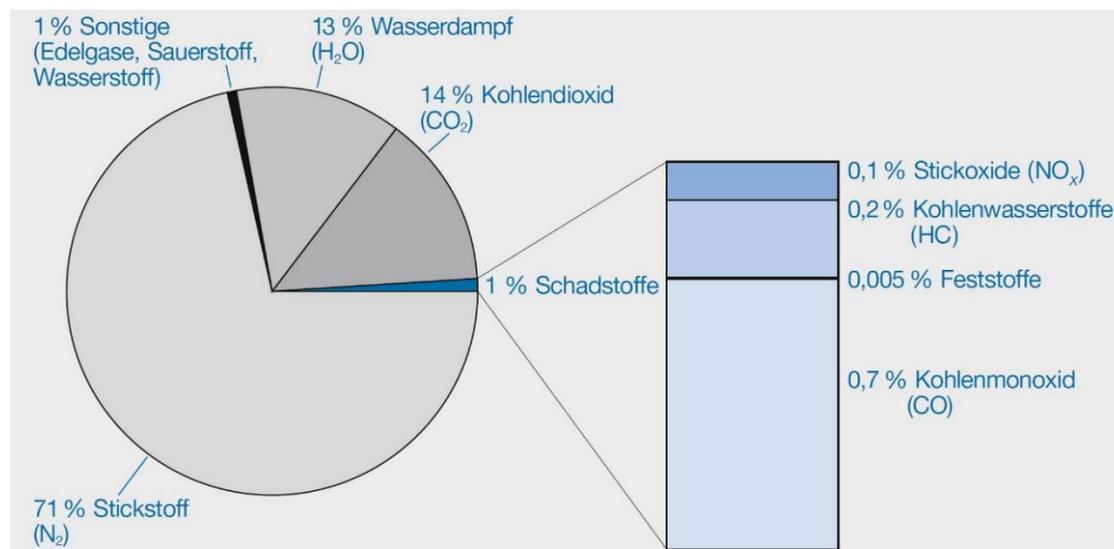


Abbildung 3.1: Zusammensetzung des Rohabgases von Ottomotoren bei stöchiometrischem Betrieb in Volumenprozent [50]

3.2 Inner- sowie außermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Um die Rohabgasemissionen von Pkw zu verringern und die gesetzlichen Grenzwerte einhalten zu können, können inner- sowie auch außermotorische Maßnahmen gesetzt werden. Diese sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

3.2.1 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Zum innermotorischen Abgasnachbehandlungssystem zählt z. B. die Abgasrückführung (EGR, vom englischen Exhaust Gas Recirculation). Die Abgasrückführung dient vor allem zur NO_x-Reduktion bei Diesel-Pkw. Dabei wird Abgas dem Abgasmassenstrom entnommen und anschließend wieder dem Frischluftmassenstrom zugeführt. Wird das Abgas vor dem Abgasturbolader entnommen, spricht man vom Hochdruck-EGR. Wird es danach entnommen, spricht man vom Niederdruck-EGR. Durch die Zugabe des rückgeführten Abgases wird der Abgasmassenstrom reduziert, die Verbrennungstemperatur und die Verbrennungsgeschwindigkeit abgesenkt und das lokale Luftverhältnis reduziert. Dadurch wird die NO_x-Bildung deutlich verringert. Durch die Kühlung des rückgeführten Abgases kann die Abgastemperatur noch weiter gesenkt werden. Nachteilig ist, dass die Rußemission bei Abgasrückführung erhöht wird. Die Rußgrenze sowie weitere Parameter (z. B. Motorlast oder Umgebungstemperatur) limitieren die maximal mögliche Rückführtrate. Die Rußgrenze liegt ungefähr bei einem Luftverhältnis von 1,1 bis 1,3. [49] [65]

3.2.2 Außermotorische Maßnahmen zur Emissionsreduktion

Außermotorische Maßnahmen sind Abgasnachbehandlungssysteme im Abgasstrang von Fahrzeugen. Solche Systeme reduzieren die Emissionen mittels Filtern und Katalysatoren.

Bei den Filtern unterscheidet man zwischen geschlossenen und offenen Partikelfiltern. Geschlossene Partikelfilter werden derzeit am häufigsten eingesetzt. Geschlossene Partikelfilter sind wabenähnlich aufgebaut und bestehen aus Siliziumkarbid oder Cordierit. Die Wabenform weist eine Vielzahl von parallelen Kanälen auf. Durch abwechselnde Verschließung der Kanäle muss das Abgas die porösen Wände durchströmen, wobei die Rußpartikel an den Porenwänden haften bleiben.

Katalysatoren beschleunigen eine chemische Reaktion, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Der Aufbau eines Katalysators kann unterschieden werden in Vollkatalysatoren sowie katalytisch beschichtete Trägerkatalysatoren. Bei Vollkatalysatoren besteht die Struktur des Katalysators komplett aus der aktiven Komponente. Trägerkatalysatoren hingegen bestehen aus einem Trägerkörper, einer Zwischenschicht und der katalytisch aktiven Schicht. Gehalten wird der Katalysator in einem Gehäuse, dem sogenannten 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. Mit der Zellendichte steigt die geometrische Oberfläche, auf der die Zwischenschicht aufgebracht werden kann. 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 (Al_2O_3) verwendet, bei Drei-Wege-Katalysatoren sind auch Ceriumoxid und Zirkoniumoxid als Sauerstoffspeicherkomponenten enthalten. Die Wirksamkeit eines Katalysators wird mit der Konvertierungsrate k nach Gleichung (3.1) beschrieben. Sie ist ein Maß für die Verminderung der Konzentration einer Schadstoffkomponente im Abgas. [12]

$$k = \frac{\text{Eingangskonzentration} - \text{Ausgangskonzentration}}{\text{Eingangskonzentration}} \quad (3.1)$$

3.2.2.1 Abgasnachbehandlungssysteme beim Dieselmotor

Aus dem Verbrennungskonzept des Dieselmotors leiten sich dessen Abgasnachbehandlungssysteme ab. Aufgrund des Luftüberschusses im Abgas des Dieselmotors reagieren HC und CO mit dem Restsauerstoff im Abgas. Daher kommen beim Dieselmotor Oxidationskatalysator, NO_x -Speicherkatalysator und/ oder SCR-Katalysator zum Einsatz. In Kombination zum SCR-Katalysators wird oft auch ein Ammoniak-Sperrkatalysator eingesetzt. Um die gesetzlichen Grenzwerte der Partikelanzahl einzuhalten, wird ein Dieselpartikelfilter verbaut. Die aufgezählten Abgasnachbehandlungssysteme sind nachfolgend kurz beschrieben.

Diesel-Oxidationskatalysator (DOC)

Der Diesel-Oxidationskatalysator (DOC, vom englischen Diesel Oxidation Catalyst) ist im Abgasstrang meist direkt nach dem Turbolader angeordnet. Als katalytische Reaktion liegt die Oxidation von CO und HC zu CO_2 und H_2O vor. [38]

Je nach Strömungsgeschwindigkeit, Abgaszusammensetzung und Katalysatoraufbau findet diese Reaktion ab 170 bis 200 °C statt. Ist die Betriebstemperatur erreicht, so liegt ein Umsatz von über 90 % an. Im DOC wird zusätzlich auch Partikelmasse reduziert. Dies geschieht durch Absorption von Kohlenwasserstoffen, die Bestandteil der Partikelmasse sind. Dadurch kann die Partikelmasse um 15 bis 30 % gesenkt werden. Eine weitere Funktion des DOC ist die Oxidation von NO zu NO_2 . Das ist für den nachgeschalteten SCR-Katalysator und Partikelfilter wichtig, da in den meisten Betriebspunkten des Motors der NO_2 -Anteil nur ca. 1:10 ausmacht. [48]

NO_x-Speicher-katalysator (LNT)

Mit dem NO_x-Speicher-katalysator (LNT, vom englischen Lean NO_x Trap) können die NO_x-Emissionen reduziert werden. Im Gegensatz zum SCR-Katalysator benötigt der NO_x-Speicher-katalysator keine zusätzlichen Betriebsmittel. Er ist vom Prinzip her aufgebaut wie ein Drei-Wege-Katalysator, weist jedoch eine zusätzliche Schicht aus Alkali- bzw. Erdalkalimetallen auf, wobei Barium bevorzugt wird. Die Reduktion von NO_x im Abgas mittels NO_x-Speicher-katalysator erfolgt in zwei Schritten: [48]

1. Beladungsphase: Kontinuierliche NO_x-Speicherung während des Motorbetriebs mit Luftüberschuss. Dabei wird im Katalysator NO zu NO₂ oxidiert und das NO₂ eingespeichert.
2. Regenerationsphase: Ausspeicherung und Konvertierung von NO_x während des Motorbetriebs mit Luftmangel.

Während der Beladung von NO₂ wird Bariumcarbonat unter Freisetzung von CO₂ zu Bariumnitrat umgewandelt. Je mehr Stickoxide im NO_x-Speicher-katalysator eingelagert werden, desto weniger zusätzliche Stickoxide können gebunden werden. D.h. mehr NO_x durchströmen den NO_x-Speicher-katalysator. Deshalb muss der NO_x-Speicher-katalysator periodisch regeneriert werden. Die Regeneration des NO_x-Speicher-katalysators ist im fetten Motorbetrieb möglich, wodurch aber höherer Kraftstoffverbrauch vorliegt. Während der Regeneration wird Bariumnitrat mit CO wieder zu Bariumcarbonat. [38]

Liegt die Abgastemperatur zwischen 300 und 400 °C, können mit dem NO_x-Speicher-katalysator Konvertierungsraten > 90 % erreicht werden. Liegt die Abgastemperatur darunter, so ist die Konvertierung von NO zu NO₂ geringer und die NO_x-Konvertierung sinkt. Bei höheren Abgastemperaturen wird die Konvertierungsrate durch fehlende thermische Stabilität der Nitrate reduziert. [38]

Beim NO_x-Speicher-katalysator kann als unerwünschtes Nebenprodukt auch N₂O entstehen [4]. N₂O hat das 298-fache Treibhausgaspotential wie CO₂, weshalb N₂O als Nebenprodukt nicht zu vernachlässigen ist.

Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Im Gegensatz zum NO_x-Speicher-katalysator arbeitet die selektive katalytische Reduktion (SCR, vom englischen Selective Catalytic Reduction) kontinuierlich. Das SCR-System greift nicht in den Motorbetrieb ein und gewährleistet niedrige NO_x-Emissionen bei geringem Kraftstoffverbrauch. Wie bereits vorhin erwähnt, benötigt das SCR-System allerdings ein Reduktionsmittel, um selektiv NO_x zu reduzieren. Selektiv bedeutet, dass die Oxidation des Reduktionsmittels bevorzugt mit dem Sauerstoff der NO_x erfolgt. Als Reduktionsmittel wird Ammoniak (NH₃) verwendet. Da Ammoniak jedoch giftig und ätzend ist, wird es für Pkw und Lkw in Form einer wässrigen Harnstofflösung, welche u.a. unter dem Namen AdBlue vertrieben wird, zugeführt. Harnstoff ist sowohl grundwasserverträglich als auch chemisch stabil. [38]

Die Umwandlung von NO_x im SCR ist temperaturabhängig. Die effektive Umwandlung beginnt erst bei ca. 150 °C. Ab Abgastemperaturen oberhalb von 450 °C oxidiert das Reduktionsmittel mit Sauerstoff, wodurch die NO_x-Reduktion wieder sinkt. Über einen breiten Temperaturbereich ist eine Reduktion von etwa 90 % erreichbar. [20]

Vor der SCR-Reaktion wird aus dem Harnstoff Ammoniak gebildet. Zur Ammoniak-Erzeugung sind zwei Reaktionsschritte notwendig. In der Thermolyse werden NH₃ und H₂NCO gebildet. Daraufhin wird in der Hydrolyse das H₂NCO mit H₂O zu NH₃ und CO₂ umgesetzt. Diese zwei Schritte werden zusammengefasst als Hydrolysereaktion bezeichnet. [38]

Das durch die Hydrolysereaktion entstandene Ammoniak reagiert im SCR-Katalysator zu N_2 und H_2O . Man unterscheidet dabei die Standard-SCR-Reaktion, die schnelle SCR-Reaktion und die langsame SCR-Reaktion. Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt dabei von folgenden Faktoren ab:

- Temperatur des SCR-Katalysators
- NO_x -Konzentration
- Konzentrationsverhältnis NO_2 zu NO
- gespeicherte NH_3 -Menge im SCR-Katalysator

Die schnelle SCR-Reaktion läuft bevorzugt bei einem NO_2 zu NO -Verhältnis nahe dem Wert 1, bei Abgastemperaturen ab 170 bis 200 °C, ab. Mit der schnellen SCR-Reaktion kann der beste Umsatz erzielt werden. Die Standard-SCR-Reaktion tritt bei niedrigen Abgastemperaturen und bei hoher NH_3 -Beladung auf der Katalysatoroberfläche auf. Ist das NO_2 zu NO -Verhältnis > 1 , tritt die langsame SCR-Reaktion auf.

Wenn es zu einer zu starken Dosierung des Reduktionsmittels kommt, kann es zu einem NH_3 -Schlupf kommen. Das somit austretende Ammoniak kann zu einer Umweltbelastung führen, falls kein Ammoniak-Sperrkatalysator hinter dem SCR-System verbaut ist. [20] [38]

Zusätzlich kann im SCR-Katalysator unter bestimmten Betriebsbedingungen auch N_2O als unerwünschtes Nebenprodukt gebildet werden. [57]

Ammoniak-Sperrkatalysator (ASC)

Als Ammoniak-Sperrkatalysator (ASC, vom englischen Ammonia Slip Catalyst) wird ein Oxidationskatalysator bezeichnet, der nach dem SCR-Katalysator verbaut sein kann. Durch diesen Katalysator wird der NH_3 -Schlupf im SCR-Katalysator zu N_2 und H_2O oxidiert. [38]

Durch den Katalysator können unter bestimmten Betriebsbedingungen (z. B. Alterung des ASC) allerdings auch unerwünschte Nebenprodukte wie NO und/oder N_2O entstehen, die durch Reaktionen von NH_3 mit O_2 bzw. NH_3 mit NO und O_2 gebildet werden. [10]

Dieselpartikelfilter (DPF)

Die Partikelrohmissionen von Dieselmotoren sind aufgrund des Verbrennungskonzepts relativ hoch. Um diese zu reduzieren, kommen vorwiegend geschlossene Dieselpartikelfilter (DPF, vom englischen Diesel Particulate Filter) zum Einsatz. Die Rußpartikel bleiben an den Porenwänden haften. Die anhaftenden Rußpartikel bilden eine Rußschicht, die zur Filterung beiträgt. Wird diese Rußschicht zu dick, so steigt der Abgasgegendruck an. Dadurch werden die Ladungswechselarbeit und damit einhergehend der Kraftstoffverbrauch erhöht. Zudem besteht die Gefahr, dass der Filter bei der Regeneration durch zu hohe Rußbelastung aufgrund der sehr hohen lokalen Temperaturen thermisch beschädigt wird. Um dies zu vermeiden, werden Dieselpartikelfilter in periodischen Abständen regeneriert. Bei der Regeneration spricht man von gezieltem Abbrennen des Rußes im Filter. Diese muss in regelmäßigen Abständen von etwa 400 bis 500 km durchgeführt werden. Die Regeneration dauert ungefähr 5 bis 10 Minuten. Der Kohlenstoff im Ruß wird durch die Regeneration bei Abgastemperaturen $> ca. 600$ °C zu CO_2 oxidiert. Da solche Abgastemperaturen nur nahe der 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 bis 500 °C gesenkt. [48]

Im Allgemeinen ist für eine gezielte Regeneration eine Anhebung der Abgastemperatur durch motorische Maßnahmen erforderlich. Eine Abgastemperaturerhöhung kann z. B. durch Nacheinspritzung, Drosselung, Umgehung des EGR-Kühlers und Kombinationen davon erreicht werden. Mit NO_2 als Oxidationsmittel kann Ruß bereits bei Abgastemperaturen von 300 bis 450 °C oxidiert werden. Geschlossene Partikelfilter können Rückhaltegrade von mehr als 95 % für Partikel zwischen 10 nm und 1 µm erreichen. [48]

3.2.2.2 Abgasnachbehandlungssysteme beim Ottomotor

Beim Ottomotor werden der Drei-Wege-Katalysator sowie mit strenger werdender Abgasgesetzgebung auch Ottopartikelfilter als Abgasnachbehandlungssysteme eingesetzt. Diese Systeme werden nachfolgend ebenfalls kurz beschrieben.

Drei-Wege-Katalysator (TWC)

Der Drei-Wege-Katalysator (TWC, vom englischen Three-Way-Catalyst) wird bei qualitätsgeregelten Motoren verwendet, welche stöchiometrisch betrieben werden. Daher kann der Oxidations- und Reduktionskatalysator zusammengefasst werden und es findet eine gleichzeitige Oxidation von HC und CO sowie eine Reduktion von NO_x statt. [38]

Wie bereits erwähnt, benötigt der Drei-Wege-Katalysator einen stöchiometrischen Motorbetrieb. Da der Ottomotor allerdings nur um den stöchiometrischen Motorbetrieb geregelt werden kann, werden Schwankungen durch den Einsatz von z. B. Ceriumoxid, welches eine Sauerstoffspeicher- und Sauerstoffabgabefähigkeit besitzt, im Katalysator ausgeglichen.

NO_x , CO, und HC werden nur in einem engen Bereich um den stöchiometrischen Motorbetrieb gleichzeitig vermindert. Bei vorliegendem Luftüberschuss über längere Zeit kann NO und NO_2 nicht ausreichend reduziert werden, bei Luftmangel über längere Zeit können HC und CO nicht vollständig oxidiert werden. Bei vorliegendem Luftmangel kann ebenfalls NH_3 als unerwünschtes Nebenprodukt gebildet werden. Für den Drei-Wege-Katalysator müssen ebenfalls gewisse Mindesttemperaturen (ca. 250 °C) vorliegen, damit die Reaktionen ablaufen können. [38] [80]

Ottopartikelfilter (GPF)

Ab Euro 6b gelten PN-Grenzwerte von 6 E11 #/km für Pkw mit Ottomotor. Damit die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden können, werden vor allem Ottomotoren mit Direkteinspritzung immer häufiger mit Ottopartikelfilter (GPF, vom englischen Gasoline Particulate Filter) ausgestattet. Der GPF ist vom Aufbau her dem DPF ähnlich. Auch der GPF besteht aus einem keramischen Träger mit wechselseitig verschlossenen Kanälen. Der Unterschied zum Dieselmotor liegt jedoch in einem geringeren Sauerstoffanteil im Abgas sowie in der höheren Abgastemperatur. Das bedeutet u.a., dass der GPF thermisch robuster ausgeführt werden muss. Der GPF muss nur selten aktiv regeneriert werden, da wegen der hohen Abgastemperaturen bei Ottomotoren und der ausreichenden Sauerstoffverfügbarkeit im Schleppbetrieb die passive Regeneration meist ausreicht. [25] [66]

3.3 Emissionsmesssysteme

Die Messdaten bilden die Grundlage für die Erstellung der Emissionsfaktoren. Emissionsmessungen können z. B. mit folgenden Messsystemen durchgeführt werden:

- Emissionsmessungen mittels Pkw-Rollenprüfstand und CVS (Constant Volume Sampling)-Anlage
- Mobile Emissionsmessungen auf der Straße mittels PEMS (Portable Emission Measurement System)
- Emissionsmessungen auf der Straße mit Remote-Sensing-System

Die Funktionsweise dieser Messsysteme sei im Folgenden kurz beschrieben.

3.3.1 Rollenprüfstand mit CVS-Anlage

Mit einem Pkw-Rollenprüfstand kann ein Fahrzeug unter definierten Bedingungen in einem Prüfraum vermessen werden. Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch den schematischen Aufbau eines Pkw-Rollenprüfstands. Das Fahrzeug wird mit den angetriebenen Rädern auf Rollen aufgespannt. Es gibt sowohl Prüfstände für eine angetriebene Achse, als auch Prüfstände für Allrad-Fahrzeuge. Die Rolle wird über eine Asynchronmaschine angetrieben und gebremst. Dabei wird die Bremskraft so geregelt, dass sie den Fahrwiderständen des jeweiligen Fahrzeugs entspricht. Die Massenträgheit des Fahrzeugs kann ebenfalls von der Asynchronmaschine aufgebracht werden. Zusätzlich stellen schon alle rotierenden Teile des Prüfstands einen Teil der Massenträgheit des Fahrzeugs dar. Der Prüfstandsfahrer bekommt die vorgegebene Geschwindigkeit über ein Fahrerleitgerät angezeigt. Die Schadstoffemissionen werden in der Regel nach dem CVS-Verfahren gemessen. In den Kapiteln 3.3.1.1 und 3.3.1.2 sind Theorie der Fahrwiderstände und das Funktionsprinzip der CVS-Anlage beschrieben. [14]

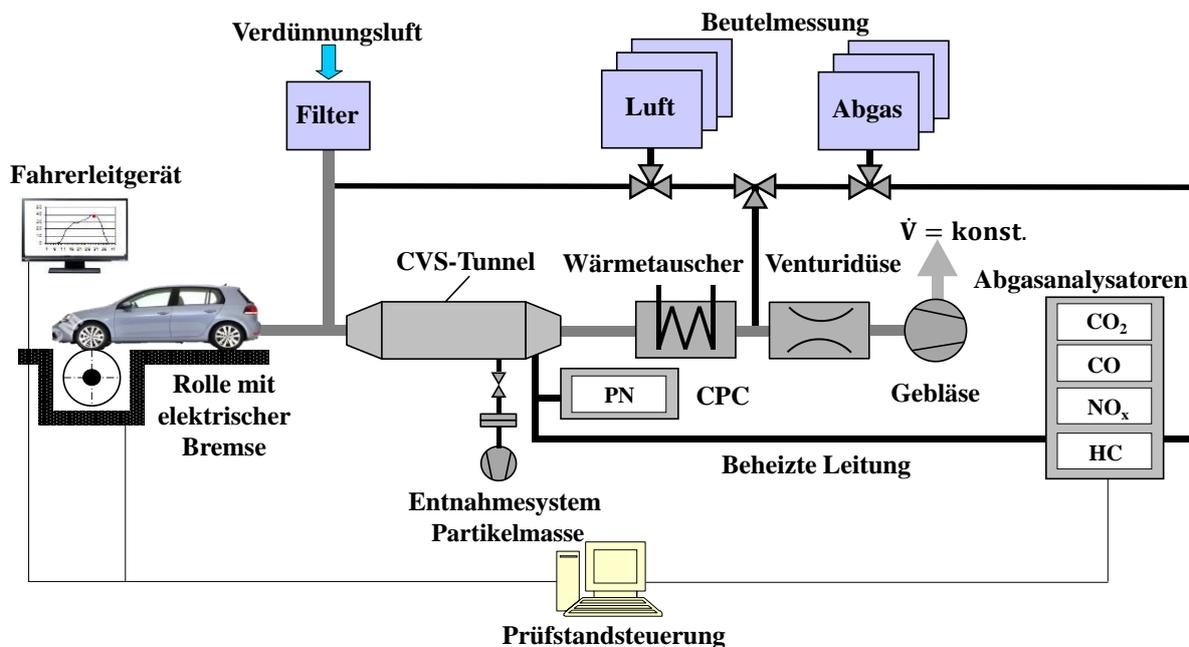


Abbildung 3.2: Funktionsschema Pkw-Rollenprüfstand mit CVS-Anlage [14]

3.3.1.1 Theorie der Fahrwiderstände

Die erforderliche Antriebsleistung an der Kurbelwelle eines Fahrzeugs ergibt sich mit Gleichung (3.2). [14]

$$P_{gesamt} = P_{Roll} + P_{Luft} + P_a + P_{Steigung} + P_{Schlupf} + P_{Getriebe} + P_{Nebenaggregate} \quad (3.2)$$

P_{gesamt} Erforderliche Antriebsleistung an der Kurbelwelle in W

P_{Roll} Leistung zur Überwindung des Rollwiderstands in W

P_{Luft} Leistung zur Überwindung des Luftwiderstands in W

P_a Beschleunigungsleistung in W

$P_{Steigung}$ Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands in W

$P_{Schlupf}$ Verlustleistung durch Reifenschlupf in W

$P_{Getriebe}$ Verlustleistung im Getriebe in W

$P_{Nebenaggregate}$ Leistungsbedarf der Nebenaggregate in W

$P_{Schlupf}^1$, $P_{Getriebe}$ und $P_{Nebenaggregate}$ sind fahrzeugbezogen und müssen nicht vom Pkw-Rollenprüfstand aufgebracht werden. Die Leistungen zur Überwindung von P_{Roll} , P_{Luft} und $P_{Steigung}$ können nach [14] mit den nachfolgenden Gleichungen beschrieben werden. Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte können durch Ausrollversuche bestimmt werden. [14]

$$P_{Roll} = m_{gesamt} * g * (f_{r0} + f_{r1} * v) * v \quad (3.3)$$

$$P_{Luft} = c_W * A_{Querschnitt} * \rho_{Luft} * \frac{1}{2} * v^3 \quad (3.4)$$

$$P_{Steigung} = m_{gesamt} * g * Stg * 0,01 * v \quad (3.5)^2$$

m_{gesamt} Masse des Fahrzeuges inklusive Beladung in kg

g Normalfallbeschleunigung in m/s^2

f_{r0} Statischer Rollwiderstandsbeiwert dimensionslos

f_{r1} Linearer Rollwiderstandsbeiwert in s/m

v Fahrgeschwindigkeit in m/s

c_W Luftwiderstandsbeiwert dimensionslos

$A_{Querschnitt}$ Querschnittsfläche des Fahrzeuges in m^2

ρ_{Luft} Dichte der Luft in kg/m^3

Stg Steigung der Fahrbahn in %

¹ Die Schlupfleistung zwischen Fahrbahn und Fahrzeug kann sich von jener auf dem Pkw-Rollenprüfstand unterscheiden. Bei üblichen Beschleunigungen von Pkw kann die Schlupfleistung in der Regel vernachlässigt werden.

² Gleichung gilt für Steigungen, wo der Sinus des Steigungswinkels mit der Steigung nahezu ident ist.

3.3.1.2 CVS-Anlage

Am Pkw-Rollenprüfstand kann zur Emissionsmessung eine CVS-Anlage verwendet werden. Dabei wird das Auspuffrohr des Fahrzeuges mit der CVS-Anlage verbunden. Die Emissionen werden im CVS-Tunnel mit einem gefilterten Luftstrom verdünnt. Durch die Verdünnung soll die Kondensation sowie chemische Reaktion des Abgases gehemmt werden.

Damit die Berechnung der absolut emittierten Mengen nicht verfälscht wird, wird z. B. mittels Venturidüse ein konstanter Volumenstrom des Gemisches aus Abgas und gefilterter Luft gebildet. Anschließend wird ein Teilstrom für die Emissionsmessung in Beutel geführt, während weitere Teilströme für zeitaufgelöste Messungen zu Analysatoren geführt werden. Die gasförmigen Komponenten CO_2 und CO werden über Absorptionsspektroskopie des infraroten Lichts gemessen. NO und NO_2 werden über das Chemolumineszenzverfahren ermittelt, HC-Komponenten über den Flammenionisationsdetektor. Die Partikelanzahl wird über das CPC (Condensation Particle Counter)-System erfasst, die Partikelmasse wird gravimetrisch bestimmt. Die Messsysteme liefern eine Konzentration in ppm bzw. $\#/ \text{cm}^3$. Die Umrechnung in die Größen g/h oder $\#/ \text{h}$ erfolgt über den bekannten CVS-Volumenstrom und die Dichte der einzelnen Abgaskomponenten. Da in der gefilterten Verdünnungsluft bereits Schadstoffe vorhanden sind, müssen die Messergebnisse noch entsprechend mit der Hintergrundkonzentration korrigiert werden. Außerdem benötigen die Emissionen eine gewisse Zeit vom Motorauslass bis zu den Analysatoren. Dadurch und durch die unterschiedliche Ansprechzeit der Analysatoren sind die Emissionen zeitverschoben und müssen zeitlich korrekt der Motorleistung im Postprocessing zugeordnet werden. [14]

3.3.2 PEMS

PEMS-Systeme sind vor allem für mobile Emissionsmessungen (z. B. auf der Straße) angedacht. Dabei kann das System beispielhaft in oder an einem Fahrzeug montiert werden. Mit herkömmlichen PEMS-Systemen können die gasförmigen Emissionen CO_2 , CO und NO_x (NO und NO_2) über Absorptionsspektroskopie des infraroten und ultravioletten Lichts gemessen werden. HC kann über einen Flammenionisationsdetektor erfasst werden. Die Partikelanzahl wird über die Diffusionsladung oder über das CPC-System bestimmt. Da die Schadstoffe analog zu Kapitel 3.3.1.2 in ppm bzw. $\#/ \text{cm}^3$ erfasst werden, muss für die Umrechnung auf Massenemissionen der Abgasmassenstrom des Fahrzeugs bekannt sein. Dieser kann entweder mittels Abgasmassenstrommessgerät ermittelt werden, oder falls verfügbar über die Motorsteuerung ausgelesen werden. PEMS-Systeme werden mittels Akkumulatoren energieautark betrieben. Zusätzlich zur Emissionsmessung gibt es die Möglichkeit, Umgebungsdruck, -temperatur, Luftfeuchte und GPS (Global Positioning System)-Daten sowie Daten via OBD (On-Board-Diagnose)-Schnittstelle aufzuzeichnen. [1] [2] [24]

3.3.3 Remote-Sensing-System

Das Remote-Sensing-System misst Emissionen ohne das Fahrzeug, den Fahrer oder das Fahrverhalten zu beeinträchtigen. Ein möglicher Aufbau des Remote-Sensing-Systems ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Gesamtsystem wird am Fahrbahnrand aufgebaut. Das abgebildete Gesamtsystem besteht aus Emissionsmesssystem, Messsystem zur Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie einer Videokamera. Das Emissionsmessgerät misst die gasförmigen Emissionen durch Absorptionsspektroskopie. Infrarotes und ultraviolettes Licht wird vom Messgerät auf Höhe des Auspuffendrohrs bzw. der Abgaswolke über die Straße gesendet. Das Licht wird von einem Spiegel auf der anderen Straßenseite reflektiert und von einem Detektor aufgefangen. Die Konzentration in der Atmosphäre setzt sich aus der Emissionskonzentration des vorbeifahrenden Pkw sowie aus der Hintergrundkonzentration zusammen. Wird von der gemessenen Gesamtkonzentration in ppm die Hintergrundkonzentration abgezogen, so ergeben sich die Emissionskonzentrationen des vorbeigefahrenen Fahrzeugs. Durch das Messprinzip ist der Abgasmassenstrom nicht bekannt. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass das gemessene CO_2 und die gemessenen Schadstoffkonzentrationen der gleichen Verdünnung und den gleichen Ausbreitungsbedingungen unterliegen. Deshalb können Ergebnisse von Remote-Sensing-Systemen als g Schadstoff je kg CO_2 angegeben werden. Über den simulierten Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs im Messabschnitt können dann direkt die CO_2 -Massenemissionen und in weiterer Folge die Massenemissionen der Schadstoffe berechnet werden. Die mithilfe eines Messsystems ermittelte Fahrzeuggeschwindigkeit ist ein Maß für die Motorleistung. Mit dieser Leistung kann der Kraftstoffverbrauch bzw. die CO_2 -Emission des Fahrzeugs ermittelt werden. Die Videokamera erfasst das Kennzeichen des Fahrzeugs. So können im Postprocessing technische Daten des Fahrzeugs abgerufen und die gemessenen Emissionen einem Fahrzeugmodell zugeordnet werden. [3]

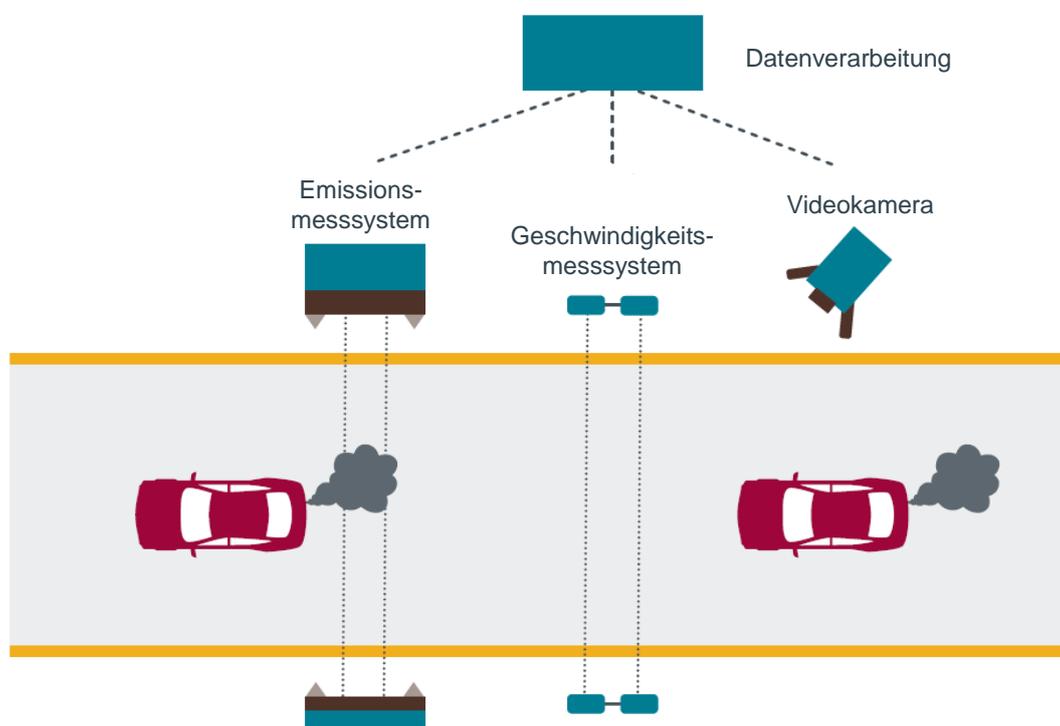


Abbildung 3.3: Schematische Abbildung des Messaufbaus eines Remote-Sensing-Systems [3]

3.4 Emissionsgesetzgebung

Für den Verkauf von Pkw am europäischen Markt müssen Fahrzeuge u.a. bestimmte Emissionsgrenzwerte einhalten. Limitierte Emissionen für Pkw sind NO_x, CO, HC, PM und PN.

Für CO₂ ist kein Grenzwert definiert, allerdings gibt es sogenannte CO₂-Flottenzielwerte. Überschreitet die verkaufte Flotte eines Herstellers die CO₂-Zielwerte, so muss dieser je Gramm CO₂-Überschreitung Strafe zahlen. Der derzeitige CO₂-Flottenzielwert beträgt 130 g/km, mit 2021 wird der Flottenzielwert auf 95 g/km gesenkt. [14]

Tabelle 3-1 zeigt die Abgasnormen für die limitierten Emissionen in der EU (Europäische Union), die früher mit „ECE“ und nun mit „Euro“ und einer Buchstaben-Ziffern-Kombination abgekürzt wurden bzw. werden. Jeder Abgasnorm sind Grenzwerte für die limitierten Emissionen zugeordnet. Die Grenzwerte für Pkw unterscheiden sich nach Diesel- und Ottomotor und wurden über die Jahre stets verschärft. Bei Neueinführung einer Abgasnorm gilt diese zunächst für alle Typprüfungen und nach einer gewissen Übergangszeit für alle neu zugelassenen Fahrzeuge. Die Grenzwerte müssen in den sogenannten Typprüfzyklen eingehalten werden. Bis Euro 6c wurde als Typprüfzyklus der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) herangezogen, ab Euro 6c muss der WLTC (Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Cycle) verwendet werden.

Zusätzlich müssen ab Euro 6c bei einer Fahrzeugtypisierung auch die Emissionen im Zuge einer realen Straßenfahrt gemessen werden. Die Emissionen dürfen dabei sogenannte NTE (Not-To-Exceed)-Limits nicht überschreiten (siehe Kapitel 3.6).

Tabelle 3-1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für Pkw in der EU [14] [68] [69]

Abgasnorm	CO in g/km		HC in g/km		NO _x in g/km		HC+NO _x in g/km		PM in g/km	PN in #/km	
	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Diesel & Otto DI	Otto	Diesel
ECE 15/00 (1972)	33,1	33,1	2,30	2,30	3	3	-	-	-	-	-
ECE 15/01 (1975)	26,4	26,4	2,00	2,00	3	3	6,25	-	-	-	-
ECE 15/02 (1977)	26,4	26,4	2,00	2,00	3	3	5,00	-	-	-	-
ECE 15/03 (1979)	21,5	21,5	1,80	1,80	2,5	2,5	4,30	-	-	-	-
ECE 15/04 (1982)	16,5	16,5	-	-	-	-	3,56	5,10	-	-	-
Euro 1 (1992)	3,2	3,2	-	-	-	-	1,13	1,13	0,1400	-	-
Euro 2 (1996)	2,2	1,0	-	-	-	-	0,50	0,70	0,0800	-	-
Euro 3 (2000)	2,3	0,6	0,20	-	0,15	0,5	0,35	0,56	0,0500	-	-

Abgasnorm	CO in g/km		HC in g/km		NO _x in g/km		HC+NO _x in g/km		PM in g/km	PN in #/km	
	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Diesel & Otto DI	Otto	Diesel
Euro 4 (2005)	1,0	0,5	0,10	-	0,08	0,25	0,18	0,30	0,0250	-	-
Euro 5a (2009)	1,0	0,5	0,10	-	0,06	0,18	-	0,23	0,0050	-	-
Euro 5b (2011)	1,0	0,5	0,10	-	0,06	0,18	-	0,23	0,0045	-	6 E11
Euro 6*	1,0	0,5	0,10	-	0,06	0,08	-	0,17	0,0045	6 E11	6 E11

* Euro 6b ab Jahr 2014, Euro 6c ab 2018, Euro 6d-Temp ab 2017 und Euro 6d ab 2020

3.5 Pkw-Rollenprüfstandzyklen

Die Emissionen von Pkw können in verschiedenen Fahrzyklen auf einem Pkw-Rollenprüfstand ermittelt werden. Je nach Anforderung gibt es unterschiedliche Zyklen. In Tabelle 3-2 sind die für diese Arbeit relevanten Fahrzyklen angeführt. Für jeden Fahrzyklus sind die wichtigsten Zyklusdaten, wie z. B. Streckenlänge, Dauer oder Durchschnittsgeschwindigkeit, angegeben.

Bis Euro 6c wurde als Typprüfzyklus der NEFZ herangezogen. Der NEFZ besteht aus einem Stadt- und einem Überlandanteil mit einer Gesamtfahrstrecke von 11 km. Der Zyklus dauert 1180 s und die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 33,6 km/h. Der NEFZ ist im Vergleich zum realen Fahrverhalten sehr moderat, was sich auch in einer maximalen Beschleunigung von 1 m/s² zeigt.

Mit Einführung der Abgasnorm Euro 6c wurde nach einer Übergangsphase der NEFZ durch den WLTC abgelöst. Die Zykluslänge des WLTC beträgt 23 km mit einer Dauer von 1 800 s. Die Durchschnittsgeschwindigkeit steigt auf 46,5 km/h und die maximale Beschleunigung ist mit 1,6 m/s² höher als im NEFZ.

Die Zyklen CADC, ERMES, RWC und IUFC sind nicht typprüfrelevant, sollen allerdings das reale Fahrverhalten besser widerspiegeln. Deshalb werden diese Zyklen für die Berechnung der Emissionsfaktoren herangezogen. Zusätzlich ist damit sichergestellt, dass mögliche Emissionsoptimierungsstrategien in den Typprüfzyklen seitens der Fahrzeughersteller keinen Einfluss auf die errechneten Emissionsfaktoren haben.

CADC steht für „Common Artemis Driving Cycle“ und besteht aus den drei Phasen Stadt, Überland und Autobahn. Ein 1/3-Mix der Emissionen der einzelnen Phasen ergibt einen repräsentativen Wert für reales Fahren. Der Autobahnanteil ist mit einer Spitzengeschwindigkeit von 132 km/h oder 150 km/h verfügbar. Die Dauer des Zyklus beträgt in Summe 3 142 s.

Der ERMES-Zyklus wurde im Rahmen der ERMES (European Research on Mobile Emission Sources)-Gruppe erarbeitet und liegt mittlerweile in der 8. Version vor. Die Dauer des Zyklus beträgt 1110 s bei einer Zykluslänge von 24,3 km. Der ERMES-Zyklus zählt mit einer Maximalbeschleunigung von 4,8 m/s² zu den dynamischsten Pkw-Rollenzyklen. Im Vergleich zu der Version 7 hat der ERMES V8 mehr Leerlaufanteil, um die Emissionen im Leerlauf besser bestimmen zu können.

RWC steht für „Real World Cycle“. Das Geschwindigkeitsprofil ist aus realen Straßenfahrten des IVT im Raum Graz zusammengestellt. Dieser wird am Pkw-Rollenprüfstand mit Steigung und standardmäßig aktivierten Nebenverbrauchern, wie z. B. Klimaanlage, gefahren.

IUFC steht für „Inrets Urbain Fluide Court“ und ist ein Zyklus, welcher aus gleichen Mikrozyklen besteht, die ein ständiges Anfahren und Stehenbleiben darstellen. Dieser Zyklus dient zur Analyse des Kaltstartverhaltens von Fahrzeugen, da das Emissionsverhalten bis zum betriebswarmen Zustand des Motors über die einzelnen Mikrozyklen gut zu erkennen ist. Die Dauer des gesamten Zyklus beträgt 2834 s.

Tabelle 3-2: Dynamikgrößen von Fahrzyklen

Zyklus	Zykluslänge in km	Dauer in s	Max. Geschwindigkeit in km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	Max. Beschleunigung in m/s ²	Max. Verzögerung in m/s ²	Stoppanteil in %
NEFZ	11,0	1180	120,0	33,6	1,0	1,4	24
WLTC Klasse 3b	23,3	1800	131,3	46,5	1,6	1,5	13
CADC ³	50,9	3142	131,8	58,3	2,4	3,8	11
ERMES V8	24,3	1320	135,3	66,2	4,8	2,3	5
RWC	28,3	1697	122,8	60,3	2,0	3,0	6
IUFC	15,0	2834	44,0	19,0	1,9	2,2	16

Abbildung 3.4 zeigt qualitativ die Betriebspunkte im Motorkennfeld. RWC sowie ERMES decken das Motorkennfeld gut ab, hingegen ist die Abdeckung des Motorkennfelds der Zyklen NEFZ und IUFC geringer.

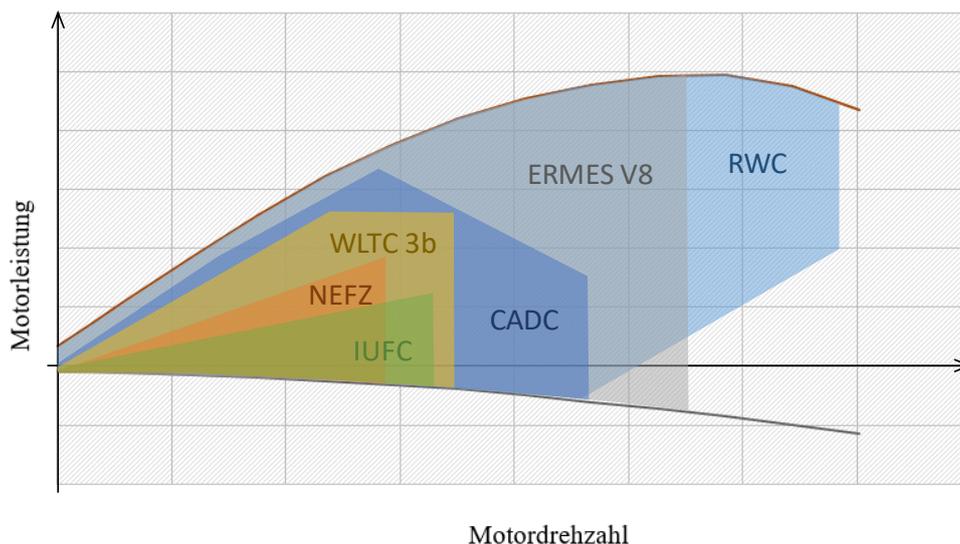


Abbildung 3.4: Betriebsbereiche der einzelnen Fahrzyklen im Motorkennfeld qualitativ abgebildet

³ CADC-Version mit Maximalgeschwindigkeit von 132 km/h.

Bei allen Rollenzyklen ist zu beachten, dass der Innerortsteil, Überlandteil sowie Autobahnteil für eine gute Messbarkeit zu etwa gleichen Zeitanteilen enthalten sein soll. In der Realität haben diese Verkehrssituationen im Mittel aber etwa gleiche Streckenanteile. Für eine Aussage zum durchschnittlichen Emissionsniveau sollen daher die Teilergebnisse in g/km mit je einem Drittel zusammengewichtet werden.

3.6 Real Driving Emissions

Zusätzlich zum Typprüfzyklus WLTC müssen seit Euro 6c auch Messungen im realen Straßenverkehr durchgeführt werden. Diese werden als RDE (Real Driving Emissions)-Messungen bezeichnet. Nachfolgend ist eine Zusammenfassung aus [70] [71] [72] und [73] gegeben. Für einen RDE-Test wird am oder im Fahrzeug ein mobiles Messsystem, das sogenannte PEMS, montiert. Mit diesem Messsystem werden in der Regel die Emissionen CO₂, NO_x, CO und PN im realen Fahrbetrieb gemessen. Im Rahmen einer Typisierung dürfen die Emissionen NO_x und PN eines Fahrzeugs nicht über dem NTE-Limit liegen. Das NTE-Limit setzt sich aus den Grenzwerten der jeweiligen Abgasnorm und einem Konformitätsfaktor nach Gleichung (3.6) zusammen.

$$NTE_{Limit_Schadstoff} = CF_{Schadstoff} \times Euro\ 6_{Grenzwert} \quad (3.6)$$

$NTE_{Limit_Schadstoff}$ Not-To-Exceed-Limit in g/km bzw. #/km

$CF_{Schadstoff}$ Konformitätsfaktor dimensionslos

$Euro\ 6_{Grenzwert}$ Euro 6 Grenzwert des jeweiligen Schadstoffs in g/km bzw. #/km

Die Konformitätsfaktoren für NO_x und PN sind in Tabelle 3-3 angeführt. In der Übergangsphase der Abgasnorm Euro 6c gilt das NTE-Limit nur für PN. Ab Euro 6d-Temp gelten die NTE-Limits für NO_x und PN, die sich mit Euro 6d für NO_x weiter verschärfen. So dürfen für Diesel-Pkw nach der Abgasnorm Euro 6d die NO_x-Emissionen nicht über 114,4 g/km, die PN-Emissionen nicht über 9 E11 #/km liegen. Für Otto-Pkw gelten für Euro 6d die NTE-Limits von 85,8 g/km für NO_x und 9 E11 #/km für PN.

Tabelle 3-3: Konformitätsfaktoren für RDE-Tests von Pkw [71]

Abgasnorm	NO _x	PN
Euro 6c	-	1 + 0,5 für Messunsicherheit
Euro 6d-Temp	2,1	1 + 0,5 für Messunsicherheit
Euro 6d	1 + 0,43 für Messunsicherheit	1 + 0,5 für Messunsicherheit

Des Weiteren gibt es im Rahmen einer RDE-Fahrt Anforderungen, die im Zuge einer Messung eingehalten werden müssen. Ein Auszug der Anforderungen ist nachfolgend angeführt:

- Die Messfahrt soll aus 34 % Stadtanteil, 33 % Überlandanteil und 33 % Autobahnanteil bestehen. Anteile beziehen sich auf die Wegstrecke, eine Zuordnung wird über die Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt (Stadt: $v \leq 60$ km/h, Überland: $60 < v \leq 90$ km/h, Autobahn: $v > 90$ km/h).
- Einstellungen der Nebenverbraucher, wie z. B. Klimaanlage, sollen wie bei einer üblichen Straßenfahrt gewählt werden.
- Die maximale Stillstandzeit der Messfahrt ist beschränkt.
- Start- und Endpunkt der Messfahrt dürfen nicht mehr als 100 m Höhendifferenz zueinander haben.
- Die positiv kumulierten Höhenmeter dürfen die Grenze von 1 200 m / 100 km nicht überschreiten.
- Kein abnormal moderates oder aggressives Fahren.
- Die Umgebungstemperatur darf zu keinem Zeitpunkt höher als 35 °C oder niedriger als -2 °C (bei Euro 6d-Temp) und -7 °C (bei Euro 6d) sein.
- Die Höhenmeter dürfen zu keinem Zeitpunkt über 1 300 m liegen.

Werden die RDE-Tests nach RDE-Gesetz [70] ausgewertet, so werden die NO_x-, PN- und CO-Emissionen im Verhältnis der CO₂-Emissionen der RDE-Fahrt zu den CO₂-Emissionen im WLTC gewichtet. Damit soll der erlaubte individuelle Fahrstil der RDE-Fahrt auf die Zyklusdynamik des WLTC bezogen werden. Zusätzlich wird eine Korrektur der Messdaten für Fahrten im erweiterten Bereich von Höhenmetern oder Umgebungstemperatur angewandt.

4 Simulationsprogramm PHEM

Die HBEFA-Emissionsfaktoren werden mit dem Simulationsprogramm PHEM erstellt. Die nachfolgende Beschreibung des Simulationsprogramms PHEM ist aus [13], [16], [18], [52] und [81] entnommen.

Das Simulationsprogramm PHEM wurde am IVT (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik) der TU Graz Ende der 90er Jahre entwickelt. Um auch aktuelle Motor- und Fahrzeugtechnologien berücksichtigen zu können, wird PHEM ständig weiterentwickelt. PHEM berechnet Kraftstoffverbrauch und Emissionen in 1 Hz für einen gegebenen Fahrzyklus. Die Berechnung wird basierend auf der Fahrzeuglängsdynamik und Motorkennfeldern für Kraftstoffverbrauch und Emissionen durchgeführt (Abbildung 4.1). Die für die Zyklen notwendige Motorleistung wird aus Fahrwiderständen, Steigung, Massenträgheit sowie aus den Verlusten zwischen Getriebe und Motor berechnet. Zusätzlich kann auch die mechanische Nebenverbraucherleistung berücksichtigt werden. Die Motordrehzahl kann vorgegeben oder mittels Reifendurchmesser und Übersetzung der Achse sowie des eingelegten Gangs berechnet werden. Sind die Gänge für einen Zyklus nicht bekannt, so kann auf das Schaltmodell von PHEM zurückgegriffen werden. Kraftstoffverbrauch und Emissionen werden mit Motorleistung und -drehzahl aus Kennfeldern interpoliert. Darüber hinaus gibt es in PHEM ein Modell zur detaillierten Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems. Dabei fließt u.a. der Wärmeübergang zwischen Abgas und Abgasnachbehandlungssystem sowie zwischen Abgasnachbehandlungssystem und Umgebung in die Simulation der Katalysatortemperaturen und damit in das Konvertierungsverhalten des Abgasnachbehandlungssystems ein.

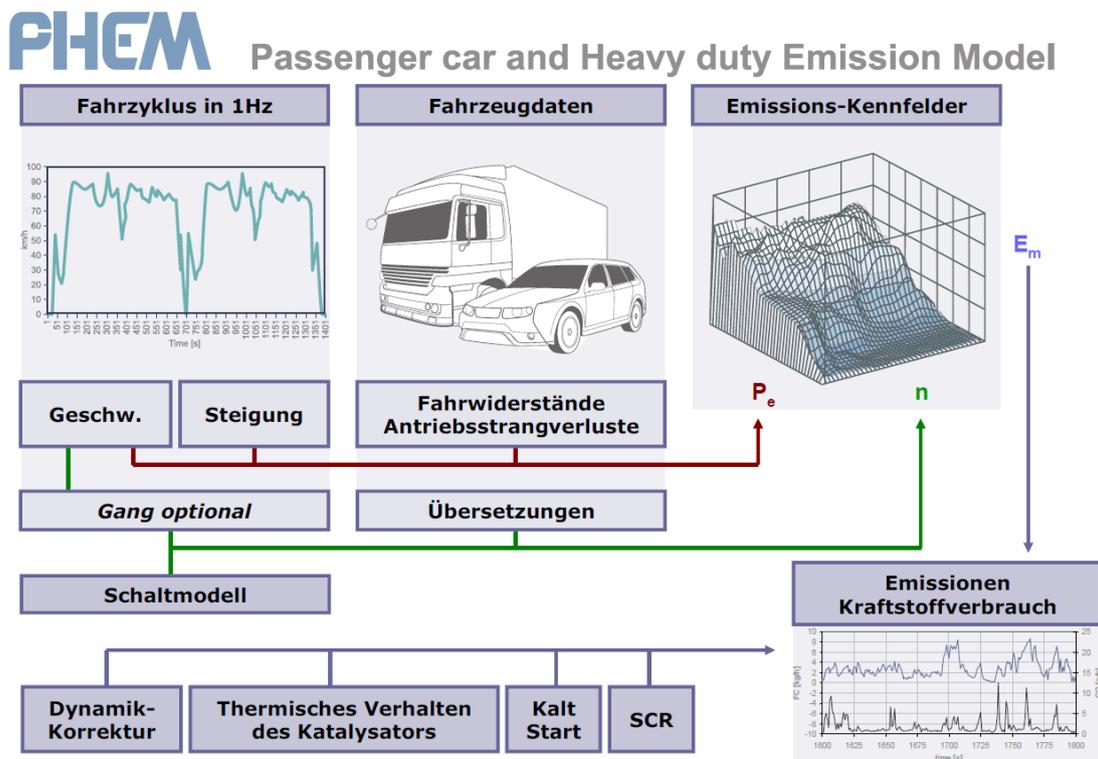


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Simulationsprogramms PHEM [18]

Da das Fahrzeuglängsdynamikmodell aus physikalischen Zusammenhängen die Motorleistung und -drehzahl berechnet, kann mit diesem Modell jeder erdenkliche Fahrzustand dargestellt werden. Die Simulation von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Massen in Kombination mit Steigungen und variablen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen kann somit durch das Modell ebenso veranschaulicht werden, wie die Auswirkungen eines unterschiedlichen Schaltverhaltens durch den Fahrer.

PHEM wird als Simulationsprogramm für die Erstellung von Emissionsfaktoren für das HBEFA herangezogen. Für die Simulation von Emissionsfaktoren wurde für jede HBEFA-Version ein vordefinierter Satz von PHEM-Durchschnittsfahrzeugen erstellt, die durchschnittliche Daten für alle relevanten Fahrzeugkategorien in Bezug auf z. B. Masse und Fahrwiderstände darstellen. Aus den Emissionsmessdaten können mit PHEM auch Kennfelder erstellt werden. Dabei werden die gemessenen Emissionen nach Motorleistung und -drehzahl in Kennfeldern eingerastert. Mit den PHEM-Durchschnittsfahrzeugen, PHEM-Kennfeldern sowie mit den repräsentativen Verkehrssituationen können die HBEFA-Emissionsfaktoren simuliert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde PHEM bezüglich folgender Submodelle erweitert:

- CO₂-Leistungsinterpolationsmethode zur Berücksichtigung von Messungen ohne bekannter Motorleistung (z. B. Messungen im realen Straßenverkehr).
- Erweiterung des vorhandenen Abgasnachbehandlungssystems, um auch Niederlastzyklen (z. B. Stausituationen) korrekt abbilden zu können.

Nachfolgend werden die für PHEM entwickelten Submodelle im Detail präsentiert. Zusätzlich wurde nach Implementierung der beiden Submodelle auch eine Validierung des Gesamtmodells PHEM durchgeführt. Die Ergebnisse dazu werden ebenfalls nachfolgend beschrieben.

4.1 CO₂-Leistungsinterpolationsmethode

Für die Kraftstoffverbrauchs-, CO₂- und Schadstoffkennfelderstellung mittels PHEM werden standardmäßig Motorleistung und Motordrehzahl benötigt. Für alle bisherigen Simulationen der HBEFA-Emissionsfaktoren lagen Pkw-Rollenprüfstandtests vor. Aus denen konnte mit bekannter Radleistung die Motorleistung gut abgeschätzt und zusammen mit der gemessenen Motordrehzahl die Kennfelder erzeugt werden. Dabei wurde zuerst der Zeitversatz der Emissionsmessdaten zur Motorleistung und -drehzahl korrigiert, dann gleitende drei Sekunden Mittelwerte gebildet und danach die Kraftstoffverbrauchs- und Emissionswerte (CO₂ sowie Schadstoffe) in Leistungs- und Drehzahlrastern gemittelt.

Durch neue mobile Messsysteme sowie auch durch Einführung der RDE-Tests im Zuge der Typisierung eines Fahrzeugs, nehmen die Messungen im realen Straßenverkehr erheblich zu. Bei den RDE-Tests ist die Motorleistung in den meisten Fällen allerdings nicht bekannt. Eine Berechnung der Motorleistung mittels Fahrzeuglängsdynamik aus Geschwindigkeit und Steigung enthält hohe Unsicherheiten wegen der bei RDE-Tests meist ungenau aufgezeichneten Steigungsdaten sowie möglicher Einflüsse von z. B. Seitenwind oder Fahrbahnbeschaffenheit auf die Fahrwiderstände. Deswegen konnten nach der Standardmethode der Kennfelderstellung keine RDE-Tests berücksichtigt werden. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Methode erarbeitet, um auch RDE-Tests für die Kennfelderstellung heranziehen zu können. Folgende Anforderungskriterien galt es bei der Entwicklung zu berücksichtigen:

- Einfache und kostengünstige Methode, die für eine Vielzahl von Pkw-Messdaten (mehr als 200 Pkw) für HBEFA verwendet werden kann.
- Die Methode soll auch auf Daten von anderen Labors anwendbar sein, die im Rahmen der HBEFA-Entwicklung gesammelt wurden.
- Benötigte Eingabedaten sollen sich auf verfügbare PEMS- und OBD-Daten beschränken.
- Methode soll für Kfz beliebiger Abgasnormen und Motortechnologien anwendbar sein.
- Implementierung der Methode soll in das Simulationsprogramm PHEM ohne größere Softwareadaptionen möglich sein.
- Die Methode soll die durchschnittliche Zyklusmotorleistung mit einer Genauigkeit von +/- 10 % berechnen können.

Anhand der Anforderungskriterien konnte die Ermittlung der Leistung durch Messung (z. B. Drehmomentfelgen am Fahrzeug) ausgeschlossen werden. Diese sind teuer und für eine schnelle und einfache Messung an einer Vielzahl von Pkw nicht geeignet. Ein Abfragen der Motorleistung via OBD-Schnittstelle wurde ebenfalls untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der Abgriff nur bei vereinzelt Pkw und dort auch nur eingeschränkt möglich war. Diese Option konnte nach den Anforderungskriterien ebenfalls ausgeschlossen werden. Mit diesen Erkenntnissen verlagerte sich die Methodenentwicklung in Richtung Ermittlung der Motorleistung mithilfe des Zusammenhangs zwischen Motorleistung, -drehzahl und Kraftstoffverbrauch bzw. CO₂ (CO₂ ist direkt mit dem Kraftstoffverbrauch über die Kohlenstoffbilanz gekoppelt). Die entwickelte CO₂-Leistungsinterpolationsmethode erfüllt die Anforderungskriterien. Die Methode wurde bei der 21. TAP-Konferenz (Transport and Air Pollution Konferenz) in Lyon vorgestellt und ist als Veröffentlichung unter [33] verfügbar. Nachfolgend wird die Methode beschrieben.

4.1.1 Methodenbeschreibung

Die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode berechnet für jeden Zeitschritt die Motorleistung aus dem gemessenen CO₂ und der gemessenen Motordrehzahl basierend auf vorhandene CO₂-Kennfelder des Pkw-Motors. Dafür sind folgende Daten erforderlich:

1. Gemessene Motordrehzahl über z. B. OBD-Schnittstelle oder verbautem Sensor in mindestens 1 Hz zeitlicher Auflösung.
2. CO₂ sowie zumindest eine weitere Emissionskomponente in g/h bzw. g/s, gemessen mit z. B. PEMS in mindestens 1 Hz zeitlicher Auflösung.
3. CO₂-Kennfeld des Pkw-Motors (bei verfügbarem Kraftstoffverbrauchskennfeld kann dieses direkt in ein CO₂-Kennfeld umgerechnet werden).

Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch die Bestimmung der Motorleistung für einen Zeitschritt. Die gemessenen CO₂-Emissionen decken die gesamte benötigte Motorleistung im betrachteten Zeitschritt ab. So werden z. B. auch Nebenverbraucher korrekt berücksichtigt.

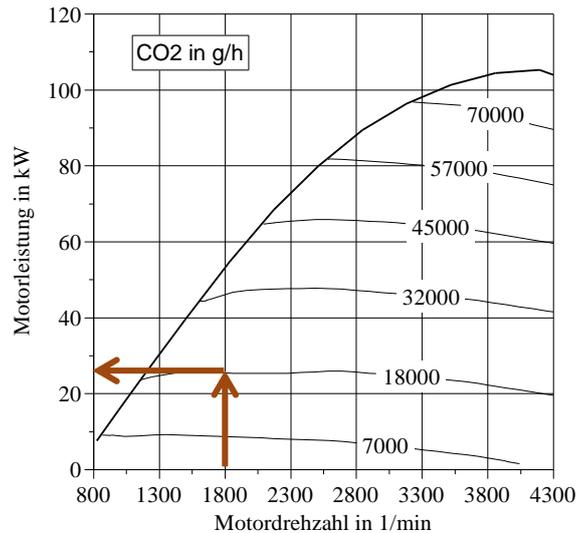


Abbildung 4.2: Beispiel für die Interpolation der Motorleistung aus einem CO₂-Kennfeld

In Abbildung 4.3 sind die mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode errechneten Motorleistungen für einen RDE-Test von einem Diesel-Pkw dargestellt. Jeder blaue Datenpunkt beschreibt die ermittelte Motorleistung für einen Zeitschritt in 1 Hz. Die schwarzen Datenpunkte beschreiben die stationäre Volllast- und Schlepkkurve für das Fahrzeug, ermittelt durch die Messung am Motorprüfstand. Durch die transienten Betriebspunkte einer RDE-Messung und den Messunsicherheiten liegen einige Datenpunkte oberhalb der Volllastkurve, die im Zuge der Kennfelderstellung per Definition auf die Volllastkurve gesetzt werden.

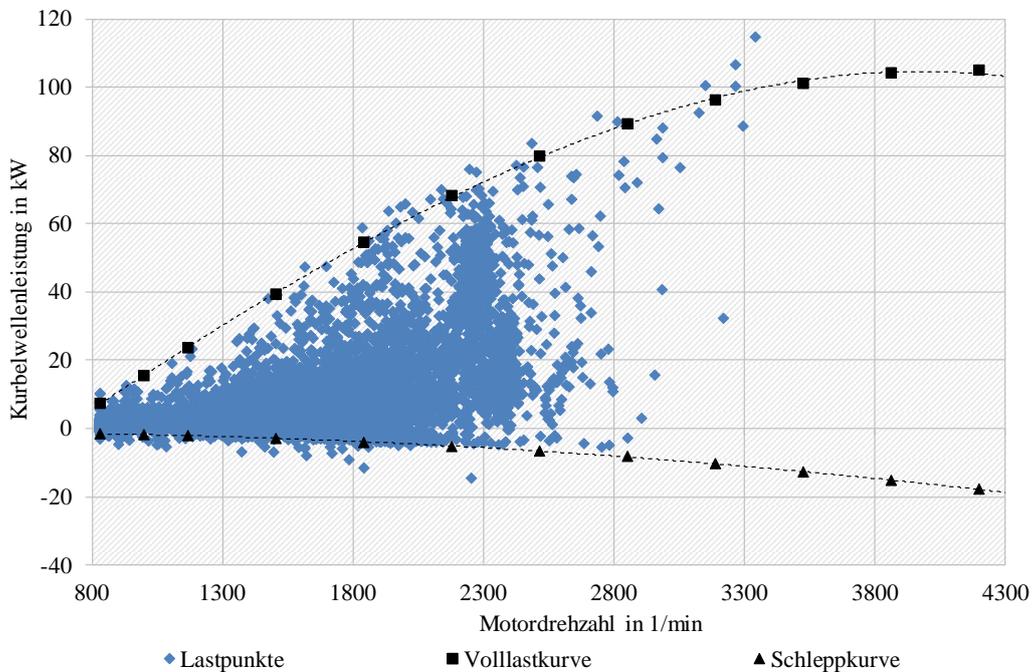


Abbildung 4.3: Beispiel für die mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode errechnete Motorleistung anhand einer RDE-Messung an einem Pkw

Durch die ermittelte Motorleistung können die restlichen Emissionskomponenten (wie z. B. NO_x) in ein Emissionskennfeld als Funktion von Motorleistung und -drehzahl nach der Standardmethode der Kennfelderstellung eingerastert werden. Abbildung 4.4 zeigt exemplarisch ein mit der CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode erstelltes NO_x -Kennfeld aus Pkw-Rollenprüfstandtests und RDE-Tests eines Fahrzeugs.

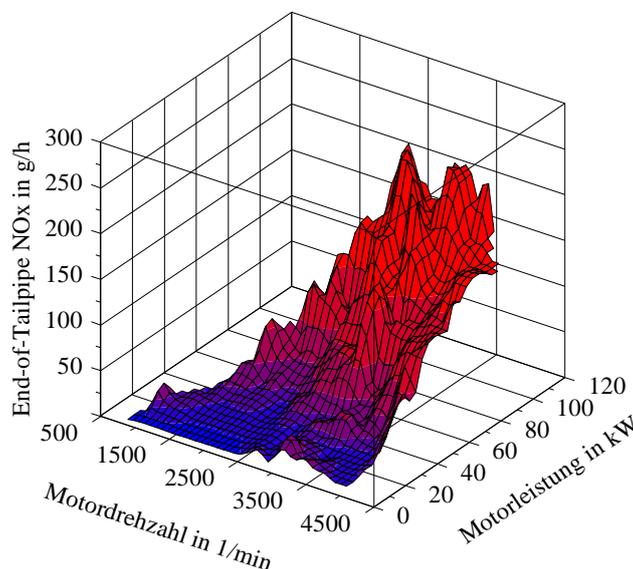


Abbildung 4.4: Ein mit der CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode erstelltes NO_x -Kennfeld

In den meisten Fällen ist vom Fahrzeug allerdings kein fahrzeugspezifisches Kraftstoffverbrauchs- oder CO_2 -Kennfeld bekannt. Daher werden für solche Fälle CO_2 -Kennfelder von Diesel- und Ottomotoren verwendet, die den jeweiligen Durchschnitt einer Abgasnorm darstellen sollen. Die Herleitung der durchschnittlichen CO_2 -Kennfelder ist unter Kapitel 5.2 beschrieben.

Durch die Verwendung von durchschnittlichen CO_2 -Kennfeldern umfasste die Entwicklung der CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode zusätzlich folgende Themengebiete:

- Normierungs- und Entnormierungsoptionen der CO_2 -Kennfelder: Die durchschnittlichen CO_2 -Kennfelder sollen normiert werden können, damit eine Anwendung für verschiedenste Leistungsklassen einer Motortechnologie und Abgasnorm durchgeführt werden kann.
- CO_2 -Kennfeldjustierung: Für den Fall, dass für einen Pkw Rollenprüfstandtests vorliegen, soll das durchschnittliche CO_2 -Kennfeld für den jeweiligen Pkw angepasst werden können, sofern das durchschnittliche CO_2 -Kennfeld erheblich vom fahrzeugspezifischen CO_2 -Kennfeld abweicht.

Normierungsoptionen und Kennfeldjustierung werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

4.1.2 Normierungs- und Entnormierungsoptionen der CO₂-Kennfelder

Für die CO₂-Kennfelder wurde eine Normierung entwickelt, um ihre Anwendung für alle Motorleistungsklassen zu ermöglichen. Der vereinfachte Ansatz besteht darin, ein CO₂-Kennfeld für Fahrzeuge mit gleicher Motortechnologie, aber unterschiedlichen Motorleistungen zu skalieren. Dafür wurden Optionen für Normierungen von CO₂-Kennfeldern ausgearbeitet. Zur Evaluierung der besten Option wurden gemessene CO₂-Kennfelder normiert und dann gemäß den Daten eines zweiten gemessenen Motors, mit gleicher Motortechnologie aber abweichender Nennleistung, entnormiert. Dafür wurden jeweils zwei Diesel- und Ottomotoren der Abgasnorm Euro 6b mit ähnlicher Laufleistung und gleicher Technologie, aber unterschiedlicher Motorleistung, auf dem Motorprüfstand vermessen. Die Messdaten vom Motorprüfstand wurden bei einer mittleren Umgebungstemperatur von 23 °C aufgenommen.

Das Kriterium für die beste Normierungsoption, der nachfolgend beschriebenen drei Optionen, war die geringste Abweichung zwischen dem durch die Normierung transformierten CO₂-Kennfeld des einen Motors und dem gemessenen CO₂-Kennfeld des anderen Motors. Die Abweichung wurde durch Mittelwertbildung der skalierten CO₂-Werte sowie der gemessenen CO₂-Werte in allen Kennfeldstützstellen nach Gleichung (4.1) bestimmt. Die Lage und Anzahl der Kennfeldstützstellen von den verglichenen CO₂-Kennfeldern sind dabei ident.

$$\text{Abweichung} = \frac{\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \text{skaliertes } CO_{2i} - \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \text{gemessenes } CO_{2i}}{\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \text{gemessenes } CO_{2i}} \quad (4.1)$$

gemessenes CO_{2i} gemessenes Kohlendioxid der Stützstelle i in g/h

i Kennfeldstützstelle dimensionslos

q Anzahl der Stützstellen im Kennfeld dimensionslos

skaliertes CO_{2i} skaliertes Kohlendioxid in Stützstelle i in g/h

Folgende Optionen erschienen für eine Normierung sinnvoll und wurden daher untersucht:

- Option 1: $CO_2 = f(n, P_e)$ (4.2)

mit:

$$n\text{-Normierung mit } \frac{n - n_{\text{Leerlauf}}}{n_{\text{Nenn Drehzahl}} - n_{\text{Leerlauf}}}$$

$$P_e\text{-Normierung mit } \frac{P_e}{P_{\text{Nennleistung}}}$$

$$CO_2\text{-Normierung mit } \frac{CO_2}{P_{\text{Nennleistung}}}$$

- Option 2: $CO_2 = f(n, p_e)$ (4.3)

mit:

$$n\text{-Normierung mit } \frac{n - n_{\text{Leerlauf}}}{n_{\text{Nenn Drehzahl}} - n_{\text{Leerlauf}}}$$

$$p_e\text{-Normierung mit } \frac{p_e}{p_{\text{max}}}$$

$$CO_2\text{-Normierung mit } \frac{CO_2}{P_{\text{Nennleistung}}}$$

- Option 3: $CO_2 = f(c_m, p_e)$ (4.4)

mit:

c_m nicht normiert

p_e -Normierung mit $\frac{p_e}{p_{emax}}$

CO_2 -Normierung mit $\frac{CO_2}{P_{Nennleistung}}$

- Option 4: wie Option 3, nur CO_2 -Normierung mit $\frac{CO_2}{V_H}$
- Option 5: wie Option 3, nur CO_2 -Normierung mit $\frac{CO_2}{h}$

n Motordrehzahl in 1/min

$n_{Leerlauf}$ Leerlaufdrehzahl in 1/min

$n_{Nennleistung}$ Motordrehzahl bei Nennleistung in 1/min

P_e Motorleistung in kW

$P_{Nennleistung}$ Motornennleistung in kW

CO_2 Kohlendioxid in g/h

p_e effektiver Mitteldruck in Pa

p_{emax} maximaler effektiver Mitteldruck in Pa

c_m mittlere Kolbengeschwindigkeit in m/s

V_H Hubraum in l

h Hub in mm

Tabelle 4-1 zeigt die Abweichungen für die Optionen der untersuchten Pkw-Dieselmotoren sowie Pkw-Ottomotoren. Die Abweichungen wurden zwischen dem Kennfeld des 2.0 l-Dieselmotors und dem Kennfeld des ursprünglichen 3.0 l-Dieselmotors, der gemäß den beschriebenen Optionen auf den 2.0 l-Dieselmotor skaliert wurde, nach Gleichung (4.1) berechnet. Ebenfalls wurde das Kennfeld des 2.0 l-Dieselmotors auf den 3.0 l-Dieselmotor skaliert und die daraus resultierenden Abweichungen nach Gleichung (4.1) berechnet. Die Untersuchung der Pkw-Ottomotoren (1.4 l- und 2.0 l-Hubraum) wurden analog zum Dieselmotor durchgeführt.

Tabelle 4-1: Abweichungen der CO_2 -Emissionen für die untersuchten Optionen der Pkw-Dieselmotoren sowie der Pkw-Ottomotoren

Skalierung	Abweichung zur Messung				
	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5
3.0 l zu 2.0 l skaliertes Dieselmotor	3,4 %	1,9 %	5,8 %	-4,5 %	43,2 %
2.0 l zu 3.0 l skaliertes Dieselmotor	-3,2 %	-2,0 %	-5,4 %	4,9 %	-30,1 %
2.0 l zu 1.4 l skaliertes Ottomotor	-0,1 %	-9,1 %	-28,8 %	-15,7 %	7,1 %
1.4 l zu 2.0 l skaliertes Ottomotor	1,0 %	9,3 %	39,5 %	17,8 %	-7,3 %

Um die Umsetzung und Handhabung so einfach wie möglich zu machen, soll für den Pkw-Dieselmotor sowie auch Pkw-Ottomotor dieselbe Option zur Normierung ausgewählt werden. Angesichts dessen, liegen bei Option 1 die besten Ergebnisse vor. Daher wurde Option 1 zur Normierung ausgewählt.

4.1.3 CO₂-Kennfeldjustierung

Die verfügbaren durchschnittlichen CO₂-Kennfelder von Kapitel 5.2 können zu einer ungenauen Zuordnung der Emissionen zur Motorleistung führen. Dies ist der Fall, wenn im untersuchten Pkw Motortechnologien zum Einsatz kommen, die nicht oder nicht ausreichend genug von den durchschnittlichen CO₂-Kennfeldern abgedeckt werden. Daher wurde eine Justierung entwickelt, damit die durchschnittlichen CO₂-Kennfelder für solche Fälle angepasst werden können. Die Justierung kann für jedes Fahrzeug durchgeführt werden, dass am Pkw-Rollenprüfstand vermessen wurde.

Die Vorgehensweise bei der CO₂-Kennfeldjustierung ist dabei wie folgt:

1. Anhand der Pkw-Rollenprüfstandeinstellungen kann mit PHEM der gemessene Zyklus mit dem durchschnittlichen CO₂-Kennfeld nachgerechnet werden. Zur Justierung des durchschnittlichen CO₂-Kennfelds wird das simulierte CO₂ mit dem gemessenen verglichen. Um keinen Einfluss des Kaltstarts zu haben, werden zur Justierung nur CO₂-Emissionen des betriebswarmen Motors verwendet. Abbildung 4.5 zeigt u.a. die normiert gemessenen (blaue Datenpunkte) und simulierten CO₂-Werte (rote Datenpunkte) über die normierte Motorleistung für einen Diesel-Pkw im CADC. Jeder Datenpunkt stellt den CO₂- und Motorleistungsmittelwert über 20 s dar, um Unsicherheiten bezüglich der zeitlichen Zuordnung zwischen CO₂ und Motorleistung zu vermeiden.
2. Die CO₂- und Motorleistungsmittelwerte über 20 s können durch lineare Funktionen gut beschrieben werden. Ein solch linearer Zusammenhang wird hier als „Veline“, abgeleitet von „Vehicle-Line“, bezeichnet. Die Velines wurden bereits in der Vergangenheit am IVT für z. B. WLTP (Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Procedure)-Korrekturen [15] oder für Korrekturen der Klimaanlage [21] verwendet. Die Velines ähneln den bekannten Willans-Linien [65], sind aber nicht auf eine konstante Motordrehzahl beschränkt. Die Velines sind die Basis für die Korrekturfunktion, um das durchschnittliche CO₂-Kennfeld zu justieren.

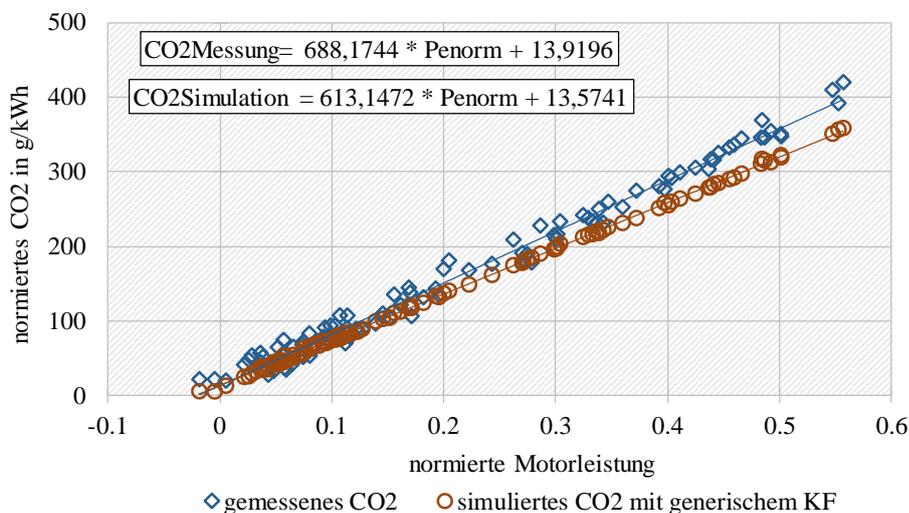


Abbildung 4.5: Beispiel für gemessene und simulierte CO₂-Emissionen im CADC von einem Diesel-Pkw mit durchschnittlichem CO₂-Kennfeld

3. Mit der Korrekturfunktion, bestimmt aus der Differenz der Velines, kann das durchschnittliche CO₂-Kennfeld justiert werden. Für die in Abbildung 4.5 dargestellten Daten errechnet sich die Korrekturfunktion $\Delta CO_{2\text{Differenz}}(P_{enorm})$ wie folgt:

$$CO_{2\text{Messung}}(P_{enorm}) = 688,1744 * P_{enorm} + 13,9196 \quad \dots \text{fahrzeugspezifische Funktion} \quad (4.5)$$

$$CO_{2\text{Simulation}}(P_{enorm}) = 613,1472 * P_{enorm} + 13,5741 \quad \dots \text{fahrzeugspezifische Funktion} \quad (4.6)$$

$$\Delta CO_{2\text{Differenz}}(P_{enorm}) = CO_{2\text{Messung}}(P_{enorm}) - CO_{2\text{Simulation}}(P_{enorm}) \quad (4.7)$$

Für jede Stützstelle im durchschnittlichen CO₂-Kennfeld wird das $\Delta CO_{2\text{Differenz}}$ mittels der Korrekturfunktion berechnet und danach zum CO₂-Wert des durchschnittlichen CO₂-Kennfelds addiert (Gleichung (4.8)). Die Korrektur wird nur für positive Motorleistungen durchgeführt, um die Lage der Schleppekurve im Kennfeld nicht zu verfälschen. Auf der Schleppekurve ist das CO₂ durch Schubabschaltung null.

für $P_{enorm} > 0$ gilt:

$$CO_{2\text{justiertesKF}}(P_{enorm}) = CO_{2\text{Basis}}(P_{enorm}) + \Delta CO_{2\text{Differenz}}(P_{enorm}) \quad (4.8)$$

4. Wird mit dem justierten CO₂-Kennfeld erneut der gemessene Zyklus nachgerechnet und mit der Messung verglichen, so sind die Velines nahezu deckungsgleich. Das Ergebnis in Abbildung 4.6 zeigt eine erfolgreiche Justierung. Für eine Kennfeldjustierung mit guter Abdeckung des gesamten Kennfelds sollen vor allem dynamische Zyklen mit Hochlastanteilen, wie z. B. der CADC oder ERMES, verwendet werden.

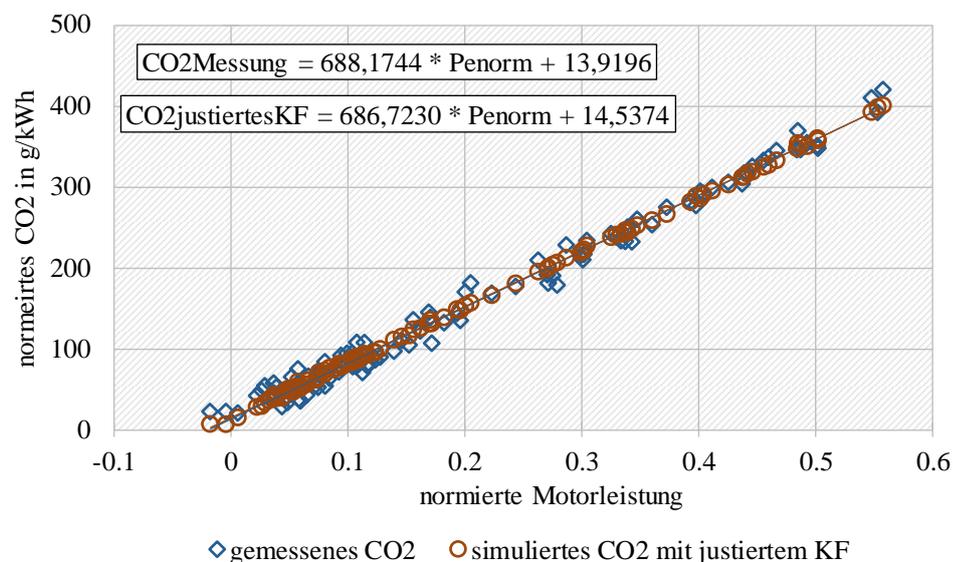


Abbildung 4.6: Beispiel für gemessene und simulierte CO₂-Emissionen im CADC von einem Diesel-Pkw mit justiertem CO₂-Kennfeld

Mit der beschriebenen Vorgehensweise können die durchschnittlichen CO₂-Kennfelder fahrzeugspezifisch justiert und somit mögliche Abweichungen zwischen Messung und Simulation verringert werden. Um die CO₂-Kennfeldjustierung vornehmen zu können, sind Messdaten von Pkw-Rollenprüfstandtests sowie die zugehörigen Pkw-Rollenprüfstandeinstellungen erforderlich. Im nachfolgenden Kapitel werden Ergebnisse der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode mit und ohne CO₂-Kennfeldjustierung gezeigt.

4.1.4 Validierung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode

Die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode wurde anhand mehrerer Fahrzeuge getestet, um eine Aussage hinsichtlich Genauigkeit und Robustheit der entwickelten Methode zu erhalten. Dafür wurde die Validierung an jeweils fünf Dieselfahrzeugen (ID 211, 245, 259, 261 und 264) und Ottofahrzeugen (ID 193, 216, 246, 255 und 274) mit der Abgasnorm Euro 6b durchgeführt. Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2 in Anhang A zeigen die wichtigsten Fahrzeugdaten jener Pkw, die für die Validierung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode verwendet wurden.

Als Zyklen wurden der CADC⁴, ERMES und RWC herangezogen. Die Umgebungstemperatur der gemessenen Zyklen betrug zwischen 20 °C und 25 °C. Wie bereits erwähnt, wurde die Validierung nur mit Zyklusdaten durchgeführt, bei denen der Motor und das Abgasnachbehandlungssystem bereits Betriebstemperatur hatten. Für die Messungen am Pkw-Rollenprüfstand wurden die entsprechenden Einstellungen für CADC, ERMES und RWC verwendet [36]. Als Referenzgröße für die Validierung wurde vom Pkw-Rollenprüfstand die gemessene Leistung des jeweiligen untersuchten Fahrzeugs herangezogen. Diese bezieht sich durch das Einstellprozedere der Fahrwiderstände auf die Antriebsachse des Fahrzeugs. Für den Vergleich mit der aus dem CO₂-Kennfeld interpolierten Motorleistung wurde als gemeinsamer Bezugspunkt die Kurbelwelle des Motors definiert. Daher wurde die gemessene Prüfstandleistung unter Berücksichtigung eines konstanten Getriebewirkungsgrad von 96 % auf die Kurbelwelle des Motors zurückgerechnet. Die Beurteilung der Genauigkeit und Robustheit der entwickelten Methode wurde mittels der Abweichung zwischen Simulation und Messung durchgeführt. Zusätzlich erschien eine Beurteilung mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 sinnvoll. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist nach [26] ein Gütemaß zum Beschreiben eines linearen Zusammenhangs und gibt an, wie gut die unabhängige Variable die Varianz der abhängigen erklären kann. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt zwischen 0 (unbrauchbares Modell) und 1 (perfektes Modell). Je besser die durch die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode bestimmte Motorleistung zur Rollenprüfstandleistung passt, desto geringer ist die Abweichung und desto näher liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 bei 1.

Für die untersuchten Dieselfahrzeuge wurde das gemessene CO₂, die gemessene Motordrehzahl und das selbe normierte durchschnittliche CO₂-Kennfeld für Dieselmotoren verwendet. Das normierte durchschnittliche CO₂-Kennfeld wurde mit der Nennleistung des entsprechenden Fahrzeugs entnormiert. Als exemplarisches Beispiel wird in Abbildung 4.7 der sekundliche Leistungsvergleich für Fahrzeug 211 im CADC dargestellt. In der Abbildung ist die positive gemessene Prüfstandleistung (in Blau) für die ersten 1 000 s ersichtlich. Die punktierte rote Linie ist die mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode interpolierte Leistung. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf insgesamt gut reproduziert werden kann, allerdings die lokalen Maxima teilweise überschätzt werden. Dies ist auf die durchschnittlichen Daten für CO₂-Kennfeld und Vollastlinie zurückzuführen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass bei niedrigen Leistungen der Verlauf versetzt ist. Dies ist auf den unter Kapitel 5.1.1.1 beschriebenen Zeitversatz der CO₂-Emissionen zwischen Motorauslass und Messstelle zurückzuführen, der in diesem Fall mit einer konstanten Zeitverschiebung korrigiert wurde. Der Zeitversatz für die

⁴ CADC-Zyklen mit Maximalgeschwindigkeit von 132 km/h.

konstante Zeitverschiebung wurde anhand der Hochlastphasen im Zyklus ermittelt, weshalb die Zuordnung in den Niederlastphasen ungenau ist. Eine korrekte Zuordnung in den Nieder- sowie Hochlastphasen ist nur mittels einer variablen Zeitverschiebung möglich. Um diese anwenden zu können, muss u.a. der Abgasmassenstrom verfügbar sein [76]. Dieser wird aufgrund des CVS-Messprinzips allerdings nur optional erfasst, was bei den untersuchten Fahrzeugen nicht der Fall war. Für Fahrzeug mit der ID 211 liegt im CADC eine durchschnittliche Abweichung der interpolierten zur gemessenen Leistung von unter 1,5 % ohne zusätzlicher Kennfeldjustierung nach Kapitel 4.1.3 vor. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt für den betrachteten Zyklus bei 0,87.

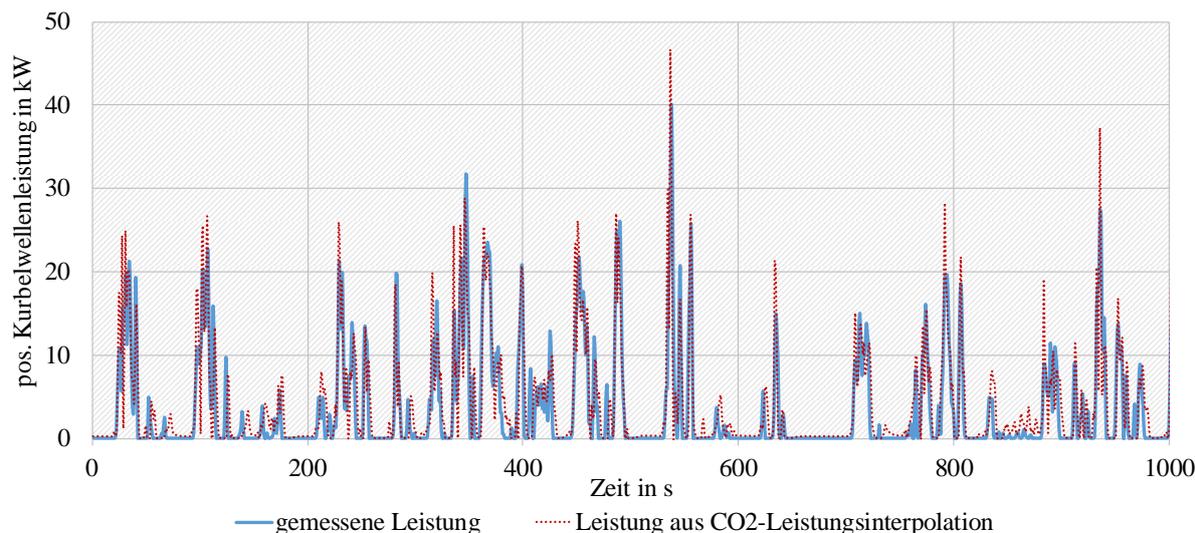


Abbildung 4.7: Beispiel zur Validierung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode anhand Fahrzeug 211 im CADC

Analoge Validierungen wurden für alle weiteren neun Fahrzeuge durchgeführt. Für die Ottofahrzeuge wurde ein normiertes durchschnittliches CO₂-Kennfeld für Ottomotoren verwendet.

Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse der Validierung. Jeder Datenpunkt repräsentiert dabei den durchschnittlichen positiven Leistungswert an der Kurbelwelle eines Zyklus von einem Fahrzeug. Sind die gemessene Leistung sowie die Leistung aus der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode ident, liegt der Datenpunkt auf der 45°-Linie. Je größer die Abweichung ist, desto größer ist auch der Abstand zur 45°-Linie. Da im Zuge der Validierung sechs von den zehn Fahrzeugen erhöhte Abweichungen aufwiesen, wurde eine fahrzeugspezifische Justierung der durchschnittlichen CO₂-Kennfelder nach Kapitel 4.1.3 durchgeführt. Die Ergebnisse mit justierten CO₂-Kennfeldern sind ebenfalls in Abbildung 4.8 dargestellt. Nicht gefüllte Datenpunkte repräsentieren die Verwendung von durchschnittlichen CO₂-Kennfeldern. Hingegen repräsentieren Datenpunkte mit Füllung die Ergebnisse mit justierten CO₂-Kennfeldern.

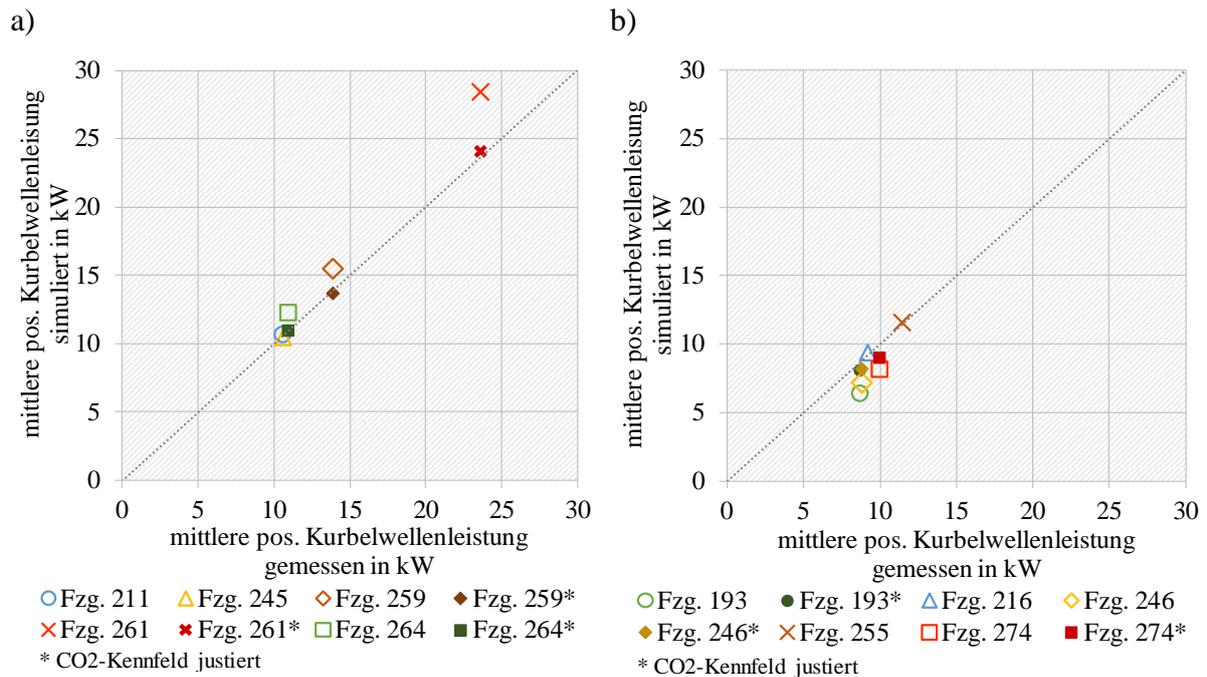


Abbildung 4.8: Vergleich der am Rollenprüfstand gemessenen Leistung mit der mittels CO₂-Leistungsinterpolationsmethode berechneten Leistung der untersuchten Diesel- (a) und Ottofahrzeuge (b) mit und ohne Kennfeldjustierung

Aus Tabelle 4-2 können die Abweichungen der Leistungsberechnung mit den zugehörigen R²-Werten entnommen werden. Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen für jeweils zwei Diesel- und Otto-Pkw ohne Kennfeldjustierung unter +/- 5 % liegen. Die R²-Werte dieser vier Fahrzeuge liegen über 0,8.

Für die Dieselfahrzeuge mit der ID 259, 261 und 264 hat das durchschnittliche CO₂-Kennfeld des Dieselmotors einen zu guten Wirkungsgrad und in Folge dessen wird für gegebene CO₂- und Motordrehzahlmessdaten eine zu hohe Motorleistung berechnet. Das durchschnittliche CO₂-Kennfeld des Ottomotors hat für drei Fahrzeuge (ID 193, 246 und 274) einen zu schlechten Wirkungsgrad. D.h. für gegebene CO₂- und Motordrehzahlmessdaten wird eine zu geringe Motorleistung ermittelt. Deshalb wurde bei diesen erwähnten Diesel- und Ottofahrzeugen eine Justierung der durchschnittlichen CO₂-Kennfelder vorgenommen. Die Abweichungen sind durch die Justierung erheblich gesunken, die R²-Werte sind unverändert geblieben bzw. geringfügig besser geworden.

Tabelle 4-2: Abweichungen und R²-Werte der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode mit und ohne Kennfeldjustierung

Fahrzeug ID	Zyklus	Abweichung zur Prüfstandleistung		Bestimmtheitsmaß R ²	
		Durchschnittliches CO ₂ -Kennfeld	Mit justiertem CO ₂ -Kennfeld	Durchschnittliches CO ₂ -Kennfeld	Mit justiertem CO ₂ -Kennfeld
211 (Diesel)	CADC	1,4 %	keine Justierung	0,87	keine Justierung
245 (Diesel)	CADC	-1,3 %	keine Justierung	0,82	keine Justierung

Fahrzeug ID	Zyklus	Abweichung zur Prüfstandleistung		Bestimmtheitsmaß R ²	
		Durchschnittliches CO ₂ -Kennfeld	Mit justiertem CO ₂ -Kennfeld	Durchschnittliches CO ₂ -Kennfeld	Mit justiertem CO ₂ -Kennfeld
259 (Diesel)	RWC	11,7 %	-1,3 %	0,74	0,74
261 (Diesel)	ERMES V8	20,5 %	2,1 %	0,89	0,90
264 (Diesel)	CADC	12,5 %	0,4 %	0,85	0,85
193 (Otto)	CADC	-26,3 %	-6,9 %	0,88	0,90
216 (Otto)	RWC	-1,9 %	keine Justierung	0,87	keine Justierung
246 (Otto)	CADC	-18,5 %	-7,2 %	0,84	0,85
255 (Otto)	CADC	1,1 %	keine Justierung	0,95	keine Justierung
274 (Otto)	ERMES V8	-18,1 %	-9,7 %	0,72	0,74

Werden die Abweichungen und R²-Werte für Diesel- bzw. Ottofahrzeuge zusammengefasst, so ergeben sich die in Tabelle 4-3 ersichtlichen Werte. Für Diesel- sowie Ottofahrzeuge ergeben sich durchschnittliche Abweichungen unter +/-15 % zur gemessenen Leistung, wenn die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode mit den durchschnittlichen CO₂-Kennfeldern angewandt wird. Die Abweichungen können erheblich vermindert werden, wenn die durchschnittlichen CO₂-Kennfelder justiert werden. Werden bei Fahrzeugen mit höheren Abweichungen die CO₂-Kennfelder justiert, so liegen die Abweichungen innerhalb +/-5 %⁵. Die R²-Werte liegen alle über 0,8.

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Abweichungen und R²-Werte bei Anwendung der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode

Fahrzeug-gruppierung	Abweichung zur Prüfstandleistung		Bestimmtheitsmaß R ²	
	Durchschnittliches CO ₂ -Kennfeld	Miteinbeziehen von justierten CO ₂ -Kennfeldern ⁵	Durchschnittliches CO ₂ -Kennfeld	Miteinbeziehen von justierten CO ₂ -Kennfeldern ⁵
Diesel	11,3 %	0,5 %	0,84	0,84
Otto	-11,2 %	-3,9 %	0,85	0,86

⁵ Dafür wurden bei Fahrzeugen, bei denen eine CO₂-Kennfeldjustierung vorgenommen wurde, die justierten Daten herangezogen. Wurde keine CO₂-Kennfeldjustierung vorgenommen, so wurden die mit dem durchschnittlichen CO₂-Kennfeld berechneten Daten verwendet.

Für die entwickelte CO₂-Leistungsinterpolationsmethode konnte nach der Validierung folgende Schlussfolgerung getroffen werden:

- Es wurde eine einfache und kostengünstige Methode entwickelt, die für RDE-Tests die Motorleistung berechnet. Dafür werden nur Eingabedaten benötigt, die im Rahmen eines RDE-Tests vorliegen.
- Mit den verfügbaren durchschnittlichen CO₂-Kennfeldern von Kapitel 5.2 kann die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode für Diesel- sowie Otto-Pkw aller Abgasnormen angewendet werden. Sollten von einem Pkw Rollenprüfstandtests verfügbar sein, so können die durchschnittlichen CO₂-Kennfelder zusätzlich justiert werden.
- Werden durchschnittliche CO₂-Kennfelder verwendet, so lagen bei den untersuchten Fahrzeugen Abweichungen der berechneten Leistung unter +/-30 % bei einem R²-Wert über 0,7 vor. Dabei sei aber erwähnt, dass nicht alle Motortechnologien in den durchschnittlichen CO₂-Kennfeldern, aufgrund fehlender Daten zum Zeitpunkt dieser Validierung, berücksichtigt werden konnten. Daher können Abweichungen in dieser Größenordnung vorliegen. Um fehlende Motortechnologien besser abzudecken, können die durchschnittlichen CO₂-Kennfelder justiert werden.
- Die Abweichungen stammen sowohl aus Unterschieden im spezifischen Kraftstoffverbrauch des Versuchsfahrzeuges zum durchschnittlichen Kennfeld, als auch aus den Annahmen zu den Verlusten in Achse, Getriebe und Radlagern sowie Leistungsbedarf durch Nebenverbraucher.
- Wird das durchschnittliche CO₂-Kennfeld justiert, so lagen die Abweichungen aller untersuchten Fahrzeuge unter +/- 10 % bei einem R² größer 0,7. Im Durchschnitt lagen die Abweichungen der untersuchten Diesel- sowie Ottofahrzeuge mit justierten CO₂-Kennfeldern innerhalb +/- 5 %.
- Die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode kann auch für Hybridfahrzeuge verwendet werden, um die Leistung des Verbrennungsmotors zu bestimmen. Wie bei den konventionellen Fahrzeugen ist auch bei den Hybridfahrzeugen zu beachten, dass Kaltstartphasen des Verbrennungsmotors nicht berücksichtigt werden können, da die Leistung nur für warme Motorbetriebsphasen korrekt bestimmt werden kann.

Mit diesen Erkenntnissen hat sich die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode unter Einbeziehung der Anforderungskriterien als adäquate Methode für die Leistungsberechnung herausgestellt. Es können somit RDE-Tests zusätzlich zu den Rollenprüfstandzyklen für die Kennfelderstellung und in weiterer Folge für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für HBEFA berücksichtigt werden.

4.2 Simulation mit detaillierter Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems

Bis einschließlich HBEFA 3.3 wurden die Simulationen von Pkw-Emissionsfaktoren nur mit Kraftstoffverbrauchs- und End-of-Tailpipe Schadstoffkennfeldern durchgeführt. D.h. eine detaillierte Berücksichtigung der Abgasnachbehandlungssysteme für HBEFA wurde aufgrund folgender Punkte bis dato nicht umgesetzt:

- a) Der überwiegende Teil an verfügbaren Pkw-Messdaten bezieht sich auf das Auspuffende, weshalb keine Engine-Out Schadstoffkennfelder und Konvertierungskennfelder der Abgasnachbehandlungssysteme aus den vorhandenen Messdaten erstellt werden konnten.
- b) Messungen zeigten, dass die Konvertierungen von Drei-Wege-Katalysatoren und Dieseloxydationskatalysatoren auf einem hohen Niveau bleiben, sobald die Betriebstemperatur einmal erreicht ist. D.h. eine Simulation mit detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung verbessert nicht die Genauigkeit der Emissionsfaktoren bei Simulation mit betriebswarmen Abgasnachbehandlungssystem und Motor. Die Untersuchung von sogenannten Kaltstarts (kalter Motor und kaltes Abgasnachbehandlungssystem) waren nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Kaltstartzusatzemissionen werden im HBEFA separat berücksichtigt.
- c) Bei NO_x -Speicherkatalysatoren hängt die Konvertierung hauptsächlich von der vom Hersteller implementierten Regenerationsstrategie ab. Die Vielzahl an Parametern, die nötig sind, um diese Regenerationsstrategie zu beschreiben, sind bis dato für die Diesel-Pkw-Flotte nicht bekannt. Des Weiteren zeigte eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung mit detaillierter Simulation des NO_x -Speicherkatalysators keine Verbesserung der Genauigkeit im Vergleich zur Verwendung von End-of-Tailpipe Schadstoffkennfeldern. Wie bereits unter Punkt b) erwähnt, war die Untersuchung des Kaltstartverhaltens nicht Bestandteil dieser Arbeit. [35] [55] [75] [83]
- d) Die Effizienz der SCR-Systeme hängt aufgrund der Betriebsweise stark von der Abgastemperatur ab. Sobald diese im optimalen Betriebsfenster liegt, sind die Konvertierungen von SCR-Systemen auf einem hohen Niveau. Standardmäßig werden die End-of-Tailpipe Schadstoffkennfelder aus Messdaten, die vorwiegend im optimalen Betriebsfenster aufgezeichnet wurden, erstellt. D.h. eine detaillierte Berücksichtigung der Abgasbehandlung würde gegenüber End-of-Tailpipe Schadstoffkennfeldern, in Betriebszuständen im Bereich optimaler SCR-Konvertierung, keine Verbesserung bringen. Allerdings könnten durch die detaillierte Berücksichtigung der Abgasbehandlung, Betriebspunkte außerhalb des optimalen Betriebsfensters besser abgebildet werden. Bis dato fehlten dazu aber entsprechende Untersuchungen.

Messungen von Pkw mit SCR-Systemen im Rahmen dieser Arbeit zeigten, dass während langer Niederlastphasen (außerhalb des optimalen Betriebsfensters) die NO_x -Emissionen steigen. Begründet wird der Anstieg der NO_x -Emissionen durch die sinkende Abgastemperatur in Niederlastphasen. Damit sinkt auch die Temperatur des Abgasnachbehandlungssystems. Unter einer Grenztemperatur wird die Einspritzung von AdBlue unterbrochen, da die Thermo- und Hydrolyse für die Umwandlung in NH_3 nicht mehr stattfinden kann. Der erste Effekt dieses Temperaturabfalls ist die Abnahme der NO_x -Konvertierung, die hauptsächlich auf die langsameren chemischen Reaktionen bei niedrigeren Temperaturen zurückzuführen ist. Während dieser Phase ist in den meisten Fällen noch genügend NH_3 im SCR-Katalysator gespeichert, welches für die Reduktion von NO_x zum Einsatz kommt. Durch diesen NH_3 -Verbrauch sinkt jedoch das NH_3 -Speicherniveau. Dies wiederum verschlechtert die NO_x -Konvertierung weiter. Die Konvertierungsrate sinkt auf null, wenn der NH_3 -Speicher vollständig leer ist.

Sobald die Abgastemperatur wieder über die Grenztemperatur ansteigt, wird auch die AdBlue-Dosierung wieder aktiviert. Damit steigt die NO_x -Konvertierung ebenfalls wieder an und der NH_3 -Speicher des SCR-Systems wird aufgefüllt. [20]

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein NH_3 -Modell entwickelt, das die beschriebenen physikalischen Effekte abbilden kann. Das NH_3 -Modell baut auf bereits bestehende Submodelle in PHEM auf. Im Nachfolgenden werden das in PHEM bereits verfügbare Temperatur- und Katalysatormodell kurz beschrieben, bevor das NH_3 -Modell im Detail erklärt wird.

4.2.1 Temperaturmodell

Ausgehend vom Abgastemperaturkennfeld und Abgasmassenstrom kann für einen beliebigen Zyklus die Temperatur für das Abgas im Abgasstrang sowie für die einzelnen Module des Abgasnachbehandlungssystems (wie z. B. Katalysator oder Rohr) mit einem 0-dimensionalen Modell nach [52] berechnet werden. Bei der Berechnung wird der Wärmeübergang zwischen Abgas und Modul (Konvektion) und zwischen Modul und Umgebung (Konvektion und Strahlung) berücksichtigt. Die Wärmeleitung zwischen den Modulen wird nicht berücksichtigt. [52]

4.2.2 Katalysatormodell

Mit dem ebenfalls in [52] beschriebenen Katalysatormodell werden die End-of-Tailpipe Emissionen basierend auf den Konvertierungen der Engine-Out Emissionen in PHEM berechnet. Diese Methode basiert auf PHEM Engine-Out Schadstoffkennfeldern sowie Konvertierungskennfeldern. Die Konvertierungskennfelder geben den Prozentsatz einer Engine-Out Schadstoffkomponente an, die in Abhängigkeit von der Abgastemperatur und Raumgeschwindigkeit im Katalysator umgewandelt wird. Die Raumgeschwindigkeit gibt das Verhältnis des Abgasvolumenstroms zum Katalysatorvolumen an. Für jede Abgaskomponente, die im Emissionskennfeld vorhanden ist, kann ein Konvertierungskennfeld in PHEM vorgegeben werden. [52]

4.2.3 NH_3 -Modell

Da die Abgastemperatur bei Niederlastfahrten vor allem bei SCR-Systemen aufgrund des NO_x -Reduktionsmechanismus und der baulichen Anordnung hohen Einfluss auf die NO_x -Konvertierung hat, können Abkühleffekte mit den End-of-Tailpipe Kennfeldern nicht korrekt abgebildet werden. Daher war ein Ziel dieser Arbeit, eine Methode zu entwickeln, welche die Abkühleffekte physikalisch korrekt abbildet. Folgende Anforderungskriterien wurden im Zuge der Modellentwicklung berücksichtigt:

- Methode soll den Nutzen der vorhandenen Anzahl an End-of-Tailpipe Messdaten nicht einschränken.
- Methode soll für Diesel-Pkw beliebiger Abgasnorm anwendbar sein.
- Wie auch bei der CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode soll die Methode, ohne größeren Aufwand für die Bedienung, in das Simulationsprogramm PHEM implementiert werden können.
- Die Methode soll die NO_x -Emissionen in Niederlastzyklen im Mittel mit einer Genauigkeit von +/- 25 % simulieren können.

Das entwickelte NH₃-Modell für PHEM erfüllt die aufgezählten Anforderungskriterien. Das Modell wurde bei der 23. TAP-Konferenz in Thessaloniki als Poster präsentiert [40]. Nachfolgend sind die Methode sowie die Validierungsergebnisse beschrieben.

4.2.3.1 Methodenbeschreibung

Um die umfangreichen Messdaten und die daraus verfügbaren End-of-Tailpipe Kennfelder vieler Pkw und LNF weiterhin nutzen zu können, werden mit der neuen Methode lediglich die Zusatzemissionen gegenüber dem in den Kennfeldern abgebildeten „optimalen Betriebszustand“ berechnet.

Das entwickelte NH₃-Modell für Pkw und LNF ist unter [45] beschrieben und arbeitet wie folgt:

- i. Für jeden Zeitschritt werden die Abgastemperaturen nach Kapitel 4.2.1 berechnet. Ist die Abgastemperatur vor dem SCR-Modul über einer definierten Grenztemperatur von 190 °C für die AdBlue-Dosierung, so wird das NH₃-Modell nicht aktiviert und die Emissionsfaktoren werden aus dem End-of-Tailpipe Kennfeld berechnet.
- ii. Sobald die Abgastemperatur unter den Grenzwert für AdBlue-Dosierung fällt, wird das NH₃-Modell aktiviert. Dabei wird in der Simulation das im SCR-Modul gespeicherte NH₃ nach Gleichung (4.9) verbraucht.

$$NH_{3\text{Speicherstand}_{n+1}} = NH_{3\text{Speicherstand}_n} - \left(\frac{NO_{xEO_n} - NO_{xTP_n}}{M_{NO_x}} \right) \times M_{NH_3} \quad (4.9)$$

$NH_{3\text{Speicherstand}_{n+1}}$ NH₃-Speicherstand zum Zeitpunkt n+1 in g

$NH_{3\text{Speicherstand}_n}$ NH₃-Speicherstand zum Zeitpunkt n in g

NO_{xEO_n} Engine-Out NO_x im Zeitschritt n in g

NO_{xTP_n} End-of-Tailpipe NO_x im Zeitschritt n in g

M_{NO_x} Molare Masse für NO₂ in g/mol

M_{NH_3} Molare Masse für NH₃ in g/mol

Durch den Verbrauch des gespeicherten NH₃ nimmt auch die NO_x-Konvertierung immer weiter ab. Diese Verschlechterung wird über einen Korrekturfaktor, der auf die NO_x-Basiskonvertierungsrate angewendet wird, abgebildet. Die NO_x-Basiskonvertierungsrate wird aus den Engine-Out und End-of-Tailpipe NO_x-Kennfeldern berechnet⁶. Der Korrekturfaktor der NO_x-Konvertierung durch abnehmenden NH₃-Speicherstand wurde aus Messungen und Literatur abgeleitet und ist in Abbildung 4.9 dargestellt [39]. Die Abbildung zeigt zum Beispiel, dass die NO_x-Konvertierung bei 0 % NH₃-Speicherstand ebenfalls null ist. Bei ≥ 50 % Speicherstand ist der Korrekturfaktor eins. Eine geringe Temperaturabhängigkeit des Korrekturfaktors kann in der Realität durchaus vorliegen, jedoch konnte diesbezüglich aus den vorhandenen Messdaten und der Literatur nichts abgeleitet werden.

⁶ Diese wurden aus einem kleinen Subsample aller gemessenen Pkw bestimmt, für die auch Rohemissionsniveaus als Messdaten verfügbar waren.

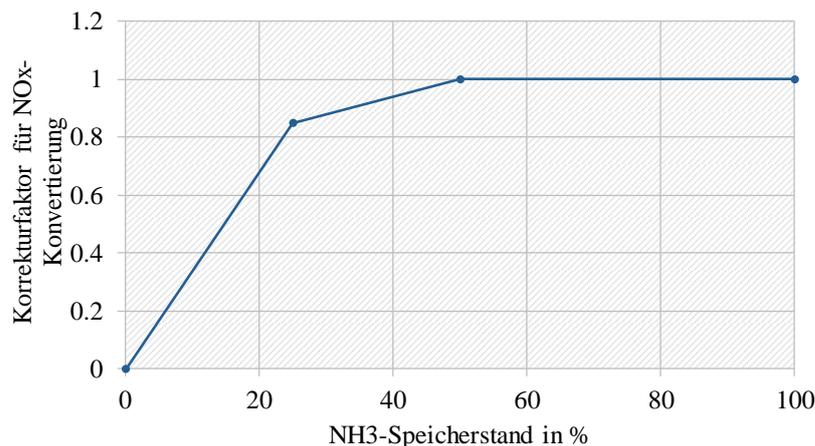


Abbildung 4.9: Exemplarischer Verlauf des Korrekturfaktors für NO_x-Konvertierung als Funktion des NH₃-Speicherstands [39]

Gleichung (4.10) zeigt den Zusammenhang zwischen korrigierter und nicht korrigierter NO_x-Konvertierungsrate sowie dem Korrekturfaktor.

$$k_{NO_xkorr} = k_{NO_x} \times KF_{NH_3} \quad (4.10)$$

k_{NO_xkorr} Korrigierte NO_x-Konvertierungsrate als Funktion des NH₃-Speicherstands dimensionslos

k_{NO_x} NO_x-Basiskonvertierungsrate dimensionslos

KF_{NH_3} Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des NH₃-Speicherstands dimensionslos

Mit den korrigierten NO_x-Konvertierungsraten können die zusätzlichen NO_x-Emissionen aufgrund des abnehmenden NH₃-Speicherstands zur NO_x-Basiskonvertierungsrate berechnet werden. Diese zusätzlichen NO_x-Emissionen werden dann zu den End-of-Tailpipe NO_x-Emissionen im jeweiligen Zeitschritt addiert.

- iii. Sobald nach Punkt ii) die Abgastemperatur die Grenztemperatur wieder überschreitet, werden die NO_x-Emissionen nur aus dem End-of-Tailpipe Kennfeld berechnet. Zusätzlich wird der NH₃-Speicherstand im SCR-Modul wieder aufgefüllt. Für Pkw wurde ein Soll-NH₃-Speicherstand von 50 % für PHEM angenommen. Mit diesem Zielwert sollen Schwankungen des NH₃-Bedarfs ausgeglichen werden können (Hochlastbetrieb mit hohen NO_x-Emissionen und möglicherweise überdosierten AdBlue-Einspritzmengen versus Niederlastbetrieb mit niedrigen NO_x-Emissionen aber auch niedrigen Abgastemperaturen und keiner stattfindenden AdBlue-Dosierung). Die maximale NH₃-Speicherfähigkeit von SCR-Systemen wurde aus der Literatur entnommen und entspricht maximal etwa 1 g je Liter SCR-Volumen [20]. Die NH₃-Speicherfähigkeit ist temperaturabhängig, d.h. mit zunehmender Temperatur nimmt die NH₃-Speicherfähigkeit ab. Eine solche NH₃-Speicherfähigkeit wurde im Modell aber nicht berücksichtigt, da mit dem NH₃-Modell lediglich die Zusatzemissionen bei niedrigen Temperaturen abgebildet werden sollen. Das Auffüllen des NH₃-Speicherstands erfolgt in PHEM mittels zwei verschiedenen AdBlue-Einspritzmassenströmen. Bis 80 % des Soll-NH₃-Speicherstands wird bei Pkw ein durchschnittlicher AdBlue-Massenstrom von 2 500 g/h, darüber von 230 g/h angenommen. In Realität erfolgt vermutlich eine feinere Abstufung der Reduktion des AdBlue-Einspritzmassenstroms, die aber in der Simulation aufgrund fehlender

Messdaten nicht umgesetzt wurde. Der Zusammenhang zwischen AdBlue- und NH₃-Menge kann über den Anteil des Harnstoffs im AdBlue mit 32,5 Massenprozent sowie dem Zusammenhang, dass 1 Mol Harnstoff durch Thermo- und Hydrolyse 2 Mol NH₃ ergibt, hergestellt werden. Gleichung (4.11) und (4.12) zeigen den Zusammenhang zwischen AdBlue-Einspritzmenge und NH₃-Speicherstand. Beim Auffüllen des NH₃-Speicherstands wird der NH₃-Bedarf für die NO_x-Konvertierung im jeweiligen Zeitschritt vernachlässigt. [18] [39]

$$NH_3 \text{ Einspritzmenge} = \left(\frac{\dot{m}_{AdBlue} \times 0.325}{M_{Harnstoff} \times 3600} \right) \times 2 \quad (4.11)$$

$$NH_3 \text{ Speicherstand}_{n+1} = NH_3 \text{ Speicherstand}_n + NH_3 \text{ Einspritzmenge} \times t \times M_{NH_3} \quad (4.12)$$

$NH_3 \text{ Speicherstand}_{n+1}$ NH₃-Speicherstand zum Zeitpunkt n+1 in g

$NH_3 \text{ Speicherstand}_n$ NH₃-Speicherstand zum Zeitpunkt n in g

$NH_3 \text{ Einspritzmenge}$ Eingespritztes NH₃ in mol/s

t AdBlue-Eindosierdauer in s

\dot{m}_{AdBlue} Eingespritzter AdBlue-Massenstrom in g/h

$M_{Harnstoff}$ Molare Masse von Harnstoff in g/mol

M_{NH_3} Molare Masse von NH₃ in g/mol

Zusammenfassend werden für das NH₃-Modell somit folgende PHEM-Eingabedaten benötigt:

1. Engine-Out sowie End-of-Tailpipe NO_x-Kennfeld
2. Abgastemperaturkennfeld
3. Abgasmassenstromkennfeld
4. Korrekturfaktor als Funktion des NH₃-Speicherstands

4.2.3.2 Validierung des NH₃-Modells

Die Validierung des NH₃-Modells in Niederlastzyklen wurde anhand des Diesel-Pkw mit der ID 304 durchgeführt. Der untersuchte Diesel-Pkw ist nach der Abgasnorm Euro 6d-Temp zugelassen und ist mit einem SCR-System im Unterboden ausgestattet. Weitere Fahrzeuge mit Messungen in Niederlastzyklen waren zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht verfügbar. Die wichtigsten Daten des untersuchten Pkw sind in Tabelle 10-1 in Anhang A angeführt.

Das Fahrzeug wurde zusätzlich zum ERMES-Zyklus in einem Niederlastzyklus mit betriebswarmem Motor und Abgasnachbehandlungssystem vermessen. Der Niederlastzyklus wurde von den HBEFA-Verkehrssituationen abgeleitet und soll eine Stausituation repräsentieren. Mit den Messdaten des ERMES V8-Zyklus wurde mittels der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, ein End-of-Tailpipe Emissionskennfeld erstellt. Mithilfe dieses Kennfelds wurde der ERMES-Zyklus mit den Prüfstandeinstellungen (Testmasse und Fahrwiderstände) nachgerechnet. Damit wurde überprüft, ob das Simulationsmodell korrekt aufgesetzt wurde, indem simulierte Leistung an der Kurbelwelle und Emissionen mit den Messdaten verglichen wurden. Danach wurde der Stauzyklus mit deaktiviertem und aktiviertem NH₃-Modell simuliert. Deaktiviert heißt, dass die Emissionen nur aus dem End-of-Tailpipe Kennfeld errechnet wurden. Mit aktiviertem NH₃-

Modell wurden die Emissionen aus dem End-of-Tailpipe Kennfeld berechnet sowie ein NO_x -Aufschlag für jene Zeitschritte, wo die Abgastemperatur vor dem SCR-System unter $190\text{ }^\circ\text{C}$ lag, anhand des beschriebenen NH_3 -Modells durchgeführt. Inputdaten, die für das NH_3 -Modell notwendig aber vom Versuchsfahrzeug nicht verfügbar waren, wurden aus Kapitel 5.5 entnommen. Abbildung 4.10 sowie Tabelle 4-4 zeigen die Ergebnisse. In Abbildung 4.10 ist zusätzlich der Geschwindigkeitsverlauf des Stauzyklus dargestellt. Wie erwartet, gibt es bei deaktiviertem NH_3 -Modell große NO_x -Abweichungen der Simulation zur Messung. Wird das NH_3 -Modell aktiviert, so verringern sich die Abweichungen stark (von 90 % auf unter 1 %). Der kumulierte NO_x -Verlauf zwischen Simulation und Messung ist ähnlich, wenn das NH_3 -Modell aktiviert ist. Mit aktiviertem NH_3 -Modell verschlechtert sich das Bestimmtheitsmaß R^2 geringfügig von 0,74 auf 0,61. Die geringfügige Verschlechterung des Bestimmtheitsmaß R^2 stellt in diesem Fall einen Sonderfall dar, in der Regel wird neben einer starken Verringerung der NO_x -Abweichung auch eine Verbesserung des Bestimmtheitsmaß R^2 erwartet.

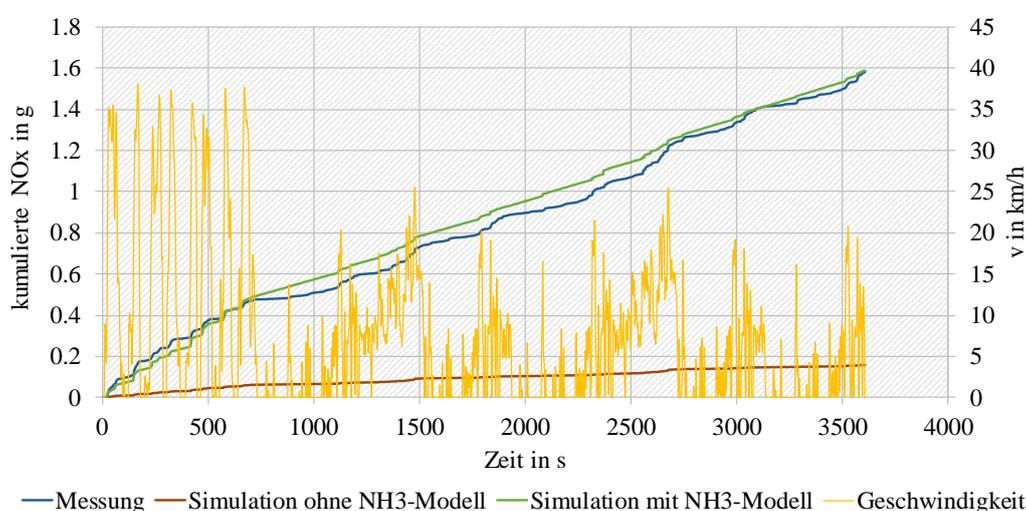


Abbildung 4.10: Vergleich der gemessenen und simulierten NO_x -Emissionen ohne und mit aktiviertem NH_3 -Modell in einem Stauzyklus

Tabelle 4-4: NO_x -Abweichungen und R^2 -Werte der untersuchten Fahrzeuge ohne und mit aktiviertem NH_3 -Modell

Fahrzeug ID	NO_x -Abweichung zur Messung		Bestimmtheitsmaß R^2	
	Deaktiviertes NH_3 -Modell	Aktiviertes NH_3 -Modell	Deaktiviertes NH_3 -Modell	Aktiviertes NH_3 -Modell
304	-90,0 %	0,3 %	0,74	0,61

Mit den Validierungsergebnissen des NH_3 -Modells konnte folgende Schlussfolgerung getroffen werden:

- Mit der entwickelten Methode können weiterhin die Vielzahl an End-of-Tailpipe Messdaten verwendet werden. Emissionsfaktoren werden wie in den vorherigen HBEFA-Versionen aus End-of-Tailpipe Kennfeldern simuliert. Nur bei Zyklen im Niederlastbereich wird das NH_3 -Modell aktiviert. NO_x -Zusatzemissionen werden dann auf die End-of-Tailpipe NO_x -Emissionen aufgeschlagen.

- Durch das NH₃-Modell wurden die NO_x-Abweichungen im Niederlastzyklus des untersuchten Fahrzeugs von 90,0 % auf unter 1 % reduziert. Mit aktiviertem NH₃-Modell verschlechterte sich in diesem Fall das Bestimmtheitsmaß R² geringfügig.

Da die Validierung eine massive Verbesserung der Modellgüte in Niederlastzyklen zeigte und der Ansatz eine physikalisch basierte Nachbildung der NO_x-Emissionen bei niederen Abgastemperaturen darstellt, wurde das NH₃-Modell für die Erstellung der HBEFA-Emissionsfaktoren herangezogen. Damit können speziell Stauzyklen viel besser abgebildet werden. Inwieweit die Modellparameter für die gesamte Flotte an Euro 6d-Temp Diesel-Pkw passen, ist noch offen. Für folgende Aktualisierungen des HBEFA werden weitere Analysen in Niederlastzyklen durchgeführt.

4.3 Validierung Gesamtmodell PHEM

Nach Implementierung der entwickelten CO₂-Leistungsinterpolationsmethode sowie des entwickelten NH₃-Modells wurde das Gesamtmodell PHEM für End-of-Tailpipe CO₂, NO_x, CO, HC, PM und PN validiert. Mit der Validierung soll eine Aussage über die Modellgenauigkeit für die Simulation von Emissionen getroffen werden können. Solche Validierungen von PHEM wurden bereits in der Vergangenheit durchgeführt, allerdings ohne der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden. Bei der Validierung wurde wie folgt vorgegangen:

1. Es wurden Messdaten von jenen Fahrzeugen, die bereits unter Kapitel 4.1.4 für die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode verwendet wurden, herangezogen.
2. Von den Fahrzeugen wurden mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode, anhand von realitätsnahen gemessenen Zyklen, End-of-Tailpipe Schadstoffkennfelder erstellt.
3. Mit diesen Daten erfolgte die Simulation der Zyklen, die für die Kennfelderstellung herangezogen wurden. Zusätzlich wurden auch weitere gemessene Zyklen, die nicht in die Kennfelderstellung miteingeflossen sind, simuliert. Diese sogenannten unabhängigen Zyklen sollen die Aussagekraft über die Modellgenauigkeit steigern.
4. Vergleich der End-of-Tailpipe Emissionen von Messung und Simulation.

In Tabelle 4-5 sind die zur Validierung von PHEM herangezogenen Fahrzeuge mit den verwendeten Zyklen ersichtlich. Für die Validierung wurden Messdaten von den realitätsnahen Zyklen CADC, ERMES und RWC zur Kennfelderstellung verwendet. Dabei wurde für Fahrzeuge, bei denen in Kapitel 4.1.4 eine CO₂-Kennfeldjustierung vorgenommen wurde, auch das justierte CO₂-Kennfeld herangezogen. Für die Validierung wurden zusätzlich auch Messdaten von unabhängigen Zyklen, die nicht in die Kennfelderstellung miteingeflossen sind, verwendet. Dies waren zum Großteil ebenfalls realitätsnahe Zyklen. Bei den drei Fahrzeugen 193, 259 und 274 lagen als unabhängige Zyklen nur WLTC-Messungen vor. Der WLTC ist ein Typisierungszyklus und löste den NEFZ als solchen ab. Die drei erwähnten Fahrzeuge wurden noch nach NEFZ typisiert, weshalb von keiner zyklusoptimierten Betriebsstrategie im WLTC ausgegangen wurde. Eine solche Optimierung würde das Validierungsergebnis verfälschen, da sich der Kraftstoffverbrauch sowie die End-of-Tailpipe Emissionen im Typisierungszyklus und realitätsnahen Zyklus in gleichen Lastpunkten durch eine optimierte oder auch manipulierte Motorsteuerung vorsätzlich unterscheiden könnten. Manipulationen sind nicht gesetzeskonform, wurden allerdings bei einigen Motortypen in der Vergangenheit angewendet (siehe auch Kapitel 5.1.1.4).

Für das Fahrzeug 216 und 246 war als unabhängiger Zyklus jeweils nur eine weitere Messung vom gleichen Zyklus, der für die Kennfelderstellung verwendet wurde, verfügbar. Des Weiteren waren für die Fahrzeug 264 und 274 keine Messwerte von PM-Emissionen verfügbar.

Tabelle 4-5: Verwendete Fahrzeuge und Zyklen zur Validierung des Gesamtmodells PHEM

Fahrzeug ID	Gemessener Zyklus zur Kennfelderstellung	Gemessener Zyklus zur unabhängigen Validierung
211 (Diesel)	CADC	ERMES V7
245 (Diesel)	CADC	RWC
259 (Diesel)	RWC	WLTC
261 (Diesel)	ERMES V8	RWC
264 (Diesel)	CADC	ERMES V8
193 (Otto)	CADC	WLTC
216 (Otto)	RWC	RWC
246 (Otto)	CADC	CADC
255 (Otto)	CADC	ERMES V8
274 (Otto)	ERMES V8	WLTC

Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 zeigen die simulierten zu den gemessenen Emissionen der Diesel- und Ottofahrzeuge. Jeder Datenpunkt beschreibt das Ergebnis eines Zyklus für ein Fahrzeug. Nicht gefüllte Datenpunkte beschreiben dabei die Simulation jener Zyklen, die für die Kennfelderstellung verwendet wurden. Datenpunkte mit Füllung beschreiben die Ergebnisse der simulierten unabhängigen Zyklen. Entspricht die Simulation exakt der Messung, so liegen die Datenpunkte auf der eingezeichneten 45°-Linie. Je weiter die Datenpunkte von der 45°-Linie entfernt sind, desto größer ist die Abweichung zwischen Messung und Simulation für den entsprechenden Zyklus.

Bei den CO₂-Emissionen der Dieselfahrzeuge ist erkennbar, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung vorliegt. Die CO₂-Abweichungen liegen in den meisten Fällen unter 5 %. Bei den restlichen Emissionskomponenten der Dieselfahrzeuge liegen zum Teil größere Abweichungen vor. Vor allem bei den NO_x-Emissionen ist erkennbar, dass die Datenpunkte der unabhängigen Zyklen weiter von der 45°-Linie entfernt liegen. Da die CO₂-Emissionen dieser Zyklen nur geringe Abweichungen aufweisen, könnten die Abgasnachbehandlungssysteme abweichende Betriebsstrategien in den unabhängigen Zyklen gehabt haben. Ebenfalls könnten unterschiedliche Vorkonditionierungen Einfluss auf die Effizienz der Abgasnachbehandlungssysteme gehabt haben. Beides würde in einem anderen End-of-Tailpipe Emissionsniveau resultieren. Ebenfalls liegen auch die Datenpunkte der CO-Emissionen weiter von der 45°-Linie entfernt. Allerdings sei auch erwähnt, dass das Absolutniveau der CO- und HC-Emissionen mit maximal 0,040 g/km gering ist. Bei den PM- und PN-Emissionen gibt es von einem unabhängigen Zyklus einen Ausreißer (vermutlich Messfehler und/oder unterschiedliche DPF-Beladung, da Fahrzeug zwischen den Messungen der beiden Zyklen auf der Straße gefahren wurde).

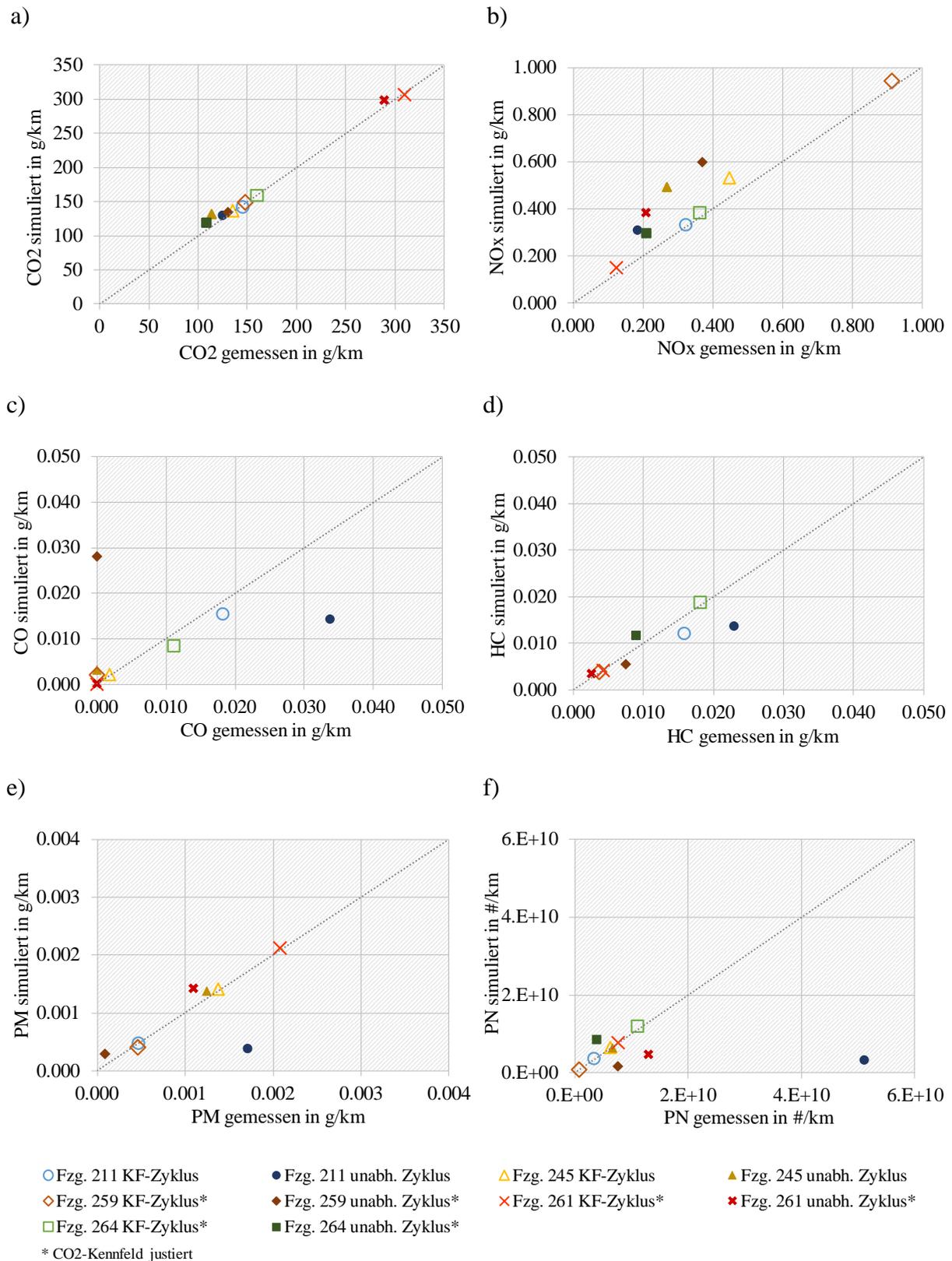


Abbildung 4.11: Validierung Gesamtmodell PHEM anhand Dieselfahrzeuge für CO₂ (a), NO_x (b), CO (c), HC (d), PM (e) und PN (f)

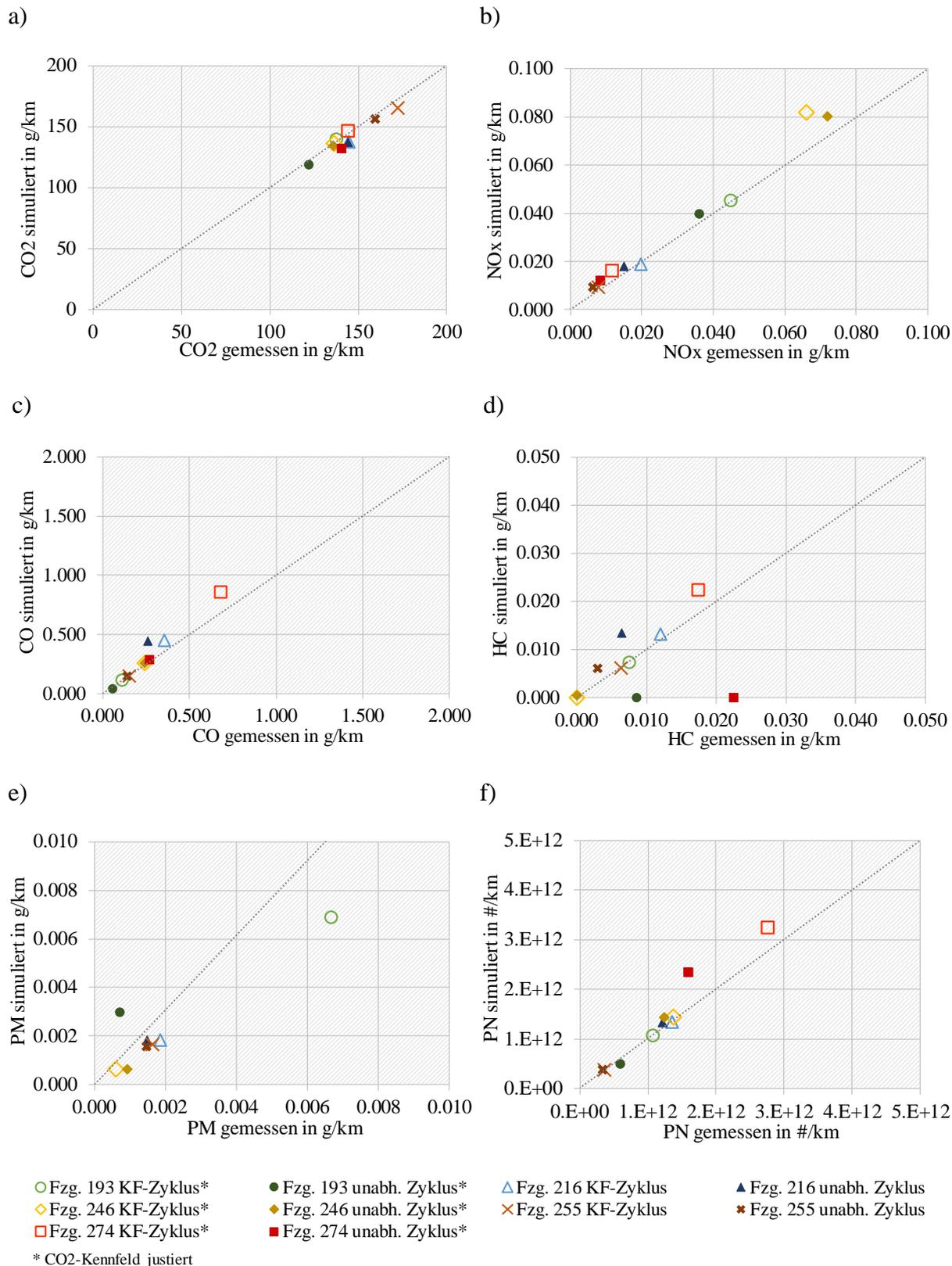


Abbildung 4.12: Validierung Gesamtmodell PHEM anhand Ottofahrzeuge für CO₂ (a), NO_x (b), CO (c), HC (d), PM (e) und PN (f)

Die Validierung der Ottofahrzeuge (Abbildung 4.12) zeigte, dass für die CO₂-, NO_x-, CO-, PM- und PN-Emissionen die Messungen bis auf wenige Ausreißer gut reproduziert werden konnten. Für die HC-Emissionen lagen bei zwei unabhängigen Zyklen höhere Abweichungen vor. Allerdings war auch bei den Ottofahrzeugen das HC-Emissionsniveau sehr gering. Alle gemessenen HC-Emissionen waren im Zyklusmittelwert unter 0,025 g/km.

Da die Abweichungen und R²-Werte der gezeigten Emissionen in Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 im Rahmen dieser Arbeit vor allem in der Detailtiefe des Fahrzeugflottenlevels interessant sind sowie aus Gründen der Übersichtlichkeit, sind in Tabelle 4-6 die fahrzeugspezifischen Daten zu durchschnittlichen Werten für die Diesel- sowie Ottofahrzeuge zusammengefasst. In Tabelle 4-6 flossen sowohl die Zyklen zur Kennfelderstellung, als auch die unabhängigen Zyklen zu gleichen Anteilen ein. Als „Abweichung zur Messung“ ist in der Tabelle 4-6 jene Abweichung angegeben, die zwischen dem Mittelwert aller simulierten Emissionen und dem Mittelwert aller gemessenen Emissionen von einer Emissionskomponente vorliegt. Das „Bestimmtheitsmaß R²“ beschreibt den Mittelwert der R²-Werte der einzelnen Zyklen, wobei das R² von jedem einzelnen Zyklus mit 20 s-Mittelwerten der modalen Mess- bzw. Simulationsdaten berechnet wurde. Die CO₂-Emissionen können im Durchschnitt mit einer Abweichung von unter 5 % simuliert werden. Das durchschnittliche Bestimmtheitsmaß liegt dabei über 0,85. Die Abweichungen der anderen End-of-Tailpipe Emissionskomponenten (bis 51 %) könnten durchaus als hoch interpretiert werden. Allerdings sei dazu erwähnt, dass es sich bei CO und HC um sehr geringe absolute Emissionsniveaus handelt. Geringe absolute Abweichungen resultieren dann in höheren relativen Abweichungen. Zusätzlich könnten die End-of-Tailpipe Emissionen durch unterschiedliche Betriebsstrategien von Motorsteuerung und Abgasnachbehandlungssystem bzw. unterschiedliche Vorkonditionierungen beeinflusst worden sein, sodass beim wiederholten Anfahren desselben Motorbetriebspunkts unterschiedliche End-of-Tailpipe Emissionen vorlagen. Vor allem bei den hier untersuchten Fahrzeugen könnten sich solche Effekte verstärkt bemerkbar gemacht haben, da die Kennfelderstellung aufgrund der Datenverfügbarkeit jeweils nur mit einem Zyklus durchgeführt wurde. Unterschiedliche Betriebsstrategien von Motorsteuerung und Abgasnachbehandlungssystem können in PHEM aufgrund der kennfeldbasierten Simulationsmethode nur bedingt nachgebildet werden. Die Abweichungen können allerdings durch eine Anpassung der erstellten End-of-Tailpipe Schadstoffkennfelder verringert werden (siehe Kapitel 5.8).

Tabelle 4-6: Zusammenfassung der Abweichungen und R²-Werte der untersuchten Diesel- und Ottofahrzeuge im Zuge der Validierung des Gesamtmodells PHEM

Fahrzeug- grup- pierung	Abweichung zur Messung						Bestimmtheitsmaß R ²					
	CO ₂	NO _x	CO	HC	PM	PN	CO ₂	NO _x	CO	HC	PM	PN
Diesel	2,6 %	29,9 %	16,7 %	-21,4 %	-18,7 %	-50,3 %	0,88	0,47	0,19	0,11	0,23	0,36
Otto	-2,4 %	14,9 %	19,9 %	-17,4 %	17,5 %	13,2 %	0,97	0,33	0,49	0,42	0,68	0,74

Die Erkenntnisse der Validierung des Gesamtmodells PHEM können nun wie folgt zusammengefasst werden:

- Die CO₂-Emissionen können im Durchschnitt mit einer Abweichung von unter 5 % bei einem R² über 0,85 simuliert werden.
- Bei NO_x, CO, HC und PM liegen die durchschnittlichen Abweichungen unter 30 %, bei PN unter 55 %. Die R²-Werte sind geringer als bei CO₂. Bei CO und HC der Dieselfahrzeuge lagen die geringsten R²-Werte (unter 0,2) vor. Allerdings sei dazu das geringe Absolutniveau dieser beiden Komponenten erwähnt.

Unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel ausgearbeiteten Validierungsergebnisse wurde das Simulationsprogramm PHEM für die nachfolgend beschriebene Aktualisierung der HBEFA-Emissionsfaktoren herangezogen.

5 Erstellung der Pkw-Emissionsfaktoren für HBEFA 4.1

Nachfolgend ist die Erstellung der HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für konventionelle Pkw beschrieben. Die Emissionsfaktoren geben die durchschnittlichen Emissionen in g/km oder #/km für eine Verkehrssituation an. Die Emissionsfaktoren repräsentieren dabei den Durchschnitt der Emissionen von Diesel- und Otto-Pkw je Abgasnorm der 28 Mitgliedsstaaten in der EU, die auch als EU-28 bezeichnet werden. Daher wird das HBEFA u.a. für die verpflichtende jährliche Emissionsberichterstattung der Mitgliedsstaaten an die EU verwendet. Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, wurden die Emissionsfaktoren mit PHEM erzeugt. Vor der Simulation der Emissionsfaktoren wurden die dafür notwendigen PHEM-Eingabedaten generiert. Nachfolgend ist eine Übersicht der Vorgehensweise gegeben, die im Detail in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben ist:

- a. Erstellung von durchschnittlichen PHEM-Kennfeldern der europäischen Pkw-Flotte für die verschiedenen Abgasnormen der Diesel- und Otto-Pkw. Dafür wurden zuerst die fahrzeugspezifischen Kennfelder mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode nach Kapitel 4.1 erstellt. Die fahrzeugspezifischen Kennfelder gleicher Abgasnorm wurden nach EU-28 Neuzulassungsanteilen zu durchschnittlichen PHEM-Kennfeldern für Diesel- und Otto-Pkw zusammengewichtet. Die Gewichtungsfaktoren wurden dabei aus dem Anteil der Neuzulassungen des jeweiligen Fahrzeugmodells an den Gesamtneuzulassungen errechnet. Die Gewichtung der fahrzeugspezifischen Kennfelder erfolgte auf Kennfeldstützstellenebene, d.h. je Stützstelle wurden die fahrzeugspezifischen Kennfeldwerte zusammengewichtet. Da alle fahrzeugspezifischen Kennfelder die gleiche Lage und Anzahl an Stützstellen aufwiesen, konnte die Gewichtung einfach durchgeführt werden.
- b. Erstellung von PHEM-Durchschnittsfahrzeugen. Die erstellten PHEM-Durchschnittsfahrzeuge beziehen sich auf die durchschnittliche Pkw-Flotte in Deutschland, da die Fahrzeugdaten in einem Projekt für das Umweltbundesamt Deutschland, anhand von in Deutschland gemeldeten Realkraftstoffverbrauchsdaten, angepasst wurden. Anpassungen an Flottenstrukturen und deren Realverbrauch in anderen Ländern werden direkt in der HBEFA-Software durchgeführt [41].
- c. Simulation der Emissionen für repräsentative Verkehrssituationen für die europäische Pkw-Flotte. Die Erstellung der etwa 2 500 repräsentativen Verkehrssituationen war nicht Bestandteil dieser Arbeit. Diese sollen hier dennoch kurz beschrieben werden, um ein vollständiges Bild zu erhalten.

Insgesamt wurden mit den PHEM-Eingabedaten (Durchschnittsfahrzeuge und Kennfelder) etwa 394 000 Emissionsfaktoren von Diesel- und Otto-Pkw für HBEFA 4.1 erzeugt. Die Pkw-Emissionsfaktoren beziehen sich dabei auf betriebswarme Motoren bei 20 °C Umgebungstemperatur und 50 000 km Laufleistung. Für abweichende Umgebungstemperaturen und Kilometerlaufleistungen wurden im Rahmen dieser Arbeit Korrekturfaktoren erarbeitet, die in der HBEFA-Software hinterlegt sind. Die Kaltstartzusatzemissionen wurden von EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) ermittelt und sind ebenfalls in der HBEFA-Software hinterlegt.

5.1 Datenbasis

Für die Erstellung der PHEM-Eingabedaten wurden folgende Daten herangezogen, die nachfolgend kurz beschrieben werden:

- ERMES-Datenbank mit allen Messdaten für die Erstellung der fahrzeugspezifischen PHEM-Kennfelder.
- CO₂-Monitoring-Datenbank mit CO₂-Werten im Typprüfzyklus sowie zugehörige Fahrzeugdaten von neu zugelassenen Fahrzeugen. Aus der Datenbank wurden die Gewichtungsfaktoren der fahrzeugspezifischen PHEM-Kennfelder nach Neuzulassungen in den 28 Mitgliedsstaaten der EU abgeleitet. In der CO₂-Monitoring-Datenbank sind auch Leermasse und Nennleistung enthalten, welche für die Erstellung der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge herangezogen wurden.
- Spritmonitor.de für die finale Anpassung der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge anhand gemeldeter Realkraftstoffverbrauchsdaten von Fahrzeugbesitzern.
- FCD (Floating Car Data) für die Ableitung der repräsentativen Verkehrssituationen für die 28 Mitgliedsstaaten der EU.
- CONOX-Datenbank zur Erstellung der Korrekturfaktoren für unterschiedliche Umgebungstemperaturen und Kilometerlaufleistungen aus Remote-Sensing-Messdaten.

5.1.1 ERMES-Datenbank

Messungen von realitätsnahen Zyklen am Pkw-Rollenprüfstand sowie Messungen im realen Straßenverkehr sind die wichtigste Datengrundlage für repräsentative Emissionsfaktoren. Um eine möglichst große Zahl an verfügbaren Testdaten unabhängiger Labors in Europa nutzen zu können, organisierten bzw. organisieren TU Graz und INFRAS in der ERMES-Gruppe regelmäßig Test- und Datenerhebungskampagnen. Die ERMES-Gruppe ist eine Gruppe von Forschungseinrichtungen, Behörden und Industrieverbänden (<https://www.ermes-group.eu/web/>). Das Ziel dieser Gruppe ist, die Modellierung von Verkehrsemissionen zu unterstützen. Die von dieser Gruppe finanzierten Messdaten werden in einer Microsoft Access-Datenbank, auch als ERMES-Datenbank bezeichnet, gespeichert. Auf die ERMES-Datenbank können alle Mitglieder der ERMES-Gruppe zugreifen.

Insgesamt wurden in der ERMES-Datenbank mehr als 4 000 Pkw ab Baujahr 1987 bis Euro 6d-Temp erfasst. Für mehr als 1 500 Pkw stehen modale Messdaten zur Verfügung, mit denen fahrzeugspezifische PHEM-Kennfelder erstellt wurden. Für die restlichen Pkw liegen Zyklusmittelwerte der Messdaten vor, die für die finale Anpassung der PHEM-Schadstoffkennfelder herangezogen wurden. Für Euro 6a,b Diesel-Pkw waren mehr als 50 % der Fahrzeugtests bereits Messungen im realen Straßenverkehr, sogenannte RDE-Tests mit PEMS-Geräten. Dies erhöhte allerdings auch die Komplexität der Messdatenauswertung. So mussten z. B. die verschiedenen Umgebungstemperaturniveaus entsprechend berücksichtigt werden [34]. Die Genauigkeit der PEMS-Geräte ist aufgrund der kompakten Baugröße geringer als jene der stationären Messgeräte. Dies kann insbesondere die PN-Ergebnisse beeinflussen. Eine systematische Analyse der Unsicherheiten der PN-PEMS-Geräte wurde noch nicht durchgeführt und ist für zukünftige Arbeiten angedacht.

5.1.1.1 Messdatenaufbereitung für die ERMES-Datenbank

Massenemissionen werden aus Massenstrom und Konzentration an jener Stelle berechnet, an der die Messgeräte das Abgas des Fahrzeugs entnehmen. Für PEMS-Geräte erfolgt die Entnahme des Abgases in der Regel unmittelbar nach dem Auspuffendrohr. Am Pkw-Rollenprüfstand ist die Entnahmestelle, durch das oft verwendete Messprinzip der Abgasverdünnung mit Frischluft in einem CVS-Tunnel, deutlich weiter entfernt. Da die Massenemissionen an der Entnahmestelle berechnet werden, müssen diese danach zur Motorleistung zeitlich korrekt zugeordnet werden. Dafür wurde die Gaslaufzeit von Motorauslass bis Entnahmestelle korrigiert. Da diese Gaslaufzeit aber vom Betriebspunkt des Motors abhängt (z. B. Leerlauf oder Vollast), ist die oft verwendete konstante Zeitverschiebung bei sekundlicher Betrachtung der Messwerte ungenau. Es werden dabei im allgemeinen Betriebspunkte mit Niederlast (wenig Abgasvolumenstrom, langsamer Transport durch die Leitungen) zu wenig, Hochlastbetriebspunkte dagegen zu viel verschoben. Der Einfluss der Zeitverschiebung ist umso größer, je größer das Volumen zwischen Motorauslass und Entnahmestelle ist. Die in [78] entwickelte variable Zeitverschiebung berücksichtigt die unterschiedlichen Gaslaufzeiten korrekt. Bevorzugt wurden daher Pkw-Rollenprüfstandtests und Straßenmessungen mit der variablen Zeitverschiebung ausgewertet. Allerdings kann es bei Prüfstandmessungen vorkommen, dass aufgrund des Messprinzips kein Abgasmassenstrom bekannt ist. Dieser wird benötigt, um die variable Zeitverschiebung anwenden zu können. In solchen Fällen wurde auf die konstante Zeitverschiebung zurückgegriffen.

Durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit bei der Simulation von Schadstoffemissionen bei konstanter Zeitverschiebung von Messungen im realen Straßenverkehr mit PEMS gegenüber der variablen Zeitverschiebung um ca. 2 Prozentpunkte sinkt. Bei Pkw-Rollenprüfstandtests sinkt die Genauigkeit aufgrund des Messprinzips mittels CVS-Tunnel und den damit einhergehenden größeren Rohrvolumina um ca. 5 Prozentpunkte. [23]

5.1.1.2 Anforderungskatalog für Messdatenauswahl

Da die ERMES-Datenbank auch Messdaten enthält, die nicht für die Simulation der Emissionsfaktoren geeignet sind, wurde ein Anforderungskatalog zur Messdatenauswahl erstellt. Pkw-Messdaten, die diese Anforderungen erfüllten, wurden verwendet. Folgende Anforderungen wurden an die Messdaten gestellt:

- a) Es wurden nur Messdaten berücksichtigt, die vor Ablauf der Abgabefrist am 11.02.2019 übermittelt wurden. Später eingelangte Messungen sind in der ERMES-Datenbank gespeichert und können für HBEFA 4.2 verwendet werden.
- b) Es wurden nur Messdaten herangezogen, in denen keine Fehlfunktion des Motors vorlag. Es wird davon ausgegangen, dass solche Fehler wenig relevant sind, da das Fahrzeug in Notbetrieb geht und vom Fahrzeugbenutzer umgehend in die Werkstätte gebracht wird. Sollte sich in Zukunft herausstellen, dass solche Fehler relevant sind, so können entsprechende Faktoren aus den Messdaten für die Verschlechterung der Emissionsfaktoren im Postprocessing aufgeschlagen werden.
- c) Die modalen Messdaten müssen zumindest CO₂ und eine weitere Emissionskomponente, Umgebungstemperatur sowie Motordrehzahl in mindestens 1 Hz Auflösung enthalten.
- d) Messdaten, bei denen die Einheiten der Messgrößen nicht bekannt waren, wurden nicht verwendet.

- e) Da sich die simulierten Emissionsfaktoren auf einen Umgebungstemperaturbereich zwischen 15 °C und 30 °C beziehen, wurden Messungen in diesem Bereich ausgewählt. Dieser Temperaturbereich wird auch als T20 bezeichnet. Zusätzliche Messungen zu T20 wurden für die Validierung der NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion herangezogen.
- f) Die Typprüfzyklen NEFZ und WLTC wurden nicht herangezogen, da für HBEFA realitätsnahe Zyklen relevant sind. Der Niederlastzyklus IUFC wird von der EMPA für die Berechnung der Kaltstartzusatzemissionen genutzt.
- g) Messdaten mit DPF-Regeneration wurden nicht berücksichtigt, da dies in einem anderen Emissionsverhalten und damit weitgehend zufällig beeinflussten Emissionskennfeldern resultiert. Die Emissionsänderungen durch DPF-Regenerationen wurden separat berücksichtigt.
- h) Waren die zeitaufgelösten Messdaten mehr als drei aufeinanderfolgende Sekunden ausgefallen, wurden die Messdaten nicht verwendet. Bis einschließlich drei Sekunden wurden die fehlenden Werte, mit dem letzten Wert vor Ausfall und dem ersten bekannten Wert nach Ausfall, linear interpoliert.
- i) Nur zeitlich korrekt zugeordnete Massenemissionen zur Motorleistung nach Kapitel 5.1.1.1 wurden verwendet.

5.1.1.3 Verwendete Messdaten von Diesel- und Otto-Pkw

Für die HBEFA 4.1-Aktualisierung flossen die Messdaten von realitätsnahen Rollenprüfstandzyklen sowie von Fahrten im realen Straßenverkehr von Pkw ab Euro 6a,b ein. Die nachfolgend angeführten Daten erfüllten den unter Kapitel 5.1.1.2 angeführten Anforderungskatalog zur Messdatenauswahl:

- 93 Euro 6a,b Diesel-Pkw, gemessen in 297 Zyklen
- 6 Euro 6d-Temp Diesel-Pkw, gemessen in 24 Zyklen
- 43 Euro 6a,b Otto-Pkw, gemessen in 55 Zyklen
- 3 Euro 6c Otto-Pkw, gemessen in 10 Zyklen
- 4 Euro 6d-Temp Otto-Pkw, gemessen in 15 Zyklen

Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-5 geben einen Überblick über die Anzahl der verwendeten Messungen von Pkw mit Abgasnorm Euro 6a,b und neuer. In Klammern sind die Anzahl der in den Zyklen getesteten Fahrzeuge angegeben. Z. B. bedeutet „16 (15)“, dass 16 Zyklen mit 15 Pkw vermessen wurden. Von jedem Fahrzeug können Fahrzeughersteller, Modell sowie die wichtigsten Fahrzeugdaten dem Anhang B entnommen werden.

Tabelle 5-1: Verfügbare Messungen von Euro 6a,b Diesel-Pkw

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
ADAC	1 (1)	1 (1)	1 (1)	-	3 (2)
DUH	-	-	-	127 (22)	127 (22)

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
EMPA	16 (15)	9 (9)	-	1 (1)	26 (15)
JRC/Vela2	-	-	-	5 (4)	5 (4)
KBA	-	-	-	39 (12)	39 (12)
TNO	-	-	-	3 (2)	3 (2)
TueVN	-	24 (24)	-	-	24 (24)
TU Graz	15 (8)	14 (7)	6 (4)	35 (6)	70 (12)
# gesamt	32 (24)	48 (41)	7 (5)	210 (47)	297 (93)

Tabelle 5-2: Verfügbare Messungen von Euro 6d-Temp Diesel-Pkw

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
TU Graz	7 (6)	7 (6)	-	10 (5)	24 (6)

Tabelle 5-3: Verfügbare Messungen von Euro 6a,b Otto-Pkw

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
DEKRA	-	15 (15)	-	-	15 (15)
EMPA	7 (6)	6 (6)	-	3 (1)	16 (7)
JRC/Vela2	-	-	-	4 (2)	4 (2)
TueVN	-	18 (18)	-	-	18 (18)
TU Graz	2 (1)	-	-	-	2 (1)
# gesamt	9 (7)	39 (39)	-	7 (3)	55 (43)

Tabelle 5-4: Verfügbare Messungen von Euro 6c Otto-Pkw

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
EMPA	3 (3)	3 (3)	-	4 (2)	10 (3)

Tabelle 5-5: Verfügbare Messungen von Euro 6d-Temp Otto-Pkw

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
TU Graz	2 (2)	3 (2)	-	10 (4)	5 (4)

Die Stichprobe der gemessenen Euro 6a,b Pkw umfasste 49 % der Euro 6a,b Diesel-Pkw-Modelle und 36 % der Euro 6a,b Otto-Pkw-Modelle, die von 2013 bis 2017 in der EU-28 neu zugelassen wurden. Im Vergleich zu HBEFA 3.3 stieg die Abdeckung von Euro 6a,b Diesel-Pkw von 18 % auf 49 % an.⁷

Für Euro 6c und neuer waren zum Zeitpunkt dieser Arbeiten noch keine Angaben zu den Neuzulassungen verfügbar.

Abbildung 5.1 zeigt den NO_x-Mittelwert sowie den minimalen und maximalen NO_x-Wert der ausgewählten Messdaten im T20-Umgebungstemperaturbereich. Es ist ersichtlich, dass die mittleren NO_x-Emissionen der vermessenen Diesel-Pkw von Euro 6a,b mit 0,317 g/km auf Euro 6d-Temp mit 0,051 g/km stark gesunken sind. Dies ist vor allem auf die neue Emissionsgesetzgebung, die im Rahmen der Fahrzeugtypisierung auch Straßenfahrten vorsieht, zurückzuführen. Das mittlere NO_x-Emissionsniveau der vermessenen Otto-Pkw liegt mit unter 0,040 g/km durchgängig auf niedrigem Niveau.

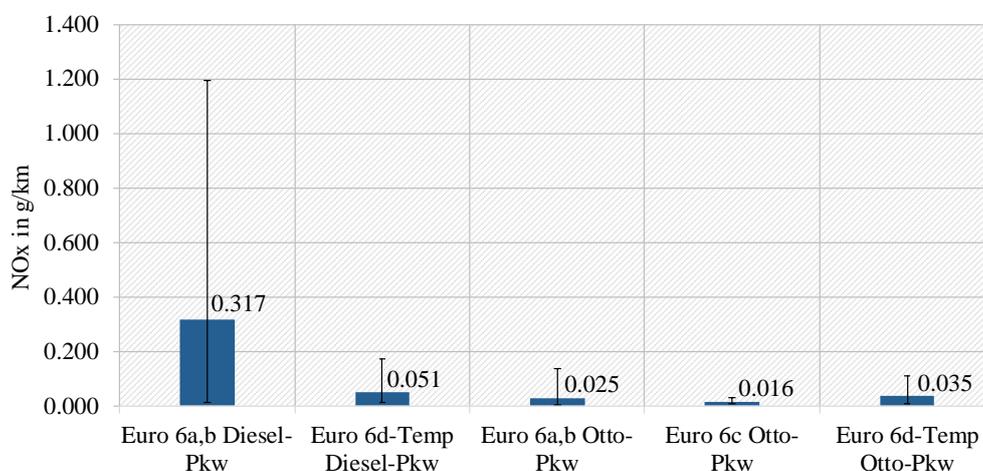


Abbildung 5.1: NO_x-Emissionen der vermessenen Pkw im T20-Umgebungstemperaturbereich

⁷ Die Berechnung der Anteile basierte auf der Annahme, dass ein gemessener Diesel- bzw. Otto-Pkw nicht nur sein eigenes Emissionsverhalten, sondern auch andere Varianten dieses Modells repräsentiert. Z. B. repräsentiert ein vermessener Audi A4 die Audi A4 Limousine sowie auch den Audi A4 Avant mit unterschiedlichen Hubräumen. Diese Art der Gewichtung ist eine Vereinfachung, führt aber vermutlich zu repräsentativeren Emissionsfaktoren für die gesamte Fahrzeugflotte im Vergleich zu einer einfachen Mittelung ohne Gewichtung.

5.1.1.4 Verwendete Messdaten von Pkw mit EA 189-Softwareupdate

Bei Diesel-Pkw sind teilweise Abschaltvorrichtungen installiert, die den Einsatz von NO_x-Emissionsminderungstechnologien außerhalb des Betriebsbereiches im Typisierungszyklus teilweise oder vollständig deaktiviert. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit waren dem KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) folgende Fahrzeugrückrufe bekannt [30]:

- Pflichtrückrufe von Euro 5 Diesel-Pkw des VW-Konzerns mit EA 189-Motor
- Freiwillige Rückrufe von Euro 5 und Euro 6b Diesel-Pkw

Da im Rahmen dieser Arbeit nur zum EA 189-Softwareupdate ausreichend Messdaten verfügbar waren, konnte im HBEFA 4.1 ebenfalls nur die Emissionsänderungen durch dieses Update berücksichtigt werden. Messungen dazu wurden vom Umweltbundesamt Deutschland und Umweltbundesamt Österreich finanziert, weitere Messdaten wurden von der DUH (Deutsche Umwelthilfe) zur Verfügung gestellt. Folgende Messdaten erfüllten den Anforderungskatalog und wurden herangezogen:

- 8 Euro 5 Diesel-Pkw mit 25 Messungen vor EA 189-Softwareupdate
- 8 Euro 5 Diesel-Pkw mit 27 Messungen nach EA 189-Softwareupdate

Von jedem Fahrzeug können Fahrzeughersteller, Modell sowie die wichtigsten Fahrzeugdaten dem Anhang B entnommen werden. Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7 zeigen die Anzahl der verwendeten Messungen von Diesel-Pkw des VW-Konzerns mit EA 189-Motor.

Tabelle 5-6: Verfügbare Messungen von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor vor Softwareupdate

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
DUH	-	-	-	20 (3)	20 (3)
TU Dresden	-	2 (2)	-	-	2 (2)
TU Graz	3 (3)	-	-	-	3 (3)
# gesamt	3 (3)	2 (2)	-	20 (3)	25 (8)

Tabelle 5-7: Verfügbare Messungen von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor nach Softwareupdate

Labor	# CADC (# Fahrzeuge im CADC getestet)	# ERMES (# Fahrzeuge im ERMES getestet)	# RWC (# Fahrzeuge im RWC getestet)	# RDE (# Fahrzeuge RDE getestet)	# Gesamtzyklen (# Gesamt- fahrzeuge)
DUH	-	-	-	21 (3)	21 (3)
TU Dresden	-	2 (2)	-	-	2 (2)
TU Graz	3 (3)	-	-	1 (1)	4 (3)
# gesamt	3 (3)	2 (2)	-	22 (4)	27 (8)

Abbildung 5.2 zeigt den NO_x -Mittelwert sowie den minimalen und maximalen NO_x -Wert der ausgewählten Messungen vor und nach dem EA 189-Softwareupdate im T20-Umgebungstemperaturbereich. Das Softwareupdate resultiert vor allem in einer NO_x -Reduktion in realitätsnahen Zyklen. Mit den vermessenen Pkw liegt vor Softwareupdate ein NO_x -Mittelwert von 0,796 g/km, nach Softwareupdate von 0,502 g/km vor. Das ergibt im Mittel eine NO_x -Reduktion von 37 %.

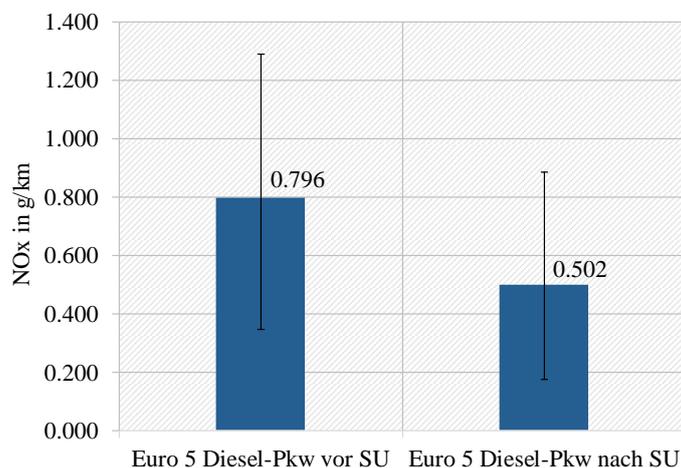


Abbildung 5.2: NO_x -Emissionen der vermessenen Pkw vor und nach dem EA 189 Softwareupdate im T20-Umgebungstemperaturbereich

Bei den Messdaten aus Abbildung 5.2 lagen bei den RDE-Tests teilweise unterschiedliche verkehrliche Randbedingungen vor, so dass die Reduktionspotenziale aus den Messdaten eventuell unsicher sind. Zudem müssen für das HBEFA Emissionsfaktoren für verschiedene Verkehrssituationen, von langsamer Innerortfahrt bis Autobahnfahrt ohne Tempolimit, erzeugt werden. Inwieweit die Reduktionen durch das EA 189-Softwareupdate in allen Lastprofilen ähnlich ist, kann aus den Messdaten ebenfalls nicht direkt bestimmt werden. Daher wurden auch für die betroffenen Pkw aus den Messdaten vor und nach dem EA 189-Softwareupdate End-of-Tailpipe Kennfelder gebildet und damit die Verkehrssituationen simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen für HBEFA 4.1 sind in Kapitel 5.10 beschrieben.

5.1.2 CO₂-Monitoring-Datenbank

Nach [67] müssen Neuzulassungen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen in den europäischen Mitgliedsstaaten gemeldet werden. Die CO₂-Werte im Typprüfzyklus sowie die Fahrzeugdaten der neu zugelassenen Fahrzeuge wurden bzw. werden in der sogenannten CO₂-Monitoring-Datenbank gespeichert. Der Betrachtungszeitraum beschränkte sich zum Zeitpunkt dieser Arbeit auf die verfügbaren Daten der Jahre 2013 bis 2017. Im Betrachtungszeitraum flossen die Daten von 28 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union ein.

Die Anzahl der zugelassenen Fahrzeugmodelle sind die Grundlage für die Gewichtung der fahrzeugspezifischen PHEM-Kennfelder zur Bildung des Durchschnittskennfelds je Emissionsschicht. Die verwendete Zulassungszahl eines Modells beinhaltet auch Varianten dieses Modells. So beinhalten z. B. die Zulassungszahlen eines Audi A4 die Zulassungen verschiedener Audi A4 Modelle, wie Audi A4 Limousine oder Audi A4 Avant. Diese Art der Gewichtung ist eine Vereinfachung, führt aber vermutlich zu repräsentativeren Emissionsfaktoren für die gesamte Fahrzeugflotte im Vergleich zu einer einfachen Mittelung ohne Gewichtung. Die CO₂-Monitoring-Datenbank ist unter [6] zu finden.

5.1.3 Spritmonitor.de

Spritmonitor.de ist eine Webseite und liefert den von Autobesitzern gemeldeten Kraftstoffverbrauch auf deutschen Straßen. Insgesamt wurde aus dieser Datenbank der Kraftstoffverbrauch für etwa 550 000 Fahrzeuge für die Modelljahre 2001 bis 2016 als Grundlage für die Anpassung der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge herangezogen. Damit konnte der Einfluss von z. B. Seitenwind, Dachbox, Anhänger und reale Beladung sowie Nebenverbraucher für HBEFA abgeschätzt werden. Daten vor 2001 und nach 2016 waren nicht verfügbar. Die Auswertung der Spritmonitor.de-Daten wurde vom ICCT (International Council on Clean Transportation) durchgeführt [63]. Abbildung 5.3 zeigt die durchschnittlichen Abweichungen zwischen dem realen Pkw-Kraftstoffverbrauch zur Typgenehmigung im NEFZ für Deutschland mit Spritmonitor.de und weiteren Datenquellen. Mobilitätspanel zeigt in etwa den selben Verlauf wie Spritmonitor.de. Im Gegensatz dazu weichen LeasePlan und ADAC EcoTest davon ab. Aufgrund der Anzahl an hinterlegten Daten und der guten Übereinstimmung mit Mobilitätspanel wurde Spritmonitor.de als Datenbasis herangezogen. Da die Daten auch getrennt für Diesel- und Otto-Pkw verfügbar waren, konnte eine getrennte Anpassung der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge in Kapitel 5.7 durchgeführt werden. Spritmonitor.de ist öffentlich unter [61] zugänglich. [63] [64]

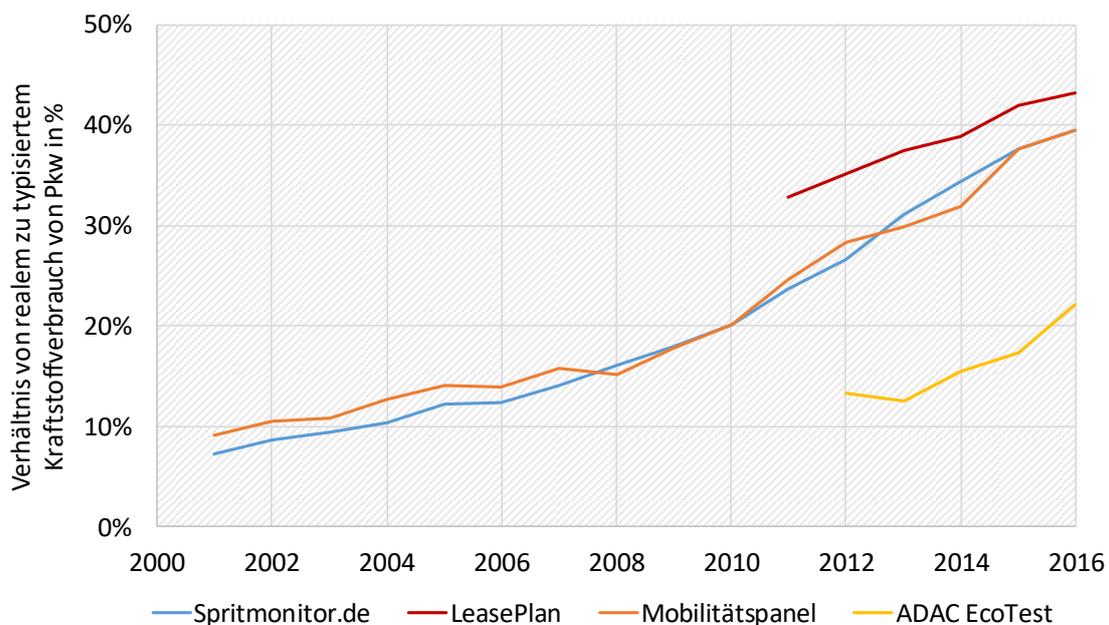


Abbildung 5.3 Verhältnis von realem zu typisiertem Kraftstoffverbrauch von Pkw in Deutschland [63]

5.1.4 Floating Car Data

Die Basis für die Erstellung der repräsentativen HBEFA-Verkehrssituationen waren reale Fahrprofile von mit GPS ausgestatteten Testfahrzeugen, Taxis und Leihfahrzeugen in EU-28. Die Erstellung der repräsentativen HBEFA-Verkehrssituationen war nicht Bestandteil dieser Arbeit und wurde von WSP und HSDAC (Heinz Steven Data Analysis and Consultancy) durchgeführt. Die erstellten Verkehrssituationen sind für verschiedene Gebietstypen von der Ortstraße bis Autobahn mit verschiedenen Geschwindigkeitsbeschränkungen verfügbar. Ebenfalls berücksichtigen sie den Verkehrszustand von flüssig bis zu Stausituationen. Jede Verkehrssituation enthält eine Fahrzeuggeschwindigkeit über der Zeit in 1 Hz Auflösung. Zusätzlich gibt es jede HBEFA-Verkehrssituation von -6 % bis 6 % Steigung, in 2 %-Schritten.

Eine HBEFA-Verkehrssituation setzt sich immer aus einem Vorkonditionierzyklus und einem Hauptzyklus zusammen. Der Vorkonditionierzyklus dient dazu, das Abgasnachbehandlungssystem des zu simulierenden Pkw für den Hauptzyklus entsprechend zu konditionieren. So ist z. B. einem HBEFA-Stauzyklus als Hauptzyklus ein Stadtzyklus mit hoher Verkehrsdichte als Vorkonditionierzyklus vorangestellt. Insgesamt sind damit etwa 2 500 HBEFA-Verkehrssituationen verfügbar. In der Bezeichnung der einzelnen Verkehrssituationen ist auch die ID enthalten, um die simulierten Emissionsfaktoren der entsprechenden Verkehrssituation korrekt in der HBEFA-Software zuordnen zu können. Für jede HBEFA-Verkehrssituation wird mit PHEM ein Emissionsfaktor je Emissionskomponente berechnet. In Tabelle 5-8 sind Dynamikparameter von zwei exemplarischen HBEFA-Verkehrssituationen ersichtlich. Bei den Verkehrssituationen handelt es sich um Zyklen mit geringer und hoher Geschwindigkeit (Stadt- und Autobahnzyklus). Abbildung 5.4 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf des Hauptzyklus für die zwei erwähnten Verkehrssituationen. [8]

Tabelle 5-8: Dynamikgrößen des Hauptzyklus von zwei HBEFA-Verkehrssituationen

Zyklus ID	Zykluslänge in km	Dauer in s	Max. Geschwindigkeit in km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	Max. Beschleunigung in m/s ²	Max. Verzögerung in m/s ²	Stoppanteil in %
9094	1,8	1200	26,2	5,5	1,7	1,5	44
9256	51,2	1292	166,5	142,7	0,5	0,9	0

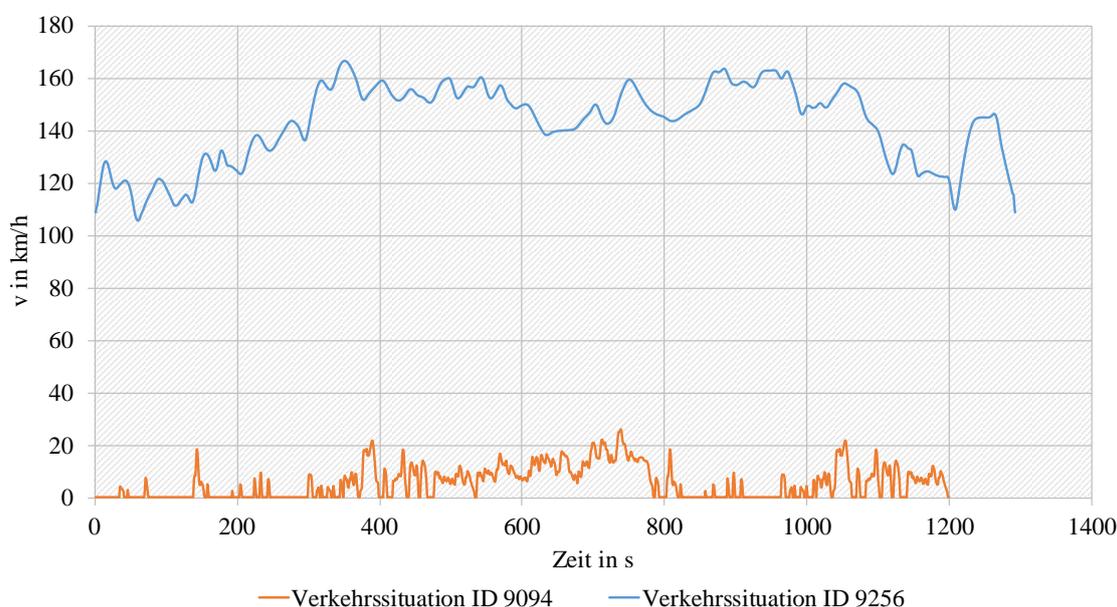


Abbildung 5.4: Geschwindigkeitsverlauf des Hauptzyklus von zwei HBEFA-Verkehrssituationen

5.1.5 CONOX-Datenbank

In der CONOX-Datenbank sind über 400 000 Datensätze von Pkw enthalten, die von Remote-Sensing-Systemen in Schweden, England, Spanien und der Schweiz stammen. Aufgrund des in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Messprinzips sind in der Datenbank die g Emissionen auf kg CO₂ bezogen. Der Vorteil dieses Messprinzips ist, dass ein breites Spektrum an Messdaten von Fahrzeugmodellen aller zugelassenen Abgasnormen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen aufgenommen werden kann. Mithilfe der CONOX-Datenbank konnten Korrekturfunktionen für die Emissionsfaktoren bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen sowie Laufleistungen abgeleitet werden. Die Datenbank ist unter [27] verfügbar. [58]

5.2 PHEM-Kraftstoffverbrauchs- bzw. CO₂-Kennfelder für Pkw

Die Kraftstoffverbrauchskennfelder aller früheren HBEFA-Versionen wurden aus Pkw-Rollenprüfstandtests abgeleitet. Aufgrund von Ungenauigkeiten in der zeitlichen Zuordnung zwischen Kraftstoffverbrauch und Motorleistung, waren die erstellten PHEM-Kennfelder teilweise ungenau. Mit neuen Messdaten wurden die PHEM-Kraftstoffverbrauchskennfelder aller Abgasnormen für HBEFA 4.1 überarbeitet. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- 1) Aus [22] waren verschiedene Kraftstoffverbrauchskennfelder von Motorprüfstandmessungen für Euro 6a,b Diesel- sowie Otto-Pkw verfügbar. Die korrekte Zuordnung zwischen Kraftstoffverbrauch, Motorleistung und -drehzahl war aufgrund der stationären Motorprüfstandmessungen gewährleistet. Diese Kraftstoffverbrauchskennfelder wurden nach Kapitel 4.1.2 normiert. Die Normierung ist die Grundlage für die Erstellung von durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchskennfeldern.
- 2) Die Kraftstoffverbrauchskennfelder von Punkt 1) wurden zu durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchskennfeldern für Diesel- und Otto-Pkw nach den Neuzulassungszahlen in EU-28 zusammengewichtet. Für das durchschnittliche Euro 6a,b Kraftstoffverbrauchskennfeld des Otto-Pkw wurden die entsprechenden Anteile der direkteinspritzenden Motoren und Saugrohrmotoren in EU-28 berücksichtigt (Tabelle 5-9). Der Anteil für Euro 6a,b in EU-28 wurde aus [60] entnommen. Die Anteile bis einschließlich Euro 5 wurden aus dem HBEFA 3.3 entnommen, die Anteile für Euro 6c und neuer wurden aufgrund noch nicht verfügbarer Daten abgeschätzt.

Tabelle 5-9: Anteil Otto-Pkw mit Direkteinspritzung an zugelassenen Otto-Pkw in EU-28

	bis Euro 4	Euro 5	Euro 6a,b	Euro 6c	Euro 6d- Temp	ab Euro 6d
Anteil Otto-Pkw mit Direkteinspritzung	0 %	35 %	50 %	70 %	80 %	100 %

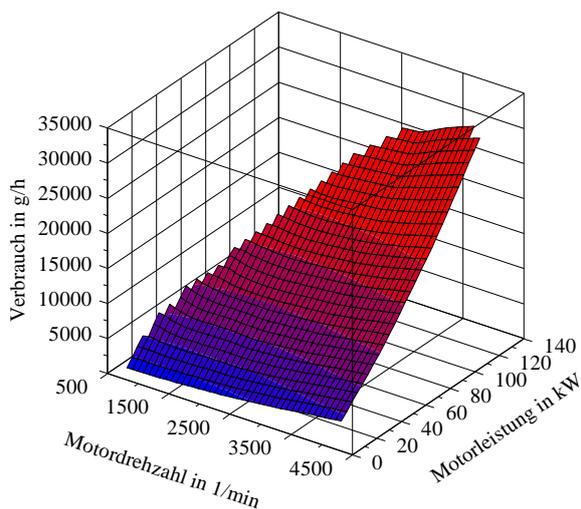
- 3) Die neuen durchschnittlichen HBEFA 4.1-Kraftstoffverbrauchskennfelder für Pkw älterer Abgasnormen wurden unter Verwendung der Wirkungsgrade von den durchschnittlichen HBEFA 3.3-Kraftstoffverbrauchskennfeldern abgeleitet. Dabei wurde der Kraftstoffverbrauch im CADC mit PHEM für alle HBEFA 3.3-Kraftstoffverbrauchskennfelder simuliert und die Ergebnisse zum Kraftstoffverbrauch

des HBEFA 3.3 Euro 6a,b Pkw ins Verhältnis gesetzt. Wie bereits erwähnt, weisen die Kraftstoffverbrauchskennfelder aus HBEFA 3.3 eine ungenaue Zuordnung von Kraftstoffverbrauch und Motorleistung auf. Die Verhältnisse der Abgasnormen zueinander sollte aber wieder korrekt sein, wenn man davon ausgeht, dass die Zuordnung von Kraftstoffverbrauch und Motorleistung für alle Abgasnormen ähnlich ungenau ist. Mit den Verhältnisfaktoren wurden die neuen HBEFA 4.1-Kraftstoffverbrauchskennfelder aus den neuen Euro 6a,b Kennfeldern von Schritt 1) für alle Abgasnormen abgeleitet.

- 4) Die Kraftstoffverbrauchskennfelder für Euro 6c aufwärts wurden auf Grundlage von Literaturrecherchen [22] und Fortsetzung der Trends der letzten Jahre ermittelt. Dabei erreichen Otto-Pkw von Euro 6a,b bis Euro 6d eine durchschnittliche jährliche Verbesserung von 1 %. Für Diesel-Pkw wurde eine durchschnittliche jährliche Verbesserung von 0,8 % ermittelt. Von Euro 6d auf Post-Euro 6 (bzw. Euro 7) wurde für Diesel- sowie Otto-Pkw eine jährliche Verbesserung von 0,5 % angenommen.

Abbildung 5.5 zeigt exemplarisch das Kraftstoffverbrauchskennfeld für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw.

a)



b)

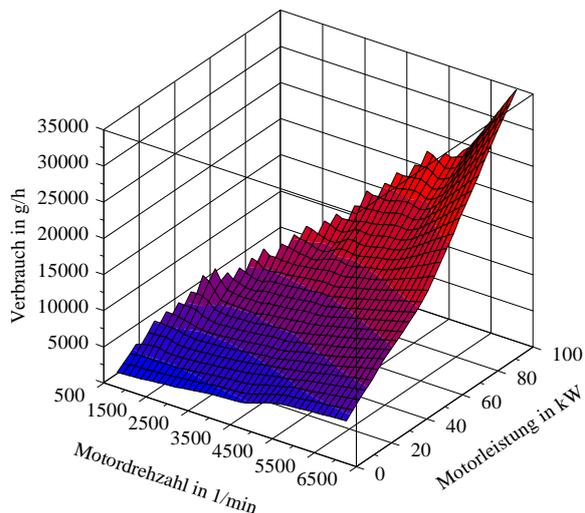


Abbildung 5.5: Kraftstoffverbrauchskennfeld des durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw (a) und Euro 6a,b Otto-Pkw (b)

Da für die Erstellung der PHEM-Schadstoffkennfelder für HBEFA 4.1 mittels der in Kapitel 4.1 beschriebenen CO₂-Leistungsinterpolationsmethode CO₂-Kennfelder benötigt werden, wurden die ermittelten Kraftstoffverbrauchskennfelder in CO₂-Kennfelder umgerechnet. Die Umrechnung entspricht den EU-Anforderungen bei Emissionsinventuren, bei denen der gesamte Kohlenstoff in CO₂ umgewandelt wird [54]. In Tabelle 5-10 sind die für den europäischen Markt typischen Kraftstoffe angeführt.

Tabelle 5-10: Eigenschaften von Diesel- und Ottokraftstoff [54]

Kraftstoff	Dichte in kg/ m ³ ⁸	Unterer Heizwert in MJ/ kg	Kohlenstoffanteil im Kraftstoff in Massenprozent	CO ₂ -Faktor in g/ MJ	CO ₂ -Faktor in kg CO ₂ / kg Kraftstoffverbrauch
Otto (E5)	745,8	42,3	84,7	73,3	3,10
Diesel (B7)	836,1	42,7	85,4	73,4	3,13

Nach der Erstellung der PHEM-Schadstoffkennfelder nach Kapitel 5.3 wurde auf die Kraftstoffverbrauchskennfelder bzw. CO₂-Kennfelder der Diesel-Pkw ein Aufschlag zur Berücksichtigung von DPF-Regenerationen gegeben. Der Korrekturfaktor wurde dafür aus Kapitel 5.9.1 entnommen.

5.3 PHEM-Schadstoffkennfelder für Pkw

Die fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder am Auspuffende wurden nach Kapitel 4.1 mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode für NO_x, CO, HC, PM und PN erstellt. Anschließend wurde aus den fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfeldern das durchschnittliche Schadstoffkennfeld je Abgasnorm und Motortechnologie nach den EU-28 Zulassungszahlen gebildet, da HBEFA 4.1 für die internationale Emissionsberichterstattung verwendet wird. Folgende Schadstoffkennfelder wurden im Rahmen dieser Arbeit für Diesel- sowie Otto-Pkw neu erstellt:

- Euro 6a,b
- Euro 6c
- Euro 6d-Temp
- Euro 6d
- Post-Euro 6

Für alle anderen Abgasnormen wurden die Schadstoffkennfelder von HBEFA 3.3 übernommen.

Die einzelnen Schritte für die Erstellung der Schadstoffkennfelder für betriebswarme Fahrzeugzustände sind nachfolgend beschrieben:

- 1) Auswahl der Messdaten nach dem Anforderungskatalog gemäß Kapitel 5.1.1.2 und Export aus der ERMES-Datenbank.
- 2) Aufbereitung der exportierten modalen Messdaten. Die Kaltstartphase wurde nach [70] aus den modalen Messdaten entfernt. Die Kaltstartzusatzemissionen wurden separat von EMPA ermittelt und werden in der HBEFA-Software getrennt berücksichtigt.
- 3) Erstellung von fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfeldern mittels PHEM. Für die zur Kennfelderstellung verwendete CO₂-Leistungsinterpolationsmethode sollen die gemessenen Emissionen am Auspuffende und Motordrehzahl in mindestens 1 Hz zeitlicher Auflösung vorliegen. War das für die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode

⁸ Dichte bezogen auf 101,32*10³ Pa und 288,15 K nach DIN 1343 und ISO 2533.

benötigte fahrzeugspezifische CO₂-Kennfeld vom vermessenen Fahrzeug nicht bekannt, wurde das durchschnittliche CO₂-Kennfeld der entsprechenden Abgasnorm und Motortechnologie aus Kapitel 5.2 herangezogen. Die fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder wurden normiert (Normierung von Motorleistung und -drehzahl nach Kapitel 4.1.2) erstellt. Die Normierung ist die Grundlage für die Erstellung von durchschnittlichen Schadstoffkennfeldern.

- 4) Erstellung eines durchschnittlichen Schadstoffkennfelds je Abgasnorm und Motortechnologie mit den Kennfeldern von Punkt 3). Die fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder wurden nach den Neuzulassungszahlen in EU-28 zusammengewichtet.

In Abbildung 5.6 ist exemplarisch das durchschnittliche End-of-Tailpipe NO_x-Schadstoffkennfeld für den Euro 6a,b sowie Euro 6d-Temp Diesel-Pkw gezeigt. Die stellenweise niederen Emissionswerte bei hohen Motorleistungen und -drehzahlen resultieren aus der sehr geringen Anzahl an Messwerten in diesem Bereich. Da diese Lastpunkte real sehr selten auftreten, wurde auf eine manuelle Korrektur der Messdaten verzichtet.

Der Einfluss verschiedener nationaler Flottenzusammensetzungen (anstatt EU-28 Flottenzusammensetzung) auf länderspezifische Schadstoffemissionen könnte durch die Ausarbeitung länderspezifischer Schadstoffkennfelder oder Korrekturfaktoren in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher nationaler Flottenzusammensetzungen wurden für Euro 6a,b Diesel-Pkw in Kapitel 5.12 für vier verschiedene Länder analysiert.

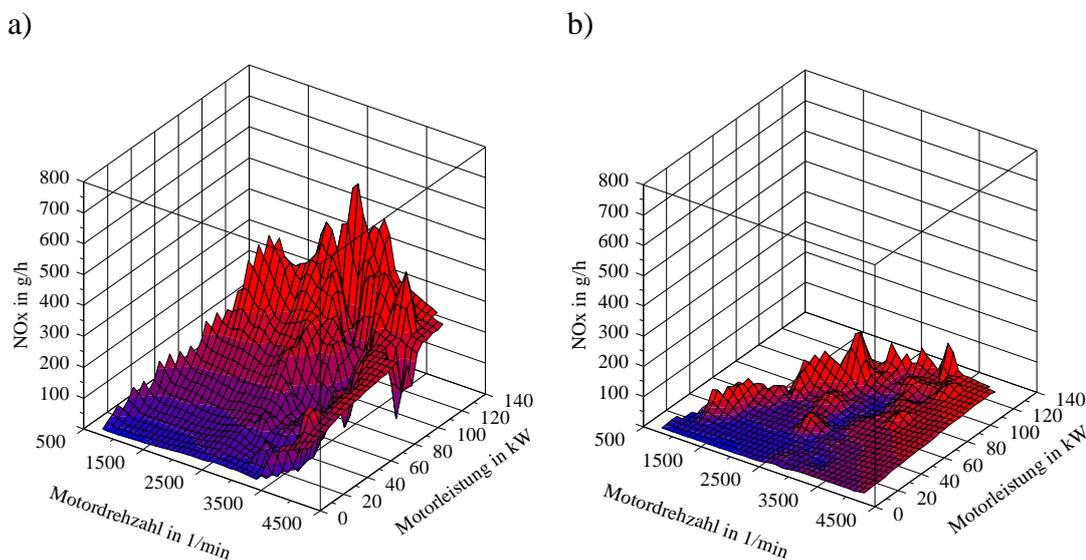


Abbildung 5.6: End-of-Tailpipe NO_x-Kennfeld des durchschnittlichen Euro 6a,b (a) sowie Euro 6d-Temp (b) Diesel-Pkw

Für Otto-Pkw wurde ein durchschnittliches Schadstoffkennfeld für Motoren mit Direkteinspritzung und für Motoren mit Saugrohreinspritzung erstellt. Die Gewichtung der fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder erfolgte wiederum nach den Anteilen der Neuzulassungszahlen. Diese beiden durchschnittlichen Schadstoffkennfelder wurden in einem weiteren Schritt mit den Anteilen der verfügbaren Fahrzeuge mit Direkt- sowie Saugrohreinspritzmotoren in EU-28 zusammengewichtet (Tabelle 5-9).

Abbildung 5.7 zeigt das End-of-Tailpipe NO_x -Kennfeld für den durchschnittlichen Euro 6a,b sowie Euro 6d-Temp Otto-Pkw. Auch hier sind die Peaks bei hohen Motorleistungen und -drehzahlen auf geringe Abdeckung mit Messdaten zurückzuführen. Die hohen NO_x -Niveaus bei hoher Motorleistung und niederen Motordrehzahlen dürfte auf ein Scavenging bei mehreren der gemessenen Pkw zurückzuführen sein. Durch Überschneidung der Einlass- und Auslass-Ventilöffnungszeiten wird mehr Abgasmassenstrom erzeugt und der Abgasturbolader spricht dynamisch besser an. Damit entsteht mageres Gemisch und die NO_x -Konvertierungsrate im Drei-Wege-Katalysator nimmt ab.

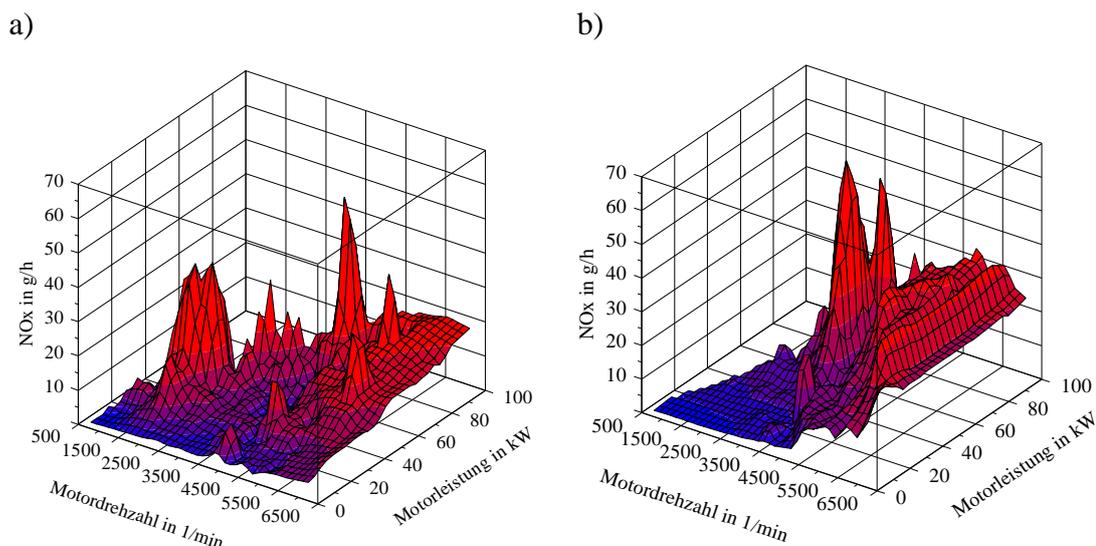


Abbildung 5.7: End-of-Tailpipe NO_x -Kennfeld des durchschnittlichen Euro 6a,b (a) sowie Euro 6d-Temp (b) Otto-Pkw

- 5) Ableitung der End-of-Tailpipe Schadstoffkennfelder für Abgasnormen, für die zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch keine bzw. nicht genügend Messdaten zur Verfügung standen:
- Schadstoffkennfeld für Euro 6c Diesel-Pkw: Das Schadstoffkennfeld für Euro 6c wurde als gewichteter Durchschnitt aus dem Euro 6a,b und Euro 6d-Temp Diesel-Pkw Schadstoffkennfeld erstellt. Der Gewichtungsfaktor für Euro 6a,b wurde mit 1/3, für Euro 6d-Temp mit 2/3 gewählt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Vielzahl von Euro 6c Fahrzeugen bereits die Euro 6d-Temp RDE-Gesetzgebung erfüllt.
 - Schadstoffkennfeld für Euro 6d und Post-Euro 6 Diesel-Pkw: Unter der Annahme, dass NO_x -Grenzwerte und Testbedingungen weiter verschärft werden, sollten durch zukünftige Pkw-Motorentechnologien vor allem weitere Reduzierungen der NO_x -Emissionen ermöglicht werden. Die CO-Emissionen steigen aufgrund höherer EGR-Raten vermutlich an. Dies bestätigen bereits Messdaten von Vorserienfahrzeugen für Post-Euro 6 Pkw.
 - Schadstoffkennfeld Euro 6d und Post-Euro 6 Otto-Pkw: Für Euro 6d und Post-Euro 6 wurde der Trend der Schadstoffreduzierung aus den vorangegangenen Abgasnormen fortgesetzt, wobei die Reduktionspotentiale der gasförmigen Komponenten aufgrund des bereits niedrigen Schadstoffniveaus gering sind.

Ausgenommen sind PM- und PN-Emissionen, die mit eingesetzten Partikelfiltern bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung signifikant sinken sollten.

- 6) Auf die Schadstoffkennfelder der Diesel-Pkw wurde die Erhöhung der Schadstoffe durch DPF-Regenerationen aufgeschlagen. Die Korrekturfaktoren dafür sind in Kapitel 5.9.1 aufgelistet.

5.4 PHEM-Schadstoffkennfelder für Pkw mit EA 189-Softwareupdate

Im Rahmen einer angeordneten Pflichtrückrufaktion vom KBA wurde das EA 189-Softwareupdate bei VW-Konzernfahrzeugen installiert. Mit dem Softwareupdate sollen keine Abschaltvorrichtungen von NO_x-Reduktionsstrategien im Typprüfzyklus NEFZ mehr aktiviert sein. Das Softwareupdate führt allerdings nicht nur zu einer Änderung des Emissionsverhaltens des Fahrzeugs im NEFZ⁹, sondern auch im realen Straßenverkehr. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit die Emissionsänderungen durch das EA 189-Softwareupdate berücksichtigt. Aufgrund der geringen Anzahl an vermessenen VW-Konzernfahrzeugen vor und nach EA 189-Softwareupdate wurde wie folgt vorgegangen:

1. Analog zu Kapitel 5.3 wurden die Messdaten von VW-Konzernfahrzeugen vor und nach EA 189-Softwareupdate ausgewählt und die Kaltstartphase entfernt.
2. Fahrzeugspezifische Schadstoffkennfelder wurden für jedes Fahrzeug vor und nach EA 189-Softwareupdate mit der CO₂-Leistungsinterpolationsmethode erzeugt.
3. Die fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder wurden zu durchschnittlichen Schadstoffkennfeldern vor und nach EA 189-Softwareupdate mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren zusammengewichtet. D.h. es wurden alle fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor vor Softwareupdate zu einem Durchschnittskennfeld vor Softwareupdate zusammengefasst. Alle fahrzeugspezifischen Schadstoffkennfelder von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor nach Softwareupdate wurden zu einem Durchschnittskennfeld nach Softwareupdate zusammengefasst. Die Gewichtungsfaktoren wurden aus Daten vom KBA nach Flottenanteilen betroffener Modelle, die beim Nationalen Forum Diesel präsentiert wurden, abgeleitet [29]. Die Daten sind in Anhang C enthalten.
4. Aus diesen durchschnittlichen Schadstoffkennfeldern vor und nach Softwareupdate wurden entsprechende Differenzenkennfelder errechnet. D.h. es wurde die Änderung der jeweiligen Emissionskomponente in g/h im Kennfeld als Funktion von Motorleistung und -drehzahl abgebildet. Exemplarisch ist in Abbildung 5.8 das NO_x-Differenzenkennfeld gezeigt. Zur besseren Veranschaulichung ist die NO_x-Änderung nicht in g/h, sondern in %-Änderung zum Emissionsniveau vor EA 189-Softwareupdate über Motorleistung und Motordrehzahl dargestellt. Es ist ersichtlich, dass NO_x-Reduktionen bis ca. 40 % im mittleren Lastbereich vorliegen (rote Bereich in der Abbildung). An der Vollastkurve bei höherer Motordrehzahl können auch leichte NO_x-Erhöhungen vorliegen (violette bis blaue Bereich).

⁹ Die Änderungen im NEFZ fallen gering aus, da diese auch schon mit der Original-Software sehr niedrig waren. Mit der Original-Software wurden NO_x-Reduktionsstrategien gezielt außerhalb des NEFZ-Profiles reduziert.

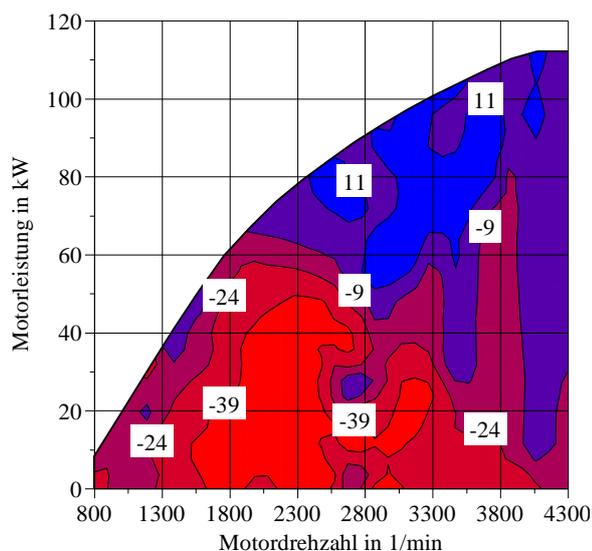


Abbildung 5.8: NO_x-Änderungen in % von VW-Konzernfahrzeugen aufgrund des Softwareupdates EA 189 bei 20 °C Umgebungstemperatur

5. Das so bestimmte Reduktionspotential in g/h wurde vom durchschnittlichen Euro 5 Schadstoffkennfeld der Diesel-Pkw-Flotte aus Kapitel 5.3, unter Berücksichtigung des Anteils an umgerüsteten VW-Konzernfahrzeugen, subtrahiert. Die dafür notwendigen Flottenanteile der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor an der gesamten Euro 5-Flotte ergeben sich aus den Umrüstungszahlen, die vom KBA beim Nationalen Forum Diesel präsentiert wurden [29]. Diese sind in Tabelle 5-11 zusammengefasst. Die Abarbeitungsquote wurde mittels den betroffenen bzw. umgerüsteten Pkw errechnet. Zusätzlich ist in Tabelle 5-11 auch der gesamte Bestand an Euro 5 Pkw in Deutschland enthalten, der aus dem Verkehrsmodell TREMOD (Transport Emission Model) entnommen wurde. Dadurch kann der Anteil der betroffenen VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor errechnet werden.

Tabelle 5-11: Bestandsdaten und Umrüstungszahlen von Euro 5 Pkw in Deutschland [29]

	Euro 5 Diesel-Pkw in Deutschland (Bestand)	Betroffene EA 189-Pkw in Deutschland (Bestand)	Anteil EA 189-Pkw an gesamter Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte in Deutschland (Bestand)	Abgewickelte EA 189-Pkw in Deutschland (kumulativ)	Abarbeitungsquote
Oktober 2015	5 952 394	2 360 111	40 %	0	0 %
Juni 2016	5 944 797	2 326 795	39 %	458 294	20 %
Juni 2017	5 700 128	2 177 213	38 %	1 374 881	63 %
Juni 2018	5 438 548	2 022 663	37 %	1 924 518	95 %
Juni 2019	5 149 781	1 994 438	39 %	1 994 438	100 %

5.5 PHEM-Eingabedaten für das NH₃-Modell

Für Diesel-Pkw ab Euro 6a,b wurde bei der Simulation der Emissionsfaktoren das beschriebene NH₃-Modell nach Kapitel 4.2.3 verwendet. Dazu wurden zusätzlich zu den Kraftstoffverbrauchs- und End-of-Tailpipe Schadstoffkennfeldern zusätzliche Kennfelder benötigt. Da diese Kennfelder nicht von standardmäßigen Messkampagnen abgeleitet werden konnten, wurden vier Euro 6a,b Diesel-Pkw (Fahrzeug ID 239, 245, 254 und 262) mit einem umfangreicheren Messprogramm vermessen. Dafür wurden auch NO_x- sowie Temperatursensoren im Abgasstrang verbaut. In Tabelle 10-1 in Anhang A sind die wichtigsten Fahrzeugdaten angeführt.

Aus den Messungen der vier Pkw wurden die für das NH₃-Modell benötigten durchschnittlichen Engine-Out NO_x-, Abgastemperatur- und Abgasmassenstromkennfelder der EU-28 Diesel-Pkw-Flotte erstellt. [11] [28] [46] [51] [82]

Die erstellten Kennfelder werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

5.5.1 Engine-Out NO_x-Kennfeld

Das durchschnittliche Engine-Out NO_x-Kennfeld wurde vom durchschnittlichen End-of-Tailpipe NO_x-Kennfeld der Diesel-Pkw Flotte abgeleitet. Für die Ableitung war ein NO_x-Konvertierungskennfeld notwendig, welches aus den vier vermessenen Pkw erstellt wurde. Die wesentlichen Abhängigkeiten der NO_x-Konvertierung sind Abgastemperatur und Abgasmassenstrom. Da diese aber je nach Vorgeschichte des Motorlastverlaufes an ein und demselben Motorbetriebspunkt sehr unterschiedlich sein können, würde mit dieser Abhängigkeit der NO_x-Konvertierung kein eindeutiger Zusammenhang von End-of-Tailpipe NO_x-Kennfeld und dem gesuchten Engine-Out NO_x-Kennfeld gegeben sein. Daher wurden aus den Messdaten fahrzeugspezifische NO_x-Konvertierungen vereinfacht als Funktion von Motorleistung und –drehzahl berechnet, welche die durchschnittlichen NO_x-Konvertierungen bei den verschiedenen Motorbetriebspunkten zeigen. Die fahrzeugspezifischen NO_x-Konvertierungen wurden dann zu durchschnittlichen NO_x-Konvertierungen gemittelt, um sie für die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge verwenden zu können. Aufgrund der geringen Anzahl der Fahrzeuge erfolgte eine einfache Mittelung ohne Gewichtung. Dabei wurde zwischen motornahen SCR-Systemen sowie SCR-Systemen im Unterboden differenziert. Wegen der begrenzten Anzahl an verfügbaren NO_x-Konvertierungskennfeldern wurde davon ausgegangen, dass die NO_x-Konvertierungen der vermessenen Fahrzeuge den Durchschnitt der Flotte repräsentieren.

Abbildung 5.9 a) zeigt die berechnete durchschnittliche NO_x-Konvertierung aus den Messdaten der vermessenen Pkw mit der ID 239, 254 und 262 mit motornahem SCR-System. Es liegen NO_x-Konvertierungen zwischen 20 % bis 95 % vor. Höhere NO_x-Konvertierungen liegen bei niedrigen bis mittleren Lastbereichen vor. In Abbildung 5.9 b) sind die durchschnittlichen NO_x-Konvertierungen für den vermessenen Pkw mit der ID 245 mit SCR-System im Unterboden gezeigt. Die Konvertierungen sind deutlich niedriger und liegen im Bereich von 10 % bis 65 %. Die besten Konvertierungen sind vor allem in Bereichen hoher Motorleistung und mittlerer Motordrehzahl vorhanden. Konvertierungen bei hohen Leistungen und Drehzahlen wurden extrapoliert und unterliegen daher einer gewissen Unsicherheit, da ab etwa 3 200 U/min keine entsprechenden Messdaten mehr verfügbar waren. Allerdings liegen Betriebspunkte in solchen Bereichen in Realität sowie auch in der Simulation nur selten vor.

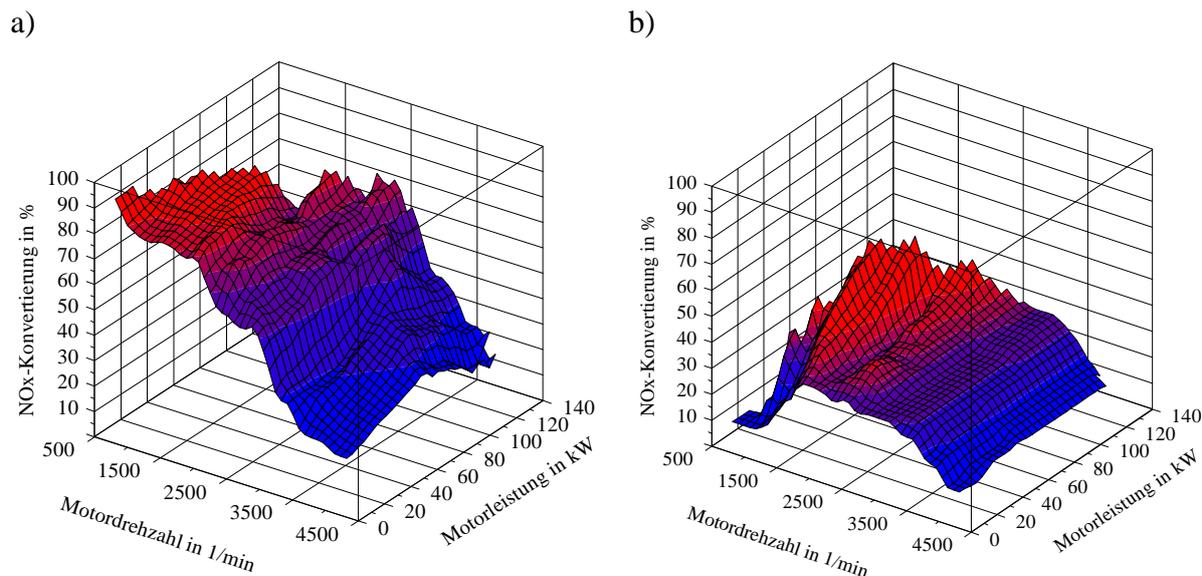


Abbildung 5.9: Durchschnittliche NO_x -Konvertierungen der vermessenen Pkw mit motornahem SCR-System (a) und SCR-System im Unterboden (b)

Die gezeigten NO_x -Konvertierungskennfelder der Pkw in Abbildung 5.9 mit motornahem SCR-System und SCR-System im Unterboden wurden für die Abgasnorm Euro 6a,b zu gleichen Anteilen zusammengewichtet. Da keine Messdaten von Euro 6c Diesel-Pkw und neuer verfügbar waren, wurden Ableitungen vom durchschnittlichen Euro 6a,b NO_x -Konvertierungskennfeld vorgenommen. Folgende Annahmen wurden dafür getroffen:

- Durchschnittliches NO_x -Konvertierungskennfeld für Euro 6c: Analog zur Gewichtung des Schadstoffkennfelds wurde der Gewichtungsfaktor für das Konvertierungskennfeld der Abgasnorm Euro 6a,b mit $1/3$, für das Konvertierungskennfeld der Abgasnorm Euro 6d-Temp mit $2/3$ gewählt.
- Durchschnittliches NO_x -Konvertierungskennfeld für Euro 6d-Temp: Für das durchschnittliche SCR-System des Euro 6d-Temp Diesel-Pkw wurde angenommen, dass SCR-Systeme bei den Fahrzeugen größtenteils nur mehr motornah verbaut werden. Deshalb wurde auch das NO_x -Konvertierungskennfeld aus den Messdaten mit motornahem SCR-System verwendet. Das NO_x -Konvertierungskennfeld wurde zusätzlich verbessert, um eine Effizienzsteigerung des SCR-Systems berücksichtigen zu können.
- Durchschnittliches NO_x -Konvertierungskennfeld für Euro 6d und Post-Euro 6: Es wurde davon ausgegangen, dass bei Diesel-Pkw dieser Abgasnormen ein motornahes SCR-System sowie ein SCR-System im Unterboden zum Einsatz kommen. Dadurch sollen die Nachteile der Anordnung im Unterboden durch die Vorteile der motornahen Anordnung und vice versa kompensiert werden. Wie auch bei Euro 6-Temp wurden Effizienzsteigerungen des SCR-Systems berücksichtigt. In den Motorbetriebspunkten realer Fahrten liegen durchgängige NO_x -Konvertierungen zwischen 80 und 98 % vor. Diese NO_x -Konvertierungen basieren auf Abschätzungen, wo sich die realen NO_x -Konvertierungsraten einpendeln werden, werden zukünftige Messungen zeigen.

Wie bereits erwähnt, verlangt die Simulation mit NH₃-Modell Engine-Out und End-of-Tailpipe NO_x-Kennfelder. Daher wurden mit den erstellten durchschnittlichen NO_x-Konvertierungskennfeldern und den durchschnittlichen End-of-Tailpipe NO_x-Kennfeldern die durchschnittlichen Engine-Out NO_x-Kennfelder, unter Berücksichtigung des Anteils an verbauten SCR-Systemen, berechnet. Tabelle 5-12 zeigt die Anteile an SCR-Systemen in der Diesel-Pkw-Flotte. Bis einschließlich Abgasnorm Euro 5 wurden keine SCR-Systeme in Diesel-Pkw verbaut. Für Euro 6a,b Diesel-Pkw liegt der Anteil an verbauten SCR-Systemen bei ca. 40 %. Für Euro 6c liegt der Anteil bei etwa 80 %, ab Euro 6d-Temp bei annähernd 100 %. Die Anteile der Diesel-Pkw mit SCR-Systemen wurden von den Fahrzeugdaten der vermessenen Fahrzeuge aus der ERMES-Datenbank abgeleitet.

Tabelle 5-12: Anteile an SCR-Systemen in der Diesel-Pkw-Flotte

	bis Euro 5	Euro 6a,b	Euro 6c	Euro 6d-Temp	Euro 6d	Post-Euro 6
Anteil an SCR-Systemen	0 % ¹⁰	40 %	80 %	100 %	100 %	100 %

5.5.2 Abgastemperaturkennfeld

Die für das NH₃-Modell relevante Temperatur ist die Temperatur des Temperatursensors vor SCR-System. Daher muss für die PHEM-Simulation mit NH₃-Modell u.a. ein Abgastemperaturkennfeld vorgegeben werden. Beim Abgastemperaturkennfeld handelt es sich um ein Abgastemperaturkennfeld mit Bezugspunkt vor Abgasturbolader. Im Kennfeld ist die Abgastemperatur als Funktion von Motorleistung und Motordrehzahl enthalten. Wie bereits in Kapitel 4.2.1 erwähnt, wird ausgehend vom Abgastemperatur- und Abgasmassenstromkennfeld die Temperatur für das Abgas im Abgasstrang sowie für die einzelnen Module des Abgasnachbehandlungssystems mit einem 0-dimensionalen Modell berechnet.

Aus den Messdaten der vier Euro 6a,b Diesel-Pkw wurden daher zwei Abgastemperaturkennfelder erzeugt. Abbildung 5.10 a) zeigt das Abgastemperaturkennfeld für Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System, Abbildung 5.10 b) das Abgastemperaturkennfeld für Euro 6a,b Diesel-Pkw mit SCR-System im Unterboden. Diese Kennfelder wurden für das NH₃-Modell verwendet. Die Annahme dabei ist, dass sich die Abgastemperaturen der vermessenen Fahrzeuge gleich verhalten wie der Durchschnitt der Euro 6a,b Diesel-Pkw-Flotte. Die Abbildungen zeigen, dass die Abgastemperatur mit zunehmender Motorleistung und Motordrehzahl ansteigt. Für Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System liegt eine Maximaltemperatur von 720 °C, für Diesel-Pkw mit SCR-System im Unterboden eine Maximaltemperatur von 550 °C im Kennfeld vor.

¹⁰ Einzelne Modelle mit verbautem SCR-System sind in der Flotte vorhanden, die aber aufgrund der geringen Anzahl vernachlässigt wurden.

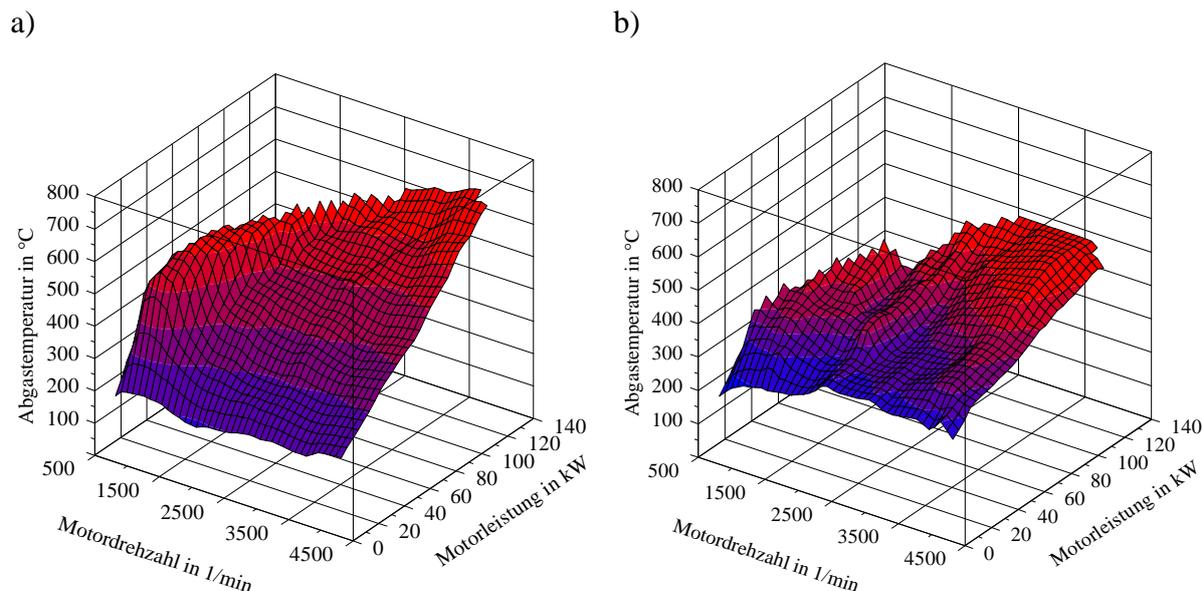


Abbildung 5.10: Abgastemperaturkennfeld für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System (a) und SCR-System im Unterboden (b)

Beide in Abbildung 5.10 gezeigten Abgastemperaturkennfelder wurden zu gleichen Anteilen, für die Erstellung des durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw Abgastemperaturkennfelds, zusammengewichtet.

Da noch keine Messdaten für Diesel-Pkw der Abgasnorm Euro 6c und neuer verfügbar waren, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Abgastemperaturkennfeld für Euro 6c: Der Gewichtungsfaktor wurde analog zu Kapitel 5.5.1 mit 1/3-Anteil des Abgastemperaturkennfelds der Abgasnorm Euro 6a,b und 2/3-Anteil des Abgastemperaturkennfelds der Abgasnorm Euro 6d-Temp gewählt.
- Abgastemperaturkennfeld für Euro 6d-Temp: Da für das durchschnittliche SCR-System des Euro 6d-Temp Diesel-Pkw angenommen wurde, dass das SCR-System großteils nur mehr motornah verbaut wird, wurde auch das durchschnittliche Abgastemperaturkennfeld aus den vermessenen Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System verwendet.
- Abgastemperaturkennfeld für Euro 6d und Post-Euro 6: Es wurde davon ausgegangen, dass Diesel-Pkw mit Euro 6d und neuer ein motornahes sowie ein SCR-System im Unterboden verbaut haben. Daher wurde das Abgastemperaturkennfeld ebenfalls aus dem Abgastemperaturkennfeld des Euro 6a,b Diesel-Pkw mit SCR-System im Unterboden und aus dem Abgastemperaturkennfeld des Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System zusammengesetzt. Somit wurden die höheren Temperaturen im Niederlastbereich aus dem Abgastemperaturkennfeld des Euro 6a,b Diesel-Pkw mit SCR-System im Unterboden mit den Temperaturen aus dem Abgastemperaturkennfeld des Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System kombiniert (damit konnten bereits verfügbare Heizstrategien von Pkw mit SCR-Systemen im Unterboden berücksichtigt werden). Verbesserte Heizstrategien, so wie sie in Zukunft möglicherweise eingesetzt werden könnten, wurden aufgrund noch nicht verfügbarer Messdaten nicht berücksichtigt.

5.5.3 Abgasmassenstromkennfeld

Bei der PHEM-Simulation mit NH_3 -Modell muss auch ein Abgasmassenstromkennfeld vorgegeben werden. Das Abgasmassenstromkennfeld der Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System wurde analog zu 5.5.1 mit dem Abgasmassenstrom des Euro 6a,b Diesel-Pkw mit SCR-System im Unterboden zusammengewichtet. Das Abgasmassenstromkennfeld der Pkw mit motornahem SCR-System war dabei ähnlich dem des Pkw mit SCR-System im Unterboden. Wie bereits in Kapitel 5.5.1 und 5.5.2 erwähnt, wurde auch beim Abgasmassenstromkennfeld angenommen, dass sich der Abgasmassenstrom der Euro 6a,b Diesel-Pkw-Flotte im Durchschnitt gleich verhält, wie jener der vermessenen vier Diesel-Pkw. In Abbildung 5.11 ist das durchschnittliche Massenstromkennfeld für die Euro 6a,b Diesel-Pkw Flotte gezeigt.

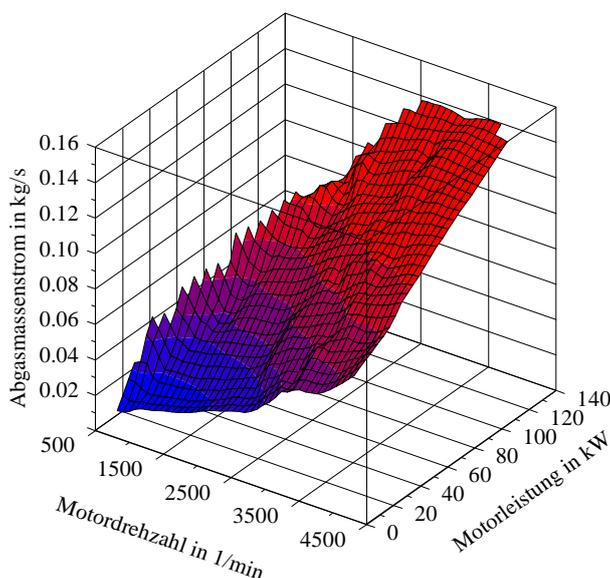


Abbildung 5.11: Abgasmassenstromkennfeld für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw

Für Abgasnorm Euro 6c und neuer setzt sich das Abgasmassenstromkennfeld wie folgt zusammen:

- Abgasmassenstromkennfeld für Euro 6c: Wie auch bei der Gewichtung des Abgastemperaturkennfelds wurde der Gewichtungsfaktor für das Abgasmassenstromkennfeld der Abgasnorm Euro 6a,b mit $1/3$, für das Abgasmassenstromkennfeld der Abgasnorm Euro 6d-Temp mit $2/3$ gewählt.
- Abgasmassenstromkennfeld für Euro 6d-Temp: Für den durchschnittlichen Euro 6d-Temp Diesel-Pkw wurde das Abgasmassenstromkennfeld der vermessenen Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System verwendet.
- Abgasmassenstromkennfeld für Euro 6d und Post-Euro 6: Für die Euro 6d und Post-Euro 6 Diesel-Pkw-Flotte wurde das Abgasmassenstromkennfeld aus den Abgasmassenstromkennfeldern der Euro 6a,b Diesel-Pkw mit SCR-System im Unterboden und aus dem Abgasmassenstromkennfeld des Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System zusammengesetzt. Effekte von eventuell höheren EGR-Raten bei diesen Pkw-Konzepten wurden nicht berücksichtigt, da zukünftige Anteile von Hoch- und Niederdruck-EGR nicht bekannt sind.

5.6 PHEM-Fahrzeugdaten

Wie bereits am Anfang von Kapitel 5 erwähnt, beziehen sich die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge bezüglich Masse, Beladung, Roll- und Luftwiderstand sowie Nutzung von Nebenaggregaten und den damit berechneten Kraftstoffverbräuchen bzw. CO₂-Emissionen auf die durchschnittliche Pkw-Flotte in Deutschland, da die Fahrzeugdaten in einem Projekt für das Umweltbundesamt Deutschland anhand der verfügbaren Spritmonitor.de-Daten angepasst wurden. Kraftstoffverbrauchs- und CO₂-Emissionsfaktoren anderer Länder werden in der HBEFA-Software angepasst [41]. Die Kennfelder für Schadstoffemissionen wurden dagegen entsprechend dem EU-28 Mix zusammengestellt. Die berechneten Schadstoffemissionen hängen natürlich auch von den Fahrzeugdaten ab, da diese Motorleistung und -drehzahl beeinflussen. Eine separate Simulation der Emissionsfaktoren einzelner Länder mit nationalen Fahrzeugdaten kombiniert mit national gewichteten Schadstoffkennfeldern wäre möglich, aber sehr aufwändig und wurde bislang nicht beauftragt.

Im Folgenden werden die wichtigsten PHEM-Eingabedaten der Durchschnittsfahrzeuge beschrieben.

5.6.1 Nennleistung, Nenndrehzahl, DIN-Leermasse und Beladung

Die Ermittlung der Fahrzeugmasse und Nennleistung erfolgte auf Basis der Daten der Neuzulassungen in Deutschland. Mit der Datenbank aus dem CO₂-Monitoring nach Kapitel 5.1.2 sowie zusätzlichen Daten vom ifeu [63] lagen die Werte zu Fahrzeugmasse und Nennleistung von 2001 bis 2016 für Deutschland vor. Damit konnten die Werte der Abgasnormen Euro 3 bis Euro 6a,b direkt ermittelt werden. Für Pkw bis Euro 2 wurden die Fahrzeugdaten von HBEFA 3.3 mit dem Euro 3 Verhältnis zwischen HBEFA 4.1 und HBEFA 3.3 skaliert. Euro 6c bis Post-Euro 6 wurden mit der zeitlichen Weiterentwicklung von Euro 5 auf Euro 6a,b mit den repräsentativen Jahren 2016 für Euro 6a,b und 2025 für Post-Euro 6 extrapoliert. Dieser Ansatz wurde zur Bestimmung der DIN-Leermasse und Nennleistung der Durchschnittsfahrzeuge verwendet. Da keine Daten für die Nenndrehzahl verfügbar waren, wurden die Nenndrehzahlen aus HBEFA 3.3 übernommen. Die durchschnittliche Beladung für Diesel- sowie Otto-Pkw wurde anhand der Kalibrierung mit Spritmonitor.de-Daten ermittelt und ist in Kapitel 5.7 beschrieben. In Tabelle 5-13 sind Nennleistungen und -drehzahlen sowie DIN-Leermassen der durchschnittlichen Diesel- und Otto-Pkw für HBEFA dargestellt.

Tabelle 5-13: Nennleistungen und -drehzahlen sowie DIN-Leermassen der durchschnittlichen Diesel- und Otto-Pkw in Deutschland

Abgasnorm	Diesel-Pkw			Otto-Pkw		
	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	DIN-Leermasse in kg	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	DIN-Leermasse in kg
1986-1988 (Diesel) bzw. ECE-15'04	63,8	4010	1295	70,2	5400	1095
Euro 1	68,8	4010	1335	76,2	5723	1115
Euro 2	81,8	4010	1385	78,2	5723	1145
Euro 3	90,8	3930	1455	80,2	5723	1165

Abgasnorm	Diesel-Pkw			Otto-Pkw		
	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	DIN-Leermasse in kg	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	DIN-Leermasse in kg
Euro 4	102,9	4073	1545	84,0	5565	1194
Euro 5	112,1	4014	1597	89,1	5247	1212
Euro 6a,b	120,8	3672	1628	99,1	5247	1237
Euro 6c	122,0	3672	1632	100,5	5247	1240
Euro 6d-Temp	124,3	3672	1640	103,3	5247	1247
Euro 6d	126,6	3672	1648	106,0	5247	1253
Post-Euro 6	130,1	3672	1660	110,2	5247	1263

5.6.2 Rollwiderstand

Die Rollwiderstände wurden aus drei Reifenlabels abgeleitet und sollen den durchschnittlichen Rollwiderstand für Deutschland repräsentieren. Der Anteil des jeweiligen Reifenlabels in der Flotte wurde angenommen, da keine Statistiken über die auf deutschen Straßen eingesetzten Reifen gefunden wurden. Der RRC (Rolling Resistance Coefficient) für die einzelnen Reifenlabels und deren Flottenanteile sind in Tabelle 5-14 dargestellt. Der RRC-Wert des jeweiligen Reifenlabels wurde aus [74] entnommen.

Tabelle 5-14: Reifenlabels und deren abgeschätzten Anteile für den durchschnittlichen Pkw in Deutschland für das Bezugsjahr 2018

Reifenlabel	RRC in kg/t	Anteil in Deutschland
E	9,44	20 %
C	8,12	50 %
B	6,89	30 %

Der gewichtete RRC wurde um einen Korrekturfaktor von 30 % erhöht, um auch Verluste zwischen Rad und Getriebeneutralgang zu berücksichtigen. Die Verluste von Getriebeneutralgang bis Motor werden bereits im Simulationsprogramm PHEM berücksichtigt. Des Weiteren wurde mit dem Korrekturfaktor auch berücksichtigt, dass das Reifenlabel mithilfe eines Trommelprüfstands ermittelt wird. Deshalb liegt im Gegensatz zur Straße eine andere Kontaktfläche zwischen Rad und Untergrund vor. Zusätzlich gibt es Unsicherheiten in der Oberflächenrauigkeit der Trommel, die nicht exakt der Asphaltoberfläche entspricht. Der Korrekturfaktor wurde durch Ausrollversuche auf der Straße mit bekanntem Reifenlabel anhand eines Pkw ermittelt. Der nach den Anteilen in Tabelle 5-14 gewichtete RRC, multipliziert mit dem Korrekturfaktor, war die Grundlage für die weitere Anpassung nach Kapitel 5.7 zur Berücksichtigung von z. B. zu niedrigem Reifendruck oder nasser Fahrbahn.

5.6.3 Luftwiderstand

Das Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche beschreibt, zusammen mit der Luftdichte, den Luftwiderstand eines Fahrzeugs. Die Basiswerte von Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche wurden wie folgt ermittelt:

- 1) Literaturstudie zu Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche für den durchschnittlichen Euro 6a,b Otto-Pkw in Deutschland. Ein Luftwiderstandsbeiwert in der Höhe von 0,3041 und eine Querschnittsfläche von 2,34 m² repräsentieren dabei den Durchschnitt aus verfügbaren WLTC-Testdaten.
- 2) Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche der anderen Abgasnormen von Otto-Pkw wurden mit dem Verhältnis des Luftwiderstands zu Euro 6a,b aus HBEFA 3.3 berechnet. Da HBEFA 3.3 auch realitätsnahe Luftwiderstandsbeiwerte verwendet hat, und seither keine neuen Daten zu ECE-15'04 bis Euro 5 identifiziert wurden, war ein umfangreicheres Update nicht erforderlich.
- 3) Um Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche von Diesel-Pkw für 1987 bis Euro 6a,b zu bestimmen, wurden die Verhältnisse zwischen Otto- und Diesel-Pkw aus HBEFA 3.3 berechnet. Aus diesen Verhältnissen wurden die Luftwiderstandsbeiwerte und Querschnittsflächen basierend auf dem HBEFA 4.1-Datensatz des Otto-Pkw abgeleitet.
- 4) Luftwiderstandsbeiwert und Querschnittsfläche der Euro 6c und neueren Diesel- und Otto-Pkw wurde vom jeweiligen Euro 6a,b Pkw als zeitliche Weiterentwicklung berechnet. Daten für Post-Euro 6 wurden abgeleitet, indem das gleiche Verhältnis von Euro 6a,b auf Post-Euro 6 angewandt wurde, welches bei Euro 5 auf Euro 6a,b vorlag. Mit den repräsentativen Jahren 2016 für Euro 6a,b und 2025 für Post-Euro 6 wurden die dazwischenliegenden Abgasnormen interpoliert.

Die durchschnittlichen Luftwiderstandsbeiwerte und Querschnittsflächen waren die Grundlage für weitere Anpassungen von z. B. Dachboxen und Anhängern in Kapitel 5.7.

5.6.4 Leistungsbedarf von Nebenverbrauchern

Die Nebenverbraucherleistung von Diesel- und Otto-Pkw im realen Straßenverkehr wurde in [22] untersucht und umfasst die Energieversorgung von Klimaanlage, Steuergeräten, Sensoren und anderen elektrischen Verbrauchern, wie z. B. Licht und Radio. Bisher konnte die Berücksichtigung der Klimaanlage in der HBEFA-Software explizit ausgewählt werden und beeinflusste nur Kraftstoffverbrauchs- und CO₂-Emissionsfaktoren. Die anderen elektrischen Verbraucher wurden bis dato nicht in der Simulation der Emissionsfaktoren berücksichtigt. Für HBEFA 4.1 wurde erstmals der Nebenverbraucherbedarf in der Simulation der Emissionsfaktoren berücksichtigt. Aufgrund neuer Daten wurden zusätzlich zu [22] weitere Untersuchungen des Leistungsbedarfs der Klimaanlage durchgeführt. Die finalen Ergebnisse sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Der berechnete mechanische Leistungsbedarf jeder Abgasnorm stellt die durchschnittliche Klimaanlageleistung über das Jahr für Deutschland dar. Der Leistungsbedarf der Klimaanlage (Mix aus 50 % vollautomatischer und 50 % halbautomatischer Klimaanlage) ist mit blauen Balken dargestellt. Dieser sank aufgrund technischer Verbesserungen im Laufe der Jahre von 742 W auf 420 W. Die roten Balken zeigen den Leistungsbedarf der Klimaanlage in der Flotte, berechnet mit dem Anteil der verfügbaren Klimaanlagen in den Fahrzeugen für jede Abgasnorm. Diese Anteile sollen dem durchschnittlichen Klimaanlagenanteil in Deutschland entsprechen und wurden aufgrund fehlender Literaturdaten abgeschätzt. Die Daten zeigen u.a. die Abschätzung, dass jeder Euro 5 und Euro 6a,b Pkw mit einer Klimaanlage ausgestattet wurde.

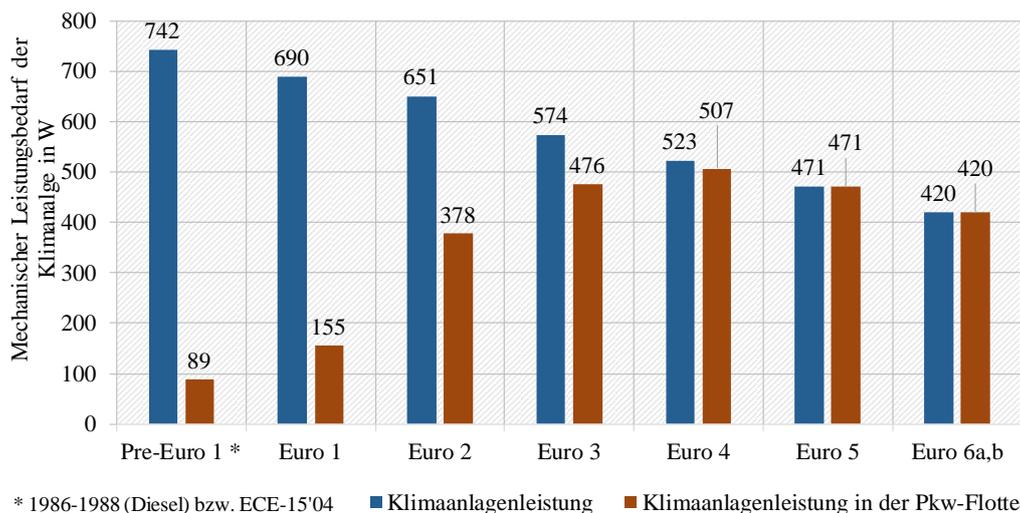


Abbildung 5.12: Durchschnittlicher Leistungsbedarf der Klimaanlage von Pkw in Deutschland

Die Schlussfolgerung der Untersuchungen war, dass der gesamte mechanische Nebenverbraucherbedarf für HBEFA vereinfacht als Funktion der Nennleistung dargestellt werden kann. Folgende mechanische Nebenverbraucherleistungen in kW wurden für die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge verwendet:

- 0,75 % der Nennleistung für Diesel-Pkw zwischen 1986-1988 bzw. für ECE-15'04 Otto-Pkw
- 1 % der Nennleistung für Euro 1 Diesel- und Otto-Pkw
- 1,5 % der Nennleistung für Euro 2 bis Euro 6a,b Diesel- und Otto-Pkw
- Da zum Zeitpunkt dieser Arbeiten noch keine Daten über den Nebenverbraucherbedarf von Euro 6c Diesel- bzw. Otto-Pkw und neuer vorlagen, wurden deren mechanische Nebenverbraucherleistungen ebenfalls mit 1,5 % der Nennleistung gewählt.

5.6.5 Start-Stopp-System

Seit Euro 5 sind in Pkw Start-Stopp-Systeme verbaut. Start-Stopp-Systeme schalten den Motor während der Stillstandphasen des Fahrzeugs automatisch ab. Dadurch werden Emissionen im Leerlauf des Motors vermieden. Die Aktivierung des Start-Stopp-Systems ist abhängig vom Ladezustand der Batterie und weiteren Parametern. Der Motor wird z. B. nicht abgeschaltet, wenn die Motor- oder Umgebungstemperatur unter bzw. über einem bestimmten Schwellwert liegt oder die Batterie nicht ausreichend geladen ist. Für die Berechnung der Emissionsfaktoren wurde ein durchschnittlicher Start-Stopp-Aktivierungsfaktor von 70 % für Euro 5 bis Euro 6d-Temp, 75 % für Euro 6d und 80 % für Post-Euro 6 abgeschätzt. Der Start-Stopp-Aktivierungsfaktor beschreibt den Anteil von Motoren, die bei Fahrzeugen mit Start-Stopp-System wirklich abgestellt werden. Tabelle 5-15 zeigt die Marktdurchdringung und den Anteil an funktionierendem und aktiviertem Start-Stopp-System für Deutschland. Der Gesamtfaktor von Start-Stopp-Systemen in der Flotte ergibt sich aus der Multiplikation der Marktdurchdringung und des Aktivierungsfaktors.

Tabelle 5-15: Marktdurchdringung und Aktivierungsfaktoren von Start-Stopp-Systemen für Pkw in Deutschland

	bis Euro 4	Euro 5	Euro 6a,b	Euro 6c	Euro 6d-Temp	Euro 6d	Post-Euro 6
Marktdurchdringung	0 %	50 %	75 %	80 %	87 %	90 %	100 %
Aktivierungsanteil	0 %	70 %	70 %	70 %	70 %	75 %	80 %
Gesamtanteil von aktivierten Start-Stopp-Systemen in der Flotte	0 %	35 %	53 %	56 %	61 %	68 %	80 %

5.6.6 Abgasnachbehandlungssysteme

Für die Bedatung des NH₃-Modells waren u.a. die Marktdurchdringung und die Volumina von SCR-Systemen der Diesel-Pkw-Flotte notwendig. Aus den Fahrzeugdaten der vermessenen Fahrzeuge in der ERMES-Datenbank wurden diese Daten für Deutschland abgeleitet (Tabelle 5-16). Der Vollständigkeit halber sind in der Tabelle auch die Anteile der NO_x-Speicherkatalysatoren angeführt. Beim PHEM-Durchschnittsfahrzeug der Abgasnorm Euro 6a,b wurde das modellierte SCR-System am weitesten vom Motor entfernt angeordnet, beim Euro 6d-Temp PHEM-Durchschnittsfahrzeug wurde das SCR-System motornah modelliert. Beim Euro 6c PHEM-Durchschnittsfahrzeug liegt das SCR-System zwischen jenem vom Euro 6a,b und Euro 6d-Temp. Die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge der Abgasnormen Euro 6d und Post-Euro 6 berücksichtigen ein motornah verbautes SCR-System sowie ein SCR-System im Unterboden. Für die HBEFA-Simulationen wurde als Starttemperatur der Abgasnachbehandlungssysteme 250 °C für motornah Systeme und 200 °C für Systeme im Unterboden angenommen. Die Starttemperaturen wurden von realen RDE-Tests für ein durchschnittliches Verkehrsaufkommen und für einen durchschnittlichen Fahrstil abgeleitet. Durch den in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Vorkonditionierzyklus wird das Abgasnachbehandlungssystem aber ohnehin für die jeweilige Verkehrssituation separat vorkonditioniert. Die Kaltstartzusatzemissionen werden in der HBEFA-Software getrennt berücksichtigt.

Tabelle 5-16: Abgasnachbehandlungssysteme der Diesel-Pkw-Flotte in Deutschland

Abgasnachbehandlungssystem	vor Euro 5	Euro 5	Euro 6a,b	Euro 6c	Euro 6d-Temp	Euro 6d	Post-Euro 6
Anteil LNT-System in %	0 %	50 %	40 %	20 %	0 % ¹¹	0 %	0 %
Anteil SCR-System bzw. LNT+SCR-System in %	0 %	0 % ¹¹	40 %	80 %	100 %	100 %	100 %
SCR-Gesamtvolumen in l	0 l	0 l	2,5 l	2,5 l	2,5 l	4,5 l	4,5 l

¹¹ Vernachlässigbarer Anteil in der Diesel-Pkw-Flotte vorhanden.

5.7 Anpassung der PHEM-Fahrzeugdaten an den Realkraftstoffverbrauch

Für Pkw liegen umfangreiche Daten zum realen Kraftstoffverbrauch in Deutschland nach Kapitel 5.1.3 vor, die einen deutlich höheren Kraftstoffverbrauch unter realen Verkehrsbedingungen als im NEFZ-Typprüfzyklus zeigen. Zwar wurden im HBEFA schon immer reale Fahrwiderstände in der Simulation verwendet, ein Abgleich mit Real World Datenbanken erfolgte bislang aber nicht.

Um einen Abgleich zu erreichen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die beschriebenen Lücken analysiert und die Fahrzeugeingabedaten für PHEM angepasst, um alle relevanten und realen Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch abdecken zu können. Die durchgeführten Fahrzeuganpassungen der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge ist auch als Veröffentlichung unter [17] und [77] verfügbar.

Im realen Straßenverkehr können folgende Effekte die Fahrwiderstände erhöhen:

- Einflüsse durch Seitenwind
- Nasse Straßenbahnverhältnisse
- Matsch- oder Schneefahrbahn
- Höherer Rollwiderstand von verschiedenen Reifentypen (z. B. Winterreifen gegenüber Sommerreifen)
- Abweichungen des Reifendrucks von der Herstellerempfehlung
- Aufbauten (z. B. Dachbox) und Anhänger
- Beladung

Darüber hinaus liegt bei Straßenfahrten gegenüber der Typprüfung am Pkw-Rollenprüfstand eine Erhöhung der Motorleistung aufgrund folgender Punkte vor:

- Steigung
- Leistungsbedarf von aktivierten Nebenverbrauchern (z. B. Klimaanlage, Sitzheizung)

Die Kombination dieser Effekte führt zu höheren Motorleistungen, möglicherweise unterschiedlichem Schaltverhalten und damit im realen Straßenverkehr zu anderen Kraftstoffverbräuchen und Emissionen als im Typprüfzyklus, insbesondere im Vergleich zur Typpgenehmigung nach NEFZ-Gesetz.

Durch die Simulation von NEFZ, WLTC, RDE-Tests und von durchschnittlichen realen Fahrten in Deutschland konnten die für reale Fahrten unbekannt Parameter Beladung, Roll- und Luftwiderstand mithilfe der gemessenen sowie der in der Spritmonitor.de-Datenbank eingetragenen Kraftstoffverbrauchswerte angepasst werden. Das durchschnittliche reale Fahren wurde in der Simulation anhand des deutschen Mix an HBEFA-Verkehrssituationen abgebildet. Insgesamt wurden für diese Untersuchung jeweils vier Diesel- und Otto-Pkw der Abgasnorm Euro 6a,b ausgewählt. Kriterien für die Auswahl dieser Pkw waren einerseits verfügbare Messdaten von Pkw-Rollenprüfstandtests sowie von RDE-Tests, andererseits repräsentative Einträge unter Spritmonitor.de. Für die Untersuchung wurden die Diesel-Pkw mit der ID 245, 254, 262 und 264 sowie die Otto-Pkw mit der ID 265, 279, 280 und 282 herangezogen. Die Fahrzeugdaten der untersuchten Fahrzeuge sind in Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2 in Anhang A enthalten.

Für jedes Fahrzeug wurden die erwähnten Zyklen simuliert und mit den Messungen verglichen. Abbildung 5.13 zeigt die Mittelwerte der CO₂-Werte für die vier Diesel- bzw. Otto-Pkw. Durch Anpassung von Beladung, Roll- und Luftwiderstand konnten die CO₂-Emissionen bzw. Kraftstoffverbräuche aller Zyklen mit einer Abweichung von +/- 1 % in der Simulation nachgebildet werden. Die detaillierten Simulationsergebnisse für NEFZ, WLTC, RDE-Tests und für die durchschnittlichen realen Fahrten in Deutschland können [42] und [44] entnommen werden.

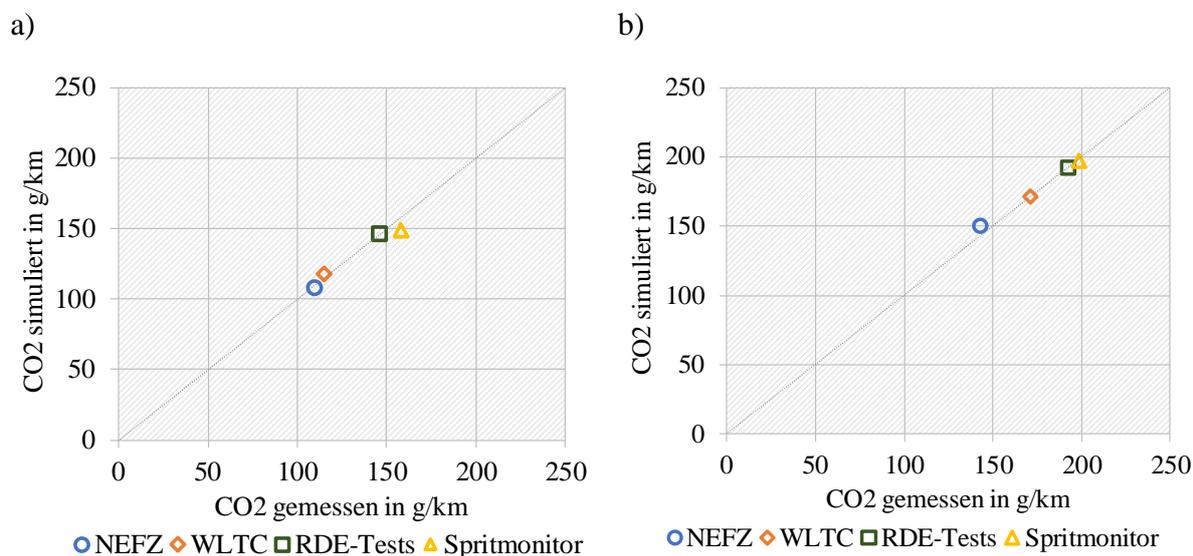


Abbildung 5.13: Simulierte und gemessene CO₂-Emissionen (Mittelwert von vier Diesel-Pkw (a) und von vier Otto-Pkw (b) in verschiedenen Zyklen)

Da die gemessenen Kraftstoffverbrauchs- bzw. CO₂-Werte in NEFZ und WLTC sehr gut wiedergegeben werden und bei diesen Zyklen die Fahrwiderstände aus den Prüfstandeinstellungen genau bekannt sind, ist die Genauigkeit der Simulation bei bekannten Parametern bestätigt. Für die RDE-Tests wurden Aufschläge für aktive Nebenaggregate sowie Luft- und Rollwiderstandsbeiwerte angepasst, die wegen realer Straßenbedingungen und dem höheren Luftwiderstand durch das montierte PEMS-System entstehen. Die Beladungen der Kfz waren für die RDE-Tests bekannt. Bei der Simulation der HBEFA-Zyklen für den Abgleich mit den Spritmonitor.de-Daten wurde der Aufschlag für PEMS wieder entfernt. Dafür wurden Korrekturen in den Fahrwiderständen und der Beladung infolge anderer Einflüsse im realen Betrieb eingeführt. Die Erkenntnisse aus dem Abgleich für die acht Pkw wurden dann auf die Durchschnittsfahrzeuge in PHEM umgelegt und die Ergebnisse der PHEM-Simulationen für die HBEFA-Zyklen mit den Spritmonitor.de-Daten abgeglichen.

Nachfolgend sind die aus den durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse für die Anpassungen der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge für das reale Fahren in Deutschland (entsprechend den mittleren Kraftstoffverbrauchswerten aus Spritmonitor.de) zusammengefasst.

- a. Für die Berechnung der Beladung der HBEFA-Durchschnittsfahrzeuge wurden folgende Annahmen getroffen:
 - Die DIN-Leermasse enthält keine Zusatzausstattung des Fahrzeugs. Um diese im Flottendurchschnitt zu berücksichtigen, wurde die Zusatzausstattung mit 5 % der DIN-Leermasse veranschlagt.

- Bei der Berechnung der Beladung wurden auch Tendenzen von Fahrzeugbesitzern unterschieden. Eine Tatsache dabei war, dass der durchschnittliche Diesel-Pkw größer und stärker motorisiert ist, als der durchschnittliche Otto-Pkw. Daher wurde angenommen, dass Urlaubsfahrten mit mehr Beladung (z. B. auch mit Wohn- oder Bootsanhängern) tendenziell mit Diesel-Pkw durchgeführt werden. So wurden für den durchschnittlichen Diesel-Pkw jährlich 3 000 km mit 4 Insassen und 100 kg Beladung (Fahrten in den Urlaub bzw. längere Fahrten von A nach B) und 10 000 km mit 1,5 Insassen und 50 kg (für den täglichen Verkehr) angenommen. Für den durchschnittlichen Otto-Pkw wurden im Jahresdurchschnitt 10 000 km mit 1,2 Insassen und 30 kg Beladung angenommen. Je Insasse wurde 75 kg veranschlagt.
- b. Der Rollwiderstandsbeiwert wurde um 6,3 % erhöht. Dabei wurden Anteile der folgenden Einflussgrößen berücksichtigt:
- Ca. 6 % der gefahrenen Kilometer der Fahrzeuge werden auf nassen Straßen bzw. auf Schneefahrbahnen zurückgelegt.
 - Ca. 30 % der gefahrenen Kilometer werden mit Winterreifen und einem teilweisen nicht idealen Reifendruck zurückgelegt.
 - Für Diesel-Pkw wurde aufgrund der Wahl einer größeren Reifendimension ein Anstieg des Rollwiderstands um weitere 5 % angenommen.
- c. Der Luftwiderstandsbeiwert der Pkw wurde um 8,5 % aufgrund folgender Punkte erhöht:
- Seitenwindeffekte [79]
 - Ca. 5 % Anteil an den mit Anhängern gefahrenen Kilometern
 - Ca. 5 % Anteil der gefahrenen Kilometer mit Dachboxen
 - Eine höhere Luftdichte als unter Normbedingungen aufgrund der niedrigeren Durchschnittstemperatur in Deutschland (12 °C statt 20 °C)

Die Simulationsergebnisse für die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge (PHEM-Diesel-Pkw und PHEM-Otto-Pkw) entsprechen den Ergebnissen aus dem CO₂-Monitoring und Spritmonitor.de mit weniger als 2 % Abweichung ohne weitere Anpassungsanforderungen. Somit ist auch das Verhältnis zwischen den simulierten realen CO₂-Emissionen und den NEFZ-Typgenehmigungswerten in Abbildung 5.14 sehr ähnlich. In Abbildung 5.14 sind keine Angaben vor Euro 3 und nach Euro 6a,b ersichtlich, da dazu keine Daten unter Spritmonitor.de verfügbar waren.

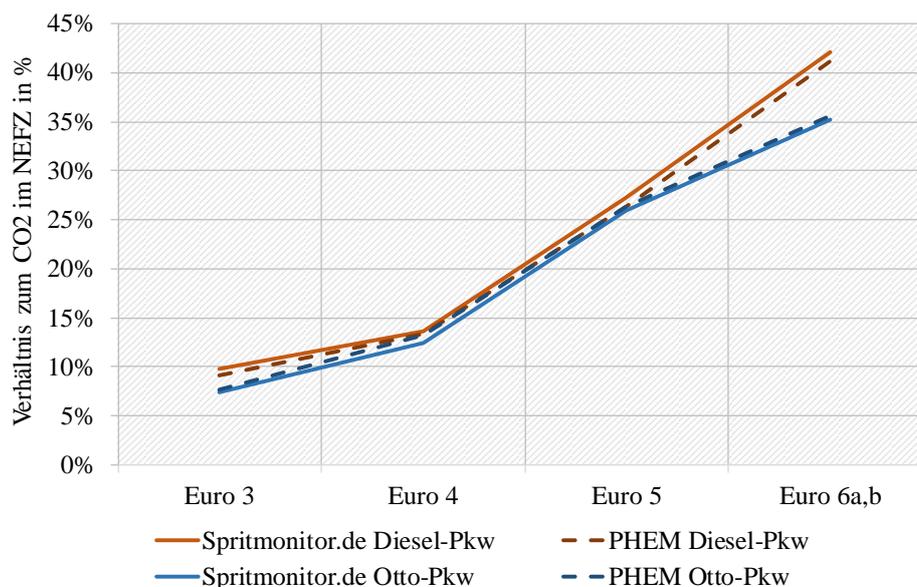


Abbildung 5.14: Verhältnis der realen CO₂-Emissionen sowie der mit PHEM simulierten CO₂-Emissionen zum CO₂ im NEFZ

5.8 Anpassung der PHEM-Schadstoffkennfelder

Die Anpassung von erstellten Schadstoffkennfeldern, die auf einer begrenzten Stichprobe von Fahrzeugmessungen mit modalen Messdaten basieren, hat das Ziel, eine breitere Stichprobe von Beutelmessergebnissen (z. B. Zyklen ohne Messung der Motordrehzahl), die ebenfalls in der ERMES-Datenbank gespeichert sind, zu berücksichtigen. In den vorangegangenen HBEFA-Versionen waren nahezu alle Messdaten aus Rollenprüfstandtests (CADC und ERMES). Durch Simulation dieser Zyklen mit den Durchschnittskennfeldern aus der kleineren Stichprobe der Tests mit Modaldaten und Niveauabgleich mit dem Durchschnitt der Beutelwerte aus der gesamten Testmenge, konnte das simulierte Flottenemissionsniveau an eine möglichst große Anzahl an Kfz angepasst werden.

Da für HBEFA 4.1 für viele gemessene Euro 6 Pkw nur PEMS-Messdaten verfügbar waren, fehlten gemeinsame Testzyklen für so einen Niveauabgleich. Abgesehen von den unterschiedlichen Fahrprofilen in RDE-Tests sind auch Fahrwiderstände und Leistungsbedarf der Nebenverbraucher zwischen RDE-Tests unterschiedlich und auch unterschiedlich zu den verfügbaren Rollenprüfstandtests.

Im Rahmen der Arbeit wurde daher eine vereinfachte Vorgehensweise zur Anpassung der Schadstoffkennfelder zwischen Messung und Simulation erarbeitet:

- 1) CADC, ERMES und ein RDE-Zyklus wurden mit den durchschnittlichen Schadstoffkennfeldern und den PHEM-Durchschnittsfahrzeugen für jede Abgasnorm berechnet.
- 2) Die gemessenen und simulierten Emissionen in CADC, ERMES und RDE wurden in g Emission je km zu g CO₂ je km verglichen. Mit diesem Ansatz werden unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften, die zu unterschiedlichem Emissionsverhalten führen, größtenteils kompensiert.
- 3) Stimmen die simulierten Werte mit dem Trend der Messdaten überein, wurde keine weitere Anpassung vorgenommen. Andernfalls wurde eine Anpassung der entsprechenden Emissionskomponente durchgeführt.

Durch diese Vorgehensweise konnten auch Messdaten von z. B. Testreihen des Magazins Auto-Motor-Sport berücksichtigt werden [7].

Nachfolgend wird die Validierung der End-of-Tailpipe NO_x -Emissionen von Euro 6a,b Diesel-Pkw exemplarisch gezeigt. Mehr als 90 Euro 6a,b Diesel-Pkw wurden mit unterschiedlichen Testmassen und Fahrwiderständen in 300 Zyklen gemessen. Um diese Zyklen trotz unterschiedlicher Einflüsse miteinander vergleichen zu können, wurde der durchschnittliche g NO_x je km über g CO_2 je km Wert aufgetragen. Die durchschnittlichen Messdaten der Zyklen sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Die Datenpunkte wurden in diesem Ausschnitt vereinfacht durch eine lineare Regression beschrieben, die einen NO_x -Anstieg mit steigendem CO_2 zeigt. Wie bereits zuvor beschrieben, ist der Euro 6a,b PHEM-Diesel-Pkw schwerer und hat im Vergleich zu den gemessenen Fahrzeugen höhere Fahrwiderstände. Daher sind die simulierten CO_2 -Emissionen auch höher als jene der Messdaten und sollten den Verlauf der gemessenen NO_x -Daten fortsetzen. Abbildung 5.15 zeigt, dass es eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung gibt.

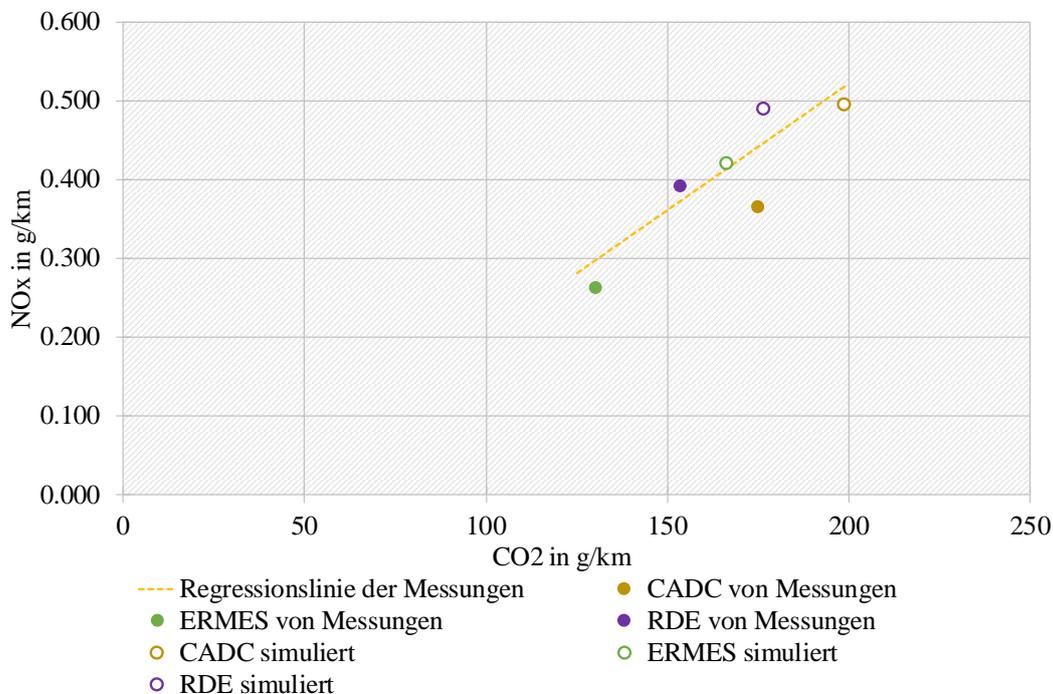


Abbildung 5.15: Validierung der NO_x -Emissionen für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw

Analoge Validierungen wurden für die limitierten Schadstoffe CO, HC, PM und PN von Diesel- und Otto-Pkw der Abgasnormen von Euro 6a,b und neuer durchgeführt. Die bereits validierten Schadstoffkennfelder bis einschließlich Euro 5 wurden von HBEFA 3.3 übernommen. Von den Schadstoffkennfeldern von Euro 6a,b und neuer mussten nur Anpassungen der Partikelmasse bei Euro 6a,b und Euro 6d-Temp Diesel-Pkw durchgeführt werden. Hier zeigte die breitere Stichprobe von Messdaten in der ERMES-Datenbank geringere PM-Emissionen als jene modalen Messdaten, die für die Schadstoffkennfelderstellung herangezogen wurden.

5.9 Korrektur- und Anteilsfaktoren

Die mit PHEM simulierten Emissionsfaktoren beziehen sich auf 20 °C Umgebungstemperatur und 50 000 km Laufleistung. Eine anteilmäßige Emissionserhöhung durch DPF-Regenerationen wurde in den Emissionsfaktoren berücksichtigt. Dafür wurden K_i -Faktoren erarbeitet, die auf die PHEM-Kennfelder ohne DPF-Regeneration aufgeschlagen wurden. Zusätzlich wurden folgende Korrektur- und Anteilsfaktoren erarbeitet, die vom Benutzer in der HBEFA-Software verwendet werden können:

- Korrekturfaktor für abweichende km-Laufleistung zur Basis mit 50 Tkm. Eine Korrektur der Laufleistung nach Betriebsstunden des Fahrzeugs wurde bisher noch nicht untersucht. Dies könnte bei häufigen Kurzstreckenfahrten sowie bei Fahrten mit ständigem erhöhten Verkehrsaufkommen einen Einfluss haben.
- Korrekturfaktor für abweichende Umgebungstemperatur zur Basis mit 20 °C
- Anteilsfaktor NO_2 an NO_x

Die erwähnten Korrektur- und Anteilsfaktoren werden in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

5.9.1 K_i -Faktoren zur Berücksichtigung von Partikelfilterregenerationen

Um die PM- und PN-Emissionsgrenzwerte für Pkw einzuhalten, wurden Partikelfilter für Diesel-Pkw teilweise mit Euro 4, flächendeckend ab Euro 5 eingeführt. Mit Euro 6d-Temp wurden auch bei Otto-Pkw vermehrt Partikelfilter eingesetzt. Der Partikelfilter muss bei Erreichen einer bestimmten Partikelbeladung regeneriert werden. Bei der Partikelfilterregeneration sind Emissionen deutlich höher als in normalen Fahrsituationen. Die höheren Schadstoffe bei Partikelfilterregenerationen wurden bei Diesel-Pkw durch Korrekturfaktoren berücksichtigt. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit waren noch keine Messdaten zu Partikelfilterregenerationen bei Otto-Pkw verfügbar. Deshalb konnten GPF-Regenerationen im HBEFA 4.1 auch noch nicht berücksichtigt werden. Allerdings treten aktive GPF-Regenerationen laut [66] selten auf, da wegen der hohen Abgastemperatur bei Ottomotoren und der ausreichenden Sauerstoffverfügbarkeit im Schlepptrieb, die passive Regeneration meist ausreicht.

Die Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der DPF-Regeneration werden auch als K_i -Faktoren bezeichnet. Die K_i -Faktoren wurden auf die PHEM-Kennfelder ohne Partikelfilterregeneration angewendet.

Die K_i -Faktoren für NO_x , CO, HC und PM wurden von insgesamt zehn Motoren von UTAC (Union Technique de l'Automobile du motorcycle et du Cycle) und KBA zur Verfügung gestellt [53]. Für CO_2 und PN wurden im Rahmen dieser Arbeit K_i -Faktoren aus Messungen von vier Diesel-Pkw (Fahrzeug ID 211, 226, 264, 271 und 298) abgeleitet. Tabelle 10-1 in Anhang A zeigt die entsprechenden Fahrzeugdaten.

Es wurden Messdaten herangezogen, bei denen ein Regenerationsereignis während eines Tests aufgetreten ist und die gleichen Tests ohne Regeneration solange wiederholt wurden, bis wieder ein Regenerationsereignis vorlag. Um aus den zusätzlichen Emissionen pro Regeneration den K_i -Faktor ableiten zu können, wurden zusätzlich folgende Daten aus den Messungen herangezogen:

- Die DPF-Regenerationen erfolgten nach ca. 450 km mit normalem Fahrstil.
- Die DPF-Regenerationen dauerten in der Regel zwischen 5 und 10 Minuten.
- Die Entschwefelung von NO_x-Speicherкатаlysatoren führt auch zur DPF-Regeneration. Die Entschwefelung erfolgte nach etwa 1 500 km mit normalem Fahrstil. Die Entschwefelungsdauer belief sich auf 5 bis 10 Minuten.

Da noch keine Fahrzeuge mit Euro 6d und Post-Euro 6 verfügbar waren, wurden die K_i-Faktoren von Euro 6d-Temp übernommen. Tabelle 5-17 zeigt die K_i-Faktoren für die verschiedenen Abgasnormen.

Tabelle 5-17: K_i-Faktoren zur Berücksichtigung der Emissionserhöhungen aufgrund DPF-Regenerationen

Abgasnorm	K _i -Faktor für CO ₂	K _i -Faktor für CO	K _i -Faktor für HC	K _i -Faktor für NO _x	K _i -Faktor für PM	K _i -Faktor für PN
bis Euro 3	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Euro 4	1,010	1,005	1,024	1,047	1,419	1,419
Euro 5						3,286
Euro 6a,b						2,363
Euro 6c						1,908
Euro 6d-Temp						1,908
Euro 6d						1,908
Post-Euro 6						1,908

5.9.2 Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Laufleistungseinflusses auf die Emissionen

Die Korrekturfaktoren berücksichtigen die durchschnittlichen Auswirkungen einer zunehmenden km-Laufleistung auf die Emissionen der Flotte. Die Erarbeitung der Korrekturfaktoren für die Abbildung der km-Laufleistung war nicht Bestandteil dieser Arbeit, dennoch sollen sie der Vollständigkeit halber hier kurz beschrieben werden. Eine detaillierte Beschreibung ist unter [37] und [59] zu finden. Effekte, die zu einer Erhöhung der Emissionen durch zunehmende Laufleistung führen können, sind:

- Chemische und thermische Alterung des Abgasnachbehandlungssystems
- Abnehmende Genauigkeiten der für die Emissionen relevanten Sensoren und Aktoren
- Ausfälle relevanter Komponenten, die vom OBD-System des Fahrzeugs nicht erkannt werden

Abgasnorm	NO _x -Alterung nach kumulierter Laufleistung					CO-Alterung nach kumulierter Laufleistung				
	0 km	50 Tkm	100 Tkm	200 Tkm	300 Tkm	0 km	50 Tkm	100 Tkm	200 Tkm	300 Tkm
Euro 2	1,00	1,00	1,00	1,25	1,25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 3	1,00	1,00	1,05	1,20	1,33	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 4	1,00	1,00	1,03	1,06	1,13	1,00	1,00	1,00	1,30	1,30
Euro 5	1,00	1,00	1,00	1,03	1,07	1,00	1,00	1,00	1,30	1,30
Euro 6a,b	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25	1,00	1,00	1,15	1,40	1,67
Euro 6c	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25	1,00	1,00	1,15	1,40	1,67
Euro 6d-Temp	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25	1,00	1,00	1,15	1,40	1,67
Euro 6d	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25	1,00	1,00	1,15	1,40	1,67
Post-Euro 6	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25	1,00	1,00	1,10	1,30	1,50

5.9.3 Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen

Die nachfolgende Beschreibung über den physikalischen Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und NO_x-Emissionen sind aus [14], [35] und [20] entnommen. Die NO_x-Bildung kann mit dem Zeldovich-Mechanismus beschrieben werden und ist abhängig von der Verbrennungstemperatur und der Sauerstoffkonzentration an der Flammenfront im Brennraum. Höhere Verbrennungstemperaturen und ausreichend Sauerstoff führen zu höheren Engine-Out NO_x-Emissionen, wenn alle anderen Randbedingungen unverändert bleiben. So führen bei herkömmlichen Motortechnologien niedrigere Umgebungstemperaturen zu einer niedrigeren Verbrennungstemperatur an der Flammenfront und damit zu geringeren NO_x-Emissionen am Motorauslass, wenn die EGR-Rate unverändert bleibt. Wenn die EGR-Rate in Richtung niedriger Umgebungstemperaturen reduziert wird, z. B. um Kondensation im EGR-Kühler zu vermeiden, kann sich insgesamt ein Anstieg der Engine-Out NO_x-Emissionen ergeben. Durch Abgasnachbehandlungssysteme können die Engine-Out NO_x-Emissionen bei ordnungsgemäßer Betriebsweise gesenkt werden, sofern die Systeme auf Betriebstemperatur sind. Hier besteht also auch eine Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

Eine Änderung der NO_x-Reduktionsstrategien sowohl bei der Verbrennung als auch bei der Abgasnachbehandlung zieht auch eine Änderung der NO_x-Emissionen am Auspuff nach sich. Höhere NO_x-Emissionen können aufgrund folgender Änderungen der Regelstrategien vorliegen:

- Senkung der EGR-Raten (Erhöhung der Engine-Out NO_x-Emissionen)
- Reduzierung der AdBlue-Dosierung bei Fahrzeugen mit SCR-Systemen (geringere NO_x-Reduktion im Abgasnachbehandlungssystem)
- Reduzierung der Regenerationen für NO_x-Speicherkatalysatoren (geringere NO_x-Reduktion im Abgasnachbehandlungssystem)

Nachfolgend sind die Effekte und Beweggründe solcher Regeleingriffe zusammengefasst.

Die NO_x -Reduktionsstrategien haben auch Nachteile, wie z. B. Verkokung des Abgasrückführungssystems, erhöhter Kraftstoffverbrauch aufgrund Regenerationsphasen des NO_x -Speicherkatalysators oder AdBlue-Verbrauch bei Fahrzeugen mit SCR-Systemen. Daher wurde offensichtlich bei einer Vielzahl von Fahrzeugmodellen die Reduzierung der NO_x -Reduktionsstrategien außerhalb des Umgebungstemperaturfensters bei Typprüfungen (20 °C bis 30 °C) durchgeführt.

Die Abgasrückführung nutzt die Eigenschaften vom sogenannten Inertgas, um Verbrennungstemperatur und Sauerstoffkonzentration bei der Rückführung von ungekühltem oder gekühltem Abgas zu reduzieren. Durch die Rückführung von Verbrennungsprodukten steigt die Wasserdampfkonzentration im Abgas mit der EGR-Rate an. Folglich sind niedrigere Umgebungstemperaturen bei höheren EGR-Raten kritischer in Bezug auf Kondensationseffekte im EGR-Pfad. Die Kondensation von Wasser mit Partikeln und Kohlenwasserstoffen kann zu Problemen führen, wie z. B. das Zusetzen des EGR-Kühlers oder des Einlasssystems durch Verkokung. Daher kann die EGR-Rate reduziert oder deaktiviert werden, um Schäden an Komponenten im EGR-Pfad zu vermeiden. Wenn die EGR-Rate bei niedrigeren Umgebungstemperaturen reduziert wird, führt dies zu mehr Engine-Out NO_x -Emissionen.

SCR-Systeme benötigen NH_3 für die NO_x -Umwandlung. Die Umwandlung von AdBlue in NH_3 funktioniert nur bei Abgastemperaturen über etwa 190 °C. Des Weiteren weisen die SCR-Systeme im Allgemeinen niedrigere Wirkungsgrade auf, wenn die Abgastemperatur unter 220 °C fällt. Niedrigere Umgebungstemperaturen führen auch zu niedrigeren Abgastemperaturen und damit zu einer Verringerung des SCR-Wirkungsgrades, insbesondere bei Niederlastfahrten. Neben diesem physikalischen Effekt ist ein niedriger AdBlue-Verbrauch für den Fahrzeugbesitzer attraktiv. Der AdBlue-Verbrauch ist proportional zur NO_x -Reduktion, sodass eine reduzierte AdBlue-Dosierung bei Umgebungstemperaturen außerhalb des Typpflichtfensters auch zu erhöhten NO_x -Emissionen führt.

Bei NO_x -Speicherkatalysatoren liegt durch die Regenerationen ein erhöhter Kraftstoffverbrauch vor. Weniger Regenerationsereignisse außerhalb des Umgebungstemperaturfensters bei Typpflichtungen können für den Fahrzeugbesitzer als attraktiv angesehen werden, erhöhen aber die NO_x -Emissionen.

Um die beschriebenen Annahmen der NO_x -Erhöhung außerhalb des Bereichs von 20 °C bis 30 °C Umgebungstemperatur mit Messdaten belegen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Messungen durchgeführt [62]. Zusätzlich wurden auch Messdaten von TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) herangezogen. Die Messdaten von vier Euro 6a,b Diesel-Pkw verschiedener Automarken wurden danach ausgewertet und analysiert (Fahrzeug ID 211, 245, TNO_1 und TNO_2). Die wichtigsten Fahrzeugdaten sind in Tabelle 10-1 in Anhang A zusammengefasst. Die vier Fahrzeuge wurden am Pkw-Rollenprüfstand sowie im realen Straßenverkehr bei verschiedenen Umgebungstemperaturen vermessen. Insgesamt wurden 31 Messungen zwischen -5 °C und 30 °C durchgeführt. Da Messungen am Pkw-Rollenprüfstand sowie auch im realen Straßenverkehr durchgeführt wurden, ist ein direkter Vergleich der Messdaten nur eingeschränkt möglich. Deshalb wurden fahrzeugspezifische PHEM-Kennfelder von Messdaten für die jeweils bei der Messung vorgelegene Umgebungstemperatur mittels der CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode nach Kapitel 4.1 erstellt. Mit diesen Kennfeldern wurde der realitätsnahe CADK für die untersuchten Pkw simuliert. Das Ergebnis ist die Änderung der NO_x -Emissionen als Funktion der Umgebungstemperatur. Zusätzliche Einflussfaktoren auf die NO_x -Änderungen, wie z. B. verschiedene Fahrstile oder Beladungen, so wie sie bei Messungen vorlagen, können somit weitgehend ausgeschlossen werden. In geringem Umfang können Unterschiede in den

Testfahrten die Emissionen in den PHEM-Kennfeldern beeinflusst haben (z. B. etwas andere Motortemperaturniveaus bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen). Abbildung 5.16 a) zeigt die Simulationsergebnisse für den CADC. Daraus ist der Trend zu erkennen, dass die NO_x -Emissionen mit abnehmender Umgebungstemperatur ansteigen.

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Motor- und Abgasnachbehandlungstechnologien der Fahrzeughersteller wäre eine repräsentative Korrekturfunktion für die gesamte Diesel-Pkw-Flotte mit hohem Messaufwand verbunden. Daher wurden die Korrekturfaktoren aus der CONOX-Datenbank abgeleitet, die Messdaten von Fahrzeugen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen enthält. [9] [16] [27]

Abbildung 5.16 b) zeigt den Vergleich zwischen den durchgeführten Pkw-Messungen und den Remote-Sensing-Daten aus der CONOX-Datenbank für Euro 6a,b Diesel-Pkw. Dabei ist ersichtlich, dass die vermessenen vier Pkw gut mit dem Durchschnitt der CONOX-Daten mit den etwa 20 000 Datensätzen übereinstimmen.

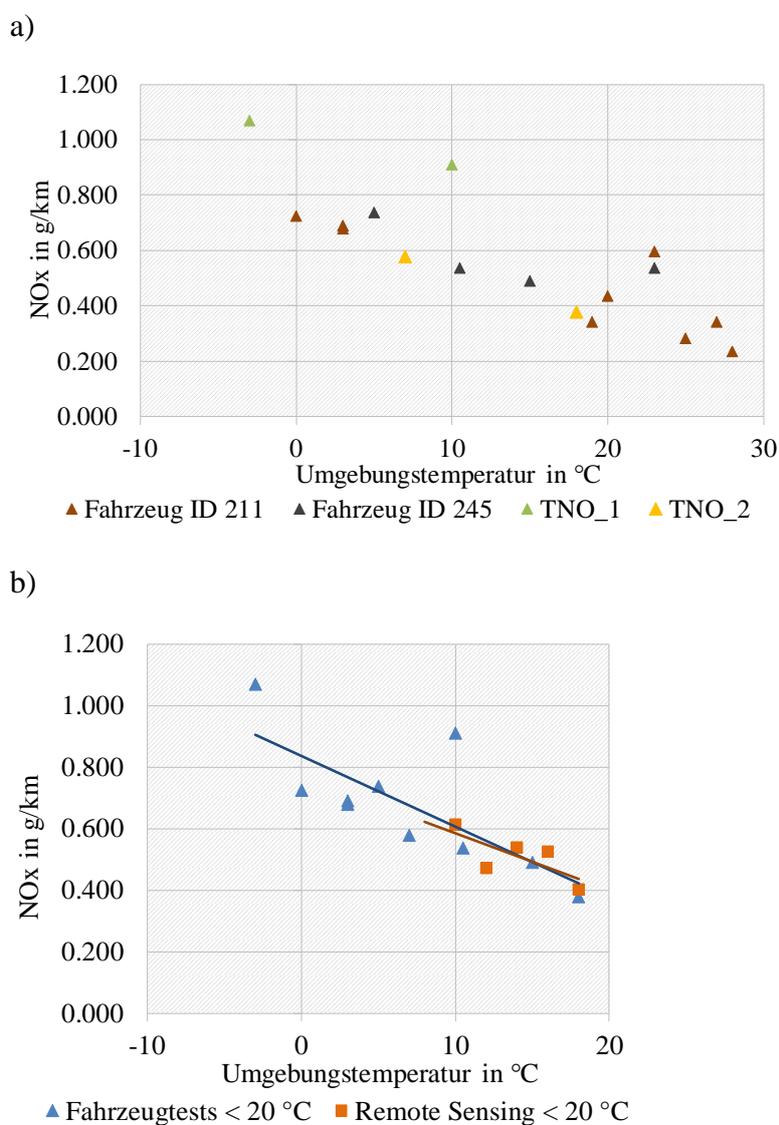


Abbildung 5.16: Umgebungstemperaturabhängigkeit der NO_x -Emissionen von Euro 6a,b Diesel-Pkw Messungen (a) und Vergleich mit Remote-Sensing-Daten (b)

Die NO_x -Emissionen wurden jeweils zu den NO_x -Emissionen bei 18 °C ins Verhältnis gesetzt, um eine Korrekturfunktion zu erhalten. Abbildung 5.17 zeigt die NO_x -Korrekturfunktionen. Da die CONOX-Datenbank hauptsächlich einen Umgebungstemperaturbereich von 0 °C bis 20 °C sowie noch keine Fahrzeuge von Euro 6c aufwärts abdeckt, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die NO_x -Emissionen liegt bei Euro 3 bis Euro 6d nur unter 20 °C vor. Über 20 °C waren keine belastbaren Daten verfügbar.
- Die verfügbaren CONOX-Daten decken keine Umgebungstemperaturen unter 0 °C ab, sodass derzeit keine Aussage über das tatsächliche Verhalten möglich ist. Es wird davon ausgegangen, dass die NO_x -Reduktionsstrategien im Flottendurchschnitt unter 0 °C für Abgasnormen bis Euro 6d-Temp zu keiner weiteren NO_x -Erhöhung führt.
- Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die NO_x -Emissionen für Euro 6d-Temp und Euro 6d wird auf Basis der in der RDE-Regelung definierten Randbedingungen begrenzt. Umgebungstemperatureinflüsse sind nur außerhalb dieser definierten Randbedingungen relevant. Für Post-Euro 6 wurde angenommen, dass es keine NO_x -Erhöhung mit abnehmender Umgebungstemperatur mehr gibt.

Vor Euro 3 wurden die NO_x -Emissionen technologiebedingt noch nicht von der Umgebungstemperatur beeinflusst.

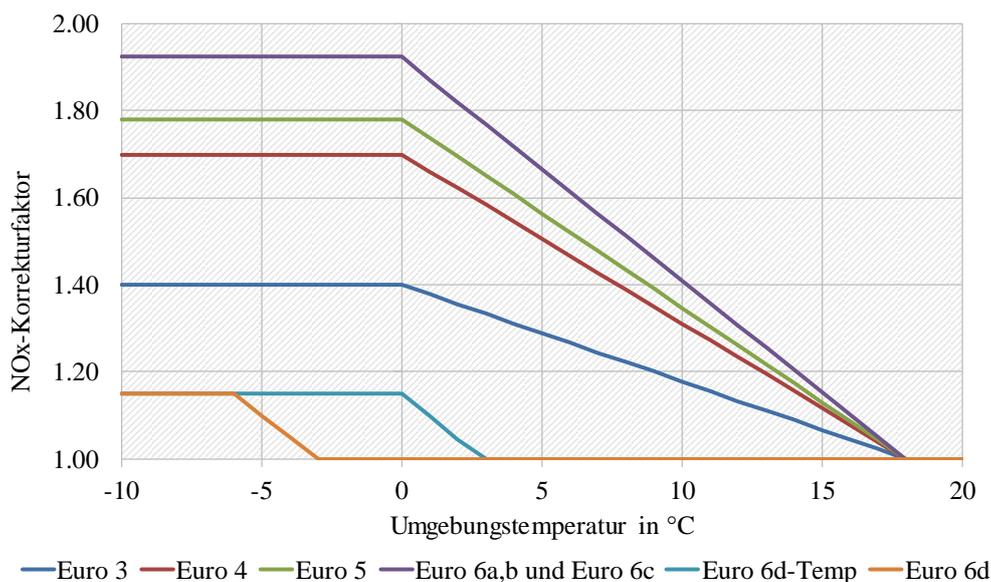


Abbildung 5.17: NO_x -Korrekturfunktionen zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x -Emissionen von Diesel-Pkw

5.9.4 Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x -Emissionen mit EA 189-Softwareupdate

Aus der CONOX-Datenbank konnten keine Ableitungen für die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor und nach dem Softwareupdate gemacht werden. Daher wurden die NO_x -Korrekturfaktoren für diese Fahrzeuge aus verfügbaren Pkw-Rollenprüfstandtests und Messungen im realen Straßenverkehr abgeleitet. Analog zu Kapitel 5.9.3 wurden fahrzeugspezifische PHEM-Kennfelder bei verschiedenen Umgebungstemperaturen erstellt und damit der realitätsnahe CADC simuliert. Die Simulationsergebnisse der Einzelfahrzeuge im CADC zeigten vor und nach dem EA 189-Softwareupdate verschiedene Trends. Die NO_x -

Änderungen der Absolutwerte zwischen Tests im Bereich von 5 °C und 20 °C lagen zwischen +/-10 %. Um eine Aussage für die gesamte VW-Konzernflotte mit EA 189-Motor treffen zu können, wurden die einzelnen NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktionen dieser Fahrzeuge zu einer durchschnittlichen NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion zusammengefasst. Die verwendeten Gewichtungsfaktoren können der Tabelle 5-19 entnommen werden. Aufgrund der geringen Anzahl an vermessenen Fahrzeugen wurden zusätzliche Annahmen getroffen:

- Die VW-Konzernflotte mit EA 189-Motor verhält sich hinsichtlich der Umgebungstemperaturabhängigkeit im Durchschnitt gleich, wie die gewichteten fünf Fahrzeuge.
- Die Gewichtungsfaktoren wurden von den Zulassungszahlen der betroffenen VW-Konzernfahrzeuge abgeleitet. Es wird davon ausgegangen, dass der Bestand der betroffenen Fahrzeugmodelle über die Jahre im Verhältnis zueinander gleich bleibt, weshalb sich auch die Gewichtungsfaktoren über die Jahre nicht ändern.
- Die Zulassungszahlen der jeweiligen Fahrzeugmodelle waren zum Zeitpunkt dieser Arbeit nur für Deutschland bekannt. Da die NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion für EU-28 gelten soll, wird davon ausgegangen, dass die Zulassungszahlen der jeweiligen Fahrzeugmodelle in den EU-Ländern sich im selben Verhältnis zueinander verhalten.

Tabelle 5-19: Gewichtungsfaktoren für die durchschnittliche NO_x-Umgebungstemperaturkorrekturfunktion der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor

Marke	Modell	Gewichtungsfaktor
VW	Golf Variant 1.6 TDI	15,5 %
VW	Passat 1.6 TDI	15,5 %
VW	Passat Kombi 2.0 TDI	26,4 %
Audi	A3 2.0 TDI	27,1 %
Skoda	Octavia 1.6 TDI	15,5 %

Abbildung 5.18 zeigt die NO_x-Korrekturfaktoren für VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor vor und nach dem Softwareupdate. Zusätzlich sind in der Abbildung auch die Korrekturfaktoren der gesamten Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte vor Softwareupdate sowie auch die Diesel-Pkw-Flotte ohne VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor gezeigt. Da die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor eine deutlich geringere Temperaturabhängigkeit der NO_x-Emissionen zeigen als der Euro 5-Durchschnitt aller Diesel-Pkw, steigt der Korrekturfaktor für die Euro 5 Flotte ohne die VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor an.

Unterhalb 0 °C und oberhalb 20 °C wird, wie bereits in Kapitel 5.9.3 beschrieben, von keiner weiteren Änderung mehr ausgegangen.

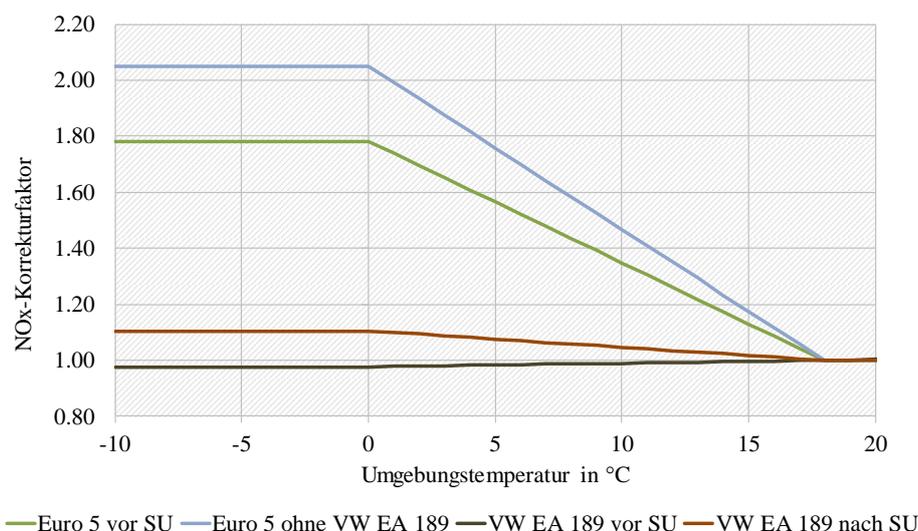


Abbildung 5.18: NO_x-Korrekturfunktionen zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO_x-Emissionen von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor

5.9.5 Anteil NO₂ an NO_x

Die HBEFA-Datenstruktur sieht vor, dass das NO₂ im Verhältnis zu NO_x angegeben wird. Um die gleiche Datenbasis wie bei den simulierten Emissionsfaktoren zu haben, wurden die Verhältnisse nicht direkt aus den Messdaten bestimmt. Stattdessen wurden mit den PHEM-Durchschnittsfahrzeugen und den PHEM-Kennfeldern die HBEFA-Verkehrssituationen simuliert. Aus den simulierten NO₂- und NO_x-Emissionsfaktoren konnten die Verhältnisse NO₂ zu NO_x berechnet werden. Daher beziehen sich die NO₂ zu NO_x-Verhältnisse auch auf eine Laufleistung von 50 000 km. NO₂ zu NO_x-Verhältnisse für abweichende Laufleistungen sollen in zukünftigen Arbeiten behandelt werden. Tabelle 5-20 zeigt die errechneten NO₂ zu NO_x-Anteile. Die NO₂ zu NO_x-Verhältnisse von Diesel- und Otto-Pkw der Abgasnorm Euro 6d und Post-Euro 6 basieren auf Annahmen, da zum Zeitpunkt dieser Arbeiten noch keine Messdaten verfügbar waren.

Bei den Diesel-Pkw steigt der NO₂ zu NO_x-Anteil mit neueren Abgasnormen an, da seit Euro 3 Oxidationskatalysatoren eingesetzt werden. Diese oxidieren NO zu NO₂. Mit der Einführung von Dieselpartikelfiltern wurde das NO₂-Verhältnis weiter erhöht, um die passive Regeneration der Dieselpartikelfilter mit NO₂ zu verbessern. Mit Euro 6 zeigte sich bislang keine signifikante Änderung des NO₂ zu NO_x-Verhältnisses gegenüber Euro 5. Bei neueren Pkw mit SCR wurden zwar niedrigere Absolutwerte für NO₂ gemessen, das NO₂ zu NO_x-Verhältnis liegt aber auch bei etwa 35 %. Das NO₂ zu NO_x-Verhältnis von Otto-Pkw ist für alle Abgasnormen in etwa gleich und beträgt 5 %.

Tabelle 5-20: Anteil NO₂ an NO_x von Diesel- und Otto-Pkw bei 50 000 km Laufleistung

Abgasnorm	NO ₂ -Anteil Diesel-Pkw	NO ₂ -Anteil Otto-Pkw
1986-1988 bzw. ECE-15'04	8 %	5 %
Euro 1	8 %	
Euro 2	11 %	
Euro 3	35 %	
Euro 4	43 %	
Euro 5	34 %	
Euro 5 nach Softwareupdate	30 %	-
Euro 6a,b	35 %	5 %
Euro 6c		
Euro 6d-Temp		
Euro 6d		
Post-Euro 6		

5.10 Exemplarische Ergebnisse der HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für konventionelle Pkw

Mit den PHEM-Durchschnittsfahrzeugen und PHEM-Kennfeldern wurden die etwa 2 500 HBEFA-Verkehrssituationen simuliert. Werden die Emissionsfaktoren in g/km bzw. #/km der einzelnen Verkehrssituationen länderspezifisch nach den Anteilen der Euro-Klassen und Otto- bzw. Diesel-Pkw gewichtet, ergeben sich durchschnittliche Emissionen für das jeweilige Mitgliedsland der EU. In diesem Kapitel sind die Emissionsfaktoren aufgrund des Umfangs exemplarisch für die Emissionskomponenten CO₂ und NO_x für den deutschen Mix an Verkehrssituationen (innerorts sowie gesamt) mit betriebswarmem Motor gezeigt. Die Emissionsfaktoren CO, HC, PM und PN für Diesel- wie auch Otto-Pkw können dem Anhang F oder der HBEFA-Software entnommen werden. Die Gewichtungsfaktoren für die Emissionsfaktoren der einzelnen Verkehrssituationen für Deutschland sind in Anhang E angeführt. Wie bereits anfangs in Kapitel 5 erwähnt, beziehen sich die simulierten Emissionsfaktoren auf betriebswarme Motoren bei 20 °C Umgebungstemperatur und 50 000 km Laufleistung. Zusätzlich werden Emissionsfaktoren für Deutschland für eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 12 °C und für eine Laufleistung von 100 000 km gezeigt.

5.10.1 Exemplarische Ergebnisse bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

In der Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20 sind die CO₂-Emissionsfaktoren ersichtlich. Die blauen Balken zeigen dabei die Emissionsfaktoren der Otto-Pkw, die roten Balken die Emissionsfaktoren der Diesel-Pkw. Insgesamt liegen zwischen 1987 und Euro 6d-Temp durchschnittliche CO₂-Reduktionsraten von rund 0,2 % pro Jahr für Deutschland innerorts sowie 0,5 % pro Jahr für Deutschland gesamt vor.

Werden die Diesel-Pkw separat betrachtet, so liegt für Deutschland innerorts eine durchschnittliche Erhöhung von 0,1 % pro Jahr vor, für Deutschland gesamt eine durchschnittliche Reduktion von 0,3 % pro Jahr. Die geringfügigen Veränderungen sind auf die zunehmenden größeren Fahrzeugsegmente mit höheren Massen bei Diesel-Pkw zurückzuführen. Die DIN-Leermasse erhöhte sich von 1295 kg auf 1640 kg. Die CO₂-Emissionen von Euro 5 Diesel-Pkw nach EA 189-Softwareupdate steigen innerorts sowie gesamt gegenüber dem Euro 5 Diesel-Pkw vor EA 189-Softwareupdate um ca. 4 % an. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich der CO₂-Wert und die nachfolgenden Emissionsfaktoren für Euro 5 Diesel-Pkw mit Softwareupdate auf eine 100 %-ige Flottenumrüstung beziehen. In der Praxis sind in Deutschland etwa 40 % der Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte von einem EA 189-Softwareupdate betroffen.

Für Otto-Pkw zeigen die Daten eine durchschnittliche Reduktion von 1987 bis Euro 6d-Temp von 0,4 % CO₂ pro Jahr für Deutschland innerorts sowie 0,7 % CO₂ pro Jahr für Deutschland gesamt. Die DIN-Leermasse erhöhte sich dabei von 1095 kg auf 1247 kg. Die Zunahme der DIN-Leermasse ist deutlich geringer als bei Diesel-Pkw.

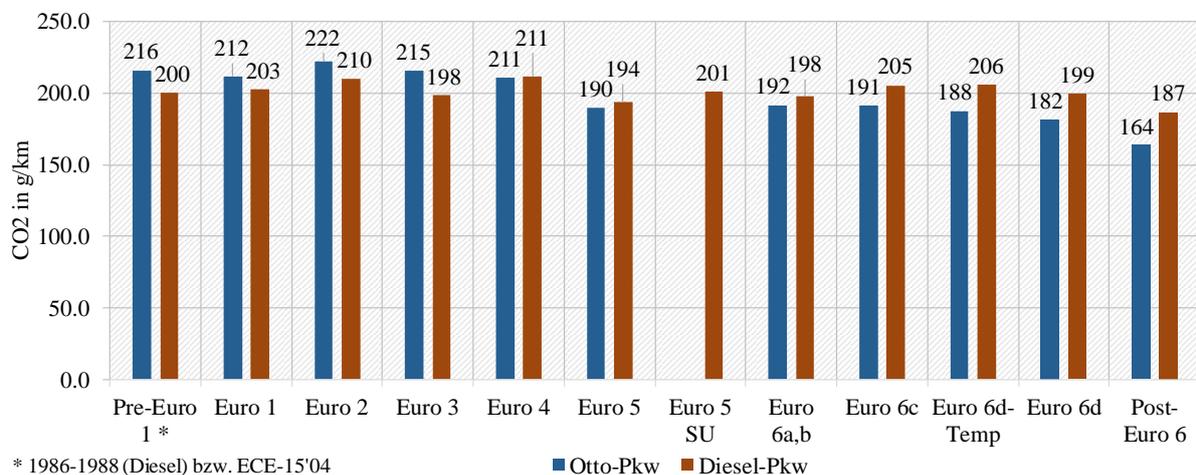


Abbildung 5.19: CO₂-Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

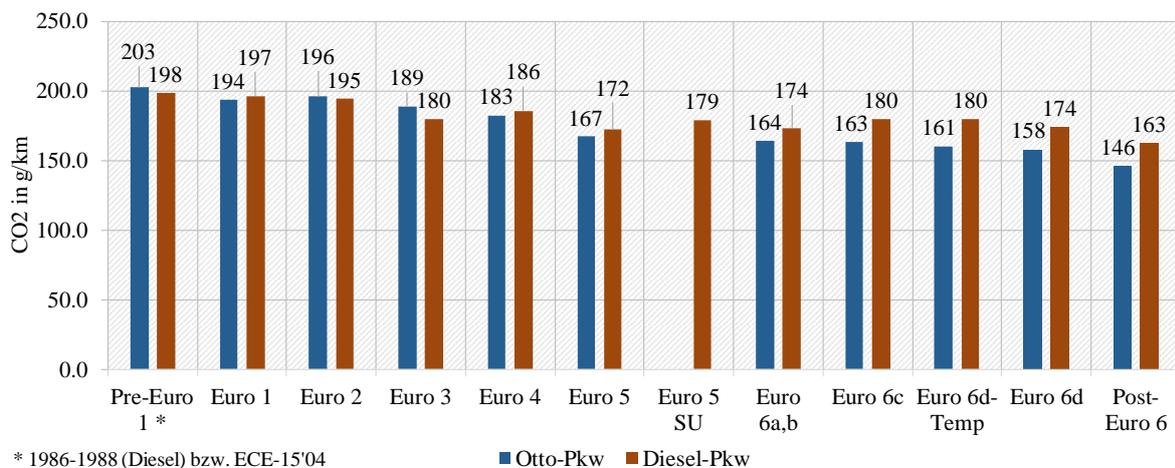


Abbildung 5.20: CO₂-Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22 zeigen die Entwicklungen der NO_x -Emissionen. Während Diesel-Pkw von 1987 bis Euro 5 im Durchschnitt rund $0,8 \text{ g/km NO}_x$ emittierten, führten die sechs vermessenen Euro 6d-Temp-Fahrzeuge, die für die Erstellung der PHEM-Kennfelder verwendet wurden, zu einem durchschnittlichen NO_x -Emissionsfaktor von $0,048 \text{ g/km}$ für Deutschland innerorts sowie $0,046 \text{ g/km}$ für Deutschland gesamt. Im Vergleich dazu ergaben die vier Euro 6d-Temp Otto-Pkw $0,022 \text{ g/km}$ für Deutschland innerorts sowie $0,031 \text{ g/km}$ für Deutschland gesamt. Inwieweit sich diese NO_x -Emissionsfaktoren für Euro 6d-Temp noch ändern werden, werden zukünftige Messdaten zeigen. Messungen von elf Euro 6d-Temp Diesel-Pkw, die am IVT seit Abschluss der HBEFA-Aktualisierungen im Auftrag des Umweltbundesamtes Deutschland durchgeführt wurden, ergaben im Mittel $0,048 \text{ g/km NO}_x$ für betriebswarme Real World Zyklen [32]. Der hier berechnete Wert sollte also belastbar sein. Die enorme Reduzierung der NO_x -Emissionen im realen Straßenverkehr ist vor allem auf das neue Pkw-Typgenehmigungsverfahren mit RDE-Tests zurückzuführen. Vergleicht man die Euro 5 Diesel-Pkw vor und nach dem EA 189-Softwareupdate, so ist eine NO_x -Reduktion von 35 % für Deutschland innerorts und 29 % für Deutschland gesamt sichtbar. Wie bereits erwähnt, sind davon etwa 40 % der Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte in Deutschland betroffen. Somit ergibt sich für die gesamte Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte in Deutschland anhand dieser Daten eine Reduzierung von bis zu 14 %. Für Post-Euro 6 wurden NO_x -Emissionen für Diesel-Pkw unter $0,020 \text{ g/km}$ abgeschätzt. Dieses Emissionsniveau liegt im Bereich der Post-Euro 6 Otto-Pkw.

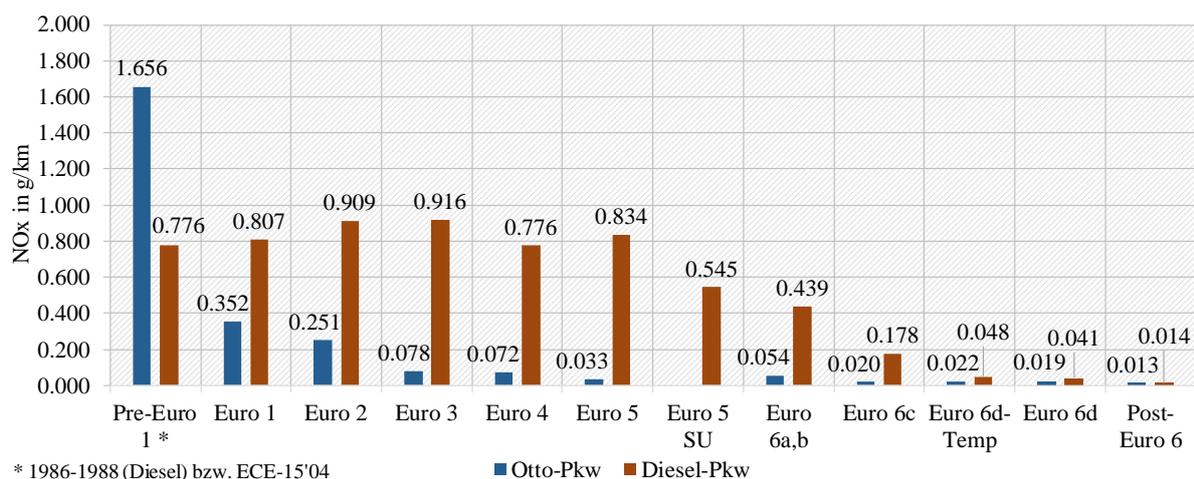


Abbildung 5.21: NO_x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland innerorts bei 20°C und 50 Tkm Laufleistung

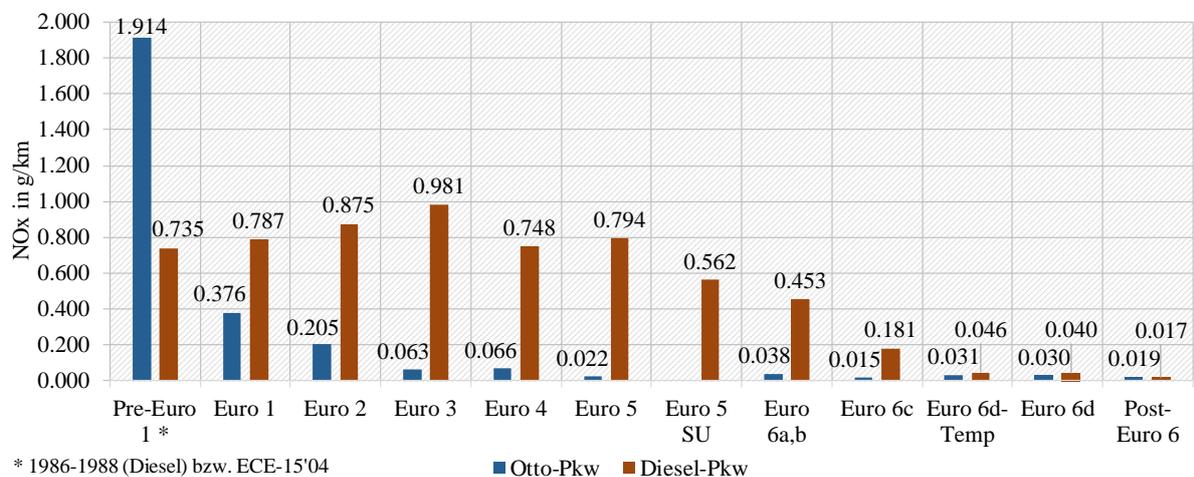


Abbildung 5.22: NO_x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland gesamt bei 20°C und 50 Tkm Laufleistung

5.10.2 Exemplarische Ergebnisse bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Nachfolgend werden exemplarisch Emissionsfaktoren bei 12 °C Umgebungstemperatur und 100 Tkm Laufleistung für den deutschen Mix an Verkehrssituationen gezeigt. Dafür wurden die Emissionsfaktoren bei 20 °C und 50 Tkm in einem Postprocessing mit Korrekturfaktoren aus Kapitel 5.9 beaufschlagt. Die CO₂-Emissionsfaktoren ändern sich dabei per Definition nicht. Abbildung 5.23 zeigt die NO_x-Emissionen für Deutschland innerorts. Die NO_x-Emissionen der Otto-Pkw steigen nur aufgrund der zunehmenden Laufleistung, jene der Diesel-Pkw mit zunehmender Laufleistung sowie auch abnehmender Umgebungstemperatur an. Es ist erkennbar, dass die Laufleistung die Emissionsfaktoren ab Euro 1 für Otto-Pkw beeinflussen. Für Diesel-Pkw erhöhen sich die Emissionsfaktoren aufgrund Laufleistung sowie Umgebungstemperatur ab Euro 3. Beispielhaft steigen die NO_x-Emissionen von Euro 6a,b Diesel-Pkw von 0,439 g/km bei 20 °C und 50 Tkm auf 0,603 g/km bei 12 °C und 100 Tkm an. Dies entspricht einer Erhöhung um 37 %. In Abbildung 5.24 sind die NO_x-Emissionsfaktoren für Deutschland gesamt gezeigt. Analog zu Deutschland innerorts ändern sich die Emissionsfaktoren ab Euro 1 für Otto-Pkw und ab Euro 3 für Diesel-Pkw. Laufleistung und Umgebungstemperatur haben ab Euro 6d-Temp nur mehr wenig Einfluss auf die NO_x-Emissionsfaktoren.

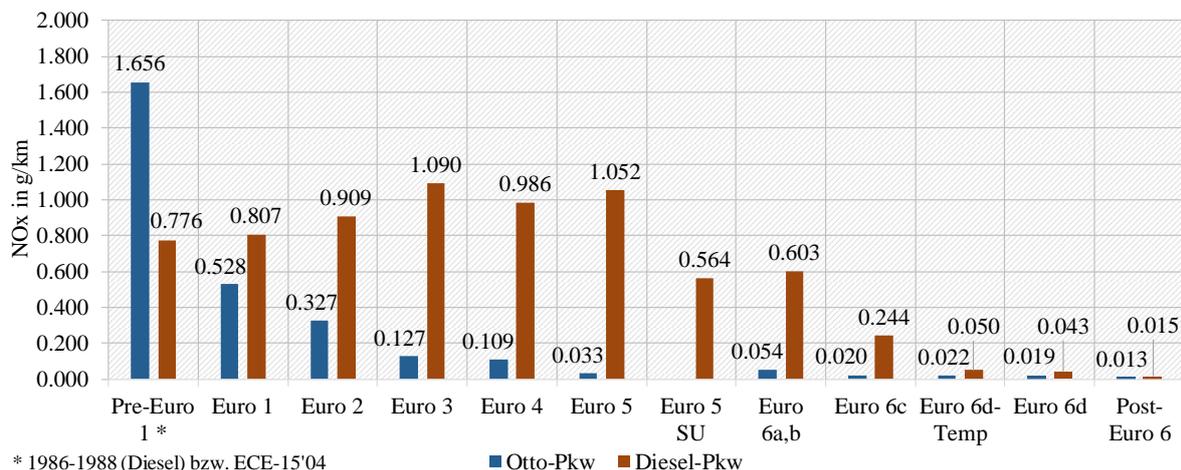


Abbildung 5.23: NO_x-Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

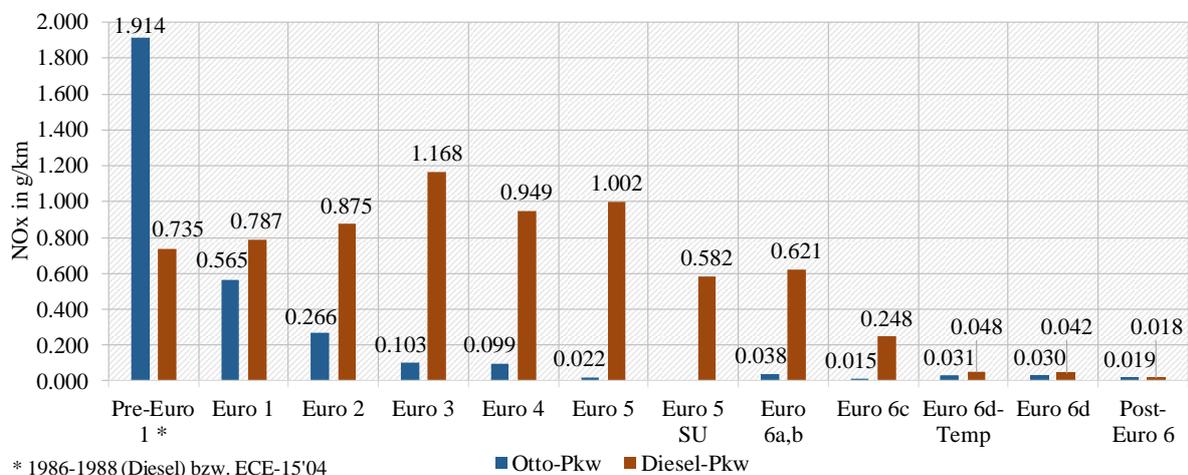


Abbildung 5.24: NO_x-Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

5.11 Exemplarische Darstellung der Unterschiede zwischen HBEFA 3.3 und 4.1

In dieser Arbeit wurden auch die Änderungen der Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3 auf 4.1 untersucht. Analog zum Kapitel 5.10 wurden die Änderungen der Emissionsfaktoren für den deutschen Mix an Verkehrssituationen für innerorts sowie gesamt untersucht. Die Vergleiche sind in diesem Kapitel aufgrund des Umfangs nur für Diesel-Pkw für die Emissionskomponenten CO₂ und NO_x gezeigt. Wie den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden kann, wurden die Änderungen für jene Abgasnormen untersucht, die sowohl im HBEFA 3.3 als auch im HBEFA 4.1 vorhanden sind.

5.11.1 Exemplarische Darstellung der Unterschiede bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abbildung 5.25 und Abbildung 5.26 zeigen die CO₂-Emissionsfaktoren von Diesel-Pkw für Deutschland innerorts und gesamt. Die blauen Balken repräsentieren dabei die Emissionsfaktoren von HBEFA 3.3, die roten Balken jene von HBEFA 4.1. Es ist deutlich zu erkennen, dass die CO₂-Emissionen zwischen 6 % und 40 % ansteigen, im Mittel beträgt der Anstieg rund 30 %. Wie sich die Änderungen im Detail zusammensetzen, wird in Kapitel 5.11.3 erläutert.

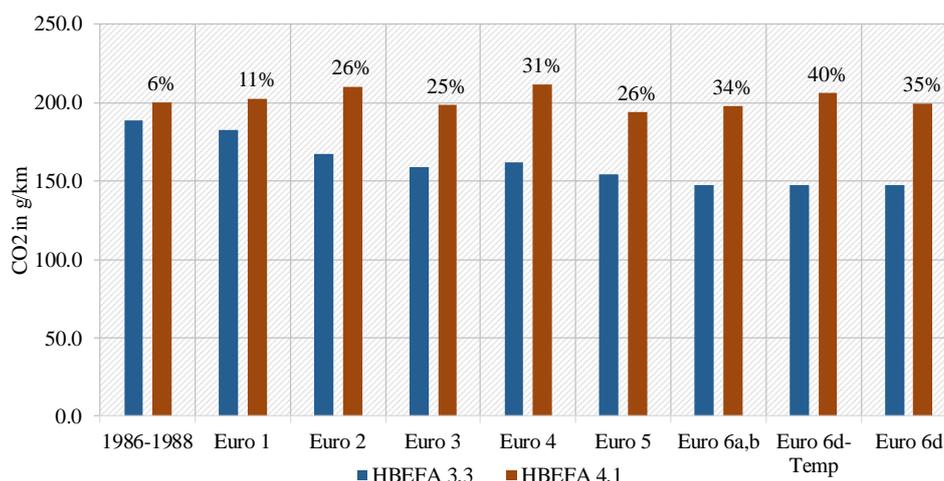


Abbildung 5.25: Unterschiede der CO₂-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

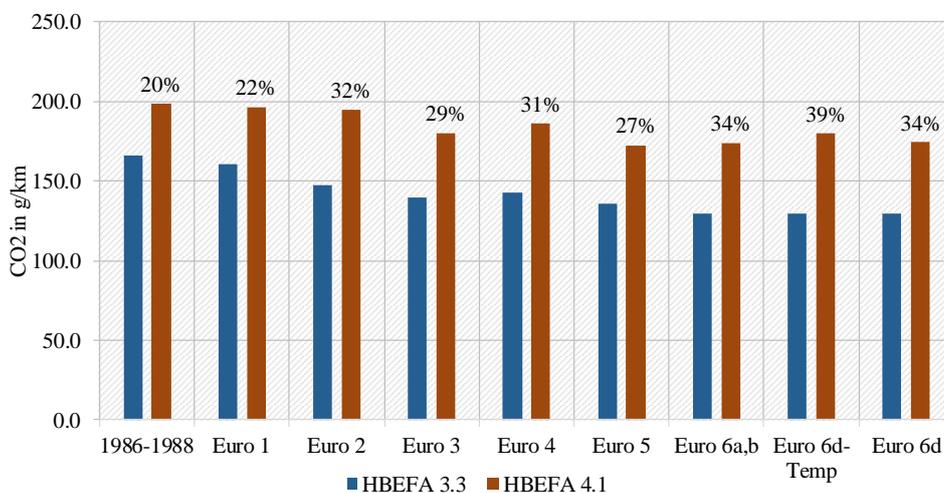


Abbildung 5.26: Unterschiede der CO₂-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abbildung 5.27 und Abbildung 5.28 zeigen die NO_x -Emissionen. Auch hier ist ein deutlicher Anstieg der HBEFA 4.1-Werte bis einschließlich Abgasnorm Euro 6a,b erkennbar. Dieser liegt zwischen 11 % und 50 %, im Mittel bei rund 30 %. Betrachtet man die Abgasnormen Euro 6d-Temp und neuer, so zeigen die Abbildungen eine Reduktion der NO_x -Emissionen von HBEFA 3.3 auf 4.1. Dazu sei erwähnt, dass die Emissionsfaktoren im HBEFA 3.3 für Euro 6d-Temp und Euro 6d Diesel-Pkw abgeschätzt wurden, da zum Zeitpunkt der HBEFA 3.3-Arbeiten noch keine Messdaten dazu verfügbar waren. Der NO_x -Emissionsfaktor der Euro 6d-Temp Diesel-Pkw liegt um mehr als 60 % unterhalb der abgeschätzten Emissionen.

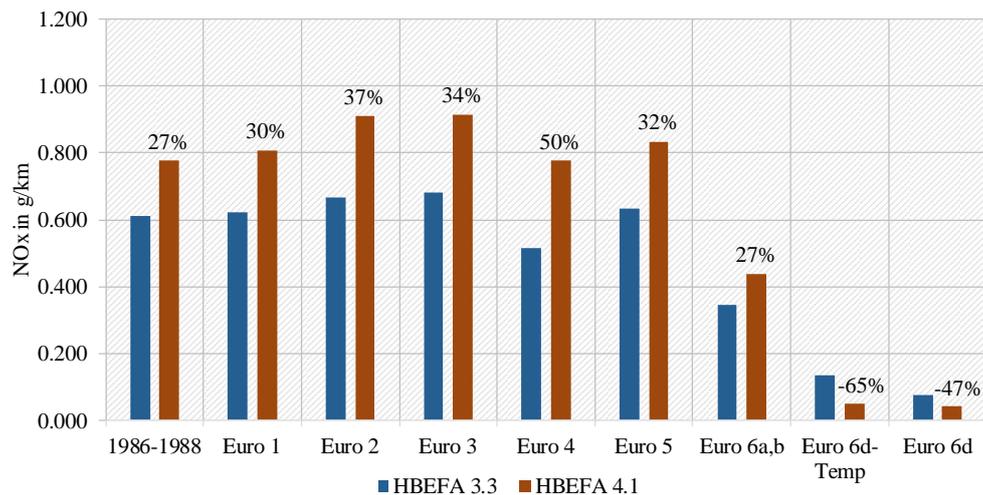


Abbildung 5.27: Unterschiede der NO_x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

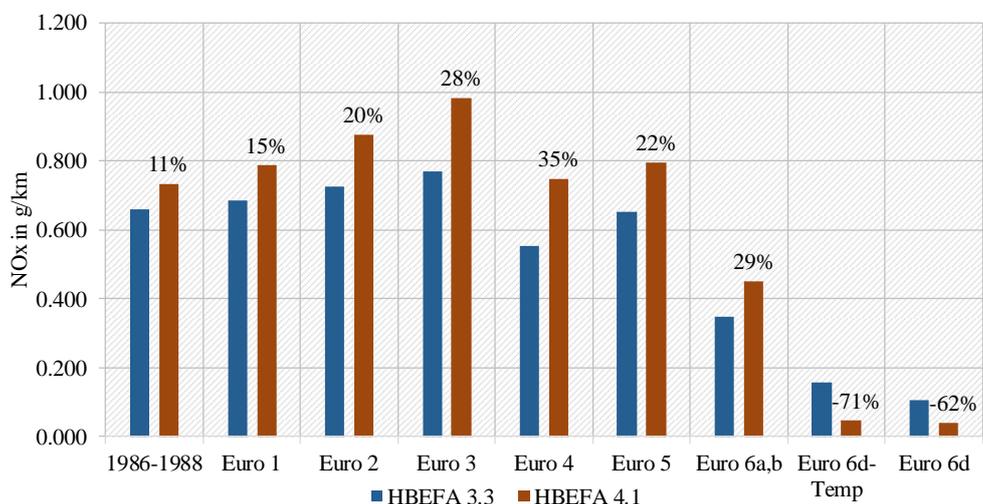


Abbildung 5.28: Unterschiede der NO_x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

5.11.2 Exemplarische Darstellung der Unterschiede bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Nachfolgend werden die Emissionsfaktoren bei 12 °C Umgebungstemperatur und 100 Tkm Laufleistung gezeigt. In Kapitel 5.10.2 wurde bereits erwähnt, dass sich die CO₂-Emissionsfaktoren per Definition für Umgebungstemperatur und Laufleistung nicht ändern, weshalb im Folgenden auch nur die Abbildungen für die NO_x-Emissionsfaktoren gezeigt werden.

Abbildung 5.29 und Abbildung 5.30 zeigen die Änderungen der NO_x-Emissionsfaktoren zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung. Umgebungstemperatur und Laufleistung haben bis einschließlich Euro 2 keinen Einfluss, weshalb dieselben NO_x-Emissionsfaktoren wie bei 20 °C und 50 Tkm vorliegen. Für z. B. den Euro 3 Diesel-Pkw erhöht sich der NO_x-Emissionsfaktor (inklusive der angewandten Korrekturfaktoren) um 60 % für Deutschland innerorts und um 52 % für Deutschland gesamt. Für Euro 6a,b ist die Änderung wesentlich geringer und beläuft sich auf 29 % für Deutschland innerorts und 31 % für Deutschland gesamt. Wie sich die Änderungen im Detail zusammensetzen, wird in Kapitel 5.11.3 gezeigt.

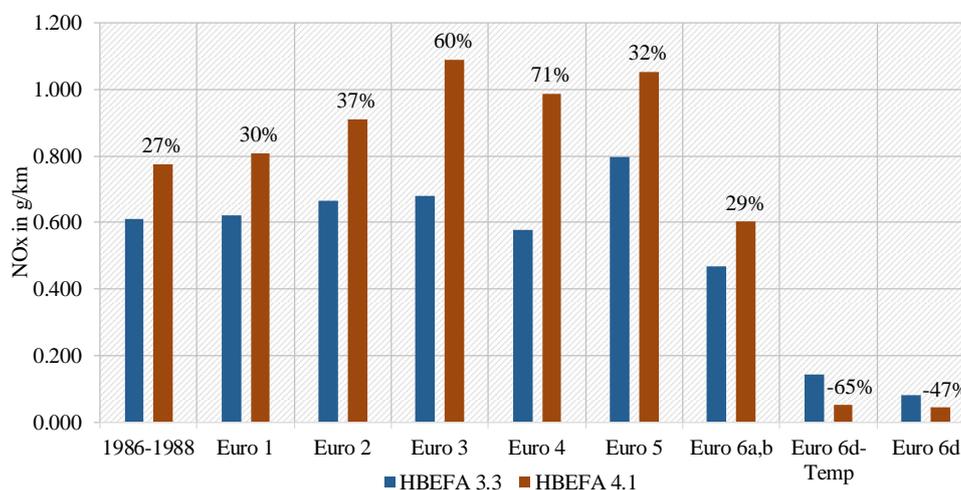


Abbildung 5.29: Unterschiede der NO_x-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

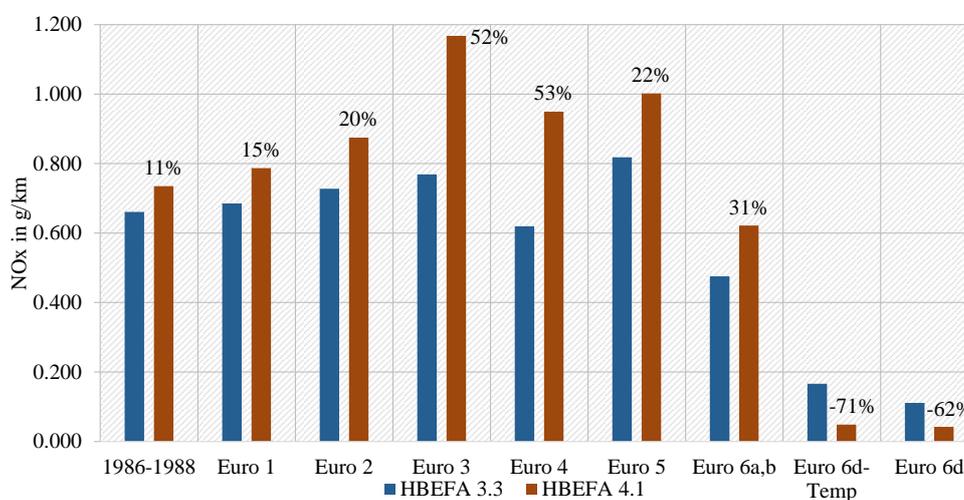


Abbildung 5.30: Unterschiede der NO_x-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

5.11.3 Exemplarische Darstellung der Unterschiede durch stufenweise Adaptierung der neuen PHEM-Eingabedaten

Im Folgenden sollen die Änderungen zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 gezeigt werden, die sich durch die stufenweise Adaptierung der neuen PHEM-Eingabedaten von HBEFA 3.3 auf 4.1 ergaben. Bei den letzten HBEFA-Versionen wurden die Emissionsfaktoren aus Kosten- und Zeitgründen nicht für alle Emissionskomponenten und Abgasnormen überarbeitet. Folgende Tabelle gibt Aufschluss, welche Emissionsfaktoren in der HBEFA 3.3-Software von welcher HBEFA-Softwareversion stammen und mit welcher PHEM-Version diese erstellt wurden. So ist z. B. zu erkennen, dass die Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw bis Euro 4 (mit Ausnahme von NO_x) im HBEFA 3.3 nicht aktualisiert wurden. Auf Basis dieser Tabellen wurden die nachfolgenden Vergleiche durchgeführt. [16] [19] [53]

Tabelle 5-21: Hinterlegte Emissionsfaktoren in der HBEFA 3.3-Software für Diesel-Pkw [16] [19] [53]

Abgasnorm	CO ₂ ¹²	NO _x	CO	HC	PM	PN		
1986-1988	Zyklen mit 6000er ID von HBEFA 3.1 (PHEM v9.6) Zyklen mit 7000er ID von HBEFA 3.2 (PHEM v11.2.13)							
Euro 1								
Euro 2								
Euro 3								
Euro 4							HBEFA 3.3 (PHEM v11.7.10) ¹³	
Euro 5	HBEFA 3.2 (PHEM v11.2.13)							
Euro 6a,b	übernommen von Euro 5 HBEFA 3.2							
Euro 6d-Temp							übernommen von Euro 6a,b HBEFA 3.2	HBEFA 3.3 (PHEM v11.7.10)
Euro 6d								

¹² CO₂- Emissionsfaktoren von PHEM, CO₂ in HBEFA-Software zusätzlich an länderspezifischen Realverbrauch angepasst.

¹³ Aufgrund neu verfügbarer Messdaten von Euro 4 Diesel-Pkw wurden im Rahmen der HBEFA 3.3-Aktualisierung auch die Emissionsfaktoren von Euro 4 Diesel-Pkw überarbeitet.

Tabelle 5-22: Hinterlegte Emissionsfaktoren in der HBEFA 3.3-Software für Otto-Pkw [16] [19] [53]

Abgasnorm	CO ₂ ¹²	NO _x	CO	HC	PM	PN
ECE-15'04	Zyklen mit 6000er ID von HBEFA 3.1 (PHEM v9.6) Zyklen mit 7000er ID von HBEFA 3.2 (PHEM v11.2.13)					
Euro 1						
Euro 2						
Euro 3						
Euro 4						
Euro 5	HBEFA 3.2 (PHEM v11.2.13)					
Euro 6a,b	übernommen von Euro 5 HBEFA 3.2					
Euro 6c						

Um zu zeigen, wie sich die in Kapitel 5.11.1 und 5.11.2 gezeigten Gesamtänderungen für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 zusammensetzen, wurden die alten PHEM-Eingabedaten stufenweise durch die neuen HBEFA 4.1 PHEM-Eingabedaten ersetzt. Die Vorgehensweise war dabei wie folgt:

1. Als Basis wurden die Emissionsfaktoren laut Tabelle 5-21 herangezogen, auf die die Änderungen bezogen wurden.
2. Berechnung der Emissionsfaktoren mit der für HBEFA 4.1 verwendeten PHEM-Version 13.0.3.13, allerdings mit den PHEM-Durchschnittsfahrzeugen und PHEM-Kennfeldern laut Tabelle 5-21 sowie den Verkehrssituationen von HBEFA 3.3. Dieser Schritt wird in den nachfolgenden Vergleichen mit „+ PHEM v13.0.3.13“ bezeichnet.
3. Zusätzlich zu Punkt 2 wurden die Verkehrssituationen von HBEFA 4.1 statt jener von HBEFA 3.3 verwendet (als „+ HBEFA 4.1 Zyklen“ bezeichnet). Mit den HBEFA 4.1-Verkehrssituationen wurde erstmals auch die Funktion „Cycle Distance Correction“ von PHEM aktiviert. Diese stellt sicher, dass in der Simulation das Fahrzeug dieselbe Soll-Strecke zurücklegt, auch wenn zweitweise aufgrund fehlender Motorleistung die Soll-Geschwindigkeitsvorgabe nicht erreicht werden kann.
4. Zu Punkt 3 wurden in einem weiteren Schritt zusätzlich die alten PHEM-Durchschnittsfahrzeuge durch die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge von HBEFA 4.1 ersetzt („+ HBEFA 4.1 Fahrzeugdaten“).
5. Anschließend wurden zusätzlich zu Punkt 4 die PHEM-Kennfelder getauscht („+ HBEFA 4.1 Kennfeld“).
6. Abschließend wurde das NH₃-Speichermodell in PHEM aktiviert („+ HBEFA 4.1 NH₃ Modell“). Dieses Modell hat nur auf die NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw Einfluss.

Das Ergebnis sind die Emissionsfaktoren für HBEFA 4.1 bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.

In Abbildung 5.31 und Abbildung 5.32 ist ersichtlich, dass mit der neuen PHEM-Version 13.0.3.13 CO₂-Änderungen zwischen 0 % und -3 %, im Mittel bei -1 % vorliegen. Diese Änderungen der Emissionskomponenten sind auf folgende PHEM-Anpassungen zurückzuführen:

- a. Optimierung der Motordrehzahlberechnung bei Schaltvorgängen.
- b. Berücksichtigung von anteilmäßigen Leerlaufemissionen, um aktivierte sowie deaktivierte Start-Stopp-Systeme in der Flotte nach Kapitel 5.6.5 berücksichtigen zu können.
- c. Optimierung bei der Berechnung der Motorbeschleunigungsleistung.
- d. Implementierung einer Kraftstoffverbrauchskorrektur bei aktivierten Nebenverbrauchern in Start-Stopp-Phasen.
- e. Zugkraftunterbrechung wird bei Schaltvorgängen nicht mehr berücksichtigt, da diese kaum Einfluss auf die berechneten Emissionsfaktoren hat und in einigen Situationen zu hohen Leistungsspitzen führte.
- f. Optimierung der Interpolationsvarianten Shepard und Delaunay. Die erwähnten Interpolationsvarianten sind unter [18], [47] und [81] beschrieben.

Werden zusätzlich die Verkehrssituationen getauscht, so liegen CO₂-Änderungen für Deutschland innerorts zwischen 9 % und 13 %, im Mittel bei 11 % vor. Für Deutschland gesamt liegen die Änderungen zwischen 1 % und 3 %, im Mittel bei 2 %. Die Verkehrssituationen, inklusive deren Gewichtungsanteilen, ändern die CO₂-Emissionen für Deutschland innerorts mehr als für Deutschland gesamt.

Werden zusätzlich zur PHEM-Version und den Verkehrssituationen auch die PHEM-Durchschnittsfahrzeuge aktualisiert, so liegen Änderungen zwischen 37 % und 51 %, im Mittel von 43 % für Deutschland innerorts vor. Für Deutschland gesamt sind Änderungen zwischen 24 % und 38 %, im Mittel von 29 % vorhanden.

Nach der Aktualisierung der PHEM-Kennfelder ergeben sich jene Änderungen, die bereits in Kapitel 5.11.1 und 5.11.2 gezeigt wurden. In Kapitel 5.2 wurde erwähnt, dass die PHEM-Verbrauchskennfelder bzw. CO₂-Kennfelder für alle Abgasnormen überarbeitet wurden. Die Schadstoffkennfelder wurden nur für jene Abgasnormen überarbeitet, wo neue Messdaten vorlagen (siehe Kapitel 5.3 und 5.4). Vergleicht man Abbildung 5.31 mit Abbildung 5.32 ist außerdem erkennbar, dass die überarbeiteten PHEM-Verbrauchskennfelder einen besseren Wirkungsgrad im Niederlastbereich haben.

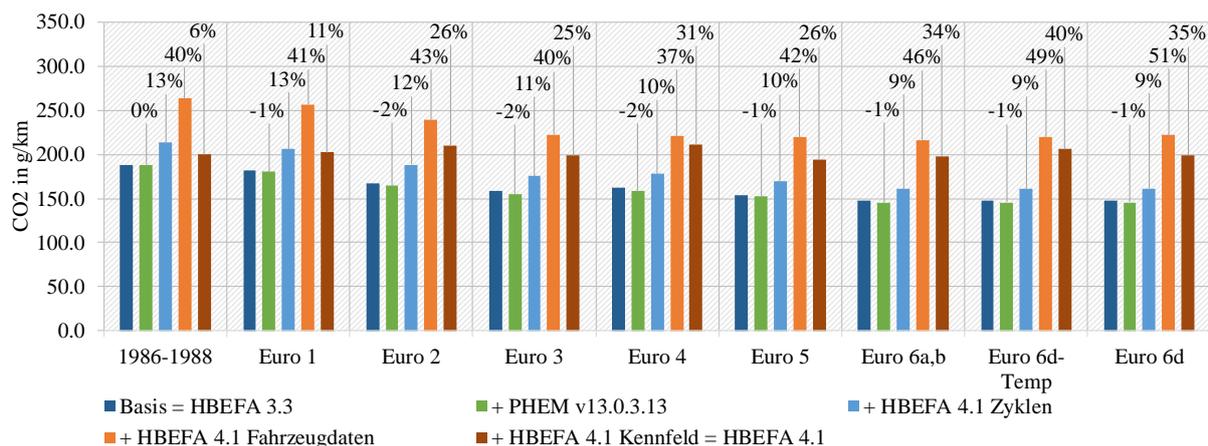


Abbildung 5.31: Unterschiede der CO₂-Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

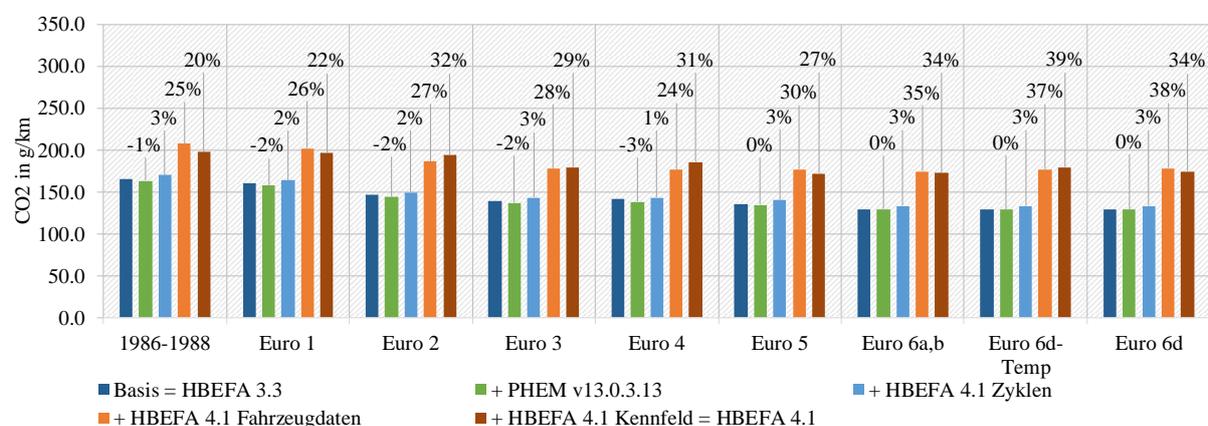


Abbildung 5.32: Unterschiede der CO₂-Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Analog zu den vorherigen Abbildungen zeigen Abbildung 5.33 und Abbildung 5.34 die Änderungen der NO_x-Emissionsfaktoren. Mit der neuen PHEM-Softwareversion liegen für Deutschland innerorts Änderungen zwischen -4 % und 0 %, im Mittel bei 2 % vor. Für Deutschland gesamt liegen Änderungen zwischen -3 % und 0 %, im Mittel bei 1 % vor.

Werden zusätzlich die Verkehrssituationen mit deren Gewichtungsfaktoren aktualisiert, so liegen die NO_x-Änderungen für Deutschland innerorts zwischen 10 % und 20 %, im Mittel bei 15 %. Für Deutschland gesamt ergeben sich Änderungen zwischen 4 % und 17 %, im Mittel von 9 %.

Nach Aktualisierung der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge liegen Änderungen zwischen 10 % und 47 %, im Mittel von 28 % für Deutschland innerorts vor. Wird Deutschland gesamt betrachtet, so befinden sich die Änderungen zwischen 9 % und 34 %, im Mittel betragen die Änderungen 19 %.

Werden zusätzlich die PHEM-Kennfelder getauscht, so liegen für Deutschland innerorts Änderungen zwischen -66 % und 50 %, im Mittel von 14 % vor. Für Deutschland gesamt liegen die Änderungen zwischen -71 % und 35 %, im Mittel bei 3 %.

Im HBEFA 4.1 wurde erstmals auch die Verschlechterung des NO_x-Konvertierungsverhaltens von SCR-Systemen in Verkehrssituationen mit Niederlastbetriebspunkten (z. B. Stausituationen) berücksichtigt. Da das SCR-System erst ab Euro 6a,b verbaut wurde, gibt es für Diesel-Pkw bis einschließlich Euro 5 keine Änderung der NO_x-Emissionsfaktoren. Da der angenommene Anteil an verbauten SCR-Systemen in Euro 6a,b Diesel-Pkw bei 40 % liegt und das Konvertierungsverhalten im Vergleich zu den Euro 6d-Temp Pkw niedriger war, liegen keine großen Änderungen der NO_x-Emissionen für Deutschland innerorts sowie gesamt vor. Für Euro 6d Pkw wurde für den durchschnittlichen Diesel-Pkw ein Abgasnachbehandlungssystem angenommen, dass sich aus einem motornahen SCR sowie aus einem SCR im Unterboden zusammensetzt. Deshalb ist die Änderung des NO_x-Emissionsniveaus für Deutschland innerorts sowie gesamt ebenfalls vernachlässigbar.

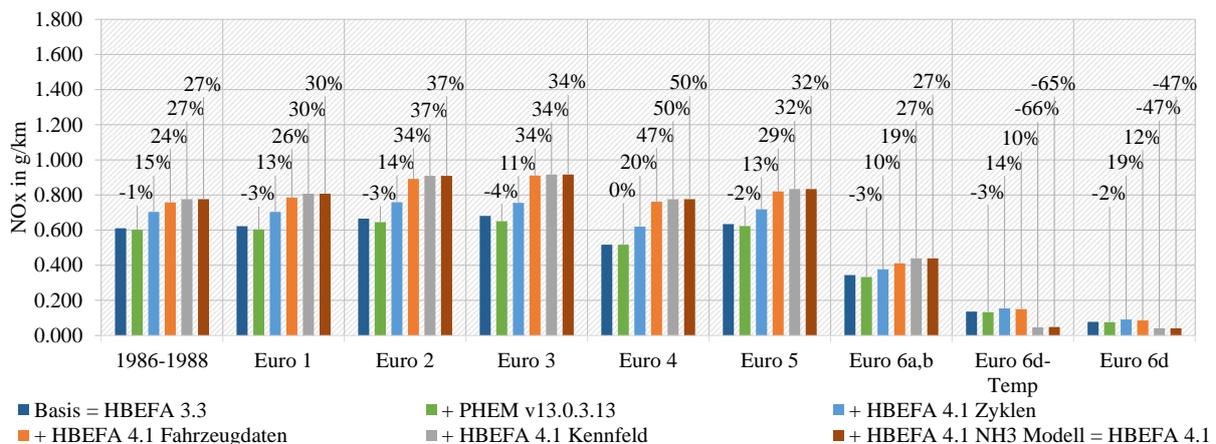


Abbildung 5.33: Unterschiede der NO_x-Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

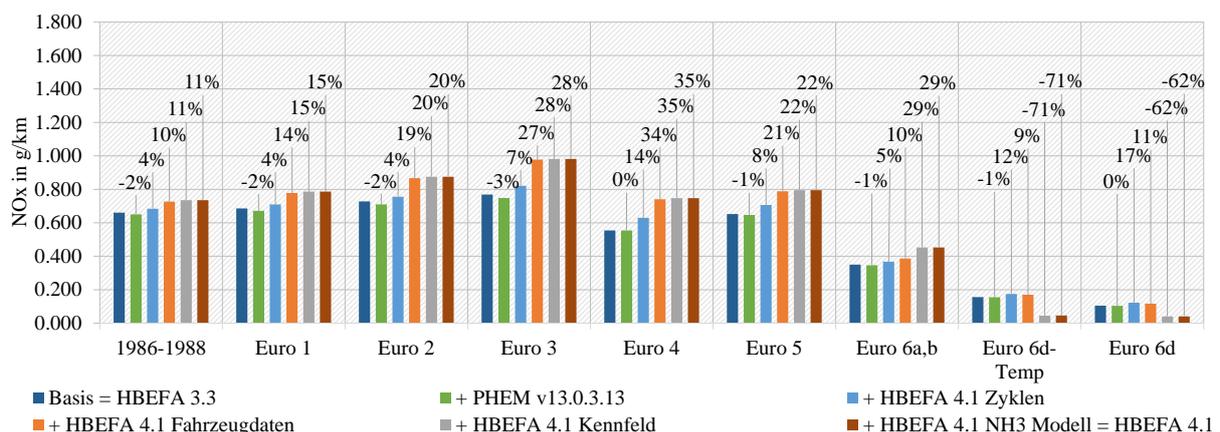


Abbildung 5.34 Unterschiede der NO_x-Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Zusätzlich zu den berechneten Effekten auf die Emissionsfaktoren bei 20 °C Umgebungstemperatur und 50 Tkm Laufleistung wurde auch untersucht, wie sich bei Diesel-Pkw die NO_x-Emissionsfaktoren bei 12 °C Umgebungstemperatur und 100 Tkm Laufleistung von HBEFA 3.3 auf 4.1 verändern.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Änderungen für Umgebungstemperatur und Laufleistung im Detail. Dabei sind die prozentuellen Änderungen immer auf die jeweilige HBEFA-Version bezogen. D.h. Änderung durch z. B. Umgebungstemperatur in HBEFA 3.3 bezieht sich auf den Emissionsfaktor von HBEFA 3.3, analoges gilt für HBEFA 4.1. Bis einschließlich Euro 2 liegen keine Änderungen der Emissionsfaktoren vor. Für Euro 3 gibt es für HBEFA 4.1 bereits einen Einfluss von Umgebungstemperatur und Laufleistung. Hier ändert sich der Emissionsfaktor um 5 % aufgrund der Laufleistung und um weitere 14 % aufgrund der Umgebungstemperatur. Generell kann gesagt werden, dass die Änderungen durch Umgebungstemperatur und Laufleistung aller Abgasnormen unter 40 % liegen. Die Änderungen sind aufgrund der gleichen Korrekturfaktoren für Deutschland innerorts und gesamt gleich. Daher sind die Änderungen für Deutschland gesamt hier nicht dargestellt.

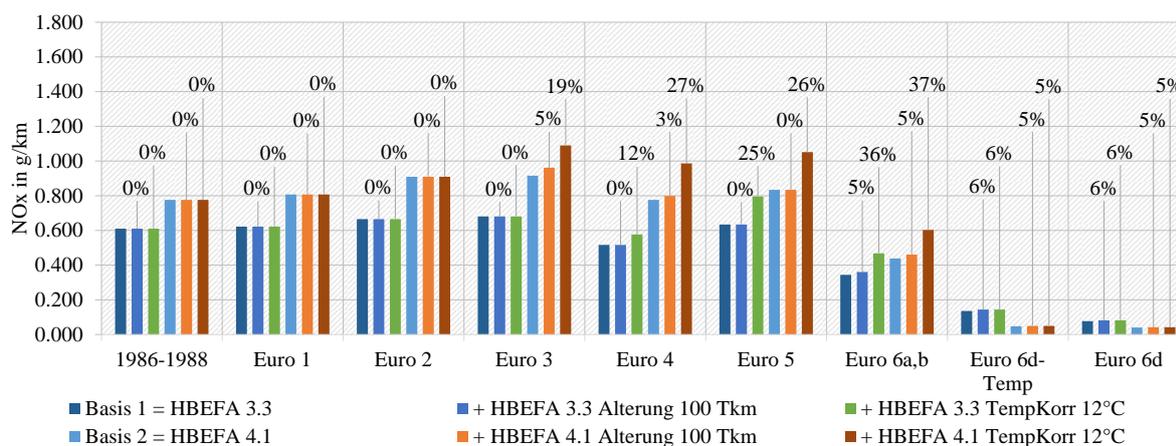


Abbildung 5.35: Unterschiede der NO_x-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Zusammenfassend kann nun folgende Schlussfolgerung getroffen werden:

- Es liegen Unterschiede von den Emissionsfaktoren zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 aufgrund des überarbeiteten Simulationsprogramms PHEM sowie neuer PHEM-Eingabedaten (Zyklen, Fahrzeugdaten sowie Kennfelder) vor.
- Für die in diesem Kapitel betrachteten Unterschiede von Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 lagen durchschnittliche CO₂-Erhöhungen von etwa 30 % bei 20 °C Umgebungstemperatur und 50 Tkm Laufleistung vor. Für NO_x lagen bis einschließlich Euro 6a,b durchschnittliche Erhöhungen von etwa 30 % bei 20 °C Umgebungstemperatur und 50 Tkm Laufleistung und von etwa 35 % bei 12 °C Umgebungstemperatur und 100 Tkm Laufleistung vor. Die durchschnittliche NO_x-Reduktion der Euro 6d-Temp und Euro 6d Diesel-Pkw betrug rund 60 % für die untersuchten Umgebungstemperaturen und Laufleistungen.
- Große Anteile an den Erhöhungen haben die aktualisierten Fahrzeugdaten sowie Kennfelder. Für Diesel-Pkw der Abgasnorm Euro 3 und Euro 4 hat auch die NO_x-Temperaturkorrekturfunktion erheblichen Anteil an der Erhöhung, die bei HBEFA 3.3 für Euro 3 noch nicht verfügbar war und bei Euro 4 geringeren Einfluss hatte.

Die durchschnittlichen Erhöhungen der CO₂- bzw. NO_x-Emissionen von HBEFA 3.3 auf 4.1 können durchaus als hoch angesehen werden, stützen sich aber auf neue Erkenntnisse sowie umfangreichere Messdaten, die für HBEFA 4.1 verfügbar waren. Mit den neuen Emissionsfaktoren soll das reale Emissionsverhalten von Pkw noch besser abgeschätzt werden können.

5.12 Exemplarische Darstellung der Unterschiede der Emissionsfaktoren für unterschiedliche nationale Pkw-Flottenzusammensetzungen

Die Emissionsfaktoren für HBEFA 4.1 sowie für die vorherigen Versionen wurden mit PHEM-Durchschnittskennfeldern erstellt, die aus fahrzeugspezifischen PHEM-Kennfeldern zusammengewichtet wurden. Aufgrund limitierter Daten und des großen Aufwands verbunden mit den hohen Kosten, wurden die Gewichtungsfaktoren nicht länderspezifisch, sondern aus den Neuzulassungen der Pkw-Modelle in EU-28 abgeleitet. Die große Anzahl der gemessenen Fahrzeuge für HBEFA 4.1 ermöglicht eine erste Sensitivitätsanalyse für NO_x -Emissionsfaktoren von Euro 6a,b Diesel-Pkw am Beispiel der länderspezifischen Gewichtung für Deutschland, Österreich und Schweden. Abbildung 5.36 zeigt den Anteil der Neuzulassungen von Euro 6a,b Diesel-Pkw nach Marken für die genannten Länder sowie für EU-28. Die Zulassungsdaten wurden aus der CO_2 -Monitoring-Datenbank nach [6] entnommen. Die Daten zeigen unter anderem, dass die Anteile der Neuzulassungen nach Marken von Land zu Land stark variieren, z. B. liegt der Anteil der VW-Diesel-Pkw in Deutschland und Österreich bei über 20 %, in Europa aber nur bei 12 %. Der Anteil der Neuzulassungen von Volvo-Diesel-Pkw liegt in Schweden bei über 30 %, während der Anteil in EU-28, Deutschland und Österreich unter 5 % liegt.

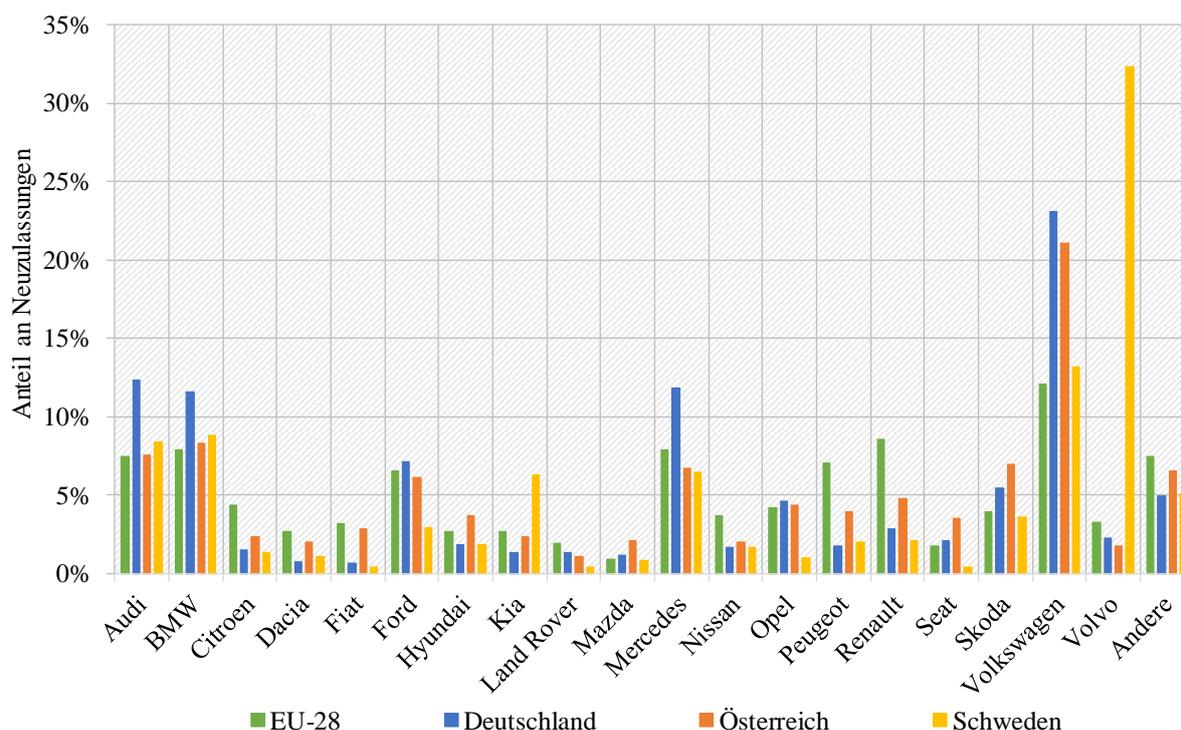


Abbildung 5.36: Anteil der Neuzulassungen von Euro 6a,b Diesel-Pkw nach Marken im Zeitraum 2013 bis 2017 [6]

Um nur Effekte durch die unterschiedliche Kennfeldgewichtung darzustellen, wurde der deutsche Mix an Verkehrssituationen als Basis für den Vergleich herangezogen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für die NO_x -Emissionen. In Abbildung 5.37 sind die NO_x -Emissionen mit den unterschiedlichen Gewichtungen der PHEM-Kennfelder für Deutschland innerorts gezeigt.

Mit dem nach den Neuzulassungen in Deutschland gewichtetem Kennfeld liegen die NO_x -Emissionen der Diesel-Pkw-Flotte 20 % unter den EU-28 NO_x -Emissionen. Für Österreich und Schweden liegen die NO_x -Emissionen der Diesel-Pkw-Flotte 16 % bzw. 10 % darunter. In Abbildung 5.37 sind die NO_x -Emissionen für Deutschland gesamt gezeigt. Hier liegen die NO_x -Emissionen der deutschen Diesel-Pkw-Flotte rund 17 % unter denen der EU-28-Flotte. Gleiches gilt für die österreichische Diesel-Pkw-Flotte. Mit dem Emissionskennfeld der schwedischen Diesel-Pkw-Flotte sind die NO_x -Emissionen um etwa 7 % niedriger als jene von EU-28.

Für Otto-Pkw haben die unterschiedlichen Gewichtungen der PHEM-Kennfelder nahezu keine Auswirkung.

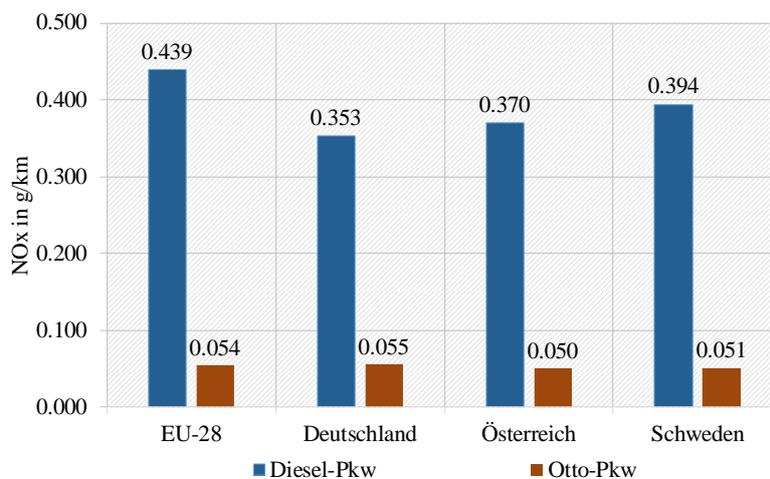


Abbildung 5.37: NO_x -Emissionsfaktoren von Euro 6a,b Diesel-Pkw mit nach Herstellern unterschiedlich gewichteten Kennfeldern für die Verkehrssituationen Deutschland innerorts

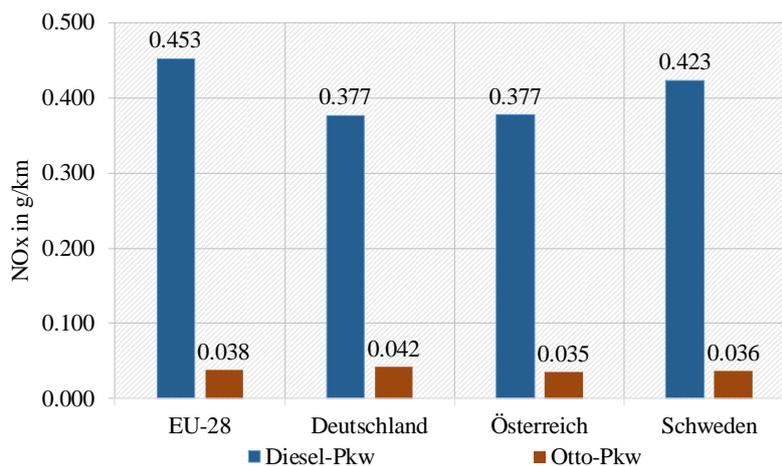


Abbildung 5.38: NO_x -Emissionsfaktoren von Euro 6a,b Diesel-Pkw mit nach Herstellern unterschiedlich gewichteten Kennfeldern für die Verkehrssituationen Deutschland gesamt

Mit diesen Ergebnissen kann folgende Schlussfolgerung getroffen werden:

- Die länderspezifische Gewichtung kann vor allem bei Diesel-Pkw Einfluss auf die Emissionsfaktoren haben.
- Wenn eine höhere Genauigkeit für die Simulation lokaler Emissionen erforderlich ist, sollen lokal gemessene Fahrprofile und PHEM-Eingabedaten der lokalen Pkw-Flotte verwendet werden. Eine solche lokale Betrachtung ist jedoch nur sinnvoll, wenn eine ausreichende Anzahl an Messdaten für die relevantesten Pkw-Marken zur Verfügung steht.

6 Vergleich der HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren mit einer Remote-Sensing-Messstelle

Eine direkte Validierung der HBEFA-Emissionsfaktoren mit Messdaten ist nicht möglich, da keine Messdaten der Pkw-Flotte zu den in HBEFA durch Fahrzyklen definierten Verkehrssituationen verfügbar sind. Daher können die HBEFA-Emissionsfaktoren nur mit ähnlichen Verkehrssituationen und zusätzlichen Vereinfachungen und Annahmen verglichen werden. Das heißt, ein Vergleich des Absolutniveaus ist nur bedingt möglich. Besser sollten beide Datensätze den gleichen Entwicklungstrend der Emissionen über die Abgasnormen widerspiegeln, sofern eine repräsentative Anzahl an Fahrzeugen je Abgasnorm vermessen wurde. Wegen der großen Anzahl an erfassten Fahrzeugen sind Daten von Remote-Sensing-Messkampagnen für solche Vergleiche sehr gut geeignet.

Für den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vergleich wurden aus der CONOX-Datenbank die Remote-Sensing-Messdaten von der Messstelle Kreuzung Gockhauserstraße mit Ursprungstraße in Zürich herangezogen. Es handelt sich dabei um eine Freilandstraße mit einer Steigung von $9,2^\circ$, dies entspricht $16,2\%$. Durch die Wahl der Messstelle wurde sichergestellt, dass nur Fahrzeuge mit betriebswarmem Motoren die Messstelle durchfahren. Die Messdaten wurden nach der Fahrzeugkategorie gefiltert, d.h. es sind separate Ergebnisse für Diesel- sowie Otto-Pkw verfügbar. Die Durchschnittsgeschwindigkeit aller gemessenen Pkw lag bei 45 km/h . Von dieser Messstelle sind CO_2 - sowie NO_x -Daten von 2000 bis 2016 verfügbar, somit können Pkw bis einschließlich Euro 6a,b verglichen werden. [5] [59]

Die Messergebnisse liegen aufgrund des Messprinzips in g Emission je kg CO_2 (bzw. je kg Kraftstoffverbrauch) vor. Um einen Vergleich durchführen zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

- 1) Es wurde eine HBEFA-Verkehrssituation ermittelt, die ähnlich jener Verkehrssituation war, die an der Messstelle vorlag. Die HBEFA-Verkehrssituation „RUR Distr 50 Freeflow_6%“ beschreibt die Durchschnittsdaten Geschwindigkeit und Steigung der Messstelle von allen verfügbaren Verkehrssituationen am besten. Weitere Daten waren von der Remote-Sensing-Messstelle nicht verfügbar, weshalb die Auswahl der Verkehrssituation einer gewissen Unsicherheit unterliegt.
- 2) Ermittlung der HBEFA 4.1 CO_2 - und NO_x -Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „RUR Distr 50 Freeflow_6%“. Es wurden keine separaten PHEM-Durchschnittsfahrzeuge für Zürich erstellt, weshalb auch bei den Fahrzeugdaten eine gewisse Unsicherheit zu der vermessenen Pkw-Flotte vorliegt. Mit den Emissionsfaktoren wurde das Verhältnis von NO_x zu Kraftstoffverbrauch für jede Abgasnorm und Motortechnologie berechnet. Der Kraftstoffverbrauch wurde aus den verfügbaren CO_2 -Daten errechnet.
- 3) Anwenden der NO_x -Korrekturfaktoren für Umgebungstemperatur und Laufleistung. Dafür wurden die mittlere Umgebungstemperatur sowie die mittlere Laufleistung der Schweiz herangezogen.
- 4) Vergleich der HBEFA-Emissionsfaktoren mit den Remote-Sensing-Messdaten in g NO_x je kg Kraftstoffverbrauch.

Aufgrund der erwähnten Unsicherheiten soll, wie bereits erwähnt, vorrangig der Trend über die Abgasnormen beurteilt werden. Abbildung 6.1 zeigt den Vergleich für Diesel-Pkw, Abbildung 6.2 für Otto-Pkw.

Für die Diesel-Pkw stimmt der Trend von HBEFA 4.1 mit den Messdaten ab Euro 3 gut überein. Davor liegen die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren deutlich unter den Remote-Sensing-Messdaten. Die HBEFA 3.3-Emissionsfaktoren stimmen für diese Abgasnormen besser überein.

Zurückzuführen ist das auf die Aktualisierung der Verbrauchskennfelder aller Abgasnormen (siehe Kapitel 5.2). Für die Abgasnormen bis Euro 3 sind diese Änderungen höher ausgefallen, d.h. die Verbrauchswerte sind für die untersuchte Verkehrssituation „RUR Distr 50 Freeflow_6%“ höher als jene von HBEFA 3.3. Bei ähnlichen NO_x -Emissionen (die älteren Schadstoffkennfelder wurden nicht aktualisiert) nimmt das Verhältnis g NO_x zu kg Kraftstoffverbrauch ab. Mögliche Erklärung für die Abweichungen zwischen den Remote-Sensing-Daten und den HBEFA-Daten könnte die Flottenzusammensetzung der PHEM-Daten von 1987 bis Euro 2 sein.

Für Otto-Pkw liegen die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren bis auf ECE-15'04 unterhalb der Remote-Sensing-Messdaten. Der Trend von HBEFA 4.1 stimmt von ECE-15'04 bis Euro 6a,b mit den Remote-Sensing-Daten gut überein. Die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren zeigen bei den Otto-Pkw eine bessere Übereinstimmung mit den Messdaten als jene von HBEFA 3.3.

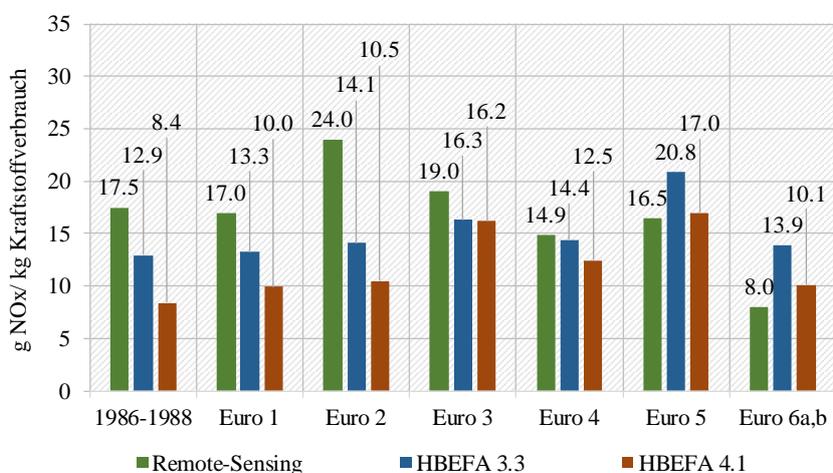


Abbildung 6.1: Vergleich der HBEFA NO_x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw mit Remote-Sensing-Messdaten, Messstelle Zürich

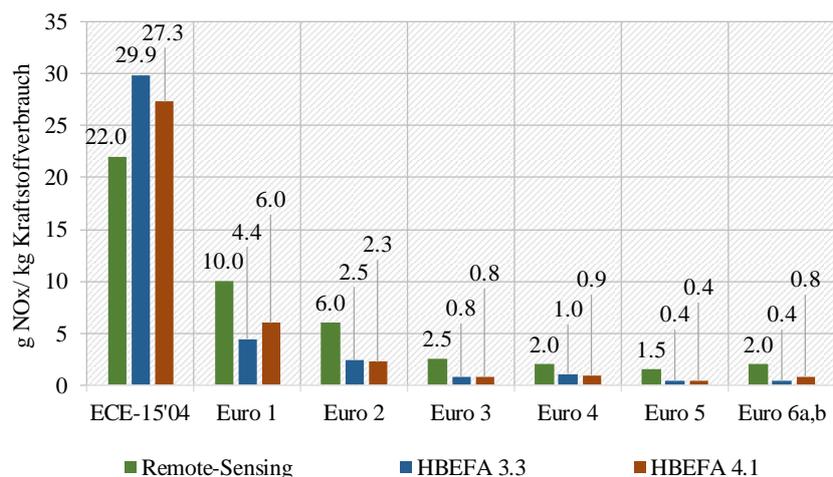


Abbildung 6.2: Vergleich der HBEFA NO_x -Emissionsfaktoren für Otto-Pkw mit Remote-Sensing-Messdaten, Messstelle Zürich

Die Erkenntnisse des durchgeführten Vergleichs können nun wie folgt zusammengefasst werden:

- Die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren spiegeln den Entwicklungstrend des Emissionsniveaus für Diesel- und Otto-PKW für die betrachtete Messstelle gut wider. Bei Diesel-Pkw bis Euro 3 sind größere Unterschiede zu den Remote-Sensing-Daten zu erkennen, allerdings haben diese Kfz nur sehr geringe Fahrleistungsanteile.
- Werden HBEFA-Emissionsfaktoren mit Remote-Sensing-Messstellen verglichen, so können die Fahrzeugflottenzusammensetzung sowie Verkehrssituation große Unsicherheiten darstellen. In Zukunft könnte man diese Unsicherheiten mittels den bei der Remote-Sensing-Messstelle ebenfalls aufgezeichneten Kfz-Marken sowie der gemessenen Geschwindigkeit und Beschleunigung deutlich reduzieren. Methoden dafür müssten aber noch weiter ausgearbeitet werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Emissionen, die durch den Verkehr verursacht werden, können aus Zeit- und Kostengründen nicht für jedes Kfz erfasst werden. Daher wurden in der Vergangenheit Emissionsmodelle erarbeitet, um Berechnungen der durch den Verkehr verursachten Emissionen durchführen zu können. Das behördlich anerkannte Emissionsmodell Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, kurz HBEFA, wurde im Rahmen dieser Arbeit für Pkw aktualisiert. HBEFA enthält Emissionsfaktoren in g/km oder #/km für verschiedene Verkehrssituationen. Die Emissionsfaktoren werden mit dem Simulationsprogramm PHEM simuliert. Eingabedaten für die Simulation sind einerseits Fahrzeugdaten verschiedener europäischer Datenbanken und andererseits Emissionsmessdaten von vermessenen Fahrzeugen. Für die Aktualisierung der Pkw-Emissionsfaktoren der Abgasnormen Euro 6a, b, c und d-Temp wurden mehr als 400 Messzyklen von 155 Fahrzeugen als Grundlage für die Bestimmung der Emissionsfaktoren herangezogen. Die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren basieren auf einer viel breiteren Datenbasis an RDE-Tests als in den vorangegangenen HBEFA-Versionen. Da die für die HBEFA-Aktualisierung verwendeten Messdaten zum Großteil RDE-Tests enthielten, musste eine neue Methode erarbeitet werden, um diese auch berücksichtigen zu können. Mit der entwickelten CO₂-Leistungsinterpolationsmethode können RDE-Tests auch ohne bekannte Motorleistung für die Erstellung der PHEM-Schadstoffkennfelder herangezogen werden. Die PHEM-Schadstoffkennfelder sind zusammen mit den Kraftstoffverbrauchs- bzw. CO₂-Kennfeldern die Basis für die Bestimmung der Emissionsfaktoren. Zusätzlich zur CO₂-Leistungsinterpolationsmethode wurde ein NH₃-Modell entwickelt, das für Diesel-Pkw Auskühleffekte von SCR-Systemen in speziellen Fahrsituationen (z. B. Stausituationen) physikalisch korrekt berücksichtigt. Die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode sowie das NH₃-Modell wurden in das Simulationsprogramm PHEM implementiert. Darüber hinaus wurden in den Emissionsfaktoren auch das EA 189-Softwareupdate des VW-Konzerns, auf Basis von Messdaten vor und nach dem Softwareupdate, berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden erstmals auch relevante reale Effekte (z. B. Seitenwind, nasse Straßenverhältnisse oder Berücksichtigung von Aufbauten und Anhängern) in den Emissionsfaktoren berücksichtigt. Dafür wurden aus einer Datenbank der dokumentierte Kraftstoffverbrauch von Realfahrten für ca. 550 000 Fahrzeuge für die Modelljahre 2001 bis 2016 als Grundlage herangezogen. Damit konnten die Daten der PHEM-Durchschnittsfahrzeuge entsprechend dem Realkraftstoffverbrauch angepasst werden. Dabei ergaben sich höhere Fahrwiderstände als für vorangegangene HBEFA-Versionen, bei denen Roll- und Luftwiderstandswerte vorwiegend aus Ausrollversuchen gewonnen wurden. Dabei waren Effekte von z. B. Schlechtwetter, Dachaufbauten und Anhängern nicht erfasst.

Messungen im Rahmen dieser Arbeit zeigten auch NO_x-Erhöhungen mit abnehmender Umgebungstemperatur. Basierend auf den Messungen wurden NO_x-Korrekturfaktoren erarbeitet, die als Funktion der Umgebungstemperatur in der HBEFA-Software integriert wurden. Der NO_x-Korrekturfaktor wird analog zum Korrekturfaktor der Laufleistung in der HBEFA-Software aufgeschlagen.

Werden die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für den deutschen Mix an Verkehrssituationen betrachtet, so sieht man, dass von 1987 bis Euro 6d-Temp durchschnittliche CO₂-Reduktionsraten von rund 0,2 % pro Jahr für Deutschland innerorts sowie 0,5 % pro Jahr für Deutschland gesamt vorliegen. Werden die Diesel-Pkw separat betrachtet, so liegt für Deutschland innerorts eine durchschnittliche Erhöhung von 0,1 % pro Jahr vor, für Deutschland gesamt eine durchschnittliche Reduktion von 0,3 % pro Jahr. Die geringfügige Änderung ist u.a. auch auf die zunehmenden größeren Fahrzeugsegmente mit höheren Massen bei Diesel-Pkw zurückzuführen.

Für Otto-Pkw zeigen die Daten eine durchschnittliche Reduktion von 1987 bis Euro 6d-Temp von 0,4 % CO₂ pro Jahr für Deutschland innerorts sowie 0,7 % CO₂ pro Jahr für Deutschland gesamt. Die Zunahme der größeren Fahrzeugsegmente ist bei Otto-Pkw geringer.

Die NO_x-Emissionsfaktoren von Pkw zeigen positive Entwicklungen ab Euro 6a,b. Das NO_x-Niveau ohne Kaltstart betrug für Diesel-Pkw von 1987 bis Euro 5 im Durchschnitt rund 0,8 g/km für Deutschland gesamt. Für Euro 6d-Temp Diesel-Pkw betragen die durchschnittlichen NO_x-Emissionsfaktoren 0,048 g/km für Deutschland innerorts sowie 0,046 g/km für Deutschland gesamt. Die Emissionsfaktoren wurden von sechs Euro 6d-Temp-Fahrzeugen abgeleitet. Wo sich das Emissionsniveau der Euro 6d-Temp Diesel-Pkw-Flotte in Zukunft einpendeln wird, werden zukünftige Messdaten zeigen. Bisher erfolgte Messungen an weiteren Pkw bestätigen die Größenordnung. Die vier vermessenen Euro 6d-Temp Otto-Pkw ergaben 0,022 g/km NO_x für Deutschland innerorts sowie 0,031 g/km für Deutschland gesamt. Auch hier werden zukünftige Messungen von weiteren Fahrzeugen zeigen, ob sich der NO_x-Emissionsfaktor für Euro 6d-Temp noch ändern wird. Die enorme Reduzierung der NO_x-Emissionen im realen Straßenverkehr ist vor allem auf das neue Pkw-Typgenehmigungsverfahren mit RDE-Tests zurückzuführen. Für Post-Euro 6 wurden NO_x-Emissionen für Diesel- und Otto-Pkw unter 0,020 g/km im betriebswarmem Zustand abgeschätzt.

Durch Hardwarenachrüstungen und Softwareupdates kann das Emissionsniveau ebenfalls reduziert werden. Ausgehend von den vermessenen Euro 5 VW-Konzernfahrzeugen, die vor und nach dem EA 189-Softwareupdate vermessen wurden, wurden NO_x-Reduktionen von 35 % für Deutschland innerorts und 29 % für Deutschland gesamt bei 20 °C Umgebungstemperatur ermittelt. Werden diese Reduktionen auf die gesamte Euro 5 Diesel-Pkw-Flotte bezogen, sind von diesem Softwareupdate etwa 40 % der Fahrzeuge in Deutschland betroffen. Somit ergibt sich für die gesamte Euro 5-Diesel-Pkw-Flotte in Deutschland eine Reduzierung von bis zu 14 % bei 20 °C Umgebungstemperatur.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollen folgende Punkte einen Ausblick für zukünftige Arbeiten an HBEFA-Emissionsfaktoren geben:

- Bis dato wurden keine detaillierten Untersuchungen zu den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren angestellt. Unsicherheiten der Emissionsfaktoren setzen sich aus den Messunsicherheiten sowie auch aus den Modellunsicherheiten inklusive Schaltverhalten von PHEM zusammen. Ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind die Korrekturfaktoren für Laufleistung und Umgebungstemperatur. Welche Unsicherheiten in den Verkehrssituationen enthalten sind, die das repräsentatives Fahren widerspiegeln, wurde ebenfalls noch nicht erarbeitet. Diese Arbeiten sind für HBEFA 4.2 vorgesehen.
- Die Emissionsfaktoren von Euro 6c und Euro 6d-Temp Fahrzeugen basieren auf einer geringen Anzahl von Fahrzeugmessungen. Daher sollen Messungen von zusätzlichen Pkw in weiteren Arbeiten zeigen, wo sich das Emissionsniveau dieser Abgasnormen einpendeln wird.
- Emissionsfaktoren für Euro 5 und Euro 6a,b Pkw mit obligatorischen und freiwilligen Umrüstungen (Hardwarenachrüstungen und/ oder Softwareupdates) fehlen noch für mehrere Fahrzeugmodelle. Aufgrund der vorhandenen Datenlage wurde bisher nur das Softwareupdate der Euro 5 Diesel-Pkw mit EA 189-Motor des VW-Konzerns im HBEFA berücksichtigt. In zukünftigen Arbeiten sollen weitere Messungen vor und nach Umrüstung, einschließlich Kaltstarttests sowie Tests bei verschiedenen Umgebungstemperaturen für HBEFA durchgeführt werden.

- Für HBEFA 4.1 waren nur Messdaten von einem Diesel-Pkw verfügbar, um Auskühl-effekte des SCR-Systems zu untersuchen. Daher sollten in weiteren Arbeiten mehr Pkw in Stausituationen gemessen werden, um ein breiteres Wissen über das Verhalten der Pkw in solchen Verkehrssituationen zu erhalten. Insbesondere sollen auch mögliche Heizstrategien des Motors in solchen Verkehrssituationen untersucht werden.

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Entwicklung des Kfz-Bestands in Österreich [14].....	1
Abbildung 1.2: Chronologische Entwicklung des HBEFA [31].....	2
Abbildung 3.1: Zusammensetzung des Rohabgases von Ottomotoren bei stöchiometrischem Betrieb in Volumenprozent [50]	5
Abbildung 3.2: Funktionsschema Pkw-Rollenprüfstand mit CVS-Anlage [14].....	10
Abbildung 3.3: Schematische Abbildung des Messaufbaus eines Remote-Sensing-Systems [3]	13
Abbildung 3.4: Betriebsbereiche der einzelnen Fahrzyklen im Motorkennfeld qualitativ abgebildet	16
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Simulationsprogramms PHEM [18].....	19
Abbildung 4.2: Beispiel für die Interpolation der Motorleistung aus einem CO ₂ -Kennfeld ...	22
Abbildung 4.3: Beispiel für die mit der CO ₂ -Leistungsinterpolationsmethode errechnete Motorleistung anhand einer RDE-Messung an einem Pkw	22
Abbildung 4.4: Ein mit der CO ₂ -Leistungsinterpolationsmethode erstelltes NO _x -Kennfeld...	23
Abbildung 4.5: Beispiel für gemessene und simulierte CO ₂ -Emissionen im CADC von einem Diesel-Pkw mit durchschnittlichem CO ₂ -Kennfeld	26
Abbildung 4.6: Beispiel für gemessene und simulierte CO ₂ -Emissionen im CADC von einem Diesel-Pkw mit justiertem CO ₂ -Kennfeld	27
Abbildung 4.7: Beispiel zur Validierung der CO ₂ -Leistungsinterpolationsmethode anhand Fahrzeug 211 im CADC.....	29
Abbildung 4.8: Vergleich der am Rollenprüfstand gemessenen Leistung mit der mittels CO ₂ - Leistungsinterpolationsmethode berechneten Leistung der untersuchten Diesel- (a) und Ottofahrzeuge (b) mit und ohne Kennfeldjustierung	30
Abbildung 4.9: Exemplarischer Verlauf des Korrekturfaktors für NO _x -Konvertierung als Funktion des NH ₃ -Speicherstands [39]	36
Abbildung 4.10: Vergleich der gemessenen und simulierten NO _x -Emissionen ohne und mit aktiviertem NH ₃ -Modell in einem Stauzyklus	38
Abbildung 4.11: Validierung Gesamtmodell PHEM anhand Dieselfahrzeuge für CO ₂ (a), NO _x (b), CO (c), HC (d), PM (e) und PN (f).....	41
Abbildung 4.12: Validierung Gesamtmodell PHEM anhand Ottofahrzeuge für CO ₂ (a), NO _x (b), CO (c), HC (d), PM (e) und PN (f).....	42
Abbildung 5.1: NO _x -Emissionen der vermessenen Pkw im T20-Umgebungstemperaturbereich	50
Abbildung 5.2: NO _x -Emissionen der vermessenen Pkw vor und nach dem EA 189 Softwareupdate im T20-Umgebungstemperaturbereich	52
Abbildung 5.3 Verhältnis von realem zu typisiertem Kraftstoffverbrauch von Pkw in Deutschland [63]	53
Abbildung 5.4: Geschwindigkeitsverlauf des Hauptzyklus von zwei HBEFA- Verkehrssituationen.....	54

Abbildung 5.5: Kraftstoffverbrauchskennfeld des durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw (a) und Euro 6a,b Otto-Pkw (b)	56
Abbildung 5.6: End-of-Tailpipe NO _x -Kennfeld des durchschnittlichen Euro 6a,b (a) sowie Euro 6d-Temp (b) Diesel-Pkw	58
Abbildung 5.7: End-of-Tailpipe NO _x -Kennfeld des durchschnittlichen Euro 6a,b (a) sowie Euro 6d-Temp (b) Otto-Pkw	59
Abbildung 5.8: NO _x -Änderungen in % von VW-Konzernfahrzeugen aufgrund des Softwareupdates EA 189 bei 20 °C Umgebungstemperatur	61
Abbildung 5.9: Durchschnittliche NO _x -Konvertierungen der vermessenen Pkw mit motornahem SCR-System (a) und SCR-System im Unterboden (b)	63
Abbildung 5.10: Abgastemperaturkennfeld für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw mit motornahem SCR-System (a) und SCR-System im Unterboden (b).....	65
Abbildung 5.11: Abgasmassenstromkennfeld für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw	66
Abbildung 5.12: Durchschnittlicher Leistungsbedarf der Klimaanlage von Pkw in Deutschland	70
Abbildung 5.13: Simulierte und gemessene CO ₂ -Emissionen (Mittelwert von vier Diesel-Pkw (a) und von vier Otto-Pkw (b) in verschiedenen Zyklen)	73
Abbildung 5.14: Verhältnis der realen CO ₂ -Emissionen sowie der mit PHEM simulierten CO ₂ -Emissionen zum CO ₂ im NEFZ	75
Abbildung 5.15: Validierung der NO _x -Emissionen für den durchschnittlichen Euro 6a,b Diesel-Pkw.....	76
Abbildung 5.16: Umgebungstemperaturabhängigkeit der NO _x -Emissionen von Euro 6a,b Diesel-Pkw Messungen (a) und Vergleich mit Remote-Sensing-Daten (b)	82
Abbildung 5.17: NO _x -Korrekturfunktionen zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO _x -Emissionen von Diesel-Pkw.....	83
Abbildung 5.18: NO _x -Korrekturfunktionen zur Berücksichtigung des Umgebungstemperatureinflusses auf die NO _x -Emissionen von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor.....	85
Abbildung 5.19: CO ₂ -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....	87
Abbildung 5.20: CO ₂ -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....	87
Abbildung 5.21: NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....	88
Abbildung 5.22: NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....	88
Abbildung 5.23: NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung.....	89
Abbildung 5.24: NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel- und Otto-Pkw für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung.....	89
Abbildung 5.25: Unterschiede der CO ₂ -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	90

Abbildung 5.26: Unterschiede der CO ₂ -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	90
Abbildung 5.27: Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	91
Abbildung 5.28: Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	91
Abbildung 5.29: Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung	92
Abbildung 5.30: Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung	92
Abbildung 5.31: Unterschiede der CO ₂ -Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	96
Abbildung 5.32: Unterschiede der CO ₂ -Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	96
Abbildung 5.33: Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	97
Abbildung 5.34 Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren durch stufenweise Adaptierung der neuen HBEFA-Parameter für Diesel-Pkw und für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	97
Abbildung 5.35: Unterschiede der NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw zwischen HBEFA 3.3 und 4.1 für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung	98
Abbildung 5.36: Anteil der Neuzulassungen von Euro 6a,b Diesel-Pkw nach Marken im Zeitraum 2013 bis 2017 [6].....	99
Abbildung 5.37: NO _x -Emissionsfaktoren von Euro 6a,b Diesel-Pkw mit nach Herstellern unterschiedlich gewichteten Kennfeldern für die Verkehrssituationen Deutschland innerorts.....	100
Abbildung 5.38: NO _x -Emissionsfaktoren von Euro 6a,b Diesel-Pkw mit nach Herstellern unterschiedlich gewichteten Kennfeldern für die Verkehrssituationen Deutschland gesamt	100
Abbildung 6.1: Vergleich der HBEFA NO _x -Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw mit Remote-Sensing-Messdaten, Messstelle Zürich	103
Abbildung 6.2: Vergleich der HBEFA NO _x -Emissionsfaktoren für Otto-Pkw mit Remote-Sensing-Messdaten, Messstelle Zürich	103

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte für Pkw in der EU [14] [68] [69]	14
Tabelle 3-2: Dynamikgrößen von Fahrzyklen	16
Tabelle 3-3: Konformitätsfaktoren für RDE-Tests von Pkw [71].....	17
Tabelle 4-1: Abweichungen der CO ₂ -Emissionen für die untersuchten Optionen der Pkw-Dieselmotoren sowie der Pkw-Ottomotoren	25
Tabelle 4-2: Abweichungen und R ² -Werte der CO ₂ -Leistungsinterpolationsmethode mit und ohne Kennfeldjustierung	30
Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Abweichungen und R ² -Werte bei Anwendung der CO ₂ -Leistungsinterpolationsmethode.....	31
Tabelle 4-4: NO _x -Abweichungen und R ² -Werte der untersuchten Fahrzeuge ohne und mit aktiviertem NH ₃ -Modell.....	38
Tabelle 4-5: Verwendete Fahrzeuge und Zyklen zur Validierung des Gesamtmodells PHEM	40
Tabelle 4-6: Zusammenfassung der Abweichungen und R ² -Werte der untersuchten Diesel- und Ottofahrzeuge im Zuge der Validierung des Gesamtmodells PHEM	43
Tabelle 5-1: Verfügbare Messungen von Euro 6a,b Diesel-Pkw.....	48
Tabelle 5-2: Verfügbare Messungen von Euro 6d-Temp Diesel-Pkw.....	49
Tabelle 5-3: Verfügbare Messungen von Euro 6a,b Otto-Pkw	49
Tabelle 5-4: Verfügbare Messungen von Euro 6c Otto-Pkw	49
Tabelle 5-5: Verfügbare Messungen von Euro 6d-Temp Otto-Pkw	50
Tabelle 5-6: Verfügbare Messungen von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor vor Softwareupdate.....	51
Tabelle 5-7: Verfügbare Messungen von VW-Konzernfahrzeugen mit EA 189-Motor nach Softwareupdate.....	51
Tabelle 5-8: Dynamikgrößen des Hauptzyklus von zwei HBEFA-Verkehrssituationen.....	54
Tabelle 5-9: Anteil Otto-Pkw mit Direkteinspritzung an zugelassenen Otto-Pkw in EU-28 ..	55
Tabelle 5-10: Eigenschaften von Diesel- und Ottokraftstoff [54].....	57
Tabelle 5-11: Bestandsdaten und Umrüstungszahlen von Euro 5 Pkw in Deutschland [29]..	61
Tabelle 5-12: Anteile an SCR-Systemen in der Diesel-Pkw-Flotte	64
Tabelle 5-13: Nennleistungen und -drehzahlen sowie DIN-Leermassen der durchschnittlichen Diesel- und Otto-Pkw in Deutschland.....	67
Tabelle 5-14: Reifenlabels und deren abgeschätzten Anteile für den durchschnittlichen Pkw in Deutschland für das Bezugsjahr 2018	68
Tabelle 5-15: Marktdurchdringung und Aktivierungsfaktoren von Start-Stopp-Systemen für Pkw in Deutschland.....	71
Tabelle 5-16: Abgasnachbehandlungssysteme der Diesel-Pkw-Flotte in Deutschland	71
Tabelle 5-17: K _i -Faktoren zur Berücksichtigung der Emissionserhöhungen aufgrund DPF-Regenerationen.....	78
Tabelle 5-18: Laufleistungskorrekturfaktoren für NO _x und CO von Diesel-Pkw.....	79

Tabelle 5-19: Gewichtungsfaktoren für die durchschnittliche NO_x -Umgebungstemperaturkorrekturfunktion der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor	84
Tabelle 5-20: Anteil NO_2 an NO_x von Diesel- und Otto-Pkw bei 50 000 km Laufleistung	86
Tabelle 5-21: Hinterlegte Emissionsfaktoren in der HBEFA 3.3-Software für Diesel-Pkw [16] [19] [53].....	93
Tabelle 5-22: Hinterlegte Emissionsfaktoren in der HBEFA 3.3-Software für Otto-Pkw [16] [19] [53].....	94
Tabelle 10-1: Herangezogene Dieselfahrzeugdaten für die Untersuchung der Methoden	120
Tabelle 10-2: Herangezogene Ottofahrzeugdaten für die Untersuchung der Methoden	121
Tabelle 11-1: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6a,b Diesel-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung	122
Tabelle 11-2: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6d-Temp Diesel-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung	125
Tabelle 11-3: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6a,b Otto-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung	125
Tabelle 11-4: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6c Otto-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung	127
Tabelle 11-5: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6d-Temp Otto-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung h	127
Tabelle 11-6: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor für die PHEM-Kennfelderstellung	127
Tabelle 12-1: Modellfamilien der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Softwareupdate (Stand: März 2017)	128
Tabelle 13-1: Laufleistungskorrekturfaktoren für NO_x und CO von Otto-Pkw.....	130
Tabelle 13-2: Laufleistungskorrekturfaktoren für HC von Otto-Pkw.....	130
Tabelle 14-1: Verwendete Gewichtungsfaktoren für die Verkehrssituationen Deutschland innerorts.....	132
Tabelle 14-2: Verwendete Gewichtungsfaktoren für die Verkehrssituationen Deutschland gesamt.....	133
Tabelle 15-1: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	137
Tabelle 15-2: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung	137
Tabelle 15-3 HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....	138
Tabelle 15-4: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung.....	138
Tabelle 15-5: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung	139
Tabelle 15-6: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung	140

Tabelle 15-7 HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung.....	140
Tabelle 15-8: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung.....	141

9 Literaturverzeichnis

- [1] Aip-Automotive: Kompaktsysteme zur mobilen Abgasmessung. <https://www.aip-automotive.de/de/Produkte/Abgas-Messtechnik/Mobile-Abgasmessung-PEMS>, zugegriffen am 20. Jänner 2020
- [2] AVL: In-vehicle measurement platform. <https://www.avl.com/web/guest/-/avl-m-o-v-e-is>, zugegriffen am 20. Jänner 2020
- [3] Borken-Kleefeld, J.; Dallmann, T.: Remote Sensing of Motor Vehicle Exhaust Emissions. White Paper, ICCT, 2018
- [4] Castoldi, L.; Matarrese, R.; Kubiak, L.; Daturi, M.; Artioli, N.; Pompa, S.; Lietti, L.: In-depth insights into N₂O formation over Rh- and Pt-based LNT catalysts. *Catalysis Today*, DOI: 10.1016/j.cattod.2018.01.026, 2019
- [5] Chen, Y.; Borken-Kleefeld, J.: Real-driving emissions from cars and light commercial vehicles e Results from 13 years remote sensing at Zurich/CH. *Atmospheric Environment*, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.01.040, 2014
- [6] EEA: Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars – Regulation (EC) No 443/2009. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-14>, zugegriffen am 29. August 2018
- [7] Enzi, M.: Validierung des Emissionsmodells PHEM für EURO 6 PKWs. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2018
- [8] Ericsson, E.; Nolinder, E.; Persson, A.; Steven, H.: Work programme 2016 - 2018 for HBEFA Version 4.1. Report of the work carried out for work package 2, WSP und HSDAC, 2019
- [9] Grange, S. K.; Farren, N. J.; Vaughan, A. R.; Rose, R. A.; Carslaw, D. C.: Strong temperature dependence for light-duty diesel vehicle NO_x emissions. *Environmental Science & Technology*, DOI: 10.1021/acs.est.9b01024, 2019
- [10] Guan, B.; Zhan, R.; Lin, H.; Huang, Z.: Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust. *Applied Thermal Engineering*, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.021, 2014
- [11] Hainisch, T.: Messung und Simulation von PKW Real World Emissionen bei einem Euro 6 Dieselfahrzeug. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2017
- [12] Hausberger, S.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil II. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [13] Hausberger, S.: Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions. VKM-THD Newsletter/Volume 82. ISBN 3-901351-74-4. Graz University of Technology, 2003
- [14] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs – Teil I. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [15] Hausberger, S.; Ligterink, N.; et al.: Correction algorithms for WLTP chassis dynamometer and coast-down testing. Report for DG Enterprise, TNO, 2015

- [16] Hausberger, S.; Matzer, C.: Update of Emission Factors for EURO 4, EURO 5 and EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA Version 3.3. Final Report No. I-09/17/ CM EM 16/26/679, Graz University of Technology, 2017
- [17] Hausberger, S.; Matzer, C.; Lipp, S.; Weller, K.; Dippold, M.; Röck, M.; Rexeis, M.; Silberholz, G.: Consistent Emission Factors from PEMS and Chassis Dyno Tests for HBEFA 4.1. 23rd International Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki, 2019
- [18] Hausberger, S.; Rexeis, M.; Dippold, M.: User Guide to the PHEM Emission Model (Status 22.01.2018). Graz University of Technology, 2018
- [19] Hausberger, S.; Rexeis, M.; Zallinger, M.; Luz, R.: Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Final Report No. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679, Graz University of Technology, 2009
- [20] Hausberger, S.; Schüssler, M.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil III: SCR. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2012
- [21] Hausberger, S.; Stadlhofer, W.; Vermeulen, R.; Geivanidis, S.; et al.: MAC performance test procedure. Study for DG Enterprise (performed under Framework Service Contract ENTR/05/18), Graz University of Technology, 2013
- [22] Hill, N.; Windisch, E.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Skinner, I.; et al.: Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Final Report for DG Climate Action Ref. CLIMA.C.2/FRA/2012/0006, Ricardo AEA, 2015
- [23] Hirt, H.-G.: Messung und Simulation von PKW-Emissionen mit Real World Zyklen und Vergleich von Interpolations-Routinen. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2019
- [24] Horiba: Portable Emissions Messsysteme. <https://www.horiba.com/de/automotive-test-systems/products/emission-measurement-systems/on-board-systems>, zugegriffen am 20. Jänner 2020
- [25] iav: Der Ottopartikelfilter kommt. <https://www.iav.com/was-uns-bewegt/der-ottopartikelfilter-kommt>, zugegriffen am 20. Jänner 2020
- [26] inwt-statistics: https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil2.html, zugegriffen am 25. Februar 2020
- [27] IVL: Remote-Sensing database. <https://rsdb.ivl.se/>, zugegriffen am 07. Februar 2020
- [28] Kapus, P.: Messung und Simulation der NO_x-Emission bei einem EURO 6 Diesel PKW mit SCR-Katalysator. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017
- [29] KBA: Umsetzungsraten des Softwareupdates im Rahmen des Pflichtrückrufes aus Vorträgen des KBA zum Nationalen Forum Diesel. Datei mit Umsetzungsraten, Kraftfahrtbundesamt Deutschland, 2018
- [30] KBA: Sachstand emissionsbezogener Rückrufe in Deutschland. Präsentationsfolien, Kraftfahrtbundesamt Deutschland, 2018

- [31] Keller, M.; Hausberger, S.; Notter, B.: Handbook Emission Factors for Road Transport Overview and introduction. Präsentationsfolien, Technische Universität Graz, INFRAS, MK Consulting, 2018
- [32] Lipp, S.; Hausberger, S.: Rahmenvertrag für die Ermittlung und Dokumentation von Realemissionen aus Fahrzeugen und Maschinen 2017-2020. Zwischenbericht im Auftrag des Umweltbundesamts Deutschland; Geschäftszeichen Z6-69 836/1, 2020
- [33] Matzer, C.; Hausberger, S.; Lipp, S.; Rexeis, M.: A new approach for systematic use of PEMS data in emission simulation. 21st Transport and Air Pollution Conference, Lyon, 2016
- [34] Matzer, C.; Hausberger, S.; Rexeis, M.; Opetnik, M.; Ramsauer, M.; Mogg, O.; Weger, F.: Update of Emission Factors for EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA. 22nd Transport and Air Pollution Conference, Zurich, 2017
- [35] Matzer, C.; Weller, K.; Opetnik, M.; Hausberger, S.; Knörr, W.; Notter, B.: Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamts Deutschland, Forschungskennzahl 3715 51 1020, 2020
- [36] Matzer, C.; Rexeis, M.: Proposal for test description for cars and LCV for chassis dyno tests and RDE tests as basis for emission factors (Version 3). Graz University of Technology, 2016
- [37] Matzer, C.; Weller, K.; Dippold, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S.: Update of emission factors for HBEFA Version 4.1. Final Report No. I-05/19/CM EM-I-16/26/679, Graz University of Technology, 2019
- [38] Merker, G.P.; Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren (8. Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-19211-2, 2018
- [39] Michelitsch, P.: Simulation von EURO VI schweren Nutzfahrzeugen in Niedriglastzyklen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, 2018
- [40] Notter, B.; Hausberger, S.; Rexeis, M.; Dippold, M.; Matzer, C.; Lipp, S.; Weller, K.; Röck, M.; Schwingshackl, M.; et al.: Integrating recent developments in road transport in HBEFA 4.1. 23rd International Transport and Air Pollution Conference, Thessaloniki, 2019
- [41] Notter, B.; Keller, M.; Althaus, H.-J.; Cox, B.; Knörr, W.; Heidt, C.; Biemann, K.; Räder, D.; Jamet, M.: HBEFA 4.1 Development Report. INFRAS, 2019
- [42] Opetnik, M.: Messung und Simulation von Euro 6 Otto-PKW Emissionen für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2019
- [43] Pischinger, R.; Klell, M.; Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine (3. Auflage). Springer Verlag, ISBN 978-3211-99276-0, 2009
- [44] Politschnig, N.: Analyse des realen Emissionsverhaltens von Euro 6 Diesel - Personenkraftwagen. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2019

- [45] Present, S.: Messung und Simulation eines EURO 6d-TEMP Diesel-PKW. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2018
- [46] Ramsauer, M.: Messung und Simulation des Emissionsverhaltens eines Euro 6 Diesel-PKWs bei RDE-Fahrten und in Stausituationen. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2017
- [47] Rase, W.-D.: Interpolation von stetigen Oberflächen aus flächenbezogenen Informationen. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn
- [48] Reif, K.: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren. Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-09521-5, 2015
- [49] Reif, K.: Dieselmotor-Management im Überblick (2. Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-06554-6, 2014
- [50] Reif, K.: Ottomotoren-Management, Steuerung, Regelung und Überwachung (4. Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-1416-6, 2014
- [51] Reinbacher, D.: Analyse von limitierten und nicht-limitierten Abgaskomponenten bei Diesel PKWs. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017
- [52] Rexeis, M.: Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles. PhD, Graz University of Technology, 2009
- [53] Rexeis, M.; Hausberger, S.; Kühlwein, J.; Luz, R.: Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2. Final Report No. I-31/2013/ Rex EM-I 2011/20/679, Graz University of Technology, 2013
- [54] Rexeis, M.; Röck, M.; Quaritsch, M.; Hausberger, S.; Silberholz, S.: Further development of VECTO. Final Report No. I 16/19/Rex EM-I 17/24 5670, Graz University of Technology, 2019
- [55] Schreck, S.: Messung und Simulation eines EURO 6 Diesel-PKW mit NSK. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2018
- [56] Schwingshackl, M.; Rexeis, M.: Assessment of transport emissions in Austria for the year 2018 based on the Inventory 2019 with emission factors from HBEFA 1.2 and HBEFA 4.1. Report No. I 03/20/Schwi - Em I-20/01/679, Graz University of Technology, 2020
- [57] Shin, Y.; Jung, Y.; Cho, C. P.; Pyo, Y. D.; Jang, J.; Kim, G.; Kim, T. M.: NO_x abatement and N₂O formation over urea-SCR systems with zeolite supported Fe and Cu catalysts in a nonroad diesel engine. Chemical Engineering Journal, DOI: 10.1016/j.cej.2019.122751, 2020
- [58] Sjödin, A.: The CONOX/ERMES Remote Sensing Database. Presentation, Swedish Environmental Research Institute, 2017
- [59] Sjödin, A.; Borcken-Kleefeld, J.; et al.: Real-driving emissions from diesel passenger cars measured by remote sensing and as compared with PEMS and chassis dynamometer measurements. CONOX Task 2 report, ISBN: 978-91-88319-70-8, 2018
- [60] Spicher, U.: Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung (4.Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-12214-0, 2017

- [61] Spritmonitor.de: <https://www.spritmonitor.de>. Zugegriffen am 14. September 2018
- [62] Stögmüller, A.: Umgebungstemperatureinflüsse auf das Emissionsniveau von betriebswarmen PKW. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017
- [63] Tietge, U.; Allekotte, M.; Althaus, H.-J.; Hausberger, S.; Eisenmann, C.; et al.: Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs. Im Auftrag des Umweltbundesamtes Deutschland, Forschungskennzahl 3716 58 180 0, 2019
- [64] Tietge, U.; Mock, P.; Franco, V.; Zacharof, N.: From laboratory to road: Modelling the divergence between official and real world fuel consumption and CO₂ emission values in the German passenger car market for the years 2001–2014. *Journal Energy Policy* 103, DOI: 10.1016/j.enpol.2017.01.021, 2017
- [65] van Basshuysen, R.; Schäfer, F.: *Handbuch Verbrennungsmotor (7. Auflage)*. Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-04677-4, 2014
- [66] Van Nieuwstadt, M.; Shah, A.; Serban, E.; Martin, D.: Regeneration Strategies for Gasoline Particulate Filters. SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2019-01-0969, 2019
- [67] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 vom 23. April 2009
- [68] Verordnung (EG) Nr. 692/2008 vom 18. Juli 2008
- [69] Verordnung (EG) Nr. 715/2007 vom 20. Juni 2007
- [70] Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017
- [71] Verordnung (EU) 2017/1154 der Kommission vom 7. Juni 2017
- [72] Verordnung (EU) 2017/1347 der Kommission vom 13. Juli 2017
- [73] Verordnung (EU) 2018/1832 der Kommission vom 5. November 2018
- [74] Verordnung Nr. 1222/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009
- [75] Viehböck, M.: Simulative und messtechnische RDE-Untersuchung eines Diesel PKW's mit NO_x Speicherkatalysator. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017
- [76] Weller, K.: Emission Models for Heavy Duty Vehicles based on On-road Measurements. PhD, Graz University of Technology, 2020
- [77] Weller, K.; Lipp, S.; Röck, M.; Matzer, C.; Bittermann, A.; Hausberger, S.: Real world fuel consumption and emissions from LDVs and HDVs. *Frontiers in Mechanical Engineering*, DOI: 10.3389/fmech.2019.00045, 2019
- [78] Weller, K.; Rexeis, M.; Hausberger, S.; Zach, B.: A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements. 21st Transport and Air Pollution Conference, Lyon, 2016
- [79] Windsor, S.: Real World Drag Coefficient – Is It Wind Averaged Drag? Paper, DOI: 10.1533/9780081002452.1.3, 2014

- [80] Wunsch, R.; Schön, C.; Frey, M.; Tran, D.; Proske, S.; Wandrey, T.; Kalogirou, M.; Schäffner, J: Detailed experimental investigation of the NO_x reaction pathways of threeway catalysts with focus on intermediate reactions of NH₃ and N₂O. Applied Catalysis B: Environmental, DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.118937, 2020
- [81] Zallinger, M.: Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen. Dissertation, Technische Universität Graz, 2010
- [82] Zöhler, A.: Simulative und messtechnische RDE-Untersuchung eines Diesel PKW mit SCR. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2016
- [83] Zunghammer, M.: RDE-Messung und PHEM-Simulation eines Diesel-PKW mit NO_x-Speicherkatalysator. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2017

10 Anhang A

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die wichtigsten Diesel- und Ottofahrzeugdaten, die für die Untersuchungen der jeweils im Hauptteil der Arbeit beschriebenen Methoden verwendet wurden.

Tabelle 10-1: Herangezogene Dieselfahrzeugdaten für die Untersuchung der Methoden

Fahrzeug ID	Fahrzeug	Gemischaufbereitung	Technologien zur Senkung der Schadstoffemissionen	Getriebe
211	Diesel-Pkw, D-Segment, 2.0l, 120 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie LNT und DPF	6-Gang, manuell
226	Diesel-Pkw, D-Segment, 2.0l, 103 kW, Euro 5	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC und DPF	6-Gang, manuell
239	Diesel-Pkw, M-Segment, 2.0l, 110 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC, motornahen SCR, DPF und ASC	6-Gang, manuell
245	Diesel-Pkw, D-Segment, 1.6l, 88 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC, SCR und DPF im Unterboden	6-Gang, Automatik
254	Diesel-Pkw, E-Segment, 2.0l, 140 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC, motornahen SCR, DPF und ASC	6-Gang, Automatik
259	Diesel-Pkw, C-Segment, 1.6l, 96 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie LNT und DPF	6-Gang, manuell
261	Diesel-LNf, N1-III, 3.0l, 132 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC mit DPF und SCR im Unterboden	6-Gang, manuell
262	Diesel-Pkw, D-Segment, 2.0l, 90 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC, motornahen SCR, DPF und ASC	6-Gang, manuell
264	Diesel-Pkw, C-Segment, 1.6l, 66 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie LNT mit DPF	5-Gang, manuell
271	Diesel-Pkw, M-Segment, 1.6l, 89 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC, SCR im Unterboden und DPF	6-Gang, manuell
298	Diesel-Pkw, D-Segment, 2.0l, 130 kW, Euro 6d-Temp	Direkteinspritzung	EGR sowie LNT, SCR im Unterboden und DPF	8-Gang, Automatik
304	Diesel-Pkw, M-Segment, 2.0l, 110 kW, Euro 6d-Temp	Direkteinspritzung	EGR, LNT sowie SCR im Unterboden mit DPF	6-Gang, manuell

Fahrzeug ID	Fahrzeug	Gemischaufbereitung	Technologien zur Senkung der Schadstoffemissionen	Getriebe
TNO_1	Diesel-Pkw, C-Segment, 1.5l, 81 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie LNT und DPF im Unterboden	6-Gang, manuell
TNO_2	Diesel-Pkw, D-Segment, 2.1l, 125 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	EGR sowie DOC, SCR und DPF im Unterboden	6-Gang, manuell

Tabelle 10-2: Herangezogene Ottofahrzeugdaten für die Untersuchung der Methoden

Fahrzeug ID	Fahrzeug	Gemischaufbereitung	Technologien zur Senkung der Schadstoffemissionen	Getriebe
193	Otto-Pkw, C-Segment, 1.4l, 103 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC	6-Gang, manuell
216	Otto-Pkw, C-Segment, 1.2l, 81 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC	7-Gang, Automatik
246	Otto-Pkw, C-Segment, 1.5l, 100 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC	6-Gang, manuell
255	Otto-Pkw, M-Segment, 1.4l, 88 kW, Euro 6b	Saugrohreinspritzung	TWC	5-Gang, manuell
265	Otto-Pkw, J-Segment, 2.0l, 135 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC und GPF	8-Gang, Automatik
274	Otto-Pkw, D-Segment, 1.5l, 118 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC	6-Gang, manuell
279	Otto-Pkw, C-Segment, 2.0l, 185 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC und GPF	8-Gang, Automatik
280	Otto-Pkw, D-Segment, 2.0l, 135 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC und GPF	8-Gang, Automatik
282	Otto-Pkw, J-Segment, 1.5l, 103 kW, Euro 6b	Direkteinspritzung	TWC und GPF	6-Gang, Automatik

11 Anhang B

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die wichtigsten Fahrzeugdaten, welche für die HBEFA-Aktualisierung der Pkw verwendet wurden. Zusätzlich ist auch das Labor angeführt, welches den jeweiligen Pkw vermessen hat. Ein Eintrag mit "-" bedeutet, dass keine Daten verfügbar waren. Weitere Informationen zu den Pkw (z. B. Leerlaufdrehzahl oder Fahrzeugleermasse) können der ERMES-Datenbank entnommen werden.

Tabelle 11-1: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6a,b Diesel-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
100051	ADAC	BMW	118d Urban Line Steptronic	1995	110	4000	3459
100052	ADAC	BMW	320d Gran Turismo Sport Line Steptronic	1995	140	4000	5042
110371	EMPA	VW	Golf VII 1.6 TDI	1598	81	3200	15076
110372	EMPA	Mazda	CX-5 D LP 4WD	2191	110	4500	16351
110373	EMPA	BMW	530d Xdrive Touring F11	2993	190	4000	17663
110374	EMPA	Mercedes	GLK220 BlueTec	2143	125	3200	28402
110375	EMPA	VW	Passat 2.0 Bl. TDI	1968	103	4200	18241
110376	EMPA	Renault	Scenic 1.6 dCi130	1598	96	4000	39141
110476	EMPA	Mini	Cooper D	1496	85	4000	7132
110477	EMPA	Mercedes	A220 CDI	2143	125	3400	6517
110478	EMPA	BMW	X3 xDrive 20D	1995	140	4000	11545
110479	EMPA	Mercedes-Benz	ML 350 Bluetec	2987	190	3600	22392
110480	EMPA	Porsche	Macan S Diesel	2967	190	4000	3658
110481	EMPA	Peugeot	308 SW Blue HDI	1997	110	3750	15398
110482	EMPA	Opel	Astra K 16DTH ST	1598	100	3500	15706
110483	EMPA	Ford	S-MAX 2.0 TDCi	1997	110	3750	13435
110484	EMPA	Renault	Megane	1461	81	4000	5288
200123	TU Graz	Peugeot	508 SW	1560	88	3500	12000
200124	TU Graz	VW	Sharan	1968	110	3500	1200
200125	TU Graz	Audi	A4 Avant	1968	90	3500	170
200126	TU Graz	VW	Golf VII	1598	66	2750	5626
200127	TU Graz	Skoda	Superb	1968	140	4000	17000
200131	TU Graz	Kia	Carens	1685	104	4000	200
200132	TU Graz	Mazda	CX-5	2191	110	4500	6000

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
200133	TU Graz	BMW	530d	2993	180	4000	2700
200134	TU Graz	BMW	X5	2993	180	4000	400
200135	TU Graz	Audi	A4 Allroad	2967	180	4000	15000
200136	TU Graz	BMW	320d Touring Efficient Dynamics	1995	120	4000	15000
200137	TU Graz	Audi	Q7	2967	160	4000	30000
320001	DUH	Ford	Mondeo 2.0 Duratorq TDCi	1997	110	3999	17050
320002	DUH	Nissan	Qashqai 1.6 dCi	1598	96	3999	19511
320003	DUH	Renault	Scenic 1.6 dCi	1598	96	3999	2255
320004	DUH	Ford	Kuga 2.0 TDCi 2x4	1997	88	3999	4808
320006	DUH	Ford	Focus 1.5 TDCi	1499	88	3999	30590
320007	DUH	Jeep	Renegade 1.6 Multijet	1598	88	3999	3878
320012	DUH	Fiat	500X 1.6	1598	88	3999	2627
320013	DUH	Volvo	XC60 2.0D	1969	140	3999	3367
320014	DUH	Toyota	Auris 1.4 D	1364	66	3999	9000
320015	DUH	Opel	Zafira 1.6 CDTi	1598	100	3999	6000
320017	DUH	BMW	320d GT xDrive	1995	135	3999	20100
320018	DUH	Hyundai	i30 1.6 CRDi	1582	81	3999	16780
320019	DUH	Hyundai	Tucson 2.0 CRDi	1995	100	3999	7461
320022	DUH	VW	Golf VII 1.6 TDI Variant	1598	81	3999	-
320030	DUH	Audi	A4 2.0 TDI Avant	1968	110	3999	2467
320031	DUH	VW	Passat 2.0 TDI Variant	1968	110	3999	3553
320035	DUH	Audi	Q3 2.0 TDI quattro	1968	110	3999	1569
320036	DUH	Mercedes	E 220 d Limousine	1950	143	3999	10614
320041	DUH	Renault	Captur 1.5 dCi 110	1461	81	3999	17723
320043	DUH	Mercedes	B180 d	1461	80	3999	5046
320051	DUH	BMW	520d Touring	1995	140	3999	42298
320057	DUH	Fiat	500X 1.6	1598	88	3999	6684
350027	KBA	BMW	218d	1995	110	3999	-
350029	KBA	BMW	318d	1995	110	3999	-
350032	KBA	Fiat	500X	1956	103	3999	-
350034	KBA	Ford	Mondeo	1997	110	3999	-
350035	KBA	Hyundai	i30	1582	81	3999	-
350037	KBA	Mercedes	C220d	2143	125	3999	-

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
350038	KBA	Mercedes	E350d	2987	190	3999	-
350040	KBA	Mercedes	GLC220	2143	125	3999	-
350041	KBA	Mercedes	Vito Tourer 109	1598	65	3999	-
350043	KBA	Opel	Corsa	1248	70	3750	-
350044	KBA	Opel	Insignia	1598	103	3500	-
350048	KBA	VW	Touareg	2967	193	3999	-
410558	TueVN	Nissan	QashQai	1461	81	3999	4068
410559	TueVN	Nissan	QashQai	1461	81	3999	5146
410560	TueVN	Nissan	QashQai	1461	81	3999	5401
410567	TueVN	BMW	X1	1995	140	3999	11222
410568	TueVN	BMW	X1	1995	140	3999	4914
410569	TueVN	BMW	X1	1995	140	3999	8198
410575	TueVN	Ford	Mondeo	1499	88	3999	12018
410598	TueVN	Audi	A4	1968	140	3999	24959
410599	TueVN	Audi	A4	1968	140	3999	23843
410600	TueVN	Audi	A4	1968	140	3999	30651
410601	TueVN	Volvo	V70	1969	133	3999	49880
410602	TueVN	Volvo	V70	1969	133	3999	57111
410603	TueVN	Volvo	V70	1969	133	3999	76993
410611	TueVN	Kia	Ceed	1582	100	3999	13628
410612	TueVN	Kia	Ceed	1582	100	3999	14859
410614	TueVN	VW	Passat	1968	140	3999	52554
410615	TueVN	VW	Passat	1968	140	3999	35785
410616	TueVN	VW	Passat	1968	140	3999	8239
410624	TueVN	Nissan	QashQai	1197	85	3999	-
410625	TueVN	Nissan	QashQai	1197	85	3999	-
410626	TueVN	Nissan	QashQai	1197	85	3999	-
410627	TueVN	Volvo	V40	1969	88	3999	-
410628	TueVN	Volvo	V40	1969	88	3999	-
410629	TueVN	Volvo	V40	1969	88	3999	-
440018	JRC/Vela2	BMW	530d	2993	195	4000	4810
440019	JRC/Vela2	Citroen	C4 Cactus	1560	73	3750	4792
440024	JRC/Vela2	Peugeot	Partner	1560	73	3750	79
440028	JRC/Vela2	Audi	A3	1968	110	3999	24473
171765	TNO	Ford	Focus	1499	70	3600	6500

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
171777	TNO	Mercedes	C220	2143	125	3000	17100

Tabelle 11-2: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6d-Temp Diesel-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
200144	TU Graz	Honda	Civic	1597	88	4000	800
200146	TU Graz	Kia	Ceed	1461	100	4000	750
200143	TU Graz	Peugeot	308	1499	96	3750	400
200141	TU Graz	BMW	X1 sDrive 16d	1496	85	4000	400
200148	TU Graz	BMW	218d	1995	110	4000	2500
200149	TU Graz	Skoda	Karoq	1598	85	3250	3000

Tabelle 11-3: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6a,b Otto-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
110462	EMPA	Audi	A3 1.4 TFSI	1395	92	5000	22252
110470	EMPA	VW	Golf VII R	1984	221	5500	31646
110471	EMPA	BMW	428i	1997	180	5000	24400
110472	EMPA	Alfa-Romeo	Giulietta 1.4 TB	1368	125	5500	20978
110473	EMPA	Fiat	500	875	77	5500	18693
110474	EMPA	Skoda	Octavia C 1.8 4x4	1798	132	5100	13742
110475	EMPA	Suzuki	SX4-Cross	1586	92	5000	16320
200092	TU Graz	Mini	Cooper F56 B38	1499	100	4400	20000
410561	TueVN	Opel	Astra	1399	92	4999	13310
410562	TueVN	Opel	Astra	1399	92	4999	16473
410563	TueVN	Opel	Astra	1399	92	4999	16332
410572	TueVN	Citroen	C3	1199	60	4999	5403

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
410585	TueVN	Peugot	308	1199	96	4999	13309
410586	TueVN	Peugot	308	1199	96	4999	11735
410589	TueVN	Ford	Fiesta	998	74	4999	24548
410590	TueVN	Ford	Fiesta	998	74	4999	30119
410593	TueVN	Renault	Clio	898	66	4999	7224
410594	TueVN	Renault	Clio	898	66	4999	13698
410595	TueVN	Renault	Clio	898	66	4999	20060
410606	TueVN	Suzuki	Swift	1242	69	4999	16450
410607	TueVN	Suzuki	Swift	1242	69	4999	9711
410608	TueVN	Suzuki	Swift	1242	69	4999	29389
410609	TueVN	Suzuki	Swift	1242	69	4999	9550
410619	TueVN	Toyota	Avensis	1798	108	4999	29047
410620	TueVN	Toyota	Avensis	1798	108	4999	-
410621	TueVN	Toyota	Avensis	1798	108	4999	-
440021	JRC/Vela2	Fiat	Panda	1242	51	5500	2336
440023	JRC/Vela2	Opel	Astra	999	77	5500	2074
480002	DEKRA	Opel	Astra	1364	103	4999	22149
480003	DEKRA	Mercedes	C-Klasse	1991	135	4999	26531
480004	DEKRA	Opel	Corsa	1364	74	4999	10757
480005	DEKRA	Seat	Ibizia	1197	66	4999	17569
480006	DEKRA	Mini	Cooper	1198	75	4999	5163
480007	DEKRA	Audi	A1	999	70	4999	2266
480008	DEKRA	Audi	A3 Limousine	1395	110	4999	13403
480009	DEKRA	Opel	Corsa-E	1398	66	4999	10731
480010	DEKRA	Mercedes	B 180	1595	90	4999	14483
480011	DEKRA	Nissan	Qashqai	1618	120	4999	18632
480012	DEKRA	Hyundai	i20	998	74	4999	12624
480013	DEKRA	VW	Up	999	55	4999	7052
480014	DEKRA	Toyota	Auris	1197	85	4999	8361
480015	DEKRA	smart	fortwo coupe	898	66	4999	2289
480016	DEKRA	VW	Golf	1498	110	4999	19499

Tabelle 11-4: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6c Otto-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
110488	EMPA	Ford	C-Max 1.0 SCTi	1000	92	6000	12728
110489	EMPA	Peugeot	308 1.2iSTT	1000	96	6000	9120
110487	EMPA	VW	Golf Variant	1500	110	5000	15641

Tabelle 11-5: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 6d-Temp Otto-Pkw für die PHEM-Kennfelderstellung h

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank ¹⁴	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
200142	TU Graz	Peugeot	208	1199	61	5750	400
200145	TU Graz	Ford	Focus	998	92	6000	800

Tabelle 11-6: Herangezogene Fahrzeugdaten der Euro 5 VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Motor für die PHEM-Kennfelderstellung

Fahrzeug ID in ERMES-Datenbank	Labor	Hersteller	Modell	Hubraum in cm ³	Nennleistung in kW	Nenn-drehzahl in 1/min	Kilometerstand am Beginn in km
200138	TU Graz	VW	Golf	1598	66	4200	70000
200139	TU Graz	VW	Passat	1598	77	4400	147500
200140	TU Graz	VW	Passat	1968	103	4200	120000
320103	DUH	VW	Sharan	1968	130	3999	47806
- ¹⁵	DUH	VW	Tiguan	1968	103	4200	142180
320085	DUH	VW	Caddy	1968	103	4400	64438
360001	TU Dresden	Audi	A3	1968	103	4200	183881
360002	TU Dresden	Skoda	Octavia	1598	77	4400	152637

¹⁴ Zusätzliche wurden Messdaten von zwei weiteren Otto-Pkw berücksichtigt. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind diese Fahrzeugdaten hier nicht angeführt.

¹⁵ Der Import der Messdaten in die ERMES-Datenbank ist in Arbeit. Daher ist noch keine ID vorhanden.

12 Anhang C

Nachfolgende Tabelle zeigt die Modellfamilien jener VW-Konzernfahrzeuge, die vom EA 189-Softwareupdate betroffen waren. Die Daten wurden vom KBA in Vorträgen zum Nationalen Forum Diesel im März 2017 veröffentlicht.

Tabelle 12-1: Modellfamilien der VW-Konzernfahrzeuge mit EA 189-Softwareupdate (Stand: März 2017)

Familie ID	Marke	Repräsentatives Fahrzeug	Bestand in Deutschland	Hubraum in cm ³	Motorleistung in kW	Einbaulage	Generation (EGR-Ventil)	Getriebe
1	Audi, Seat, VW	Audi A4 2.0l 105 kW	116720	1968	88 - 105	längs	Gen1	manuell
2	Audi, Seat	Audi A6 2.0l 100 kW	70216	1968	88 - 110	längs	Gen2	Automatik
3	Audi, Seat, VW	Audi A6 2.0l 125 kW	102158	1968	120 - 130	längs	Gen2	manuell
4	Audi	Audi A6 2.0l 125 kW	63843	1968	120 - 130	längs	Gen1	Automatik
5	Audi, Seat, VW, Skoda	VW Golf 2.0l 103 kW	311718	1968	81 - 105	quer	Gen2	manuell
6	Audi, VW, Skoda	VW Tiguan 2.0l 103 kW	260126	1968	62 - 103	quer	Gen2	Automatik
7	Audi, Seat, VW, Skoda	VW Passat 2.0l 125 kW	228249	1968	120 - 130	quer	Gen2	manuell
8	Audi, Seat, VW	VW Sharan 2.0l 130 kW	133980	1968	85 - 130	quer, SCR	Gen2	manuell/ Automatik
9	Audi, Seat, VW, Skoda	VW Golf 1.6l 77 kW	533976	1598	55 - 77	quer	-	manuell
10	Audi, Seat, VW	VW Caddy 1.6l 75 kW	72420	1598	55 - 77	quer	-	Automatik

Familie ID	Marke	Repräsentatives Fahrzeug	Bestand in Deutschland	Hubraum in cm ³	Motorleistung in kW	Einbaulage	Generation (EGR-Ventil)	Getriebe
11	Seat, VW, Skoda	VW Polo 1.2l 55 kW	24818	1199	55	quer	-	manuell
12	VW	VW Amarok 2.0l 120 kW	8255	1968	90 - 120	längs	Gen1	manuell
13	VW, Skoda	VW Passat 2.0l 103 kW	303999	1968	81 - 103	quer	Gen2	manuell
14	Audi, Seat	Audi A4 2.0l 105 kW	63320	1968	88 - 110	längs	Gen2	manuell

13 Anhang D

Tabelle 13-1 und Tabelle 13-2 zeigen die Laufleistungskorrekturfaktoren für NO_x, CO und HC von Otto-Pkw.

Tabelle 13-1: Laufleistungskorrekturfaktoren für NO_x und CO von Otto-Pkw

Abgasnorm	NO _x -Alterung nach kumulierter Laufleistung					CO-Alterung nach kumulierter Laufleistung				
	0 km	50 Tkm	100 Tkm	200 Tkm	300 Tkm	0 km	50 Tkm	100 Tkm	200 Tkm	300 Tkm
ECE-15'04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 1	1,00	1,00	1,50	2,50	3,50	1,00	1,00	1,30	1,90	2,50
Euro 2	1,00	1,00	1,30	2,30	3,17	1,00	1,00	1,20	1,60	2,00
Euro 3	1,00	1,00	1,63	2,90	4,17	1,00	1,00	1,10	1,75	2,25
Euro 4	1,00	1,00	1,50	2,00	2,50	1,00	1,00	1,25	1,90	2,25
Euro 5	1,00	1,00	1,00	2,50	3,50	1,00	1,00	1,30	2,00	2,67
Euro 6a,b	1,00	1,00	1,00	1,30	1,50	1,00	1,00	1,15	1,30	1,50
Euro 6c	1,00	1,00	1,00	1,30	1,50	1,00	1,00	1,15	1,30	1,50
Euro 6d-Temp	1,00	1,00	1,00	1,30	1,50	1,00	1,00	1,15	1,30	1,50
Euro 6d	1,00	1,00	1,00	1,30	1,50	1,00	1,00	1,15	1,30	1,50
Post-Euro 6	1,00	1,00	1,00	1,20	1,33	1,00	1,00	1,10	1,20	1,33

Tabelle 13-2: Laufleistungskorrekturfaktoren für HC von Otto-Pkw

Abgasnorm	HC-Alterung nach kumulierter Laufleistung				
	0 km	50 Tkm	120 Tkm	160 Tkm	200 Tkm
ECE-15'04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 1	0,57	1,00	1,59	1,59	1,59
Euro 2	0,57	1,00	1,59	1,59	1,59
Euro 3	0,99	1,00	1,02	1,03	1,03
Euro 4	0,99	1,00	1,02	1,03	1,00
Euro 5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 6a,b	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Abgasnorm	HC-Alterung nach kumulierter Laufleistung				
	0 km	50 Tkm	120 Tkm	160 Tkm	200 Tkm
Euro 6c	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 6d-Temp	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Euro 6d	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Post-Euro 6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

14 Anhang E

Die folgenden Tabellen enthalten die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Verkehrssituationen für Deutschland innerorts sowie gesamt, die im Rahmen dieser Arbeit für die Gewichtung der Emissionsfaktoren verwendet wurden. Gewichtungsfaktoren wurden vom ifeu zur Verfügung gestellt und können auch der HBEFA-Software entnommen werden.

Tabelle 14-1: Verwendete Gewichtungsfaktoren für die Verkehrssituationen Deutschland innerorts

Verkehrssituation ID	PHEM-Zyklus	Verkehrssituation	Steigung	Gewichtung
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	0 %	1,030 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	+/-2 %	0,490 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	+/-4 %	0,090 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	+/-6 %	0,030 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	0 %	20,604 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	+/-2 %	9,949 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	+/-4 %	1,892 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	+/-6 %	0,605 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	0 %	8,402 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	+/-2 %	4,069 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	+/-4 %	0,778 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	+/-6 %	0,251 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	0 %	1,558 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	+/-2 %	0,747 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	+/-4 %	0,146 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	+/-6 %	0,049 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	0 %	1,558 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	+/-2 %	0,747 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	+/-4 %	0,146 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	+/-6 %	0,049 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	0 %	4,110 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	+/-2 %	1,990 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	+/-4 %	0,380 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	+/-6 %	0,120 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	0 %	3,030 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	+/-2 %	1,470 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	+/-4 %	0,280 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	+/-6 %	0,090 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	0 %	2,060 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	+/-2 %	1,010 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	+/-4 %	0,200 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	+/-6 %	0,070 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	0 %	5,690 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	+/-2 %	2,930 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	+/-4 %	0,600 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	+/-6 %	0,230 %

Verkehrssituation ID	PHEM-Zyklus	Verkehrssituation	Steigung	Gewichtung
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	0 %	5,690 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	+/-2 %	2,930 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	+/-4 %	0,600 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	+/-6 %	0,230 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	0 %	6,188 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	+/-2 %	3,028 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	+/-4 %	0,586 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	+/-6 %	0,196 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	0 %	1,918 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	+/-2 %	0,939 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	+/-4 %	0,182 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	+/-6 %	0,061 %

Tabelle 14-2: Verwendete Gewichtungsfaktoren für die Verkehrssituationen Deutschland gesamt

Verkehrssituation ID	PHEM-Zyklus	Verkehrssituation	Steigung	Gewichtung
110081	9853	RUR/MW/80/Freeflow	0 %	0,347 %
110081	9853	RUR/MW/80/Freeflow	+/-2 %	0,242 %
110081	9853	RUR/MW/80/Freeflow	+/-4 %	0,032 %
110081	9853	RUR/MW/80/Freeflow	+/-6 %	0,002 %
110082	9827	RUR/MW/80/Heavy	0 %	0,232 %
110082	9827	RUR/MW/80/Heavy	+/-2 %	0,162 %
110082	9827	RUR/MW/80/Heavy	+/-4 %	0,021 %
110082	9827	RUR/MW/80/Heavy	+/-6 %	0,001 %
110083	9214	RUR/MW/80/Satur.	0 %	0,104 %
110083	9214	RUR/MW/80/Satur.	+/-2 %	0,076 %
110083	9214	RUR/MW/80/Satur.	+/-4 %	0,011 %
110083	9214	RUR/MW/80/Satur.	+/-6 %	0,000 %
110101	9888	RUR/MW/100/Freeflow	0 %	1,384 %
110101	9888	RUR/MW/100/Freeflow	+/-2 %	0,657 %
110101	9888	RUR/MW/100/Freeflow	+/-4 %	0,130 %
110101	9888	RUR/MW/100/Freeflow	+/-6 %	0,039 %
110102	9872	RUR/MW/100/Heavy	0 %	0,923 %
110102	9872	RUR/MW/100/Heavy	+/-2 %	0,438 %
110102	9872	RUR/MW/100/Heavy	+/-4 %	0,087 %
110102	9872	RUR/MW/100/Heavy	+/-6 %	0,026 %
110103	9230	RUR/MW/100/Satur.	0 %	0,508 %
110103	9230	RUR/MW/100/Satur.	+/-2 %	0,251 %
110103	9230	RUR/MW/100/Satur.	+/-4 %	0,051 %
110103	9230	RUR/MW/100/Satur.	+/-6 %	0,014 %
110104	9105	RUR/MW/100/St+Go	0 %	0,188 %
110104	9105	RUR/MW/100/St+Go	+/-2 %	0,100 %
110104	9105	RUR/MW/100/St+Go	+/-4 %	0,021 %
110104	9105	RUR/MW/100/St+Go	+/-6 %	0,006 %

Verkehrssituation ID	PHEM-Zyklus	Verkehrssituation	Steigung	Gewichtung
110105	9026	RUR/MW/100/St+Go2	0 %	0,094 %
110105	9026	RUR/MW/100/St+Go2	+/-2 %	0,050 %
110105	9026	RUR/MW/100/St+Go2	+/-4 %	0,010 %
110105	9026	RUR/MW/100/St+Go2	+/-6 %	0,003 %
110121	9905	RUR/MW/120/Freeflow	0 %	1,001 %
110121	9905	RUR/MW/120/Freeflow	+/-2 %	0,612 %
110121	9905	RUR/MW/120/Freeflow	+/-4 %	0,093 %
110121	9905	RUR/MW/120/Freeflow	+/-6 %	0,083 %
110122	9253	RUR/MW/120/Heavy	0 %	0,668 %
110122	9253	RUR/MW/120/Heavy	+/-2 %	0,408 %
110122	9253	RUR/MW/120/Heavy	+/-4 %	0,062 %
110122	9253	RUR/MW/120/Heavy	+/-6 %	0,055 %
110123	9239	RUR/MW/120/Satur.	0 %	0,212 %
110123	9239	RUR/MW/120/Satur.	+/-2 %	0,127 %
110123	9239	RUR/MW/120/Satur.	+/-4 %	0,020 %
110123	9239	RUR/MW/120/Satur.	+/-6 %	0,017 %
110131	9911	RUR/MW/130/Freeflow	0 %	0,642 %
110131	9911	RUR/MW/130/Freeflow	+/-2 %	0,307 %
110131	9911	RUR/MW/130/Freeflow	+/-4 %	0,070 %
110131	9911	RUR/MW/130/Freeflow	+/-6 %	0,011 %
110132	9254	RUR/MW/130/Heavy	0 %	0,428 %
110132	9254	RUR/MW/130/Heavy	+/-2 %	0,205 %
110132	9254	RUR/MW/130/Heavy	+/-4 %	0,047 %
110132	9254	RUR/MW/130/Heavy	+/-6 %	0,007 %
110133	9243	RUR/MW/130/Satur.	0 %	0,094 %
110133	9243	RUR/MW/130/Satur.	+/-2 %	0,044 %
110133	9243	RUR/MW/130/Satur.	+/-4 %	0,010 %
110133	9243	RUR/MW/130/Satur.	+/-6 %	0,002 %
110141	9256	RUR/MW/>130/Freeflow	0 %	5,778 %
110141	9256	RUR/MW/>130/Freeflow	+/-2 %	2,766 %
110141	9256	RUR/MW/>130/Freeflow	+/-4 %	0,630 %
110141	9256	RUR/MW/>130/Freeflow	+/-6 %	0,099 %
110142	9255	RUR/MW/>130/Heavy	0 %	3,852 %
110142	9255	RUR/MW/>130/Heavy	+/-2 %	1,844 %
110142	9255	RUR/MW/>130/Heavy	+/-4 %	0,420 %
110142	9255	RUR/MW/>130/Heavy	+/-6 %	0,066 %
110143	9246	RUR/MW/>130/Satur.	0 %	0,844 %
110143	9246	RUR/MW/>130/Satur.	+/-2 %	0,399 %
110143	9246	RUR/MW/>130/Satur.	+/-4 %	0,089 %
110143	9246	RUR/MW/>130/Satur.	+/-6 %	0,015 %
120082	9799	RUR/Trunk/80/Heavy	0 %	0,136 %
120082	9799	RUR/Trunk/80/Heavy	+/-2 %	0,138 %
120082	9799	RUR/Trunk/80/Heavy	+/-4 %	0,095 %
120082	9799	RUR/Trunk/80/Heavy	+/-6 %	0,071 %
120101	9249	RUR/Trunk/100/Freeflow	0 %	8,397 %

Verkehrssituation ID	PHEM-Zyklus	Verkehrssituation	Steigung	Gewichtung
120101	9249	RUR/Trunk/100/Freeflow	+/-2 %	3,880 %
120101	9249	RUR/Trunk/100/Freeflow	+/-4 %	0,819 %
120101	9249	RUR/Trunk/100/Freeflow	+/-6 %	0,231 %
120102	9854	RUR/Trunk/100/Heavy	0 %	0,379 %
120102	9854	RUR/Trunk/100/Heavy	+/-2 %	0,346 %
120102	9854	RUR/Trunk/100/Heavy	+/-4 %	0,203 %
120102	9854	RUR/Trunk/100/Heavy	+/-6 %	0,095 %
120111	9252	RUR/Trunk/110/Freeflow	0 %	1,072 %
120111	9252	RUR/Trunk/110/Freeflow	+/-2 %	0,446 %
120111	9252	RUR/Trunk/110/Freeflow	+/-4 %	0,080 %
120111	9252	RUR/Trunk/110/Freeflow	+/-6 %	0,020 %
130081	9831	RUR/Distr/80/Freeflow	0 %	5,009 %
130081	9831	RUR/Distr/80/Freeflow	+/-2 %	2,545 %
130081	9831	RUR/Distr/80/Freeflow	+/-4 %	0,515 %
130081	9831	RUR/Distr/80/Freeflow	+/-6 %	0,105 %
130082	9775	RUR/Distr/80/Heavy	0 %	0,279 %
130082	9775	RUR/Distr/80/Heavy	+/-2 %	0,294 %
130082	9775	RUR/Distr/80/Heavy	+/-4 %	0,170 %
130082	9775	RUR/Distr/80/Heavy	+/-6 %	0,088 %
131082	9228	RUR/Distr-sin./80/Heavy	0 %	0,096 %
131082	9228	RUR/Distr-sin./80/Heavy	+/-2 %	0,117 %
131082	9228	RUR/Distr-sin./80/Heavy	+/-4 %	0,053 %
131082	9228	RUR/Distr-sin./80/Heavy	+/-6 %	0,063 %
140081	9816	RUR/Local/80/Freeflow	0 %	9,880 %
140081	9816	RUR/Local/80/Freeflow	+/-2 %	4,945 %
140081	9816	RUR/Local/80/Freeflow	+/-4 %	1,029 %
140081	9816	RUR/Local/80/Freeflow	+/-6 %	0,128 %
140082	9756	RUR/Local/80/Heavy	0 %	0,879 %
140082	9756	RUR/Local/80/Heavy	+/-2 %	0,872 %
140082	9756	RUR/Local/80/Heavy	+/-4 %	0,441 %
140082	9756	RUR/Local/80/Heavy	+/-6 %	0,295 %
141082	9223	RUR/Local-sin./80/Heavy	0 %	0,361 %
141082	9223	RUR/Local-sin./80/Heavy	+/-2 %	0,322 %
141082	9223	RUR/Local-sin./80/Heavy	+/-4 %	0,140 %
141082	9223	RUR/Local-sin./80/Heavy	+/-6 %	0,233 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	0 %	0,273 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	+/-2 %	0,130 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	+/-4 %	0,024 %
230051	9703	URB/Distr/50/Freeflow	+/-6 %	0,008 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	0 %	5,459 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	+/-2 %	2,636 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	+/-4 %	0,501 %
230052	9183	URB/Distr/50/Heavy	+/-6 %	0,160 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	0 %	2,226 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	+/-2 %	1,078 %

Verkehrssituation ID	PHEM-Zyklus	Verkehrssituation	Steigung	Gewichtung
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	+/-4 %	0,206 %
230053	9152	URB/Distr/50/Satur.	+/-6 %	0,066 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	0 %	0,413 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	+/-2 %	0,198 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	+/-4 %	0,039 %
230054	9047	URB/Distr/50/St+Go	+/-6 %	0,013 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	0 %	0,413 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	+/-2 %	0,198 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	+/-4 %	0,039 %
230055	9077	URB/Distr/50/St+Go2	+/-6 %	0,013 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	0 %	1,089 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	+/-2 %	0,527 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	+/-4 %	0,101 %
230071	9779	URB/Distr/70/Freeflow	+/-6 %	0,032 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	0 %	0,803 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	+/-2 %	0,389 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	+/-4 %	0,074 %
230072	9729	URB/Distr/70/Heavy	+/-6 %	0,024 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	0 %	0,546 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	+/-2 %	0,268 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	+/-4 %	0,053 %
230073	9176	URB/Distr/70/Satur.	+/-6 %	0,019 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	0 %	1,508 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	+/-2 %	0,776 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	+/-4 %	0,159 %
240052	9178	URB/Local/50/Heavy	+/-6 %	0,061 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	0 %	1,508 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	+/-2 %	0,776 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	+/-4 %	0,159 %
240053	9149	URB/Local/50/Satur.	+/-6 %	0,061 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	0 %	1,640 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	+/-2 %	0,802 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	+/-4 %	0,155 %
250032	9151	URB/Access/30/Heavy	+/-6 %	0,052 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	0 %	0,508 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	+/-2 %	0,249 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	+/-4 %	0,048 %
250033	9138	URB/Access/30/Satur.	+/-6 %	0,016 %

15 Anhang F

Nachfolgend sind tabellarisch die HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren von Diesel- und Otto-Pkw für den deutschen Mix an Verkehrssituationen bei 20 °C Umgebungstemperatur und 50 Tkm Laufleistung sowie bei 12 °C Umgebungstemperatur und 100 Tkm Laufleistung angeführt.

Tabelle 15-1: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
1986-1988	200,2	0,72	0,78	0,15	0,11	8,08E+13
Euro 1	202,6	0,542	0,807	0,100	0,131	7,76E+13
Euro 2	210,3	0,258	0,909	0,060	0,101	7,24E+13
Euro 3	198,5	0,144	0,916	0,035	0,046	7,00E+13
Euro 4	211,4	0,071	0,776	0,016	0,026	3,13E+13
Euro 5	193,7	0,068	0,834	0,012	0,003	1,38E+12
Euro 5 nach Softwareupdate	201,1	0,033	0,545	0,015	0,003	1,41E+12
Euro 6a,b	197,9	0,114	0,439	0,023	0,001	1,36E+11
Euro 6c	205,4	0,053	0,178	0,016	0,001	8,55E+10
Euro 6d-Temp	206,0	0,022	0,048	0,013	0,001	6,01E+10
Euro 6d	199,5	0,020	0,041	0,011	0,001	5,35E+10
Post-Euro 6	186,9	0,225	0,014	0,010	0,001	4,76E+10

Tabelle 15-2: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
1986-1988	198,5	0,527	0,735	0,095	0,113	6,24E+13
Euro 1	196,5	0,363	0,787	0,061	0,120	5,93E+13
Euro 2	194,6	0,137	0,875	0,034	0,081	5,47E+13
Euro 3	180,0	0,059	0,981	0,022	0,042	5,30E+13
Euro 4	186,1	0,034	0,748	0,010	0,021	2,68E+13
Euro 5	172,4	0,030	0,794	0,007	0,002	1,02E+12
Euro 5 nach Softwareupdate	179,0	0,011	0,562	0,008	0,002	1,15E+12

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
Euro 6a,b	173,6	0,078	0,453	0,018	0,001	1,33E+11
Euro 6c	179,7	0,036	0,181	0,014	0,001	7,68E+10
Euro 6d-Temp	179,8	0,015	0,046	0,011	0,001	4,88E+10
Euro 6d	174,1	0,014	0,040	0,010	0,001	4,36E+10
Post-Euro 6	163,1	0,100	0,017	0,004	0,001	3,88E+10

Tabelle 15-3 HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
ECE-15'04	216,2	17,601	1,656	2,400	0,004	8,74E+11
Euro 1	212,1	1,254	0,352	0,172	0,003	8,35E+11
Euro 2	222,1	0,705	0,251	0,058	0,005	8,56E+11
Euro 3	215,5	0,669	0,078	0,018	0,002	8,43E+11
Euro 4	210,8	0,480	0,072	0,007	0,001	8,72E+11
Euro 5	189,7	0,593	0,033	0,009	0,002	1,13E+12
Euro 6a,b	191,7	0,346	0,054	0,006	0,001	1,17E+12
Euro 6c	191,4	0,289	0,020	0,002	0,001	4,64E+11
Euro 6d-Temp	187,6	0,409	0,022	0,004	0,001	7,13E+11
Euro 6d	181,7	0,381	0,019	0,004	0,001	4,85E+11
Post-Euro 6	163,6	0,260	0,013	0,002	0,000	1,65E+11

Tabelle 15-4: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 20 °C und 50 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
ECE-15'04	202,5	12,664	1,914	1,325	0,011	1,69E+12
Euro 1	193,7	1,712	0,376	0,133	0,007	1,44E+12
Euro 2	196,2	1,843	0,205	0,044	0,011	1,44E+12
Euro 3	189,0	1,717	0,063	0,024	0,004	1,38E+12

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
Euro 4	182,6	1,293	0,066	0,011	0,002	1,25E+12
Euro 5	167,4	1,264	0,022	0,012	0,002	1,25E+12
Euro 6a,b	164,0	0,654	0,038	0,007	0,001	8,57E+11
Euro 6c	163,2	0,423	0,015	0,002	0,000	3,05E+11
Euro 6d-Temp	160,7	0,400	0,031	0,005	0,001	8,17E+11
Euro 6d	158,2	0,315	0,030	0,005	0,001	6,25E+11
Post-Euro 6	146,4	0,215	0,019	0,003	0,000	2,12E+11

Tabelle 15-5: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
1986-1988	200,2	0,722	0,776	0,147	0,112	8,08E+13
Euro 1	202,6	0,542	0,807	0,100	0,131	7,76E+13
Euro 2	210,3	0,258	0,909	0,060	0,101	7,24E+13
Euro 3	198,5	0,144	1,090	0,035	0,046	7,00E+13
Euro 4	211,4	0,071	0,986	0,016	0,026	3,13E+13
Euro 5	193,7	0,068	1,052	0,012	0,003	1,38E+12
Euro 5 nach Softwareupdate	201,1	0,033	0,564	0,015	0,003	1,41E+12
Euro 6a,b	197,9	0,132	0,603	0,023	0,001	1,36E+11
Euro 6c	205,4	0,061	0,244	0,016	0,001	8,55E+10
Euro 6d-Temp	206,0	0,025	0,050	0,013	0,001	6,01E+10
Euro 6d	199,5	0,023	0,043	0,011	0,001	5,35E+10
Post-Euro 6	186,9	0,248	0,015	0,010	0,001	4,76E+10

Tabelle 15-6: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Diesel-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
1986-1988	198,5	0,527	0,735	0,095	0,113	6,24E+13
Euro 1	196,5	0,363	0,787	0,061	0,120	5,93E+13
Euro 2	194,6	0,137	0,875	0,034	0,081	5,47E+13
Euro 3	180,0	0,059	1,168	0,022	0,042	5,30E+13
Euro 4	186,1	0,034	0,949	0,010	0,021	2,68E+13
Euro 5	172,4	0,030	1,002	0,007	0,002	1,02E+12
Euro 5 nach Softwareupdate	179,0	0,011	0,582	0,008	0,002	1,15E+12
Euro 6a,b	173,6	0,089	0,621	0,018	0,001	1,33E+11
Euro 6c	179,7	0,041	0,248	0,014	0,001	7,68E+10
Euro 6d-Temp	179,8	0,018	0,048	0,011	0,001	4,88E+10
Euro 6d	174,1	0,016	0,042	0,010	0,001	4,36E+10
Post-Euro 6	163,1	0,110	0,018	0,004	0,001	3,88E+10

Tabelle 15-7 HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland innerorts bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
ECE-15'04	216,2	17,601	1,656	2,400	0,004	8,74E+11
Euro 1	212,1	1,630	0,528	0,245	0,003	8,35E+11
Euro 2	222,1	0,846	0,327	0,083	0,005	8,56E+11
Euro 3	215,5	0,736	0,127	0,018	0,002	8,43E+11
Euro 4	210,8	0,600	0,109	0,007	0,001	8,72E+11
Euro 5	189,7	0,771	0,033	0,009	0,002	1,13E+12
Euro 6a,b	191,7	0,398	0,054	0,006	0,001	1,17E+12
Euro 6c	191,4	0,332	0,020	0,002	0,001	4,64E+11
Euro 6d-Temp	187,6	0,470	0,022	0,004	0,001	7,13E+11
Euro 6d	181,7	0,438	0,019	0,004	0,001	4,85E+11

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
Post-Euro 6	163,6	0,286	0,013	0,002	0,000	1,65E+11

Tabelle 15-8: HBEFA 4.1-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw im Mix an Verkehrssituationen für Deutschland gesamt bei 12 °C und 100 Tkm Laufleistung

Abgasnorm	CO ₂ in g/km	CO in g/km	NO _x in g/km	HC in g/km	PM in g/km	PN in #/km
ECE-15'04	202,5	12,664	1,914	1,325	0,011	1,69E+12
Euro 1	193,7	2,226	0,565	0,189	0,007	1,44E+12
Euro 2	196,2	2,212	0,266	0,062	0,011	1,44E+12
Euro 3	189,0	1,889	0,103	0,024	0,004	1,38E+12
Euro 4	182,6	1,616	0,099	0,011	0,002	1,25E+12
Euro 5	167,4	1,644	0,022	0,012	0,002	1,25E+12
Euro 6a,b	164,0	0,752	0,038	0,007	0,001	8,57E+11
Euro 6c	163,2	0,486	0,015	0,002	0,000	3,05E+11
Euro 6d-Temp	160,7	0,460	0,031	0,005	0,001	8,17E+11
Euro 6d	158,2	0,362	0,030	0,005	0,001	6,25E+11
Post-Euro 6	146,4	0,236	0,019	0,003	0,000	2,12E+11