



Hannes Eberhart, BSc

Emissionsverhalten moderner Erdgas-PKW im realen Betrieb

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Vorstand

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

Betreuer

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

Zweitbetreuer

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

Graz, September 2018



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

Vorwort

Die Begeisterung zur Technik, vor allem zu dessen Anwendung im praktischen Bereich, war für mich bereits im jungen Alter sehr ausgeprägt. Bereits im Laufe meiner Schulzeit in der HTL entwickelte ich immer mehr Interesse in den einzelnen technischen Fächern. Schlussendlich fasste ich den Entschluss, nach Abschluss der HTL-Voitsberg in dieser Richtung weiterzumachen. Im Laufe des Studiums weckten vor allem die spannenden Vorlesungen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) mein Interesse. Nach der spannenden Bachelorarbeit im Fachbereich Konstruktion und Auslegung des Instituts, wollte ich auch meine Masterarbeit ebenfalls am IVT machen. Durch die Vorlesungen Schadstoffbildung, Emissionsminimierung und Umweltauswirkungen des Verkehrs, stieß ich im Forschungsbereich Emissionen auf das Thema Erdgasfahrzeuge und dem damit verbundenen Thema „Emissionsverhalten moderner Erdgas-Pkw im realen Betrieb.

In diesem Sinne möchte ich mich bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Hausberger recht herzlich für die ständige Unterstützung bedanken. Er hatte bei Fragen stets ein offenes Ohr.

Des Weiteren gilt ein großer Dank an meinen Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer der bei Fragen stets zur Verfügung stand. Die außerordentlich gute Betreuung und deine ständige Verfügbarkeit waren nicht selbstverständlich.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern im Bereich Emissionen, die auch bei Fragen sofort zu helfen versuchten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Hervorzuheben sind dabei vor allem meine Eltern und meine Schwester, die mir einerseits das Studium ermöglicht haben und andererseits immer für eine tatkräftige Unterstützung sorgten.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
LDUNGFORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	X
KURZFASSUNG	XI
ABSTRACT	XII
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1 ERDGAS ALLGEMEIN.....	3
2.1.1 <i>Physikalische Eigenschaften</i>	3
2.1.2 <i>Chemische Eigenschaften</i>	5
2.2 TRANSPORTKETTE ERDGAS	7
2.2.1 <i>Well-To-Tank</i>	8
2.2.2 <i>Tank-To-Wheel</i>	9
2.2.3 <i>Well-To-Wheel</i>	10
2.3 ERDGASFAHRZEUG	10
2.3.1 <i>Anforderungen und Tankstellennetz</i>	10
2.3.2 <i>Monovalenter und bivalenter Antrieb</i>	11
2.3.3 <i>Aufbau und Bestandteile eines CNG-Fahrzeugs</i>	11
2.3.4 <i>Vollständige und unvollständige Verbrennung</i>	13
2.3.5 <i>Schadstoffe</i>	14
2.3.6 <i>Abgasnachbehandlung</i>	16
2.3.7 <i>Abgasgesetzgebung</i>	21
3 MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN MIT ERGEBNISSEN	22
3.1 MESSPROGRAMM.....	22
3.2 VERMESSENE FAHRZYKLEN	22
3.2.1 <i>NEDC</i>	22
3.2.2 <i>WLTC</i>	23
3.2.3 <i>ERMES V7 und V8</i>	23
3.2.4 <i>IUFC</i>	24
3.1 HBFA-HANDBOOK EMISSION FACTORS FOR ROAD TRANSPORT	24
3.2 VERSUCHSFAHRZEUGE	25
3.2.1 <i>Opel Zafira</i>	26
3.2.2 <i>VW-Caddy</i>	27
3.2.3 <i>Fiat Doblo</i>	28
3.3 PKW-ROLLENPRÜFSTAND UND CVS-ANLAGE	29
3.3.1 <i>PKW-Rollenprüfstand</i>	29
3.3.2 <i>Prüfstandseinstellungen</i>	31
3.3.3 <i>CVS-Anlage mit Messeinrichtung</i>	31
3.4 AUSWERTUNG DER MESSDATEN.....	32
3.4.1 <i>Vergleich Messung NEDC mit Zulassungsdaten und Grenzwerten</i>	32
3.4.2 <i>Plausibilitätscheck der ERMES-Messdaten</i>	36
3.4.3 <i>Überprüfung der NEDC, IUFC und ERMES-Messdaten für Kaltstartzusatzemissionen</i>	40
3.4.4 <i>Zusammenfassung der Messdatenüberprüfung</i>	41
4 KALTSTARTZUSATZEMISSIONEN	42
4.1 KALTSTARTZUSATZEMISSIONEN IUFC BEI -7 °C.....	42
4.1.1 <i>Validierung der Kaltstartzusatzemissionen im IUFC</i>	45
4.2 KALTSTARTZUSATZEMISSIONEN NEDC BEI 25 °C	48
4.2.1 <i>Validierung der Kaltstartzusatzemissionen im NEDC</i>	50
5 SIMULATIVE UNTERSUCHUNG MIT ERGEBNISSEN	53

5.1	SIMULATIONSSOFTWARE PHEM	53
5.1.1	<i>Eingabedaten für das Simulationstool PHEM</i>	54
5.2	SIMULATION DER FAHRZEUGE MIT VALIDIERUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE.....	57
5.2.1	<i>Kalibrierung des generischen CO₂-Kennfelds</i>	57
5.2.2	<i>Erstellung der Emissionskennfelder</i>	59
5.2.3	<i>Validierung der Kennfelder</i>	61
5.3	ERSTELLUNG DER DURCHSCHNITTSKENNFELDER UND DURCHSCHNITTSFAHRZEUGE	63
5.3.1	<i>Durchschnittliche Emissionskennfelder</i>	65
5.3.2	<i>Durchschnittsfahrzeuge</i>	66
5.4	VALIDIERUNG DURCHSCHNITTSFAHRZEUG UND DURCHSCHNITTSKENNFELD	68
5.5	SIMULATION DER HBEFA-ZYKLEN	74
5.5.1	<i>Durchschnittsfahrzeuge HBEFA</i>	74
5.5.2	<i>Durchschnittskennfelder HBEFA</i>	75
5.5.3	<i>Volllastkurven HBEFA</i>	75
5.6	ERGEBNISSE BEI DER HBEFA-SIMULATION	75
5.6.1	<i>HBEFA-Simulationsergebnisse für EURO 5</i>	76
5.6.2	<i>HBEFA-Simulationsergebnisse für EURO 6</i>	84
5.6.3	<i>Fazit der HBEFA-Simulation</i>	88
6	SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK	89
7	LITERATURVERZEICHNIS	90
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	93
9	TABELLENVERZEICHNIS	98
10	ANHANG	99
10.1	TREIBHAUSGAS-KOEFFIZIENTEN AUS [9].....	99
10.2	FAHRZEUGDATEN VW-ECOUP UND AUDI A3 G-TRON	100
10.3	NEDC-KALTSTARTS ALLER FAHRZEUGE	102
10.4	KALTSTARTZUSATZEMISSIONEN	103
10.5	ERSTELLUNG DURCHSCHNITTSFAHRZEUGE.....	105
10.5.1	<i>Durchschnittsfahrzeug mit Gewichtungsvariante 1</i>	105
10.5.2	<i>Durchschnittsfahrzeug mit Gewichtungsvariante 2</i>	105
10.6	PARTIKELANZAHLKENNFELDER (PN-KENNFELDER)	106
10.7	EINGABEDATEN HBEFA-SIMULATION.....	107

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A	m^2	Stirnfläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
$CH_4; CH_4$	$g/h, g/km, ppm$	Methan
CO	$g/h, g/km, ppm$	Kohlenmonoxid
CO_2, CO_2	$g/h, g/km, ppm$	Kohlendioxid, gemessene CO_2 -Emissionen
CO_2eq	$g/MJ, g/km, g$	Äquivalente CO_2 -Emissionen
CO_{2_norm}	$g/kW_{rated}h$	Normiertes Kohlendioxid (bezogen auf P_{rated})
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
d	m	Durchmesser
Em_x	g/h	Emissionswert an einer Stützstelle
F	N	Kraft
FC	g/h	Kraftstoffverbrauch
$F_{r0}..F_{r4}$	-	Rollwiderstandskoeffizienten
HC	$g/h, g/km, ppm$	Kohlenwasserstoff
H_o	kJ/kg	spezifischer Brennwert, massenbezogener Brennwert (früher: oberer Heizwert)
H_u	kJ/kg	spezifischer Heizwert (früher: unterer Heizwert)
H_{vol}	kJ/dm^3	volumetrischer Heizwert
i_G	-	Getriebeübersetzung
i_A	-	Achsübersetzung
k	-	Konvertierungsrate
l	m	Länge
L	$kmol L/kmol B$ oder $kg L/kg B$	Luftmenge
L_{min}	$kmol L/kmol B$ oder $kg L/kg B$	Mindestluftbedarf
m	kg oder mol	Masse
m_{CO_2}	kg, g	Masse Kohlendioxid
m_{CH_4}	kg, g	Masse Methan
m_{N_2O}	kg, g	Masse Distickstoffmonoxid
\dot{m}	$kg/h, kg/s$	Massenstrom
M_d	$N \cdot m$	Drehmoment
n	$1/min$	Motordrehzahl
N_2	$g/h, g/km, ppm$	Stickstoff
n	$1/min$	aktuelle Motordrehzahl
n_{idle}	$1/min$	Leerlaufdrehzahl
n_{norm}, n_{norm}	-	normierte Drehzahl
n_{rated}	$1/min$	Nenndrehzahl
N_2O	$g/h, g/km, ppm$	Distickstoffmonoxid
$Neuz_x$	$\#$	Neuzulassungen des Fahrzeuges x im Jahr 2013 oder 2016
NO	$g/h, g/km, ppm$	Stickstoffmonoxid
NO_2, NO_2	$g/h, g/km, ppm$	Stickstoffdioxid
NO_x	$g/h, g/km, ppm$	Stickoxid
$NMHC$	$g/h, g/km, ppm$	Non-methane Hydrocarbons
O_2	$kmol O_2/kmol B$	Sauerstoffmenge (auch: $kg O_2/kg B$)
O_{2min}	$kmol O_2/kmol B$	Mindestsauerstoffbedarf (auch: $kg O_2/kg B$)

p	bar, Pa	Druck
P	(k)W	aktuelle Motorleistung
P_a	W	Beschleunigungsleistung
P_{aux}	W	Nebenverbraucherleistung
$P_{Getriebe}$	W	Getriebeverlustrleistung
$P_{Nebenaggregate}$	W	Leistungsbedarf Nebenaggregate
P_{norm}, P_{norm}	-	normierte Leistung
P_{Luft}	W	Leistung zur Überwindung des Luftwiderstands
P_{rated}	kW	Nennleistung
P_{Roll}	W	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstands
$P_{Schlupf}$	W	Verlustleistung durch Reifenschlupf
$P_{Steigung}$	W	Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands
PM	g/h, g/km, ppm	Partikelmasse
PN	#/h, #/km	Partikelanzahl
R_0	N	Rollwiderstand (geschwindigkeitsunabhängig)
R_1	Ns/m	Faktor für Rollwiderstand (geschwindigkeitsabhängig)
R_2	Ns ² /m ²	Faktor für Luftwiderstand
r_{dyn}	m	dynamischer Reifendurchmesser
T	°C, K	thermodynamische Temperatur
THC	g/h, g/km, ppm, g	Total Hydrocarbons
$\emptyset THC_{EURO 6}$	g/h	Durchschnittlicher THC- Wert an einer Stützstelle
THC_e	g/h	Extrapolierter THC-Wert
THC_i	g/h	Interpolierter THC-Wert
THG_{CO_2}	-	Treibhausgasfaktor Kohlendioxid
THG_{CH_4}	-	Treibhausgasfaktor Methan
THG_{N_2O}	-	Treibhausgasfaktor Distickstoffmonoxid
THC_x	g/h	Sekundlicher THC-Wert des Fahrzeuges x
v	m/s, km/h	Geschwindigkeit; Relativgeschwindigkeit Fahrzeug zu anströmender Luft
v_F	km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
V	m ³	Volumen

Konstanten

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

Griechische Formelzeichen

α	° ; rad	Winkel
ε	-	Verdichtungsverhältnis
η_{th}	-	thermodynamischer Wirkungsgrad
λ	-	Luftverhältnis, Luftzahl
ρ	kg/m ³ , kg/dm ³	Dichte
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

Operatoren und Bezeichnungen

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

Weitere Indices und Abkürzungen

:=	Definition
∅	Durchschnitt
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
B	Brennstoff
Bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CNG	Compressed Natural Gas
CPC	Condensation Particle Counter
cpsi	cells per square inch
CVS	Constant Volume Sampling
CZ	Cetanzahl
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DIN-Masse	DIN-Leermasse
DRI	Driving cycle
engl	englisch
ECE	Economic Commission for Europe (United Nations)
EG-Datum	Erstgenehmigungsdatum
EU-Masse	Masse des im Betrieb befindlichen Fahrzeugs
ERMES	European Research for Mobile Emission Sources
ERMES_mo d_300	Modifizierter ERMES-Testzyklus (300 Sekunden als Warmlaufphase definiert)
ERMES_mo d_300_NOx_ cut	Modifizierter ERMES-Testzyklus(300 Sekunden als Warmlaufphase definiert und die NOx-Spitzen beim Opel Zafira werden berücksichtigt)
EU	Europäische Union
EURO 5/6	Abgasnorm EURO 5 und EURO 6
eq	äquivalent
FIT	Flammenionisationsdetektor
FLD	Full Load and Drag Curve-File
ges	gesamt
gew.	gewichtet
gr	gravimetrisch
GUS	Gemeinschaft unabhängiger Staaten
H	Erdgastyp High
H ₂ O	Wasser, Wasserdampf
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
IUFC	Inrets Urbain Fluide Court
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
k	Konvertierungsrate
konst	konstant
L	Luft
LNG	Liquefied Natural Gas
MAP	Emission-Map
min	Minute
MPI	Multi Point Injection
MZ	Methanzahl
NDIR	Nichtdispersive Infrarot-Analystor
NEDC	New European Driving Cycle

Neuz	Neuzulassungen
NPI	NPI-File
NSK	NO _x -Speicherkatalystator
OBD	On-Board-Diagnose
Pa	Pascal
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
Pkw	Personenkraftwagen
real	real
RDE	Real Drive Emissions
ROZ	Research Oktanzahl
RWC	Real World Cycle
SCR	Selective Catalytic Reduction
SO ₂	Schwefeldioxid
THG	Treibhausgase
TL	Turbolader
TTW	Tank-To-Wheel
u.a.	unter anderem
UN	United Nations
V7/V8	Version 7/Version 8
v_target	Vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit
var.	Variante
VEH	Vehicle and engine specifications, Vehicle-File
vol	volumetrisch
WLTC	Worldwide harmonized Light Duty vehicles Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WTT	Well-To-Tank
WTW	Well-To-Wheel
Zul.	Zulassungsschein

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Hannes Eberhart

Graz, September 2018

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Messung von Schadstoffemissionen am Rollenprüfstand, die im Betrieb von Erdgasfahrzeugen entstehen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Fahrzeuge vermessen. Dabei sind zwei der Fahrzeuge nach der Abgasnorm EURO 5 und eines der Fahrzeuge nach der Abgasnorm EURO 6 typisiert. Mit den sekundlichen Messdaten aus den Rollenprüfstandsmessungen werden Emissionskennfelder der einzelnen Fahrzeuge erstellt. Für die Erstellung der Kennfelder wird die Simulationssoftware PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) verwendet.

Mit den erstellten Emissionskennfeldern der einzelnen Fahrzeuge erfolgt danach eine Erstellung von gewichteten Durchschnittskennfeldern für die Abgasnormen EURO 5 und EURO 6. Ebenso wird ein gewichtetes Durchschnittsfahrzeug für die jeweilige Abgasnorm erstellt. Sowohl für die Durchschnittsfahrzeuge als auch Durchschnittskennfelder erfolgt die Gewichtung der Daten mit den Neuzulassungen in Europa. Das für die Abgasnorm EURO 5 sowie EURO 6 erstellte Durchschnittsfahrzeug und Durchschnittskennfeld wird als Basis für die Simulation der HBEFA-Zyklen herangezogen. Dabei handelt es sich um 1457 verschiedene Zyklen, die reale Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Steigungen bestmöglich repräsentieren sollen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, mithilfe der Simulation das Emissionsverhalten von Erdgasfahrzeugen im Betrieb mittels repräsentativen Zyklen realitätsnah abbilden zu können. Die Endergebnisse sind schlussendlich die Emissionen in [g/km] als Funktion der Fahrzeuggeschwindigkeit in [km/h]. Die Simulationsergebnisse der Erdgas-Durchschnittsfahrzeuge werden abschließend mit bereits vorliegenden Simulationsergebnissen der Diesel- und Benzin-Durchschnittsfahrzeuge verglichen.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von Kaltstartzusatzemissionen. Darunter verstehen sich die Mehremissionen, die aufgrund eines Starts mit auf Umgebungstemperatur abgekühlten Verbrennungsmotor emittiert werden. Das Ziel dabei ist es, diese Mehremissionen in [g/Start] bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen zu bestimmen.

Abstract

The present work deals with the measurements of pollutant emissions on the chassis dynamometer, which are produced by the operation from natural gas vehicles. In the context of this work, three different vehicles were measured. Two of the vehicles are type approved by the emission standard EURO 5 and one is type approved by the emission standard EURO 6. The modal measuring data from the chassis dynamometer is used for producing emission maps of every vehicle. For the creation of this emission maps the simulation software PHEM has been used.

The created emission maps of every vehicle have been used for the creation of weighted average emission maps for the emission standard EURO 5 and EURO 6. In addition, weighted average vehicles for the mentioned emission standards have been created. For the weighted average vehicles and the average emission maps, the new registrations of natural gas vehicles in Europe based on a representative year were used. The produced weighted average vehicle and the average emission map were base for the simulation of the HBEFA-cycles. These are 1457 different cycles that represents the real traffic situations at different gradients.

The aim of this work was to simulate the emission behaviour of natural gas vehicles during operation with representative cycles. The results were presented in [g/km] over the vehicle speed in [km/h]. The results of the simulation of the average weighted natural gas vehicles are finally compared with those of the average gasoline and diesel vehicles.

Another part of this thesis deals with the investigation of cold start emissions. This includes the additional emissions emitted as a result of a cold start. The goal is to determine these additional emissions in [g] for different test cycles at different temperatures.

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten ist auf der Erde eine starke Veränderung des Klimas zu beobachten. Gesprochen wird hierbei oft vom Klimawandel, der hauptsächlich durch die globale Erwärmung hervorgerufen wird. Überflutungen, Dürreperioden, Gletscherschmelzen und starke Stürme sind allgegenwärtig und werden zukünftig wahrscheinlich auch immer häufiger auftreten. Doch warum kommt es zu dieser Erwärmung? Einen großen Faktor spielt dabei der Mensch selbst. Durch die Abholzung von Regenwäldern oder das Verbrennen von fossilen Brennstoffen lagern sich Treibhausgase wie CO_2 oder Methan in großen Mengen in der Erdatmosphäre an. Diese Gase erschweren dabei eine Rückstrahlung der Wärmestrahlung in das Weltall, wodurch die Temperatur in der Atmosphäre zunimmt. Um zu verhindern, dass die Temperatur immer weiter steigt, sollen Treibhausgase reduziert werden.

Einen großen Anteil der CO_2 -Emissionen stellt der Verkehr dar. Dieser Sektor ist gegenwärtig ein Hauptemittent von CO_2 , da die Neuzulassungen an PKWs stetig zunehmen, wie Abbildung 1-1 zeigt.

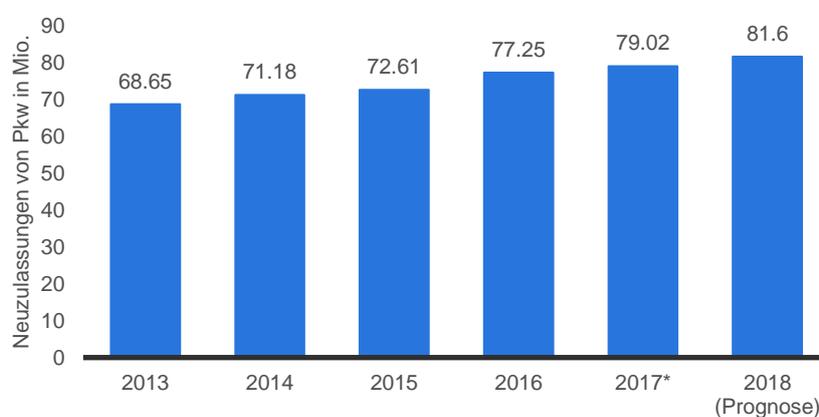


Abbildung 1-1: Anzahl der weltweiten PKW-Neuzulassungen in den Jahren 2013 bis 2018 (in Millionen) [1]

Damit im Verkehrssektor auch zukünftige Klimaziele erreicht werden und im städtischen Verkehr die Luftgüte durch Reduzierung von Schadstoffen verbessert werden kann, ist eine immer strengere Abgasgesetzgebung notwendig. Diese beschlossenen Gesetze stellen Motoren- und Automobilhersteller immer wieder vor große Herausforderungen. Zumeist werden dabei bereits bestehende Motoren übernommen und auf die nächsthöhere Emissionsstufe weiterentwickelt oder neu entwickelte Aggregate verbaut. Die Grenzen sind hierbei jedoch schnell erreicht, da die gegenwärtigen Verbrennungskraftmaschinen bereits sehr effizient betrieben werden. Um den von der Europäischen Union beschlossenen Grenzwert des Flottendurchschnitts von $92 \text{ gCO}_2/\text{km}$ ab dem Jahr 2020 einzuhalten, sind die Elektrifizierung des Antriebes oder die Adaptierung von alternativen Kraftstoffen für Automobilhersteller unumgänglich.

Einer dieser alternativen Kraftstoffe ist zum Beispiel Erdgas, das durch das günstige C/H-Verhältnis bei der Verbrennung im Gegensatz zu Benzin und Diesel laut [2] zu einem geringeren CO_2 -Ausstoß führt. Außerdem ist mit Erdgas aufgrund des hohen Methananteils ein höheres Verdichtungsverhältnis gegenüber Benzin möglich. Deshalb kann laut [2] im idealen Vergleichsprozess eine Wirkungsgradsteigerung vom Erdgas- gegenüber dem Benzinmotor erzielt werden. Zurückzuführen ist dies auf die höhere Klopfgrenze des Methans. Nachteilig wirkt sich das höhere Verdichtungsverhältnis ϵ hingegen auf die Abgasnachbehandlung bei Erdgasfahrzeugen aus. Dies wird in Kapitel 2.3.6 näher erläutert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Messung und anschließenden Simulation von Emissionen bei Erdgasfahrzeugen. Die Unterteilung der Arbeit erfolgt in einen praktischen und theoretischen Teil, wobei der praktische Teil die Messung verschiedener Fahrzeuge auf dem PKW-Rollenprüfstand beinhaltet.

Der theoretische Abschnitt hingegen beschäftigt sich einerseits mit der Literaturstudie über das Emissionsverhalten von Erdgasfahrzeugen. Andererseits behandelt dieser Teil die Simulation der Emissionskomponenten der Versuchsfahrzeuge für verschiedene Testzyklen sowie die Erstellung von Durchschnittsfahrzeugen und Durchschnittskennfeldern für erdgasbetriebene Fahrzeuge in den jeweiligen Abgasnormen EURO 5 und EURO 6. Die Durchschnittsfahrzeuge für die jeweiligen Abgasnormen sollen den Durchschnitt aller in Europa zugelassenen Erdgasfahrzeuge der Abgasnorm EURO 5 und EURO 6 repräsentieren. Damit kann in einem weiteren Schritt das Emissionsverhalten von Erdgasfahrzeugen abgeschätzt werden. Abschließend erfolgt der Vergleich der Simulationsergebnisse der Emissionen des Erdgasdurchschnittsfahrzeugs mit den bereits vorliegenden Emissionen des Diesel- und Benzindurchschnittsfahrzeugs. Weiters werden im theoretischen Teil der Arbeit die Zusatzemissionen bestimmt, die in Folge eines Kaltstarts ausgestoßen werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurden drei verschiedene Fahrzeuge am Rollenprüfstand vermessen und anschließend Emissionskennfelder erstellt. Die Emissionskennfelder von zwei weiteren Erdgasfahrzeugen wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit erstellt und übernommen. Die Bestimmung der Kaltstartzusatzemissionen erfolgt für alle fünf verschiedenen Erdgasfahrzeuge.

2 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit thematisieren Erdgas als Kraftstoff sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften dieses Kraftstoffs. Weiters wird der Transport von Erdgas von der Gewinnung bis hin zur Betankung beschrieben, was im Rahmen dieser Arbeit als Transportkette Erdgas bezeichnet wird. Abschließend werden in diesem Kapitel der Aufbau eines Erdgasfahrzeugs, insbesondere Bauteile und Komponenten sowie die Abgasnachbehandlung von Erdgas näher erklärt.

2.1 Erdgas allgemein

Grundsätzlich sind unter Erdgas laut [2] alle gasförmigen Kohlenwasserstoffe, die aus der Erde stammen und brennbar sind, zu verstehen. Erdgas wird dabei als fossiler Energieträger bezeichnet, der gleich wie Erdöl im Erdinneren bereits vor Jahrmillionen unter Druckabschluss und organischen Substanzen entstand. Gegenwärtig ist Erdgas abhängig vom Fundort in unterschiedlichen Zusammensetzungen aufzufinden. Der Hauptbestandteil von Erdgas ist laut [2] dabei immer Methan (CH_4), dessen Anteil zwischen 75-98 % variiert. Dieser Methananteil hat wesentlichen Einfluss auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften, die in den nächsten Kapiteln näher erläutert werden.

2.1.1 Physikalische Eigenschaften

Bei Erdgas handelt es sich um ein brennbares als auch um ein farb- und geruchloses Gasmisch. Da es sich um ein geruchloses Gas handelt, wird es aus Sicherheitsgründen mit Duftstoffen odoriert, damit es mit den menschlichen Sinnen wahrnehmbar ist. Die geringere Dichte von Erdgas gegenüber Luft ist auf den hohen Wasserstoffanteil des Moleküls Methan zurückzuführen. Die Dichte des Methans beträgt bei einer Raumtemperatur von $25\text{ }^\circ\text{C}$, 0.66 kg/m^3 . Die Dichte der Luft ist bei gleicher Temperatur und gleichem Druck hingegen etwa doppelt so groß. Des Weiteren hat der bereits erwähnte hohe Wasserstoffanteil auch Einfluss auf den massenbezogenen unteren Heizwert H_u , der bei Methan mit 50 MJ/kg deutlich über jenen der flüssigen Kohlenwasserstoffe wie Diesel und Benzin liegt. In Abbildung 2-1 ist dieser Vergleich ersichtlich und ergänzend dazu sind spezifische Heizwerte verschiedener Kraftstoffe über den stöchiometrischen Luftbedarf dargestellt. Es wird hierbei von einer vollständigen Verbrennung und Rückkühlung auf die Bezugstemperatur ausgegangen. Unter stöchiometrischem Luftbedarf versteht man das Verhältnis von der benötigten Menge an Luft um 1 kg Brennstoff vollständig zu verbrennen. Beispielhaft ist angeführt, dass für die vollständige Verbrennung von 1 kg Benzin 14.6 kg Luft benötigt werden. Sämtliche Reaktionsgleichungen hierzu werden in Kapitel 2.3.4 näher erklärt. [2]

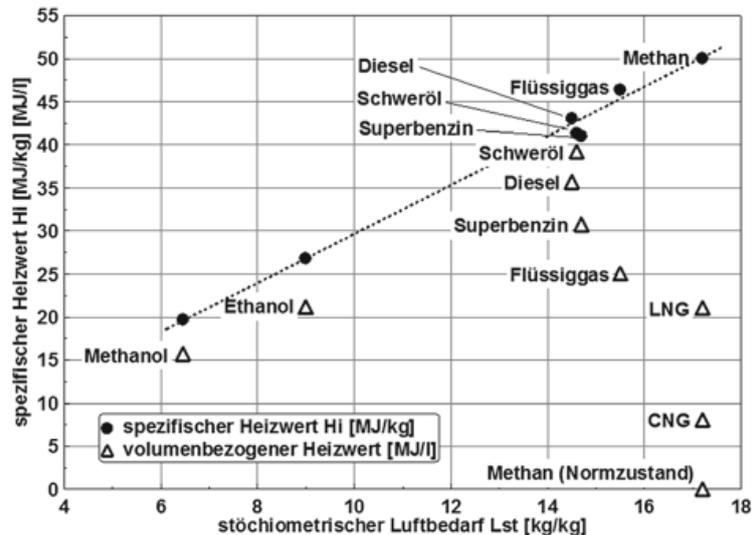


Abbildung 2-1: Vergleich spezifischer Heizwerte verschiedener Kraftstoffe über den stöchiometrischen Luftbedarf [2]

Zu beachten ist, dass die geringe Dichte des Erdgases im spezifischen Heizwert nicht direkt hervorgeht. Deshalb ist es ebenfalls sinnvoll, den Heizwert nicht auf die Masse zu beziehen, sondern auch auf das Volumen. Daraus ergibt sich laut [2], dass der volumetrische Heizwert des Methans ungefähr um den Faktor 857 kleiner ist als jener des Benzins. Um im Transport und Verkehr mit Erdgasfahrzeugen annehmbare Reichweiten zu erzielen, sind zufriedenstellende Energiedichten essentiell. Daher ist es unumgänglich das Erdgas zu komprimieren. Bei einer solchen Kompression von Erdgas wird von CNG (Compressed Natural Gas) gesprochen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verflüssigung von Erdgas und somit die Abkühlung auf eine Temperatur von -162 °C bei Normaldruck von 1.013 bar. Dann wird von LNG (Liquid Natural Gas) gesprochen. Der Unterschied dieser beiden verschiedenen Möglichkeiten Erdgas zu speichern, soll nochmals anhand Abbildung 2-2 veranschaulicht werden.

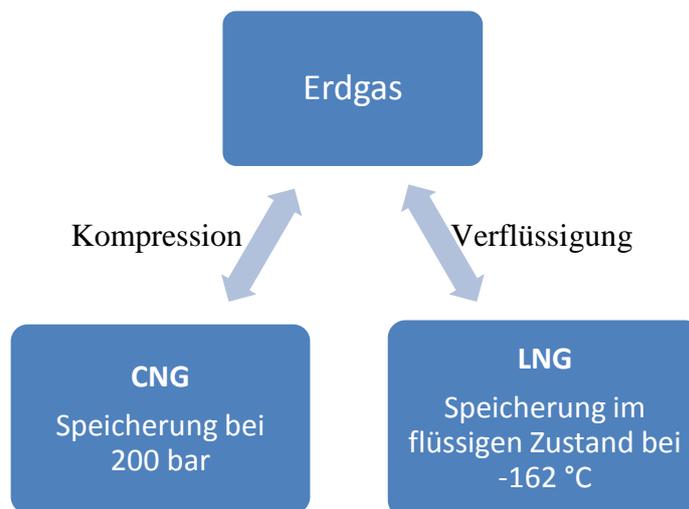


Abbildung 2-2: Unterscheidung CNG und LNG

Im Pkw-Bereich wird vorwiegend CNG verwendet, das wie anhand von Abbildung 2-2 ersichtlich mit 200 bar und Umgebungstemperatur gespeichert ist. In diesem Zustand besitzt Methan eine Dichte von 162 kg/m^3 . Bei LNG hingegen bedarf es bei der Speicherung einen größeren Aufwand, das auf die tiefkalte Verflüssigung zurückzuführen ist. Damit die

Siedetemperatur von Erdgas, die 112 K (- 161 °C) beträgt, unterschritten werden kann, wird bereits im Herstellungsprozess von LNG viel Energie benötigt. Aufgrund der weiteren komplexen Speicherung in erforderlichen Kryotanks wird LNG derzeit nur selten eingesetzt. [4]

Des Weiteren ist zu erwähnen, dass eine Speicherung auf höhere Drücke als 200 bar bei CNG möglich wäre, aber aufgrund der Wirtschaftlichkeit, zunehmender Fahrzeugmassen sowie höherer Sicherheitsvorschriften wird auf diese verzichtet. Abschließend soll in Abbildung 2-3 gezeigt werden, wie sich das Speichervolumen in Liter von verschiedenen Kraftstoffen für einen Energieinhalt von 2500 MJ (entspricht 80 Liter Benzin) verhält. Es ist ersichtlich, dass CNG trotz der Komprimierung noch circa das 4-fache Speichervolumen gegenüber Benzin benötigt, um den gleichen Energieinhalt bereit zu stellen. Lediglich mit LNG erreicht man ähnliche Speichervolumina wie bei den alternativen flüssigen Kohlenwasserstoffverbindungen wie Diesel und Benzin. [2]

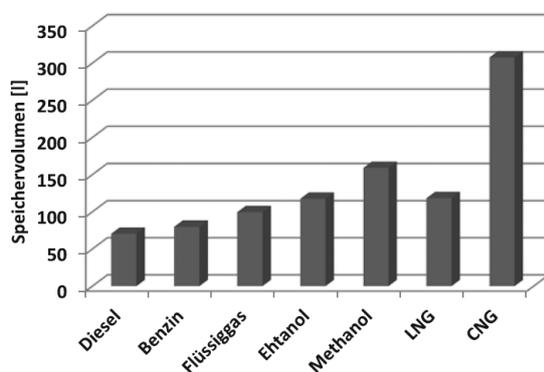


Abbildung 2-3: Speichervolumen verschiedener Kraftstoffe für 2500 MJ [2]

Aus dem Kapitel wird deutlich, dass die geringe Dichte von Erdgas einen enormen Einfluss auf die Reichweite bzw. die Größe der Erdgastanks hat.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit behandelten Fahrzeuge haben alle CNG-Tanks verbaut, weshalb der Schwerpunkt dieser Arbeit in den folgenden Kapiteln auch auf CNG gerichtet ist. Im Weiteren wird das Erdgasfahrzeug daher auch als CNG-Fahrzeug verstanden.

2.1.2 Chemische Eigenschaften

Zusammenfassend geht aus [2] hervor, dass der geringere CO₂-Ausstoß bei Erdgasfahrzeugen im Vergleich zu Benzin oder Diesel betriebenen Fahrzeugen auf den chemischen Eigenschaften des Methan-Moleküls beruht. Der Vorteil ergibt sich durch das kleinste C/H-Verhältnis des Methanmoleküls mit 1/4. Dies führt zu einer 20-prozentigen Einsparung von CO₂-Emissionen gegenüber Benzinmotoren.

Um nun die maximal mögliche Einsparung von CO₂ bei der Verbrennung von Erdgas zu erreichen, ist ein hoher Methananteil vorteilhaft. Dieser Methananteil im Erdgas ist stark vom Fundort abhängig, weshalb eine Differenzierung in Erdgastyp Low und Erdgastyp High notwendig ist (Tabelle 2-1). Zu den jeweiligen Erdgastypen sind die Methananteile in Prozent sowie das Vorkommen aufgelistet.

Tabelle 2-1: Einteilung der Erdgastypen nach Methananteil und Vorkommen [2]

Erdgastyp	Methananteil in %	Vorkommen
Erdgastyp L (Low)	~85 %	Holland und Deutschland
Erdgastyp H (High)	Mindestens 89 % - 98 %	Nordsee bzw. GUS-Staaten ¹

Des Weiteren besagt [5], dass der Methananteil wesentlichen Einfluss auf die Klopfestigkeit des jeweiligen Erdgastypen hat. Die Klopfestigkeit wird bei gasförmigen Kraftstoffen mit der Methanzahl (MZ) angegeben. Diese kann mit ROZ (Research Oktanzahl) von flüssigen Kraftstoffen, wie bei Benzin, verglichen werden. Methan ist ein sehr klopfester Kraftstoff und besitzt eine MZ von 100 was einer ROZ von 130 entspricht.

Die Bestimmung der Methanzahl von gasförmigen Kraftstoffen erfolgt laut [5] dadurch, dass in einem Prüfmotor, unter genormten Bedingungen, das zu prüfende Erdgas mit einem Prüfgemisch aus Methan (MZ=100, klopfest) und Wasserstoff (MZ=0, klopfreudig) verglichen wird. Bei gleichen Randbedingungen und gleicher Klopfneigung gibt der Volumenprozent-Anteil von Methan im Prüfgemisch die Methanzahl an. Stark beeinflusst wird die Methanzahl durch die Zusammensetzung des Erdgases, denn neben dem Methananteil ist auch der Anteil an höherwertigen Alkanen bzw. auch an Inertgasen entscheidend. In Tabelle 2-2 sind die Erdgaszusammensetzungen aus verschiedenen Gebieten dargestellt. Dabei bezeichnet H und L die jeweiligen Erdgastypen High und Low.

Tabelle 2-2: Erdgaszusammensetzungen in verschiedenen Gebieten [6]& [7]

Gaszusammensetzung	Symbol	Einheit	Russland H	Dänemark H	Holland L	Bio- Erdgas
Methan	CH ₄	Mol %	96.42	90.07	84.11	96.15
Stickstoff	N ₂	Mol %	0.42	0.28	10.28	0.75
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	Mol %	0.33	0.6	1.32	2.9
Ethan	C ₂ H ₆	Mol %	2.58	5.68	3.43	
Propan	C ₃ H ₈	Mol %	0.17	2.19	0.56	
n-Butan	n-C ₄ H ₁₀	Mol %	0.03	0.9	0.1	
n-Pentan	n-C ₅ H ₁₂	Mol %	<0.01	0.22	0.03	
n-Hexan	n-C ₆ H ₁₄	Mol %	<0.01	0.06	0.05	
Sauerstoff	O ₂	Mol %				0.2
Summe		Mol %	100	100	100	100

Aus Tabelle 2-2 ist ersichtlich, dass die Mol-%-Anteile von Methan beim Erdgas aus Russland und dem Bio-Erdgas am höchsten sind. Dies führt auch zu hohen Methanzahlen der einzelnen Gase wie Tabelle 2-3 zeigt. Ungünstig ist aber der hohe Anteil an Inertgasen von CO₂ und N₂,

¹ GUS= Gemeinschaft unabhängiger Staaten

der vor allem beim holländischen Erdgas sowie beim Bio-Erdgas zu einer Reduktion des Brennwertes H_o führt.

Tabelle 2-3: Gasbeschaffungsparameter von Erdgas in unterschiedlichen Gebieten

	Symbol	Einheit	Russland H	Dänemark H	Holland L	Bio-Erdgas
Brennwert	H_o	kWh/m ³	11.2	12.1	10.25	10.6
Methanzahl	MZ	-	90	73	88	103

Aus diesem Abschnitt geht hervor, dass die Qualität des Erdgases wesentlichen Einfluss auf den Brennwert als auch auf die Klopfestigkeit hat und somit die Herkunft eine große Rolle spielt. Wie nun der Transport des Erdgases vom Reservoir bis hin zum Tank des Fahrzeuges und anschließend zum Reifen erfolgt, wird im folgenden Kapitel näher thematisiert.

2.2 Transportkette Erdgas

Der Weg, den das Erdgas von der Bohrung oder vom Reservoir („Well“) bis hin zum Tank durchläuft, ist lange und erfordert bereits in der Herstellung viel Aufwand und Energie. Somit sind eine nachhaltige Erzeugung und ein nachhaltiger Transport des Erdgases anzustreben. Um dies zu erreichen, sind in den einzelnen Prozessen der Erdgasförderung bis hin zur Speicherung effiziente und ausgereifte Verfahren notwendig. In Abbildung 2-4 ist laut [3] die gesamte Prozesskette dargestellt. Rechts in der Abbildung sind die einzelnen Prozessschritte ersichtlich, die sich wie folgt aufteilen:

- Erdgasproduktion und Erdgasgewinnung
- Erdgastransport
- Erdgasspeicherung und Erdgasverteilung
- Weiterverarbeitung
- Erdgasnutzen

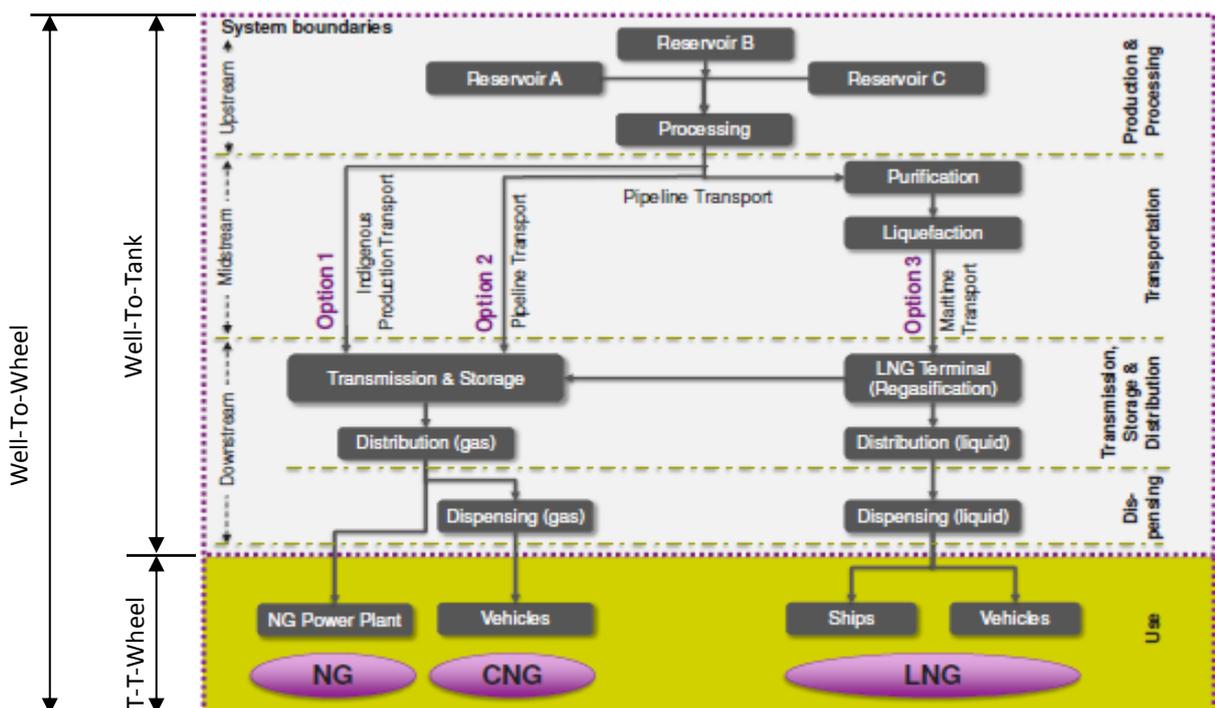


Abbildung 2-4: Prozesskette des Erdgases von der Bohrung bis zum Rad [3]

Um verschiedene Verfahren zur Kraftstoffherstellung oder verschiedene Fahrzeugtypen miteinander vergleichen zu können, werden die Prozessschritte nach [3] in einzelne Phasen oder Teilbereiche eingeteilt. Mithilfe dieser Einteilung können nach [8] anschließend Aussagen über den Wirkungsgrad der gesamten Energieumwandlungskette, Schadstoffemissionen, Treibhausgasemissionen und den Gesamtenergiebedarf getätigt werden. Diese Gliederung ist in Abbildung 2-4 links dargestellt und unterteilt sich in folgende Phasen:

- Well-To-Tank (WTT) (Energiebereitstellung) [8]
Wird nach [8] auch umgangssprachlich als Energiebereitstellungsbereich vom Bohrloch bis zum Tank bezeichnet. Diese beinhaltet die Prozessschritte Produktion und Gewinnung von Rohstoffen sowie Transport, Speicherung und Weiterverarbeitung.
- Tank-To-Wheel (TTW)
Die Tank-To-Wheel-Analyse untersucht den Energiefluss vom Tank bis zum Reifen/Rad. Es wird bei dieser Bewertung auch vom Fahrzeugwirkungsgrad gesprochen. Der gesamte Motor und Antriebsstrang wird betrachtet.
- Well-To-Wheel (WTW)
Unter dieser Phase versteht man eine Gesamtbetrachtung, die sich aus den vorhin erwähnten Einzelphasen ergeben.

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den Analysen für WTT, TTW und WTW und betrachtet dabei die Treibhausgase (THG). Anschließend erfolgt ein Vergleich der Analysen von Erdgas mit denen von Diesel und Benzin.

2.2.1 Well-To-Tank

Um der zukünftigen Klimaerwärmung entgegen zu wirken und somit eine Reduktion von CO₂-Emissionen zu forcieren, wird die Betrachtung der WTT-Phase immer wichtiger. Wie bereits erwähnt, handelt es sich hierbei um die Betrachtung der Energiebereitstellung, wobei diese stark vom geografischen Standort beeinflusst wird. Da nicht nur CO₂, sondern auch Methan und N₂O (Lachgas) als Treibhausgase zählen, wird das sogenannte Treibhauspotential definiert. Hierzu werden für die einzelnen Komponenten CO₂, CH₄ und N₂O Faktoren eingeführt und anschließend das Produkt der jeweiligen Masse mit dem jeweiligen Faktor berechnet. Die anschließende Summe der einzelnen Produkte ergibt die äquivalente CO₂-Emission. In Abbildung 2-5 sind hierzu die äquivalenten CO₂-Emissionen pro MJ (CO₂-eq/MJ) für verschiedene Regionen in Europa gezeigt. Nachfolgende Gleichung (2-1) zeigt die Berechnung:

$$CO_2eq = THG_{CO_2} * m_{CO_2} + THG_{CH_4} * m_{CH_4} + THG_{N_2O} * m_{N_2O} \quad (2-1)$$

THG_i Treibhausgasfaktor der jeweiligen Komponente [-] (die jeweiligen Faktoren sind im Anhang auf Seite 99 nach [9] angeführt)

m_i Masse der jeweiligen Komponente [g]

Es ist ersichtlich, dass bei der Produktion und Bereitstellung im Südosten und Südwesten von Europa die CO₂-eq höher sind als in den anderen Regionen. Zurückzuführen ist dies laut [3] darauf, dass der Transport in diese Regionen über LNG erfolgt und somit der Energieaufwand zur Verflüssigung in der Produktion und Verarbeitung berücksichtigt werden muss. Des Weiteren zeigen Untersuchungen, dass der Transport laut [9] von 7000 km auf 4000 km eine CO₂-eq Reduktion von mehr als 40 % einbringt. Hierbei kann vor allem im Norden der EU durch geringere Transportwege das CO₂-eq reduziert werden. Bei der Speicherung und

Verteilung verhalten sich die einzelnen Regionen ähnlich. Aus [3] ergibt sich im Zentrum der EU das geringste CO₂-eq von 10.8 gCO₂-eq/MJ in der WTT-Phase. Der Durchschnitt der CO₂-Bilanz für die Well-To-Tank-Analyse ergibt bei CNG in Europa 12.5 gCO₂-eq/MJ und wird in der Abbildung als EU-Total bezeichnet.

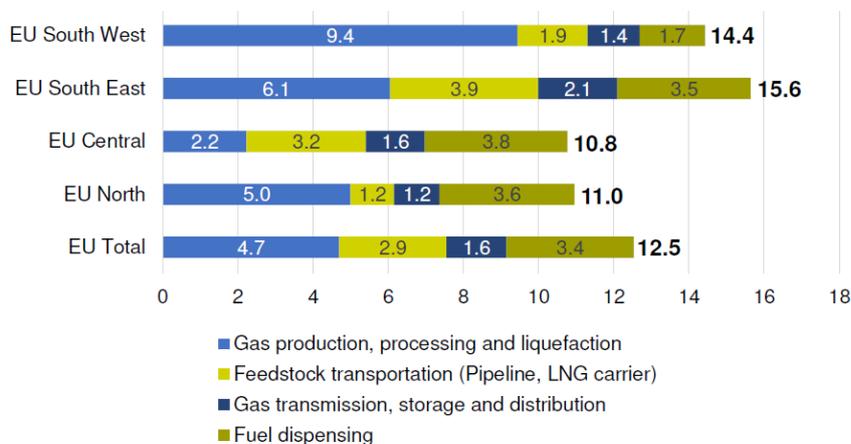


Abbildung 2-5: Well-To-Tank-Analyse in Europa in [g CO₂-eq/MJ] [3]

2.2.2 Tank-To-Wheel

Um TTW-Analysen durchführen zu können, sind laut [3] bestimmte Rahmenbedingungen zu definieren und einzuhalten. Diese beinhalten zum Beispiel das Verwenden von genormten Prüfkraftstoffen, um verschiedene Motoren miteinander zu vergleichen und nicht etwaige Emissionsvorteile durch spezielle Kraftstoffe zu nutzen. Die Eigenschaften der Prüfkraftstoffe sind in [9] für alle Kraftstoffe definiert und dementsprechend einzuhalten. Für die Studie aus [3] werden von verschiedenen Fahrzeugherstellern TTW-Analysewerte für verschiedene Fahrzeuge zur Verfügung gestellt. Dabei ergeben sich Mittelwerte aus den Messungen wie in Abbildung 2-6 dargestellt. Diese Daten beziehen sich auf den Fahrzyklus New European Driving Cycle (NEDC). Wie bereits erwähnt, ergibt sich eine Reduktion der CO₂-Emissionen von circa 20 % gegenüber Benzin und ungefähr 2 % gegenüber Diesel.

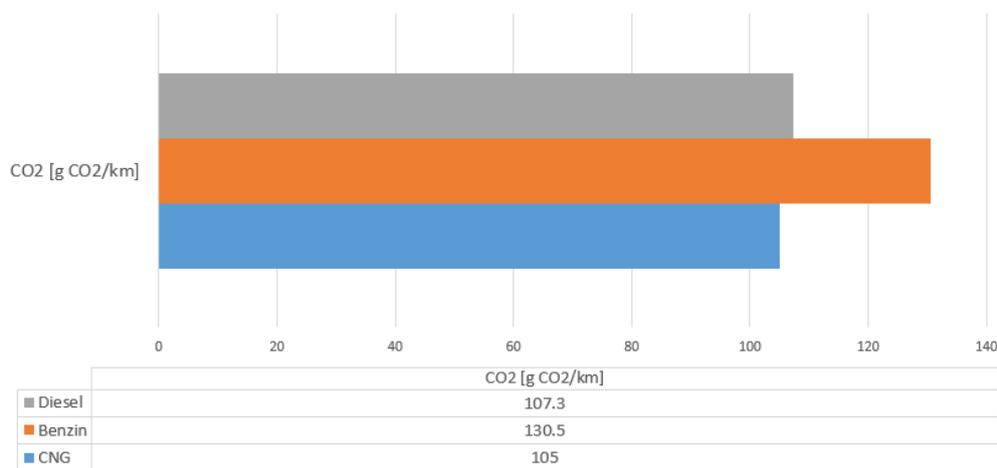


Abbildung 2-6: Vergleich von CO₂-Emissionen verschiedener Kraftstoffe im NEDC [3]

2.2.3 Well-To-Wheel

Die Kombination aus den Well-To-Tank und Tank-To-Wheel-Analysen stellt die gesamte Prozesskette, den sogenannten Well-To-Wheel-Bereich dar. Es ergibt sich hierbei laut [3] bei Erdgas ein um ca. 23 % geringeres CO₂-eq gegenüber Benzin und gegenüber Diesel kann eine Reduktion von etwa 7 % verzeichnet werden. Als Rahmenbedingungen für diese Studie gelten, dass in der Tank-To-Wheel-Phase der Prüfzyklus NEDC für C-Segment-Fahrzeuge (entspricht z.B. einem VW Golf) herangezogen wurde. Die jeweiligen CO₂-eq sind in Abbildung 2-7 für Benzin, Diesel und CNG dargestellt. Die Bezeichnung FQD bei Benzin und Diesel bedeutet Fuel Quality Directive und wurde laut [10] im Jahr 2010 von der EU eingeführt, um eine Reduktion der Treibhausgase bis zu 6 % im Jahr 2020 gegenüber 2010 zu erreichen. Der Fokus in der Reduktion liegt hierbei in der Förderung von BIO-Kraftstoffen und alternativen Kraftstoffen sowie Emissionsminderungen im Tank-To-Wheel Bereich.

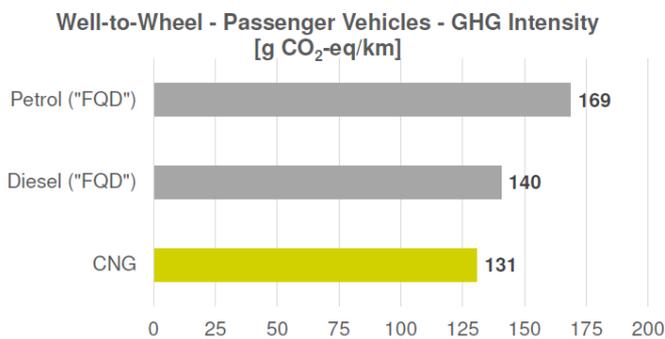


Abbildung 2-7: Well-To-Wheel-Analyse für Benzin, Diesel und Erdgas in [g CO₂-eq/km] [3]

Aus diesem Kapitel ergibt sich, dass hinsichtlich CO₂-eq mit Erdgasfahrzeugen eine deutliche Reduktion erreicht werden kann. Wie nun ein Erdgasfahrzeug aufgebaut ist, wie sich der Verbrennungsablauf mit Methan gestaltet und welche Schadstoffe dabei entstehen, wird im Folgenden erläutert.

2.3 Erdgasfahrzeug

In diesem Kapitel wird zu Beginn das bestehende Tankstellennetz in Europa näher betrachtet. Im nächsten Schritt erfolgt die Beschreibung der zwei verschiedenen Arten eines Erdgasfahrzeugs. Daraus werden die in einem Erdgasfahrzeug integrierten Komponenten und Bauteile näher beschrieben. Weiters wird ein Überblick über die Verbrennung, die dadurch entstehenden Schadstoffe und die Abgasnachbehandlung gegeben. Abschließend beschäftigt sich das Kapitel mit der Abgasgesetzgebung und mit den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Fahrzyklen.

2.3.1 Anforderungen und Tankstellennetz

Laut [2] legen Kunden das Augenmerk auf Sicherheit, störungsfreien Betrieb, das Erreichen akzeptabler Reichweiten und adäquaten Innenraum. Bei Erdgasfahrzeugen stoßen Fahrzeughersteller dabei jedoch schnell an Grenzen. Durch den Einbau großer Tanks für adäquate Reichweiten müssen Kompromisse hinsichtlich Innenraumgröße eingegangen werden.

Des Weiteren ist das Tankstellennetz für Erdgas in Europa nicht ausreichend ausgebaut, womit sich ein reiner Erdgasbetrieb schwierig gestaltet. Abbildung 2-8 zeigt das Tankstellennetz für Erdgas in Europa. Es ist ersichtlich, dass im Zentrum Europas die Anzahl der Tankstellen gegenwärtig am größten ist. Östlich und westlich stehen hingegen nur wenige Tankstellen zur Verfügung. Dies führt somit in diesen Gebieten zu geringer Kaufbereitschaft von Erdgasfahrzeugen. Spitzenreiter für CNG-Tankstellen ist Italien mit 1198 Erdgastankstellen,

wie in der Abbildung 2-8 ersichtlich.

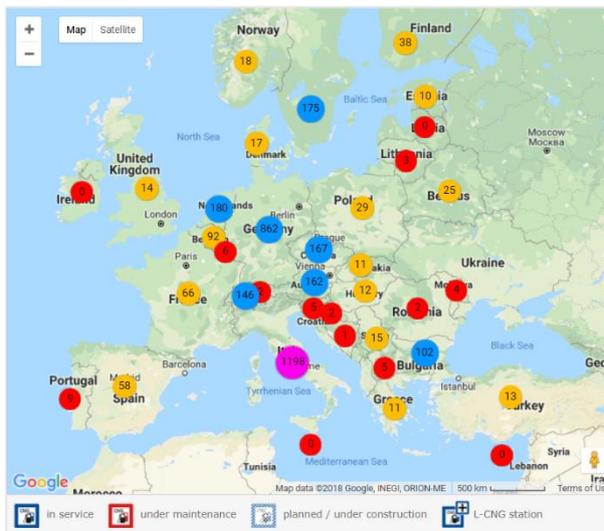


Abbildung 2-8: Erdgastankstellennetz in Europa [11]

Aufgrund der geringen Tankstellenanzahl ist es für den Fahrzeughersteller unumgänglich einen zusätzlichen Benzintank in das CNG-Fahrzeug einzubauen, um geforderte Mindestreichweiten erzielen zu können.

2.3.2 Monovalenter und bivalenter Antrieb

Grundsätzlich versteht man unter einem monovalenten Erdgasfahrzeug laut [12] ein Fahrzeug, dessen Betrieb für Erdgas optimiert ist. Diese Fahrzeuge verfügen entweder über keinen oder einen maximal 15 Liter großen Benzintank. Einerseits gewährleistet dieser Benzintank das Erreichen akzeptabler Minstdistanzen und andererseits wird der Benzinbetrieb oft bei Kaltstarts herangezogen. Der Grund für die Kaltstarts mit Benzin ist, dass ein schnelles Erreichen der Light-Off Temperatur des Katalysators gewährleistet ist. Gegenwärtige monovalente Ausführungen erreichen mit dementsprechend großen CNG-Tanks Reichweiten bis 500 km.

Bei Fahrzeugen mit einem CNG-Tank und einem Benzintank, der ein größeres Volumen als 15 Liter aufweist, spricht man hingegen von bivalenten Antrieben. Dies ist gemäß [2] gegenwärtig die am meisten verwendete Variante und wird im Gegensatz zum monovalentem Betrieb für den Benzinbetrieb optimiert. Der Vorteil des höheren Verdichtungsverhältnisses beim Methan kann bei diesen Ausführungen somit nicht genutzt werden. Bei dieser Variante kann der Kraftstoffbetrieb automatisch oder durch Schalterbetrieb gewechselt werden.

Im folgendem wird der Aufbau und die einzelnen Komponenten bzw. die Zusatzkomponenten des CNG-Fahrzeuges näher erläutert.

2.3.3 Aufbau und Bestandteile eines CNG-Fahrzeugs

Der prinzipielle Aufbau bzw. die Bestandteile sind für mono- und bivalente Ausführung ähnlich. Die beiden Ausführungen unterscheiden sich nur geringfügig. Da beim monovalenten Antrieb aufgrund der höheren Klopfgrenze des Methans höhere Verdichtungsverhältnisse erreicht werden, unterliegen in diesem Betrieb die Bauteile auch höheren thermischen und mechanischen Belastungen. Aufgrund der höheren Belastungen sind die Motoren monovalenter Fahrzeuge dementsprechend massiver oder mit anderen Werkstoffen ausgelegt als bivalente Ausführungen.

Der grundlegende Aufbau beider Ausführungen ist in Abbildung 2-9 gemäß [12] dargestellt.

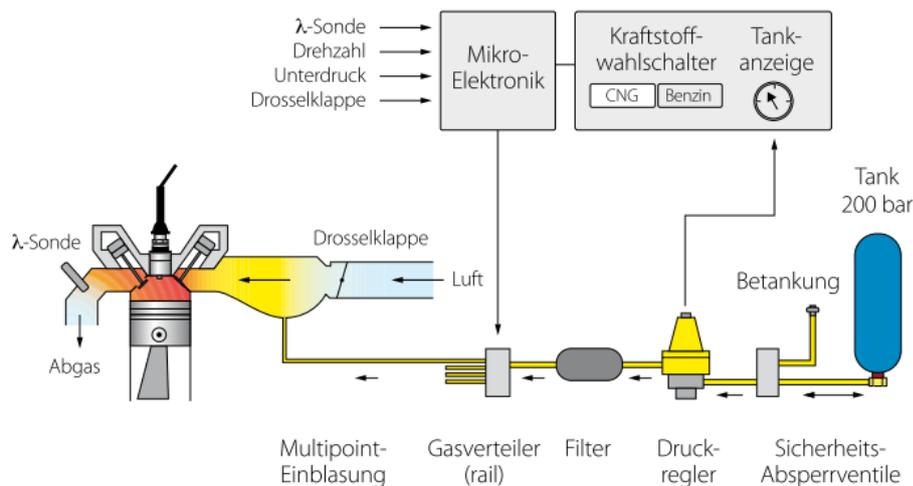


Abbildung 2-9: Grundlegende Bauteile eines CNG-Fahrzeugs [12]

Das Funktionsprinzip der einzelnen Bauteile kann laut [2] wie folgt beschrieben werden:

- **Füllanschluss**
Der genormte Füllanschluss wird in Kombination mit der Füllkupplung der Erdgastankstelle formschlüssig verbunden. Somit wird eine gasdichte Betankung gewährleistet.
- **Hochdruckleitungen und Verbinder**
Diese Komponenten haben bei der Betankung einerseits die Aufgabe den Kraftstoff vom Füllanschluss bis zum Tank zu transportieren und sind des Weiteren für den Transport vom Tank bis zum nachfolgenden Druckregler verantwortlich. Bei der Betankung ist darauf zu achten, dass eine gleichmäßige Verteilung des Kraftstoffes über den Verteiler in die einzelnen Tanks erreicht wird. Bei einer nicht vollständigen Betankung kommt es beim Start zu unruhigen Druckausgleichsgeräuschen, die durch gleichmäßige Verteilung des Massenstromes beim Tanken vermieden werden können.
- **Tankventil**
Die Aufgabenfunktionen dieser Komponente bestehen darin, den Kraftstoff während des Motorbetriebs dem Motor zuzuführen sowie beim Stillstand des Fahrzeuges die Kraftstoffzufuhr abzusperren.
- **Tank**
Der Tank hat genormte gesetzliche Anforderungen zu erfüllen und speichert den Kraftstoff bei ca. 200 bar.
- **Sicherheits-Absperrventile (Thermische Sicherung)**
Bei zu hoher Temperatur (ab etwa 110 °C) hat dieses Bauteil die Aufgabe den Tankinhalt vollständig in die Umgebung zu entspannen, um etwaige Unfallrisiken und Bauteilbeschädigungen zu vermeiden.
- **Druckregler**
Der Druckregler dient dazu, den Druck im Tank von 200 bar auf einen Druck von fünf bis sechs bar zu reduzieren.

- Filter und Ölabscheider

Es kann nach längerer Zeit zu Ölablagerungen an den Injektoren kommen, was zumeist auf die Kompressoren an den Tankstellen zurückzuführen ist. Es gelangt hierbei ein großer Anteil Schmieröl in den Kompressionsraum der Tankstellenkompressoren und verdampft. Damit das verdampfte Schmieröl nicht in den Motor gelangt, werden Filter und Ölabscheider verbaut.

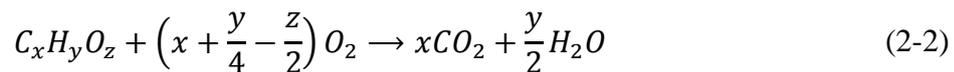
- Niederdruckleitungen

Diese Leitungen dienen dazu, das Erdgas vom Druckregler bis hin zum Verteiler (auch als Rail bezeichnet) zu transportieren. Anschließend wird das Erdgas über das Injektor-Rail in das Saugrohr eingeblasen.

Gegenwärtig erfolgt die Einblasung hauptsächlich in das Saugrohr, wobei zukünftig die Forschung auf Direkteinblasung in den Brennraum laut [13] forciert wird. Beide Male ist das Ziel ein homogenes Gemisch sowie eine vollständige Verbrennung mit minimalen Schadstoffemissionen zu erreichen.

2.3.4 Vollständige und unvollständige Verbrennung

Eine stöchiometrische Verbrennung mit vollständiger Umsetzung eines Kohlenwasserstoffs $C_xH_yO_z$ wird laut [14] mit der chemischen Reaktionsgleichung (2-2) beschrieben. Die Produkte der Reaktion sind Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2).



Der erforderliche Sauerstoffbedarf für diese Reaktion beträgt somit nach Gleichung (2-3):

$$O_{2st} = \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol Brennstoff}} \quad (2-3)$$

Das Verhältnis der Zusammensetzung der Luft beträgt gemäß Gleichung (2-4) [5]:

$$\frac{N_2}{O_2} = \frac{0.79}{0.21} \quad (2-4)$$

Somit ergibt sich aus der Zusammensetzung der Luft und dem stöchiometrischen Sauerstoffbedarf der stöchiometrische Luftbedarf mit Gleichung (2-5):

$$L_{st} = \frac{1}{0.21} * O_{2st} = 4.76 * \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \frac{\text{kmol Luft}}{\text{kmol Brennstoff}} \quad (2-5)$$

Im realen Betrieb weicht die tatsächlich zugeführte Luftmenge von der stöchiometrischen Luftmenge ab und es bedarf der Einführung einer neuen Variable, die diese Abweichung beschreibt. Diese Abweichung wird mit dem Luftverhältnis λ beschrieben. Diese gibt das Verhältnis von der tatsächlich zugeführten Luftmenge zur erforderlichen stöchiometrischen Luftmenge nach Gleichung (2-6) an:

$$\lambda = \frac{L}{L_{st}} \quad (2-6)$$

Ein Luftverhältnis $\lambda < 1$ wird umgangssprachlich als fettes Gemisch bezeichnet und bedeutet, dass nicht genügend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung zur Verfügung steht.

Bei $\lambda > 1$ ist von einem mageren Gemisch die Rede und es wird umgangssprachlich auch von einer Verbrennung mit Luftüberschuss gesprochen. Bei Erdgasmotoren wird ein $\lambda = 0.996$ angestrebt, da hier die Abgasmachbehandlung am besten funktioniert. Näheres hierzu wird im Unterkapitel 2.3.6.2 erklärt. Bei einer nicht stöchiometrischen Verbrennung, können bei der Reaktion noch weitere Reaktionsprodukte wie Kohlenmonoxid, Stickoxide, Partikel oder Kohlenwasserstoffe gebildet werden. Diese Schadstoffe sind zumeist schädlich und aufgrund dessen auch begrenzt.

2.3.5 Schadstoffe

In diesem Kapitel werden die Entstehung sowie die Wirkungen der Reaktionsprodukte auf die Umwelt sowie auf die Gesundheit der Menschen nach [5], [15] und [16] näher erklärt. Es bedarf einer Einteilung in Produkte der vollständigen und Produkte der unvollständigen Verbrennung.

2.3.5.1 Produkte der vollständigen Verbrennung

Kohlendioxid (CO₂)

Bei Kohlendioxid handelt es sich gemäß [15] um ein erwünschtes Produkt der vollständigen Verbrennung. Es handelt sich dabei um ein geruch- und farbloses sowie ungiftiges Gas. Die größten Anteile an der CO₂-Entstehung sind der Veratmung und Verrottung zuzuschreiben. Hinsichtlich der Umwelt spielt CO₂ eine große Rolle, da seit der Industrialisierung eine starke Zunahme der CO₂-Emissionen in der Atmosphäre zu beobachten ist. Kohlendioxid wird als das maßgebende Treibhausgas eingestuft.

Wasser (H₂O)

Hierbei handelt es sich um kein schädliches Produkt. Es tritt zumeist in gleicher Konzentration wie CO₂ auf. Die Entstehung des Wassers ist auf die Verbrennung des chemisch gebundenen Wasserstoffes mit dem Sauerstoff aus der Luft zurückzuführen. [5]

Stickstoff (N₂)

Ist die Hauptkomponente im Abgas wird jedoch nicht gemessen und ist nicht schädlich. Der Anteil des Stickstoffs in der Luft beträgt circa 79 %. Bei der Verbrennung nimmt der Stickstoff im Wesentlichen nicht teil. [5]

Sauerstoff (O₂)

Ist nur bei der Verbrennung mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) im Abgas vorhanden. [5]

2.3.5.2 Produkte der unvollständigen Verbrennung

Kohlenmonoxid (CO)

In Anlehnung an [14] und [15] entsteht Kohlenmonoxid zumeist bei unvollständiger Verbrennung mit Luftmangel, aber auch in der Atmosphäre bei der Methanoxidation. Es handelt sich bei CO ebenso um ein farb- und geruchloses Gas. Es ist jedoch hochgiftig, da es eine starke Affinität zum Bluthämoglobin besitzt. Dies bedeutet, dass das CO die Bindungsplätze für den Sauerstoff im Hämoglobin belegt. Dies kann zu Sauerstoffmangel bis hin zum Erstickten führen. Aufgrund dessen ist der CO-Ausstoß in der Abgasgesetzgebung limitiert. Seit der Einführung von Oxidationskatalysatoren beim Dieselmotor sowie Dreiwegkatalysatoren bei Benzin- und Gasmotoren stellt das Kohlenmonoxid im Wesentlichen keine Probleme mehr dar.

Kohlenwasserstoffe (HC)

Hierbei sind vor allem THC (Total Hydrocarbons) und NMHC (Non Methane Hydrocarbons) relevant. Unter THC sind alle Kohlenwasserstoffverbindungen zusammengefasst. Hingegen sind als NMHC jene Kohlenwasserstoffverbindungen definiert, in denen Methan nicht berücksichtigt ist. Dies hat vor allem den Vorteil Gasmotoren mit anderen Motoren vergleichen

zu können. Gemäß [14] und [15] entstehen HC-Emissionen gleich wie CO bei unvollständiger Verbrennung oder bei Zündaussetzern. Das bedeutet wiederum, dass nicht ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht, um eine vollständige Verbrennung zu erreichen. Während einer Verbrennung werden bis zu 1000 verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen emittiert. Diese beinhalten für den Menschen nicht schädliche (zum Beispiel Methan) aber auch krebserregende Stoffe (zum Beispiel Benzol). Des Weiteren sind Kohlenwasserstoffe in Verbindung mit CO und den später beschriebenen Stickoxiden für die Bildung von Ozon, das umgangssprachlich auch als Sommersmog bezeichnet wird, verantwortlich. Somit bedarf es auch einer Begrenzung dieses Schadstoffes. Die Abgasnachbehandlung erfolgt durch Oxidation im Dreiwegekatalysator bei Benzin- und CNG-Fahrzeugen, sowie im Oxidationskatalysator beim Dieselmotor.

Stickoxide (NO_x)

Gemäß [14] und [15] entstehen Stickoxide im Gegensatz zu CO und HC bei der Verbrennung mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) und bei hohen Temperaturen. Als Stickoxide NO_x werden grundsätzlich NO (Stickstoffmonoxid) sowie NO₂ (Stickstoffdioxid) zusammengefasst. In der innermotorischen Verbrennung wird überwiegend NO produziert, das später unter Einwirkung von UV-Licht (Sonnenstrahlung) in der Atmosphäre zu NO₂ oxidiert. Es handelt sich bei NO um ein geruch- und farbloses Gas, das aber als Atem- und Reizgift eingestuft wird. Bei NO₂ handelt es sich um hochgiftiges Reizgas, das aufgrund geringer Wasserlöslichkeit tief in die Lunge eindringen kann. In weiterer Folge kann es zu Beeinflussungen der Lungenfunktion, geringerer Infektionsresistenz oder zu lebensbedrohlichen Lungenödem kommen. Hinsichtlich Umwelt tragen die NO_x-Emissionen in Kombination mit den HC-Emissionen und dem Kohlenmonoxid, wie bereits erwähnt, zur Ozonbildung bei. Aufgrund der gesundheitlichen als auch umweltbelasteten Auswirkungen werden die Stickoxide in der Abgasgesetzgebung begrenzt. Die Abgasnachbehandlung erfolgt beim CNG- und Benzinmotor wiederum mittels Dreiwegekatalysator, wobei hierbei eine chemische Reduktion der Schadstoffe erfolgt. Beim Dieselmotor hingegen sind komplexere Systeme wie das SCR-System (Selective Catalytic Reduction) oder der NO_x-Speicherkatalysator (NSK) im Einsatz.

Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefel ist gegenwärtig in Kraftstoffen nur in geringen Anteilen vorhanden. Es ist ein unerwünschtes Nebenprodukt, das in kleinen Mengen bei der Kraftstoffaufbereitung und im Kraftstofftransport auftritt und somit im Kraftstoff enthalten bleibt. Im Laufe der Zeit konnte ein immer kleiner werdender Anteil im Kraftstoff erzielt werden, da dies vor allem für eine funktionsfähige Abgasnachbehandlung von Bedeutung ist. In Bezug auf die Umweltrelevanz ist Schwefeldioxid auch nicht zu vernachlässigen, da es in der Atmosphäre in schwefelhaltige Aerosole umgewandelt wird. [14], [15]

Partikel und Ruß

Weitere Schadstoffemissionen, deren Limit begrenzt ist, sind laut [14] und [15] Partikel- und Rußemissionen. Die innermotorische Entstehung von Ruß ist auf lokalen Luftmangel im Brennraum zurückzuführen. Lokal Zonen mit Luftmangel liegen durch eine geringe Homogenisierungsqualität des Gemischs im Brennraum vor. Vorwiegend kommt es bei Dieselmotoren aber auch bei Benzinmotoren mit Direkteinspritzung zur Rußbildung. Ruß besteht dabei aus reinem Kohlenstoff, wohingegen Partikel aus einem festen Kohlenstoffkern und einer Anreicherung von festen und flüssigen Stoffen bestehen. Diese Anreicherungen beinhalten Kohlenwasserstoffe, Schwefel- und Stickstoffverbindungen und Schmierölbestandteile. Ausschlaggebend für die Gesundheit der Menschen ist die Partikelgröße sowie die chemischen Bestandteile der Partikel. Partikeldurchmesser von $< 10 \mu\text{m}$ bzw. angelagerte Schwermetalle wie Blei oder Cadmium sind für den Menschen relevant. Die durchschnittliche Größe der Partikel, die Fahrzeugmotoren emittieren, liegen unter $1 \mu\text{m}$. Durch

diese geringe Größe ist es möglich, dass Partikel in die Lunge gelangen und entzündungsähnliche Zustände sowie gesundheitsschädliche Krankheiten hervorrufen. Aber auch die Umweltrelevanz ist bei Partikel nicht zu vernachlässigen, da sie in der Troposphäre als Kondensationskeime für Wasserdampf zur Verfügung stehen und somit die Luftchemie beeinflussen. Bei Ottomotoren und Gasmotoren mit Saugrohreinspritzung bzw. -einblasung kommt es aufgrund des homogenen Gemisches zu keiner großen Partikelbildung, weshalb diesbezüglich auch keine Abgasnachbehandlung nötig ist. Bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung sind bei der gegenwärtigen Abgasnorm EURO 6d-temp Partikelfilter integriert. Bei Dieselmotoren sind Partikelfilter bereits seit der Abgasnorm EURO 5 verbaut.

Nachfolgend wird die Abgasnachbehandlung von CNG-Fahrzeugen näher erklärt.

2.3.6 Abgasnachbehandlung

Immer komplexere Systeme und Sensoren werden in Fahrzeugen integriert, um die geforderten Grenzwerte einhalten zu können. Speziell bei Dieselmotoren stellt dies Fahrzeughersteller immer wieder vor große Herausforderungen, insbesondere bei der Reduktion von NO_x-Emissionen. Bei Ottomotoren und Erdgasmotoren im Automobilbereich vertraut man seit enormer Zeit dem Dreiwegekatalysator - in dieser Arbeit auch als Dreiwegekat bezeichnet. Mit diesem können zufriedenstellende Ergebnisse bei der Konvertierung der einzelnen Schadstoffe erreicht werden sowie die limitierten Grenzwerte der einzelnen Emissionen eingehalten werden.

2.3.6.1 Aufbau Dreiwegekatalysator

Nach [16] erfolgt die Einteilung der Katalysatoren in Vollkatalysatoren sowie katalytisch beschichtete Trägerkatalysatoren. Das Funktionsprinzip beider ist gleich, sie unterscheiden sich lediglich im Aufbau. Vollkatalysatoren, die des Öfteren bei SCR-Katalysatoren Anwendung finden, bestehen vollständig aus der aktiven Komponente. Hingegen sind Trägerkatalysatoren aus mehreren Komponenten aufgebaut, der in Abbildung 2-10 beispielhaft für einen Dreiwegekatalysator dargestellt ist.

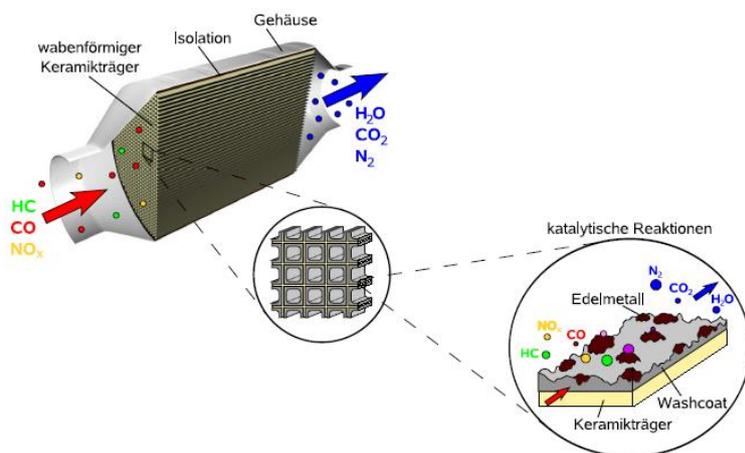


Abbildung 2-10: Aufbau eines Dreiwegekatalysators und Abbildung der katalytischen Reaktionen [17]

Nachfolgend sind die Komponenten beschrieben:

- Gehäuse (Canning)
Stellt die Aufnahme für den Katalysator dar.
- Trägerkörper (Keramik oder Metall)
Besteht aus einer stranggepressten Keramik oder aus gewickeltem/gewelltem Stahlblech. Die Keramik oder das Stahlblech hat dabei eine wabenförmige Struktur, durch die das Abgas strömt. Die Zellenzahl wird in cpsi (cells per square inch) angegeben und kann bei Keramikträgern 900 und bei Metallträgern bis zu 1000 cpsi betragen. Mit steigendem cpsi steigt die Katalysatoroberfläche und somit die Zwischenschicht, die aufgebracht werden kann.
- Zwischenschicht (Washcoat)
Um die Oberfläche des Katalysators weiter zu vergrößern, erfolgt eine Beschichtung der Trägerkörper. Hierzu wird zumeist Aluminiumoxid (Al_2O_3), für Dreiwegekatalysatoren auch Ceriumoxid und Zirkoniumoxid herangezogen. Des Weiteren ist der Washcoat für die Speicherung von Sauerstoff sowie die Aufnahme von Edelmetallen verantwortlich.
- Edelmetalle
Diese sind für den Ablauf der katalytischen Reaktionen im Katalysator verantwortlich.

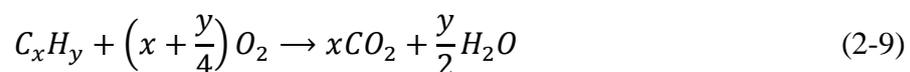
In Abbildung 2-10 sind des Weiteren die Schadstoffe, die in den Dreiwegekat eintreten und austreten dargestellt. Diese Abbildung soll die katalytischen Reaktionen zum besseren Verständnis zeigen. Im nächsten Kapitel erfolgt die genaue Erläuterung dieser Reaktionen und zudem wird das Funktionsprinzip des Dreiwegkats erklärt.

2.3.6.2 Funktionsprinzip

Die Wirksamkeit eines Katalysators wird gemäß [16] mit der Konvertierungsrate k beschrieben, die nach Gleichung (2-7) definiert ist. Sie gibt an, inwieweit sich die Konzentration einer Schadstoffkomponente durch die Beschleunigung der Reaktionen im Katalysator verringern lässt.

$$k = \frac{\text{Eingangskonzentration} - \text{Ausgangskonzentration}}{\text{Eingangskonzentration}} \quad (2-7)$$

Bei der Konvertierung im Dreiwegekat laufen verschiedene chemische Reaktionen ab. Vorab gilt, ein Katalysator beschleunigt chemische Reaktionen, ohne sich dabei selbst zu verändern. CO- und HC-Emissionen benötigen Sauerstoff, um durch Oxidation in CO_2 und H_2O umgewandelt zu werden. Stickoxide müssen Sauerstoff abgeben, weshalb diese Reaktion auch als Reduktion bezeichnet wird. Die Gleichungen (2-8) bis (2-10) zeigen die verschiedenen Reaktionen im Dreiwegekatalysator:



Bei einem Luftverhältnis $\lambda = 0,996$ können laut [16] mit dem Dreiwegekatalysator bei Erdgasmotoren Konvertierungsraten über 95 % für alle drei Schadstoffe erreicht werden. Dies ist in Abbildung 2-11 gut erkennbar. Des Weiteren ist ersichtlich, dass zufriedenstellende Konvertierungsraten nur in einem schmalen λ -Bereich möglich sind, der in der Abbildung schraffiert gekennzeichnet ist. Weiters zeigt die Abbildung, dass CO- und CH₄-Emissionen bei Luftmangel ($\lambda < 1$) nicht gut oxidiert werden können. Allerdings können in diesem Bereich die NO_x-Emissionen gut reduziert werden. Bei Luftüberschuss ($\lambda > 1$) können hingegen NO und NO₂ nicht effizient genug reduziert werden. Für den Oxidationsprozess von HC- und CO-Emissionen gibt es aufgrund des überschüssigen Sauerstoffs kein Problem.

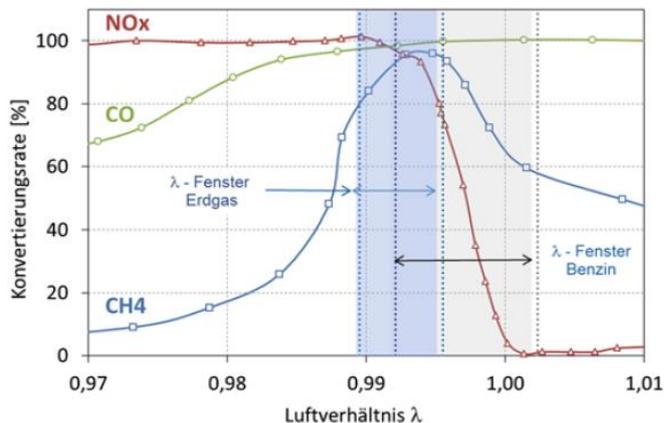


Abbildung 2-11: Konvertierungsrate (CH₄, NO_x und CO) über λ im Dreiwegekatalysator bei Erdgas und Benzin [2]

Im Dreiwegekat muss eine bestimmte Temperatur erreicht werden, damit die Reaktionen im Katalysator ablaufen können. Die Light-Off-Temperatur bezeichnet jene Temperatur, bei der die Schadstoffe bereits zu 50 % konvertiert werden können. Konvertierungsraten von über 95 % werden bei Erdgasmotoren ab einem Temperaturniveau von circa 500- 600 °C erreicht, was zugleich die Betriebstemperatur des Dreiwegekats ist. Weiters ist zu erwähnen, dass für die Abgasnachbehandlung eine genaue λ -Regelung erforderlich ist, um diese hohen Konvertierungsraten erzielen zu können. Die Regelung erfolgt durch λ -Sonden.

Obwohl sich bei Erdgasmotoren ein Vorteil hinsichtlich CO₂-Emissionen ergibt, stellt das Methan in der Abgasnachbehandlung ein großes Problem dar. In Anlehnung an [2] handelt es sich bei Methan um ein sehr reaktionsträges und stabiles Atom mit hoher Bindungsenergie, wodurch Schwierigkeiten im Aufbrechen dieser C-H-Verbindungen entstehen. Eine zufriedenstellende katalytische Umsetzung des Methans ist erst ab einer Temperatur von über 400 °C möglich, wobei Kohlenwasserstoffe des Benzins bereits ab circa 250 °C konvertiert werden können. Aufgrund des höheren Wasserstoffanteils bei der Verbrennung von Methan verschiebt sich die katalytische Umsetzung auf ein noch höheres Temperaturniveau von etwa 550 °C, wie in Abbildung 2-12 gezeigt. Aus der Abbildung lässt sich ableiten, dass vor allem CH₄-Emissionen bei Kaltstarts Probleme mit sich bringen.

Das Ziel bei Erdgasmotoren ist daher, ein schnelles Erreichen der Light-Off-Temperatur bzw. der Betriebstemperatur des Dreiwegekatalysators.

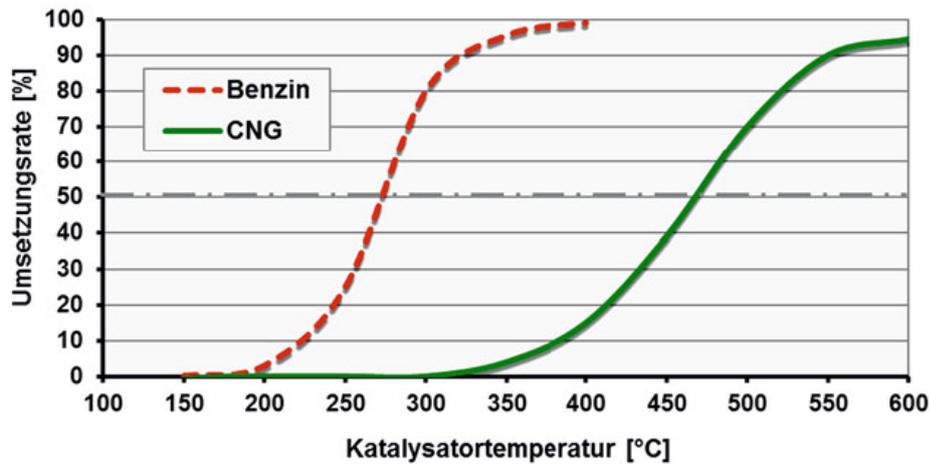


Abbildung 2-12: Umsetzungsrate von Kohlenwasserstoffen bei Benzin und bei CNG-Betrieb über der Temperatur am gleichen Katalysator [2]

Das bereits erwähnte höhere Verdichtungsverhältnis bei CNG-Motoren führt laut [2] zu einem höheren Wirkungsgrad aber auch zu einer Absenkung der Abgastemperatur, wie in Abbildung 2-13 gezeigt wird. Da das höhere Verdichtungsverhältnis zu einer größeren Expansion führt, resultiert eine niedrigere Abgastemperatur. Hinsichtlich thermischer Beanspruchungen der Bauteile ergeben sich dadurch Vorteile. Nachteilig wirkt sich die geringe Abgastemperatur auf die Abgasnachbehandlung aus, da das reaktionsträge CH_4 hohe Abgastemperaturen benötigt, um vor allem bei Kaltstarts zufriedenstellend konvertiert zu werden. Außerdem ist zu erwähnen, dass gegenwärtig die Abgasturboaufladung ein fester Bestandteil von Ottomotoren ist. Diese führt in der Turbine durch die Entspannung des Abgases zu einem weiteren Absenken der Abgastemperatur.

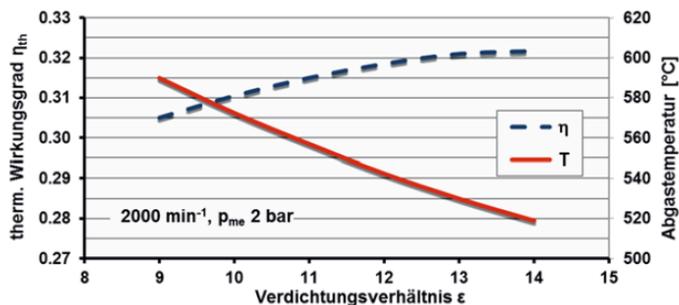


Abbildung 2-13: Wirkungsgrad und Abgastemperatur über das Verdichtungsverhältnis bei CNG-Fahrzeugen [2]

Ein weiterer Nachteil bei der Verbrennung von CH_4 gegenüber der Verbrennung von Benzin ist die geringere Emittierung von CO, die auf das C/H-Verhältnis von Erdgas zurückzuführen ist. Das führt bei der Abgasnachbehandlung von NO_x -Emissionen zu Nachteilen, da weniger CO für die Reduktion von Stickoxiden zur Verfügung steht. Aufgrund dessen haben laut [2] Untersuchungen gezeigt, dass beim CNG-Betrieb für die optimale Abgasnachbehandlung der Motor mit einem λ von 0,996 betrieben werden soll. Bei einer Konstantfahrt mit der Geschwindigkeit von 90 km/h ergeben sich dabei Emissionskonzentrationen laut Abbildung 2-14. Diese werden in der folgenden Abbildung als Reinemissionen bezeichnet.

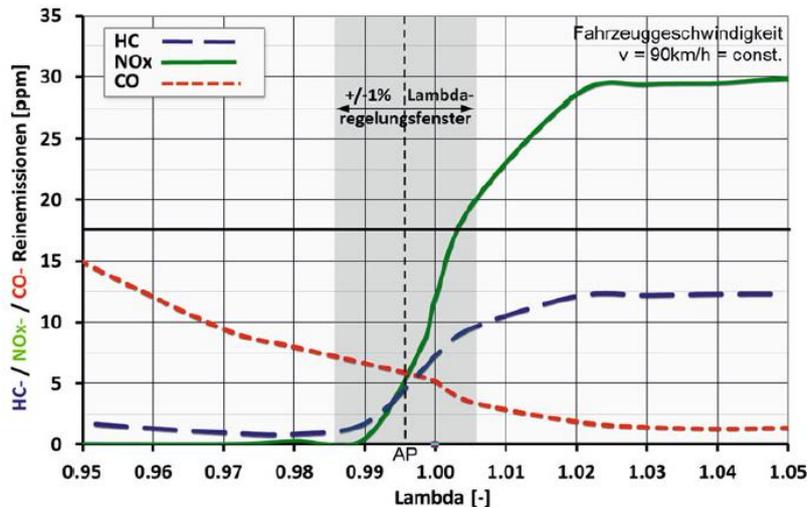


Abbildung 2-14: Optimaler Arbeitspunkt der λ -Regelung und Konzentrationen der Schadstoffe bei CNG-Fahrzeugen [2]

Um den oben erwähnten Nachteilen des CNG-Betriebs entgegenzuwirken, behelfen sich Fahrzeughersteller damit, das Fahrzeug mit Benzin zu starten. Die dabei entstehenden HC-Emissionen benötigen eine nicht so hohe Light-Off-Temperatur wie das bei der Verbrennung von Erdgas vorliegende Methan. Somit können diese HC-Emissionen bereits bei geringeren Temperaturniveaus zufriedenstellend konvertiert werden. Das Einhalten der Grenzwerte der einzelnen Schadstoffemissionen im NEDC (New European Driving Cycle) ist mit Benzinbetrieb im Kaltstart einfacher möglich. Zu beachten ist jedoch, dass im Fahrzyklus NEDC der Betrieb mit Benzin mit 60 Sekunden limitiert ist. Des Weiteren behelfen sich Motorenhersteller mit höheren Edelmetallbeladungen von Palladium oder Platin im Dreiwegekatalysator, um vor allem bei monovalenten Motorenausführungen das höhere Temperaturniveau zur Konvertierung des Methans kompensieren zu können. Auch die Positionierung des Katalysators ist für ein schnelles Erreichen der Light-Off-Temperatur entscheidend. Vorteile ergeben sich dabei mit einer motornahen Anordnung.

2.3.7 Abgasgesetzgebung

Die Abgasgesetzgebung für PKWs wurde nach [18] zu Beginn der 1970 Jahre in Europa eingeführt. Hierbei wurden die Schadstoffemissionen CO und THC limitiert. Weitere Verschärfungen führten dazu, dass folglich auch Stickoxide sowie Partikelemissionen begrenzt wurden. Die Einführung der ersten EURO Klasse (EURO 1) erfolgte im Jahr 1992, wobei zur Typengenehmigung neuer Fahrzeuge der Testzyklus NEDC eingeführt wurde. Im Laufe der Zeit wurden die Grenzwerte der einzelnen Schadstoffkomponenten für die Typengenehmigung immer weiter herabgesetzt. Der Prüfzyklus NEDC blieb aber bis zur EURO 6b bzw. 6c aufrecht. Da dieser Prüfzyklus die realen Fahrbedingungen nicht zufriedenstellend wiedergibt, wurde beschlossen, eine neue Verordnung einzuführen. Aus [20] folgt, dass diese Richtlinie seit 1. September 2017 für die Typprüfung aller neu zugelassenen Fahrzeuge gilt, wobei Fahrzeuge dabei mit der Klasse EURO 6d-temp klassifiziert werden. Des Weiteren gilt mit dieser Verordnung auch der neue Typprüfzyklus WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle). Zusätzlich werden für die Typisierung der Fahrzeuge nach EURO 6d-temp RDE-Messungen (RDE= Real Driving Emissions) durchgeführt. Diese sollen schlussendlich das Fahrverhalten der Fahrzeuge auf der Straße realitätsnäher wiedergeben.

Da im Rahmen dieser Arbeit nur Fahrzeuge der Klasse EURO 5 und EURO 6b vermessen wurden, liegt das Augenmerk in der Betrachtung dieser beiden Abgasklassen. Die damit verbundenen Grenzwerte sind in Tabelle 2-4 dargestellt. Laut [19] werden Grenzwerte in fremdzündende und selbstzündende Motoren eingeteilt. Da es sich bei CNG-Motoren um fremdzündende Motoren handelt, gelten die Grenzwerte für fremdzündende Motoren.

Tabelle 2-4: Grenzwerte der einzelnen Schadstoffkomponenten nach [19] und [20] für fremdzündende Motoren

	Einheit	EURO 5a	EURO 5b	EURO 6b	EURO 6c	EURO 6d-temp	EURO 6d
Testzyklus/Prüfverfahren		NEDC			WLTC/NEDC	WLTC/RDE	
THC	mg/km	100	100	100	100	100	100
NMHC	mg/km	68	68	68	68	68	68
CO	mg/km	1000	1000	1000	1000	1000	1000
NO _x	mg/km	60	60	60	60	60	60
PM	mg/km	5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
PN	#/km	-	-	6*10 ¹¹	6*10 ¹¹	6*10 ¹¹	6*10 ¹¹

In Anlehnung an [19] gilt für die in der Masterarbeit behandelten Fahrzeuge die Prüfung Typ 1 lt. Absatz 5.3.1 der UN/ECE-Regelung Nr. 83. Es wird entnommen, dass es sich dabei um die Emissionsmessung im Prüfzyklus NEDC handelt.

3 Messtechnische Untersuchungen mit Ergebnissen

Dieses praktisch bezogene Kapitel beschäftigt sich zu Beginn mit dem Messprogramm und den Testzyklen sowie mit den technischen Daten der einzelnen Versuchsfahrzeuge, die im Rahmen dieser Arbeit vermessen wurden. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Messaufbaus auf dem Rollenprüfstand und der CVS-Anlage. Weiters wird eine Auswertung der zeitaufgelösten Messdaten durchgeführt, um etwaige Messfehler oder Auffälligkeiten zu detektieren. Diese Messdaten sind auch die Basis für die später beschriebene Simulation.

3.1 Messprogramm

In Tabelle 3-1 ist das Messprogramm für die Versuchsfahrzeuge gezeigt. Die Zusammenstellung des Messprogramms war nicht Bestandteil dieser Arbeit und wurde bereits vor dieser Arbeit vom IVT in Abstimmung mit dem Auftraggeber durchgeführt.

Tabelle 3-1: Messprogramm aller CNG-Fahrzeuge

Zyklus	Warm-/Kaltstart	Prüfraumtemperatur
NEDC	Warmstart	25 °C
NEDC	Kaltstart	25 °C
ERMES	Warmstart	25 °C
IUFC	Warmstart	25 °C
IUFC	Kaltstart	-7 °C
ERMES	Warmstart	-7 °C
IUFC	Warmstart	-7 °C

3.2 Vermessene Fahrzyklen

Im Folgenden werden die Testzyklen NEDC, WLTC, ERMES und IUFC näher erklärt.

3.2.1 NEDC

Beim NEDC handelt es sich um einen im Jahr 1992 eingeführten Prüfzyklus, der für die Typprüfung herangezogen wurde. Die genormte Dauer von 1180 Sekunden setzt sich aus einem Stadtteil von 780 Sekunden und einem darauffolgenden Überlandteil mit einer Länge von 400 Sekunden zusammen. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des Zyklus beträgt 33.6 km/h, die Länge 11.07 km. In Abbildung 3-1 ist das Geschwindigkeitsprofil des NEDC über die Zeit grafisch dargestellt. [20]

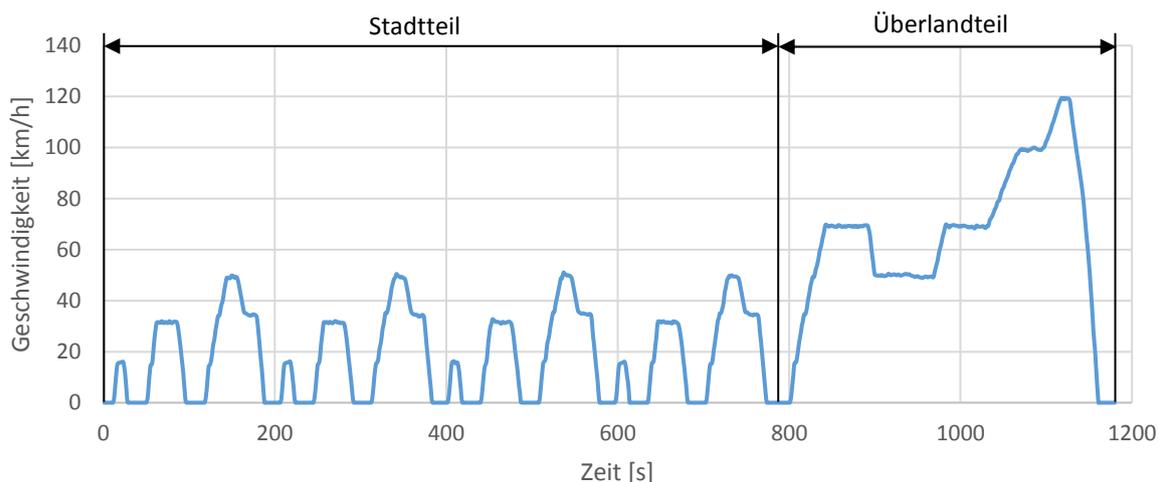


Abbildung 3-1: Testzyklus NEDC

3.2.2 WLTC

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der neue Testzyklus WLTC noch nicht vermessen, allerdings soll dieser hier vollständigshalber kurz beschrieben werden. Der seit September gültige WLTC stellt ein wesentlich dynamischeres Geschwindigkeitsprofil als der NEDC dar. Der WLTC ist für drei Klassen verfügbar, die an das Leistungsgewicht der Fahrzeuge angepasst sind. Die Dauer und Distanz des Zyklus richtet sich nach der jeweiligen Klasse. Wie in der folgenden Abbildung 3-2 ersichtlich, besteht bei der gängigsten Klasse drei das Geschwindigkeitsprofil aus vier verschiedenen Phasen. Bei Klasse drei wird im Prüfzyklus dabei eine Strecke von 23.262 km in einer Zeit von 1800 Sekunden zurückgelegt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beim WLTC beträgt 46.5 km/h und ist somit deutlich höher als beim NEDC. [21]

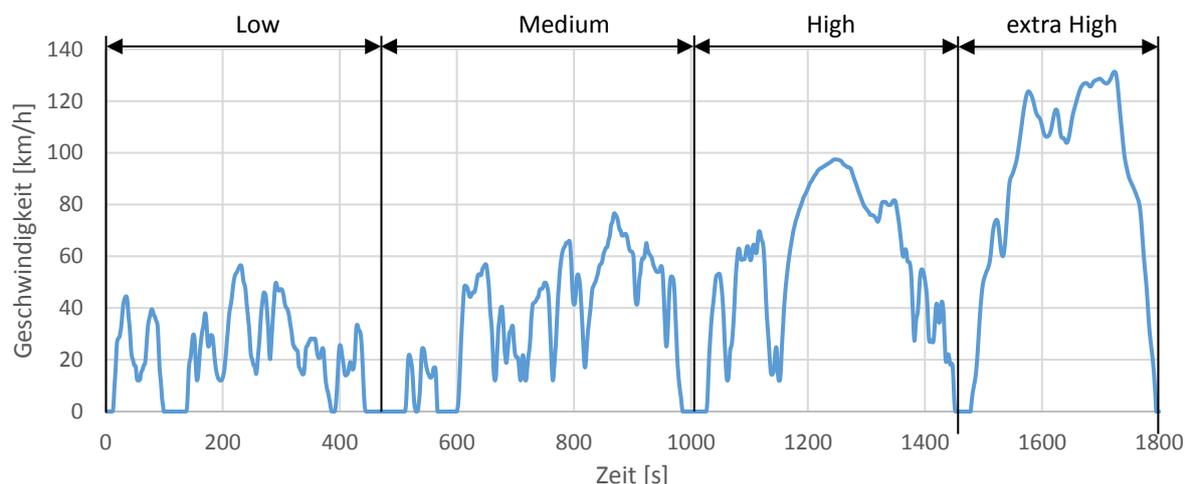


Abbildung 3-2: Testzyklus WLTC Klasse drei

3.2.3 ERMES V7 und V8

Ein weiterer Zyklus, der im Rahmen dieser Arbeit vermessen wurde, ist der ERMES-Zyklus (ERMES= European Research for Mobile Emission Sources). Beim ERMES handelt es sich um einen wesentlich dynamischeren Zyklus als beim NEDC, der das reale Fahrverhalten auf der Straße besser repräsentiert. V7 und V8 kennzeichnen dabei die Version des ERMES-Zyklus, wobei sich die beiden anhand längerer Leerlaufzeiten des aktuelleren V8 Zyklus differenzieren. Das Geschwindigkeitsprofil ist in Abbildung 3-3 veranschaulicht. [22]

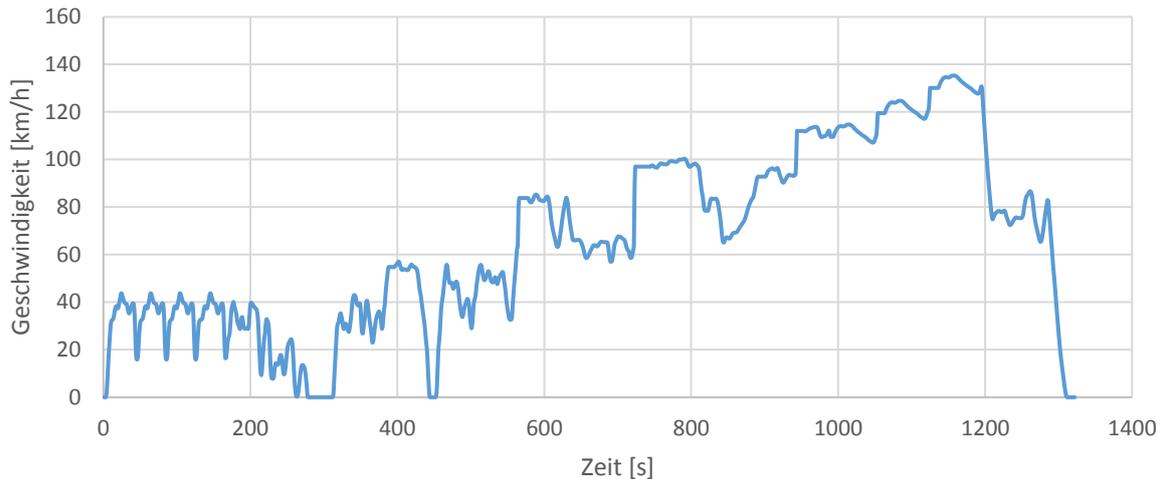


Abbildung 3-3: Testzyklus ERMES V8

3.2.4 IUFC

Beim IUFC-Zyklus (Inrets Urban Fluide Court [22]) handelt es sich um eine 10-malige Aneinanderreihung eines Geschwindigkeitsprofils. Ein solches Geschwindigkeitsprofil wird als Mikrozyklus bezeichnet und weist eine Dauer von 190 Sekunden auf. Das Geschwindigkeitsprofil ist in Abbildung 3-4 ersichtlich, die Zahlen 1 bis 10 kennzeichnen die einzelnen Mikrozyklen. Im Rahmen dieser Arbeit dient dieser Zyklus zur Bestimmung von Kaltstartzusatzemissionen.

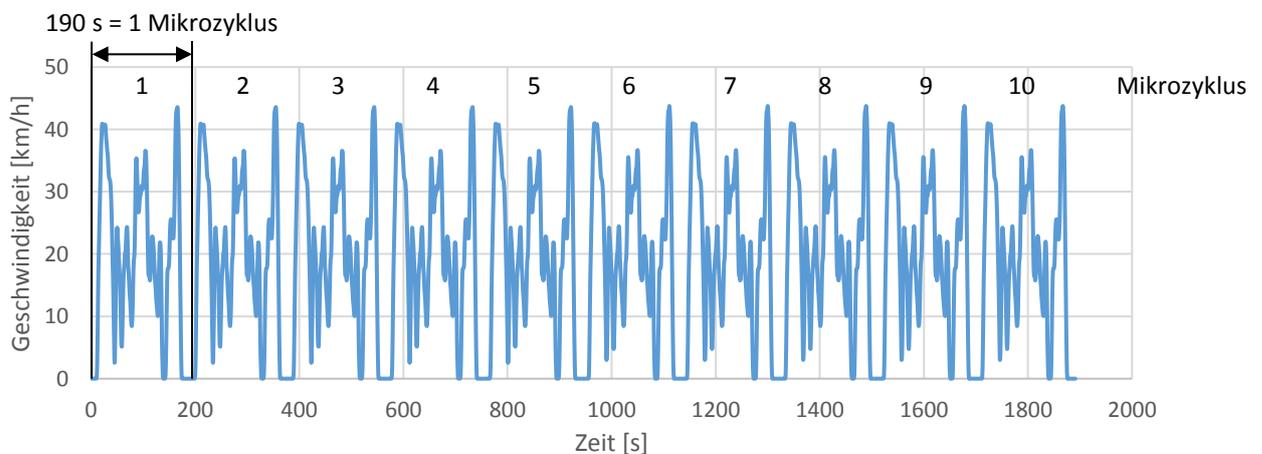


Abbildung 3-4: Testzyklus IUFC

3.1 HBEFA-Handbook Emission Factors for Road Transport

Die beiden letzten beschriebenen Fahrzyklen ERMES und IUFC sind vor allem Testzyklen, die im Rahmen vom HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) als Simulationsinput vermessen werden. Bei HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) handelt es sich um Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr für alle bestehenden Fahrzeugkategorien. Die Emissionsfaktoren werden simulativ mit repräsentativen Straßenzyklen, die Stadt, Land und Autobahn abbilden, ermittelt. Das Handbuch bzw. dessen Zyklen werden erwähnt, da auch die im Rahmen dieser Arbeit vermessenen CNG-Fahrzeuge im HBEFA Update 4.1 einfließen werden. [22]

3.2 Versuchsfahrzeuge

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Fahrzeuge vermessen, wobei zwei der vermessenen Fahrzeuge nach EURO 5 und eines der Fahrzeuge nach EURO 6b klassifiziert sind. Im Zuge der Bachelorarbeit „Messung und Simulation von CNG-Fahrzeugen für HBEFA“ [24] wurden zwei weitere Erdgasfahrzeuge vermessen, deren Messdaten für die spätere Erstellung des Durchschnittsfahrzeugs und –kennfelds, sowie für die Kaltstartzusatzemissionen herangezogen wurden. Alle am Institut vermessenen Fahrzeuge sind in Tabelle 3-2 aufgelistet, wobei die fett markierten Fahrzeuge jene sind, die im Zuge dieser Arbeit vermessen wurden.

Tabelle 3-2: Vermessene EURO 5- und EURO 6-CNG-Fahrzeuge

Fahrzeug	Abgasnorm
Opel Zafira Family 1.6 CNG Turbo ecoFlex (im Weiteren als Opel Zafira oder Opel geführt)	EURO 5
VW eco Up! 1.0 MPI (im Weiteren als VW-EcoUp geführt)	EURO 5
VW Caddy 2.0 EcoFuel (im Weiteren als VW-Caddy geführt)	EURO 5
Fiat Doblo 1.4 T-Jet 16V Natural Power (im Weiteren als Fiat Doblo geführt)	EURO 6b
Audi A3 Sportback g-tron 1.4 TFSI S tronic (im Weiteren als Audi A3 g-tron geführt)	EURO 6b

In den folgenden Tabellen sind die technischen Daten der Fahrzeuge Opel Zafira, VW-Caddy und Fiat Doblo dargestellt. Die technischen Daten der Fahrzeuge Audi A3 g-tron und VW-EcoUp wurden aus der vorhin erwähnten Bachelorarbeit entnommen und sind im Anhang auf Seite 100 und 101 aufgelistet.

3.2.1 Opel Zafira

Tabelle 3-3: Fahrzeugdaten Opel Zafira [23]

Motor	Einheit	Wert
Motorbauart	-	Reihen-Vierzylinder-Ottomotor
Motorbezeichnung	-	Opel A16XNT
Hubraum	cm ³	1598
Verdichtung	-	10.5:1
Einspritzung	-	Multipointinjection (MPI)
Aufladung	-	Abgasturboaufladung
Nennleistung	kW	110
Maximales Drehmoment	Nm	210 bei 2300 U/min
Nenn Drehzahl	U/min	5000
Leerlaufdrehzahl	U/min	780
Abgasnachbehandlung	-	Dreiwegekatalysator
Antrieb/ Kraftübertragung		
Antriebsart	-	Frontantrieb
Getriebeart	-	6-Gang manuelles Schaltgetriebe
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5/6	-	3.818/2.053/1.3022/0.959/0.744/0.614
Achsübersetzung	-	4.18
Bereifung (bei Messungen)	-	205/55 R16
Masse		
DIN-Leermasse	kg	1660
Karosserie/Abmessungen		
Luftwiderstandbeiwert c_w	-	0.31
Stirnfläche A	m ²	2.46
Weitere Fahrzeugdaten		
Tankinhalt CNG/Benzin	kg/l	31/14
Tachostand bei Testbeginn	km	31000
Erstzulassung	-	2012
EG-Genehmigungsdatum (aus Zul.)	-	21.03.2012

3.2.2 VW-Caddy

Tabelle 3-4: Fahrzeugdaten VW-Caddy [25], [26]und [27]

Motor	Einheit	Wert
Motorbauart	-	Reihen-Vierzylinder-Ottomotor
Motorkennzeichnung	-	BSX
Hubraum	cm ³	1984
Verdichtung	-	13.5:1
Einspritzung	-	Multipointinjection (MPI)
Aufladung	-	nein
Nennleistung	kW	80
Maximales Drehmoment	Nm	160 bei 3500 U/min
Nenndrehzahl	U/min	5400
Leerlaufdrehzahl	U/min	800
Abgasnachbehandlung	-	Dreiwegekatalysator
Antrieb/ Kraftübertragung		
Antriebsart	-	Frontantrieb
Getriebeart	-	5-Gang manuelles Schaltgetriebe
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5	-	3.4545/1.955/1.281/0.9262/0.74
Achsübersetzung	-	4.9286
Bereifung (bei Messungen)	-	195/65 R15
Masse		
DIN-Leermasse	kg	1553
Karosserie/Abmessungen		
Luftwiderstandbeiwert c_w	-	0.4
Stirnfläche A	m ²	2.83
Weitere Fahrzeugdaten		
Tankinhalt CNG/Benzin	kg/l	26/13
Tachostand bei Testbeginn	km	61000
Erstzulassung	-	2011
EG-Genehmigungsdatum (aus Zul.)	-	11.05.2011

3.2.3 Fiat Doblo

Tabelle 3-5 Fahrzeugdaten Fiat Doblo [23] und [28]

Motor	Einheit	Wert
Motorbauart	-	Reihen-Vierzylinder-Ottomotor
Hubraum	cm ³	1368
Verdichtung	-	9.8:1
Einspritzung	-	Multipointinjection (MPI)
Aufladung	-	Abgasturboaufladung
Nennleistung	kW	88
Maximales Drehmoment	Nm	200 bei 1500 U/min
Nenndrehzahl	U/min	5000
Leerlaufdrehzahl	U/min	800
Abgasnachbehandlung	-	Dreiwegekatalysator
Antrieb/ Kraftübertragung		
Antriebsart	-	Frontantrieb
Getriebeart	-	6-Gang manuelles Schaltgetriebe
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5/6	-	4.154/2.118/1.484/1.116/0.897/0.767
Achsübersetzung	-	4.118
Bereifung (bei Messungen)	-	195/60 R16
Masse		
DIN-Leermasse	kg	1450
Karosserie/Abmessungen		
Luftwiderstandbeiwert c_w	-	0.31
Stirnfläche A	m ²	2.81
Weitere Fahrzeugdaten		
Tankinhalt CNG/Benzin	kg/l	16.15/22
Tachostand bei Testbeginn	km	100
Erstzulassung	-	2015
EG-Genehmigungsdatum (aus Zul.)	-	xx.xx.2015

Von den drei vermessenen Fahrzeugen gelten nach Kapitel 2.3.2 die beiden EURO 5-Fahrzeuge als monovalente Ausführungen, da sie einen Benzintank kleiner als 15 Liter mit sich führen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der EURO 6-Klassifizierung um eine bivalente Ausführung. Alle erwähnten Fahrzeuge wurden am PKW-Rollenprüfstand vermessen.

3.3 PKW-Rollenprüfstand und CVS-Anlage

Die Aufgabe eines Rollenprüfstandes mit CVS-Anlage (CVS= Constant Volume Sampling) besteht darin, vergleichbare und reproduzierbare Fahrzeugmessungen durchführen zu können. Die CVS-Anlage hat die Aufgabe, zusammen mit der Messeinrichtung die Schadstoffemissionen für einen Testzyklus zu bestimmen. In den folgenden Kapiteln wird der Aufbau des Rollenprüfstandes sowie der CVS-Anlage mit Messeinrichtung kurz erklärt.

3.3.1 PKW-Rollenprüfstand

Am PKW-Rollenprüfstand wird das Fahrzeug aufgebaut und das Auspuffende mit der Messeinrichtung verbunden. Der Rollenaufbau kann aus zwei Rollen oder einer Rolle bestehen, wobei das Fahrzeug bei zwei Rollen zwischen dem Rollenpaar und bei einer Rolle genau am Scheitelpunkt aufgespannt wird. Die Rolle hat dabei die Aufgabe, die Fahrwiderstände und Massenträgheiten zu simulieren. Der PKW-Rollenprüfstand am IVT verfügt über ein Rollenpaar, wobei eine Rolle mittels einem Gleichstrommotor angetrieben bzw. gebremst wird. Durch ein Fahrerleitgerät wird der Soll-Geschwindigkeitsverlauf dem Prüfstandsfahrer vorgegeben. Der schematische Aufbau des Prüfstands ist in Abbildung 3-5 dargestellt. [15]

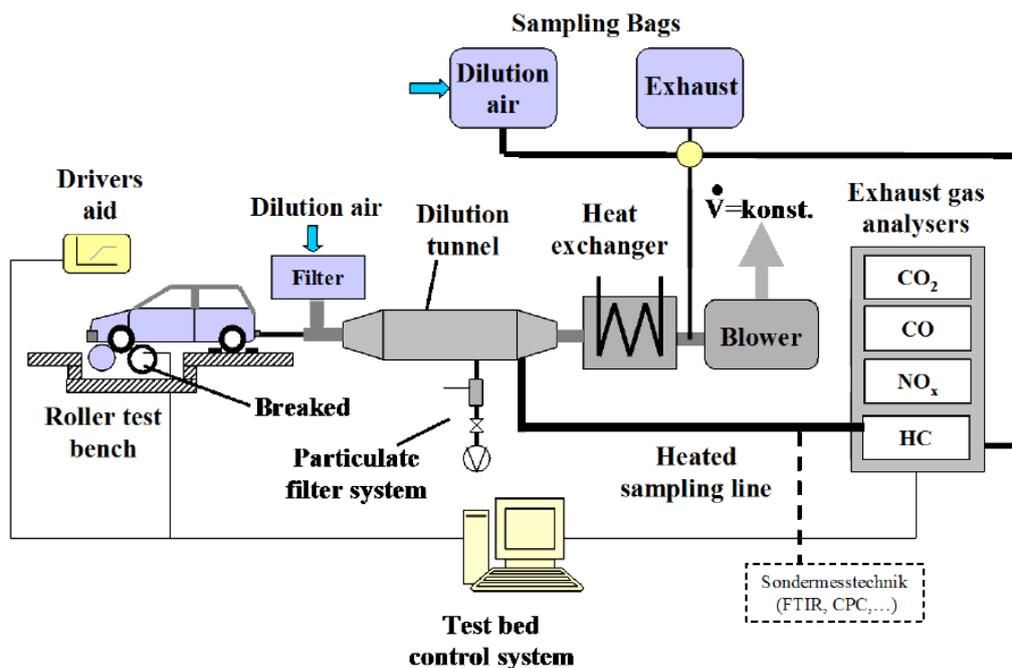


Abbildung 3-5: Aufbau PKW-Rollenprüfstand und CVS-Anlage [15]

Die erforderliche Antriebsleistung P , die vom Fahrzeug überwunden werden muss, ergibt sich aus [15] mit folgender Gleichung (3-1).

$$P = P_{\text{Roll}} + P_{\text{Luft}} + P_a + P_{\text{Steigung}} + P_{\text{Schlupf}} + P_{\text{Getriebe}} + P_{\text{Nebenaggregate}} \quad (3-1)$$

P_{Roll}	.....	Leistung zur Überwindung des Rollwiderstands [W]
P_{Luft}	.....	Leistung zur Überwindung des Luftwiderstands [W]
P_a	.....	Beschleunigungsleistung [W]
$P_{Steigung}$	.....	Leistung zur Überwindung des Steigungswiderstands [W]
$P_{Schlupf}$	.....	Verlustleistung durch Reifenschlupf [W]
$P_{Getriebe}$	.....	Getriebeverlustleistung [W]
$P_{Nebenaggregate}$	.....	Leistungsbedarf Nebenaggregate [W]

$P_{Schlupf}$, $P_{Getriebe}$ und $P_{Nebenaggregate}$ müssen dabei nicht vom Prüfstand aufgebracht werden. Die Simulation des Beschleunigungswiderstandes P_a wird am IVT-PKW-Rollenprüfstand durch Schwungmassen nachgebildet.

Der Roll- und Luftwiderstand wird von der Gleichstrommaschine simuliert. Die Leistung zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstands sind laut [15] nach Gleichung (3-2) und Gleichung (3-3) wie folgt definiert:

Rollwiderstand

$$P_{Roll} = m * g * (Fr_0 + Fr_1 * v + Fr_4 * v^4) * v \quad (3-2)$$

m	.....	Masse von Fahrzeug und Beladung [kg]
g	.....	Erdbeschleunigung [m/s^2]
Fr_0	.....	Rollwiderstandskoeffizient (aus Ausrollversuch) [-]
Fr_1	.....	Rollwiderstandskoeffizient (aus Ausrollversuch) [s/m]
Fr_4	.....	Rollwiderstandskoeffizient (aus Ausrollversuch) [s^4/m^4]
v	.....	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

Luftwiderstand

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

c_w	.....	Luftwiderstandsbeiwert [-]
$A_{Querschnitt}$	.....	Querschnittsfläche des Fahrzeugs [m^2]
ρ	.....	Dichte der Luft [kg/m^3]

3.3.2 Prüfstandseinstellungen

Im Rahmen dieser Arbeit waren für alle Fahrzeuge die Prüfstandseinstellungen, also Fahrwiderstände sowie Testmassen, bereits vorgegeben. Die Prüfstandseinstellungen unterschieden sich sowohl für die Fahrzeuge als auch für die Testzyklen. Dabei wurden auf der Rolle im NEDC NEDC-Fahrwiderstände und im IUFC und ERMES RWC-Fahrwiderstände (RWC= Real World Cycle) eingestellt. Bei den Fahrwiderständen handelt es sich um Defaultwerte, die auf Reifenlabels basieren. In Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7 sind die fahrzeugspezifischen Prüfstandseinstellungen sowie die einzelnen Schwungmassen für NEDC sowie für IUFC und ERMES aufgelistet:

Tabelle 3-6: Prüfstandseinstellungen für die vermessenen Fahrzeuge im NEDC

	Testmasse [kg]	Äquivalente Schwungmasse [kg]	R ₀ [N]	R ₁ [Ns/m]	R ₂ [Ns ² /m ²]
Opel Zafira	1760	1700	139.85	1.040	0.689
VW-Caddy	1653	1700	131.35	0.978	0.689
Fiat Doblo	1550	1590	123.16	0.917	0.419

Tabelle 3-7: Prüfstandseinstellungen für die vermessenen Fahrzeuge im ERMES und IUFC

	Testmasse [kg]	Äquivalente Schwungmasse [kg]	R ₀ [N]	R ₁ [Ns/m]	R ₂ [Ns ² /m ²]
Opel Zafira	1992	2040	200.23	1.490	0.723
VW-Caddy	1864	1810	187.33	1.394	0.723
Fiat Doblo	1740	1700	174.9	1.302	0.440

3.3.3 CVS-Anlage mit Messeinrichtung

Wie bereits erwähnt, erfolgt der Auspuff-Anschluss des Fahrzeugs an die CVS-Anlage. Das Abgas im CVS-Tunnel wird mit Umgebungsluft verdünnt. Dies hat den Vorteil, chemische Reaktionen und Wasserdampfkondensation im Abgas zu verhindern. Das Erreichen des konstanten Volumenstroms aus Abgas und Frischluft wird mithilfe von Venturi-Düsen gewährleistet. Anschließend werden Teilströme für die Emissionsmessung in Beuteln sowie für zeitaufgelöste Messdaten, Partikelmassenmessung und Partikelanzahlmessung entnommen. Da in der Verdünnungsluft auch bereits Emissionen vorhanden sind, müssen die ursprünglichen Messergebnisse noch entsprechend hintergrundkorrigiert werden. [15]

Folgende Messsysteme werden am IVT mit der CVS-Anlage verwendet:

- NDIR (nichtdispersive Infrarot-Analysator) für CO und CO₂
- FID (Flammenionisationsdetektor (FID) für C_mH_n)
- Chemoluminiszenzmessung für NO_x

- Gravimetrische Partikelmessung
- CPC (Condensation Particle Counter) für Partikelanzahlmessung

Die Analysatoren messen die einzelnen Konzentrationen der jeweiligen Schadstoffkomponenten in [ppm]. Außerdem sind die einzelnen Emissionen zeitverschoben und müssen nach der Messung zeitlich zugeordnet werden. Es bedarf somit einer Korrektur mittels Zeitverschiebung als auch einer Berechnung der Massenemissionen in [g/h] bzw. [g/km].

3.4 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der Messdaten wurde mit dem sogenannten ERMES-Tool vom IVT durchgeführt. Die Auswertung setzte sich aus den folgenden zwei Punkten zusammen:

- Auswertung der Messdaten mit dem ERMES-Tool, um mittels der gemessenen Konzentrationen Massenemissionen zu erhalten. Danach erfolgte die zeitliche Zuordnung der Massenemissionen zur Motorleistung. [29]
- Eine Betrachtung der zeitaufgelösten Messdaten hinsichtlich Plausibilität und Messfehler. Zusätzlicher Vergleich der NEDC-Messung mit den Daten aus dem Zulassungsschein und dem jeweiligen Grenzwert EURO 5/ EURO 6.

Wie bereits erwähnt, wurden im Zuge dieser Arbeit drei Fahrzeuge vermessen, weshalb sich die nachfolgende Messdatenauswertung mit den Daten dieser Fahrzeuge beschäftigt.

3.4.1 Vergleich Messung NEDC mit Zulassungsdaten und Grenzwerten

Bei den nachfolgenden fahrzeugspezifischen Abbildungen sind jeweils CO₂ und limitierte Schadstoffwerte gezeigt. Bei der Bestimmung der Abweichungen gelten als Basis immer die Zulassungsdaten. Das bedeutet, bei positiven Abweichungen werden die Zulassungsdaten überschritten, bei negativen unterschritten.

3.4.1.1 Opel Zafira

Im Zulassungsschein vom Opel Zafira sind keine Daten von NMHC und PM enthalten, weshalb die für diesen Vergleich auch nicht herangezogen werden können. In Abbildung 3-6 ist ersichtlich, dass keine gemessenen Emissionen am IVT über dem zugehörigen Grenzwert liegen. Der gemessene NO_x-Wert und der Grenzwert sind ähnlich und deutlich höher als der Wert der Zulassung. Auch die gemessenen CO-Emissionen liegen deutlich über dem Wert der Zulassung. Ebenfalls über dem Wert der Zulassung liegt das CO₂.

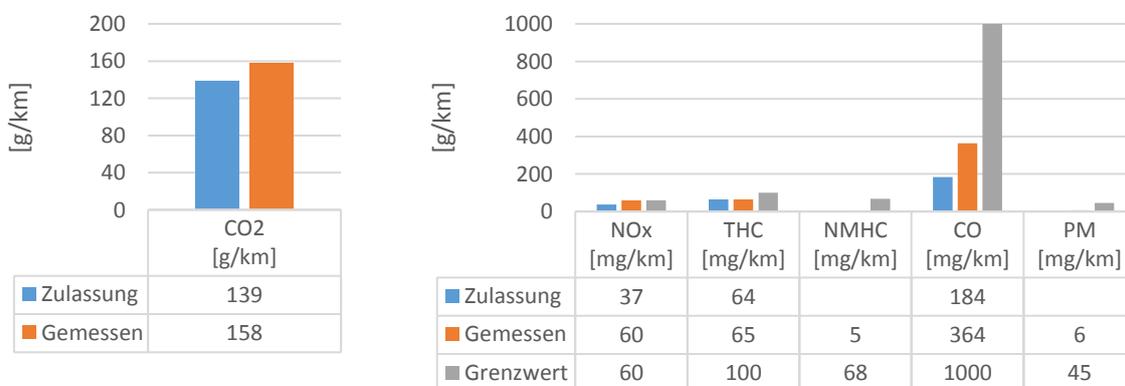


Abbildung 3-6: CO₂ (links) und limitierte Schadstoffe (rechts) im NEDC-Kaltstart (25 °C) beim Opel Zafira

Abbildung 3-7 zeigt die Abweichungen.

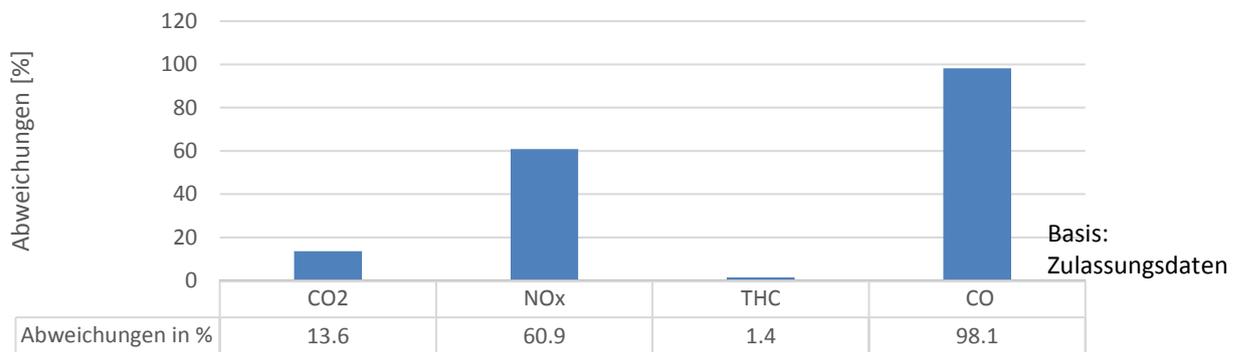


Abbildung 3-7: Opel Zafira Abweichungen von Messung zur Zulassung im NEDC mit Kaltstart (25 °C)

Folgende Gründe könnten für die Abweichungen verantwortlich sein:

- Eine Alterung des Abgasnachbehandlungssystems könnte zu den Abweichungen führen
- Im NEDC-Typprüfzyklus wird die Start-Stop Funktion des Motors aktiviert. Bei der Messung am IVT war diese Funktion nicht aktiviert, weshalb auch Abweichungen von CO₂ und den Schadstoffen zwischen Messung und Zulassung vorliegen.
- Für den Typprüfzyklus muss ein genormter Kraftstoff verwendet werden. Das vermessene Fahrzeug wurde vor der Messung an einer öffentlichen Tankstelle getankt. Aufgrund der unterschiedlichen Kraftstoffqualität könnten Abweichungen für CO₂ sowie auch bei den Schadstoffen vorliegen.
- Weiters waren die Fahrwiderstände, die bei der Typengenehmigung verwendet wurden, nicht bekannt. Bei der Messung wurden daher Defaultfahrwiderstände eingestellt, die Einfluss auf das CO₂ und die Schadstoffe haben könnten.

Alles in allem können die Abweichungen mit den aufgezählten Punkten erklärt werden. Des Weiteren liegen alle Messwerte unter dem Grenzwert. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug ein plausibles Emissionsverhalten zeigte und für die simulativen Untersuchungen in Betracht gezogen werden kann.

3.4.1.2 VW-Caddy

In Abbildung 3-8 sind wiederum höhere NO_x-Emissionen bei der Messung gegenüber der Zulassung erkennbar. Aber auch bei diesem Fahrzeug wurden die Grenzwerte im Typprüfzyklus NEDC mit der Messung am IVT eingehalten.

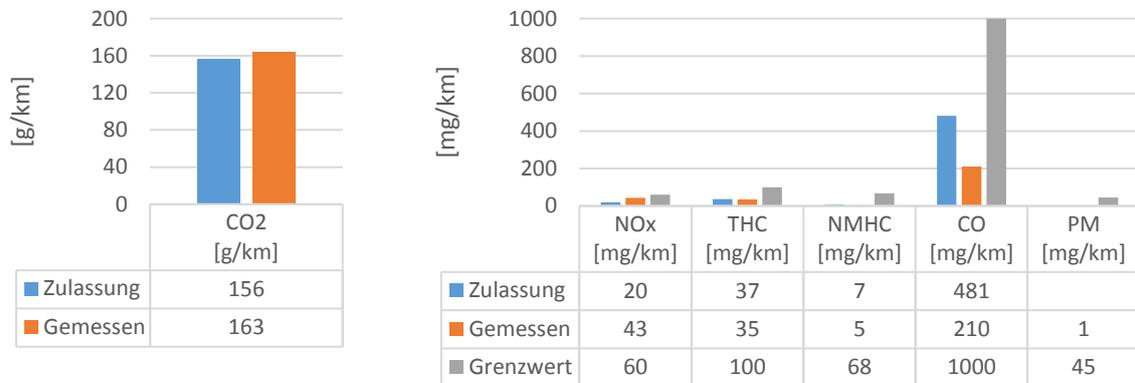


Abbildung 3-8: CO₂ (links) und limitierte Schadstoffe (rechts) im NEDC-Kaltstart (25 °C) beim VW-Caddy

Im Gegensatz zum Opel Zafira liegen hier die gemessenen CO-Emissionen unter denen des Zulassungsscheines, was auch in Abbildung 3-9 deutlich zu erkennen ist. Die Abweichungen bei THC und CO₂ sind gering. Gründe, die die Abweichungen zwischen Messung und Zulassung hervorgerufen haben könnten, wurden bereits beim Opel Zafira erläutert.

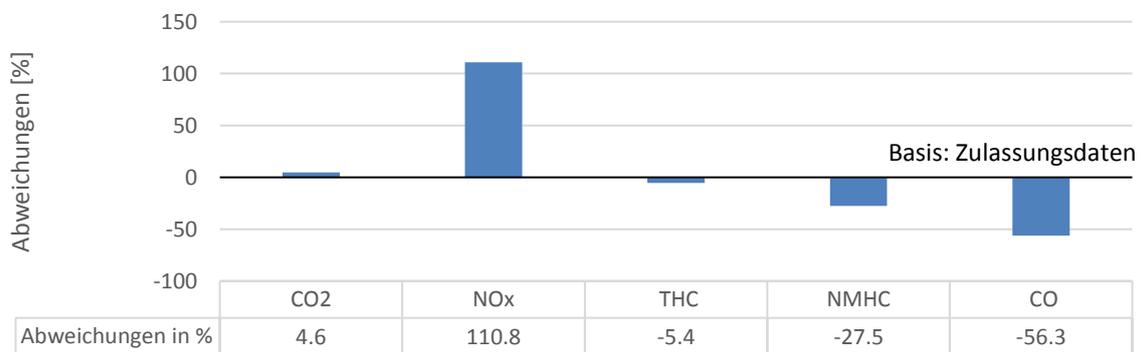


Abbildung 3-9: VW-Caddy Abweichungen von Messung zur Zulassung im NEDC mit Kaltstart (25 °C)

Auch die Abweichungen des VW-Caddy liegen im erklärbaaren Rahmen, weshalb das Emissionsverhalten als plausible eingestuft wird und das Fahrzeug für die simulativen Untersuchungen grundsätzlich herangezogen werden kann.

3.4.1.3 Fiat Doblo

Wie in Abbildung 3-10 ersichtlich, liegen auch bei diesem Fahrzeug die Messwerte unter jenen der Grenzwerte. Das Fahrzeug ist nach EURO 6b typisiert. Die Einspritzung erfolgt dabei für Erdgas sowohl für Benzin ins Saugrohr, weshalb die Partikelanzahl nicht begrenzt ist.

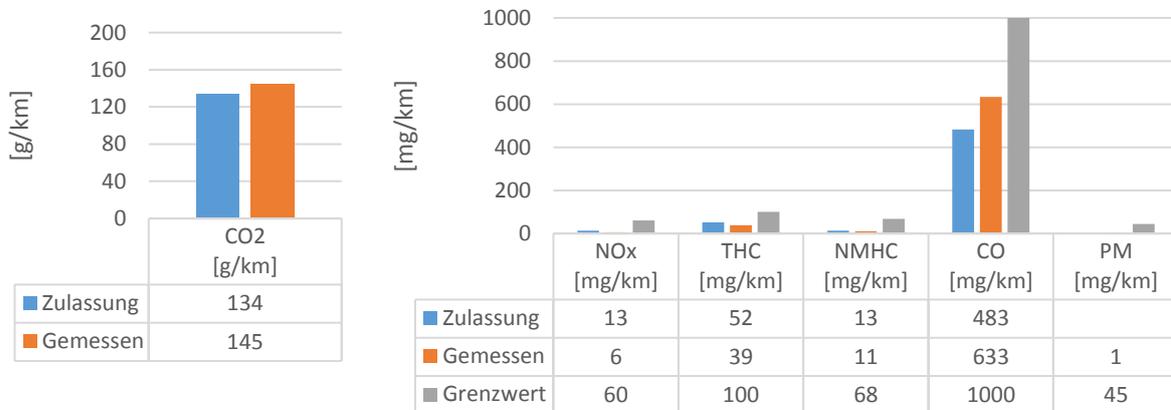


Abbildung 3-10: CO₂ (links) und limitierte Schadstoffe (rechts) im NEDC-Kaltstart (25 °C) beim Fiat Doblo

In Abbildung 3-11 sind die dazugehörigen Abweichungen der einzelnen Emissionen von Messung zur Zulassung gezeigt. Die Überschreitung der CO₂-Emissionen könnte wie bei den beiden anderen Fahrzeugen darauf zurückgeführt werden, dass bei der Typisierung des Fahrzeugs das Start-Stop-System aktiviert war. Im Zuge der Messungen am IVT wurde das Start-Stop-System am Prüfstand allerdings nicht aktiviert. Die CO-Emissionen gegenüber der Zulassung wurden überschritten. Bei der genaueren Untersuchung der sekundlichen Messdaten wurde am Beginn dieser Messung eine hohe CO-Spitze detektiert, die diese Abweichungen hervorgerufen haben könnte. Allerdings konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, wodurch diese Spitze vorlag. Weitere Gründe, die zu den Abweichungen zwischen Messung und Zulassung geführt haben könnten, wurden bereits beim Opel Zafira beschrieben.

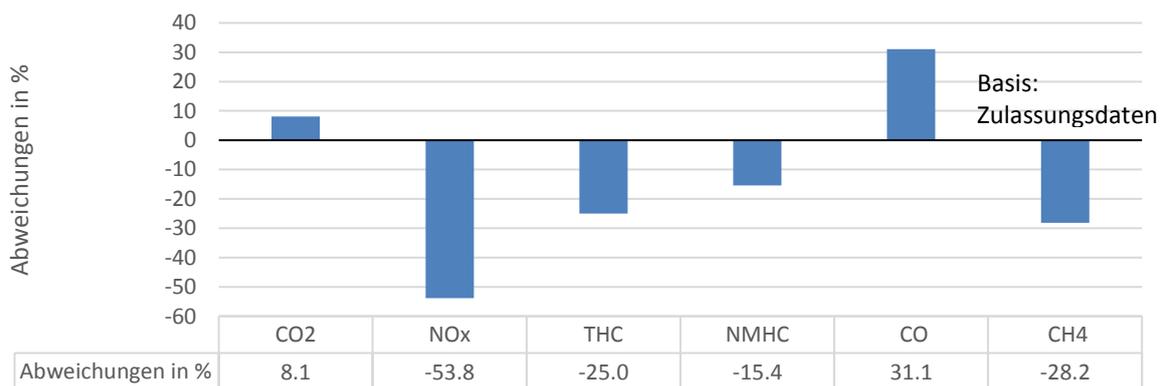


Abbildung 3-11: Fiat Doblo Abweichung von Messung zur Zulassung im NEDC mit Kaltstart (25 °C)

Auch beim Fiat Doblo wird davon ausgegangen, dass das Emissionsverhalten repräsentativ ist und somit das Fahrzeug für weitere Untersuchungen grundsätzlich herangezogen werden kann.

3.4.2 Plausibilitätscheck der ERMES-Messdaten

Im vorherigen Kapitel wurde bereits erwähnt, dass alle Fahrzeuge im NEDC repräsentatives Emissionsverhalten zeigten, und davon auszugehen ist, dass das auch im ERMES-Zyklus zutrifft. Um auch Messfehler auszuschließen und die Annahme des repräsentativen Emissionsverhalten zu bestätigen, wurden auch die ERMES-Messdaten aller drei Versuchsfahrzeuge einem Plausibilitätscheck unterzogen. Die ERMES-Zyklen bei 25 °C mit Warmstart werden als Datenbasis für die spätere Simulation herangezogen. Der NEDC wird nicht für die Simulation herangezogen, weil es sich um einen niederlastigen Zyklus handelt, der das reale Fahrverhalten nicht zufriedenstellend abbildet.

3.4.2.1 Vergleich der ERMES-Messdaten mit dem NEDC-Grenzwert

In Tabelle 3-8 sind die Emissionen in [g/km] und [# /km] der einzelnen Fahrzeuge im Testzyklus ERMES aufgelistet. Zusätzlich werden die Grenzwerte, die im Typprüfzyklus des NEDC gelten, dargestellt. Damit soll gezeigt werden, ob die Grenzwerte auch in einem dynamischeren Zyklus eingehalten werden können. Beim ERMES handelt es sich um einen Zyklus mit Warmstart, bei dem bereits bei Zyklusbeginn der Dreiwegekatalysator annähernd auf Betriebstemperatur war. Die Betriebstemperatur des Dreiwegekats wurde dabei durch eine vorherige fünf-minütige Konstantfahrt bei 80 km/h erreicht.

Tabelle 3-8: Messergebnisse ERMES-Zyklus mit Warmstart bei 25 °C

Emission	Opel Zafira	VW-Caddy	Fiat Doblo	NEDC-Grenzwert EURO 5/EURO 6
CO ₂ [g/km]	168.7	170.8	142.2	-/-
NO _x [mg/km]	140	12	60	60/60
NO [mg/km]	139	5	59	
NO ₂ [mg/km]	1	7	1	
CO [mg/km]	1436	253	152	1000/1000
THC [mg/km]	108	26	20	100/100
CH ₄ [mg/km]	88	20	18	
NMHC [mg/km]	20	6	2	68/68
PM [mg/km]	26	13	1	45/45
PN [# /km]	2.438*10 ¹³	3.12*10 ¹³	3.033*10 ¹¹	-/6x10 ¹¹ (nur für DI)

Trotz der erreichten Betriebstemperatur kommt es beim Opel Zafira zur Überschreitung von NO_x, THC und CO. Bei den anderen Fahrzeugen konnten die Grenzwerte auch beim ERMES-Zyklus eingehalten werden. Nachfolgend sollen die sekundlichen Messdaten der Versuchsfahrzeuge im ERMES-Zyklus untersucht werden.

3.4.2.2 Zeitaufgelöster Messdatenüberprüfung der ERMES-Zyklen

Bei der zeitaufgelösten Messdatenbetrachtung der ERMES-Zyklen wurden die zeitlichen Verläufe ausgewählter Schadstoffemissionen einzeln betrachtet. Dabei wurde u.a. auch analysiert, mit welchem Kraftstoff das jeweilige Fahrzeug beim Start und im gesamten Testzyklus betrieben wurde. Dafür wurde der zeitliche Verlauf von THC mit CH_4 -Emissionen, da bei der Verbrennung von Methan die Methanemissionen den Großteil der gesamten Kohlenwasserstoffemissionen ausmachen, betrachtet. Der zeitliche Verlauf der Kurven ist in der Regel deckungsgleich, kann aber auch bis zu einem Drittel von den THC-Emissionen abweichen. Weiters werden die zeitaufgelösten NO_x -Emissionen in den ERMES-Zyklen untersucht. Ergänzend ist zu erwähnen, dass die Abkürzung „v_akt“ in den Diagrammen die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit im Testzyklus bezeichnet. Als „v_target“ wird der Soll-Geschwindigkeitsverlauf bezeichnet.

ERMES-Zyklus VW-Caddy

In Abbildung 3-12 ist der gemessene ERMES-V8-Zyklus des VW-Caddy dargestellt.

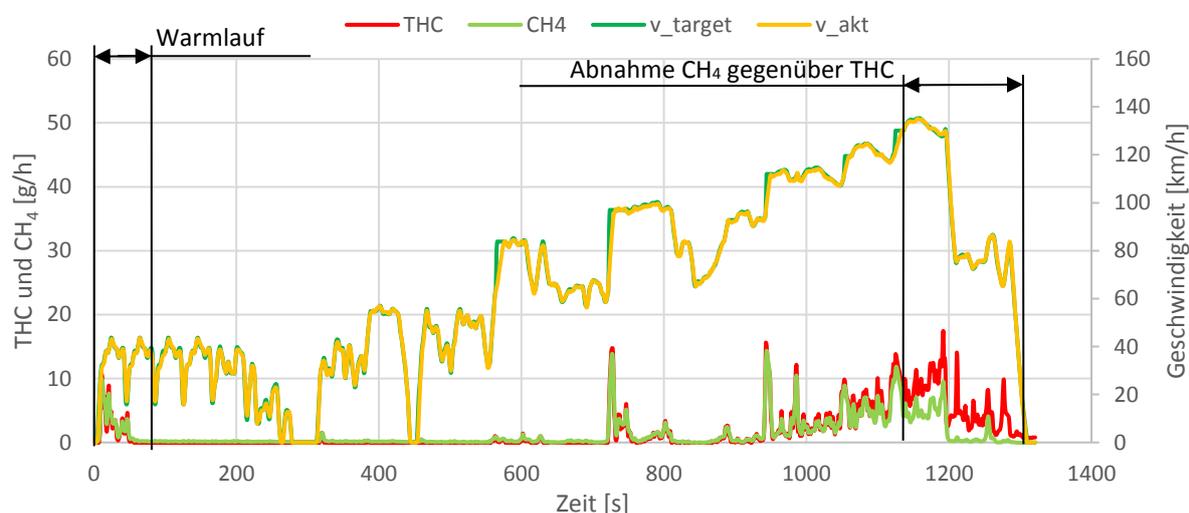


Abbildung 3-12: Messung ERMES-Warmstart beim VW-Caddy (25 °C), THC und CH_4 -Betrachtung

Bis Sekunde 1100 ist ein deckungsgleicher Kurvenverlauf der THC und CH_4 -Emissionen zu beobachten. Ab Sekunde 1100 ist eine Abweichung von den CH_4 -Emissionen zu den THC-Emissionen vorhanden. Diesbezüglich wurden weitere Untersuchungen zur Klärung dieser CH_4 -Abnahme durchgeführt, jedoch wurde der Grund für die größere Abweichung zwischen THC und CH_4 nicht herausgefunden. Es wird aber für die simulative Untersuchung davon ausgegangen, dass das Fahrzeug im gesamten Zyklus mit Erdgas betrieben wurde.

Aufgrund des erhöhten THC- und CH_4 -Emissionsniveaus bei Zyklusbeginn, wie in Abbildung 3-12 dargestellt, wird ein 100 % betriebswarmer Dreiwegekat zu Beginn des Testzyklus ausgeschlossen. Anhand dieser zeitlichen Verläufe kann aber das Warmlaufverhalten des Dreiwegekatalysators gut beobachtet werden, wobei im Falle des VW-Caddy visuell abgeschätzt werden kann, dass die Betriebstemperatur des Katalysators circa ab 65 Sekunden erreicht wurde. Dazu wurden die sekundlichen THC und CH_4 -Messwerte, die mit zunehmender Dauer aufgrund der zunehmenden Konvertierung des Dreiwegekatalysators abnehmen, betrachtet. Diese Abschätzungen über das Erreichen der Betriebstemperatur des Dreiwegekatalysators erfolgte für alle Fahrzeuge gleich.

Ein Grund für die Entstehung der höheren THC- und CH_4 -Emissionen zu Beginn des Zyklus könnte die kurze Pause (2-3 Minuten) zwischen Vorkonditionierung und Zyklusbeginn sein. Es könnte in dieser Phase zum leichten Auskühlen des Dreiwegekats gekommen sein. Abbildung

3-13 zeigt die zeitaufgelösten NO_x-Emissionen. Die hohen NO_x-Spitzen treten vermehrt während einer Schub- und anschließenden Beschleunigungsphase auf. In den Schubphasen wird Sauerstoff im Dreiwegekat eingelagert. Bei der darauffolgenden Beschleunigung wird der Motor zumeist mit $\lambda=1$ oder $\lambda<1$ betrieben. Es könnte aber aufgrund regeltechnischer Probleme bei der λ -Regelung zu einem kurzzeitigen $\lambda>1$ Betrieb in der Beschleunigungsphase kommen, der schlussendlich zu diesen hohen Spitzen führt.

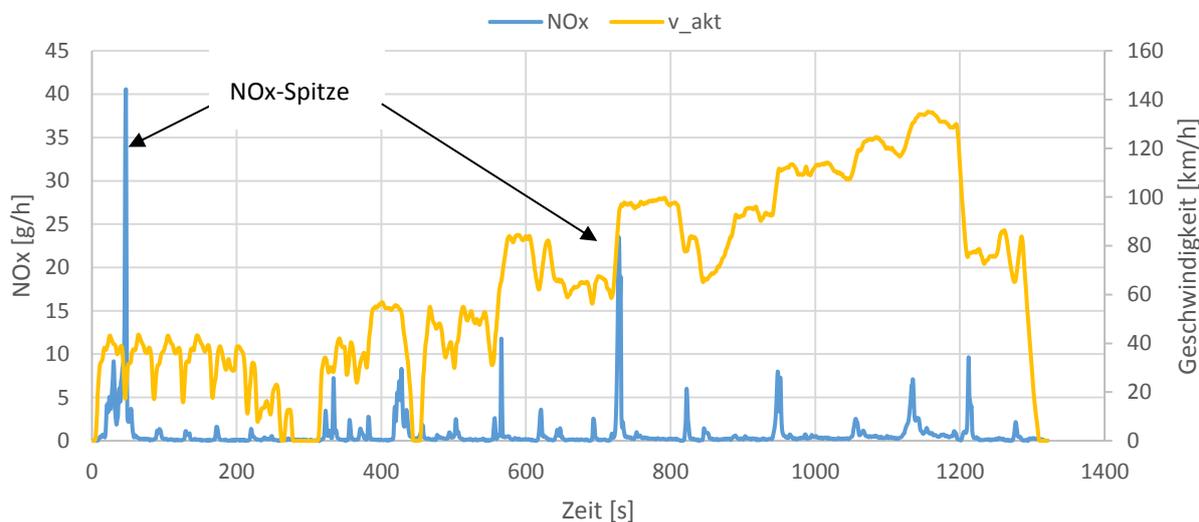


Abbildung 3-13: Messung ERMES-Warmstart beim VW-Caddy (25 °C), NO_x-Betrachtung

ERMES-Zyklus Opel Zafira

In Abbildung 3-14 sind die Verläufe der THC- und CH₄-Emissionen des Opel Zafira im ERMES-Zyklus ersichtlich. Wiederum treten zu Beginn THC- und CH₄-Spitzen auf, die wie beim VW-Caddy auf ein Auskühlen des Dreiwegekats in der Phase zwischen Vorkonditionierung und Zyklusbeginn zurückzuführen sind. Die Analyse des Warmlaufverhaltens des Katalysators anhand der THC- und CH₄-Emissionen gestaltet sich bei diesem Fahrzeug schwieriger als bei den anderen Fahrzeugen. Nach Betrachtungen aller Schadstoffemissionen kann gesagt werden, dass die Betriebstemperatur des Katalysators nach ungefähr 90 Sekunden erreicht wurde. Sowohl bei Zyklusstart als auch in der restlichen Zyklusphase wird das Fahrzeug mit Erdgas betrieben.

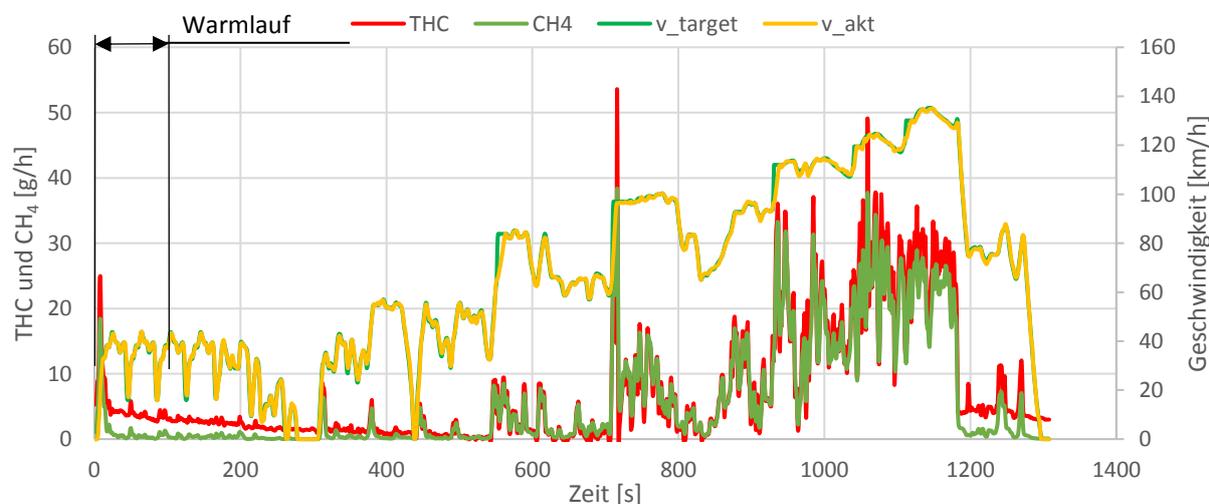


Abbildung 3-14: Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C), THC- und CH₄-Betrachtung

Der zeitliche Verlauf der NO_x-Emissionen ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Auch bei diesem Fahrzeug liegen hohe NO_x-Spitzen in den Beschleunigungsphasen nach den Schubphasen vor. Der Grund dafür könnten, gleich wie beim VW-Caddy, regeltechnische Probleme der λ -Regelung sein.

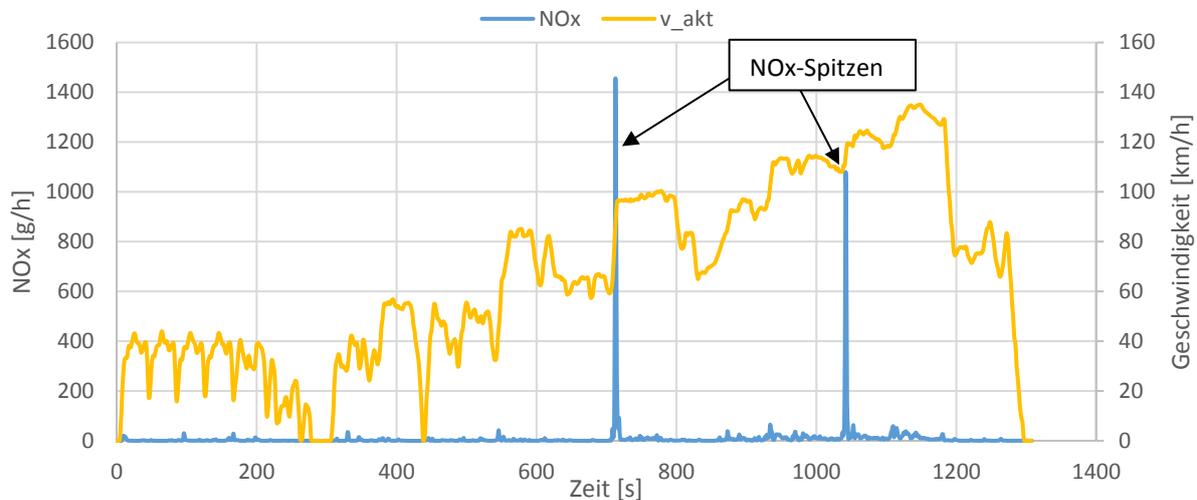


Abbildung 3-15: Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C), NO_x-Betrachtung

ERMES-Zyklus Fiat Doblo

Abbildung 3-16 zeigt den Verlauf der THC- und CH₄-Emissionen im Testzyklus ERMES beim Fiat Doblo. Auch bei diesem Fahrzeug ist das Auskühlen des Dreiwegekatalysators nach der Vorkonditionierung gut erkennbar. Beim Fiat Doblo kann davon ausgegangen werden, dass die Betriebstemperatur des Dreiwegekatalysators nach circa 65 Sekunden erreicht wird. Durch den nahezu deckungsgleichen Kurvenverlauf ist auch hier ersichtlich, dass das Fahrzeug während des Starts als auch im Zyklus mit Erdgas betrieben wurde.



Abbildung 3-16: Messung ERMES-Warmstart beim Fiat Doblo (25 °C), THC- und CH₄-Betrachtung

Die NO_x-Emissionen verhalten sich ähnlich wie bei den vorhin gezeigten Fahrzeugen (Abbildung 3-17). Wiederum sind NO_x-Spitzen in der Beschleunigungsphase nach einer Schubphase vorhanden. Auch hier könnten regeltechnische Probleme der λ -Regelung für die NO_x-Spitzen verantwortlich sein.

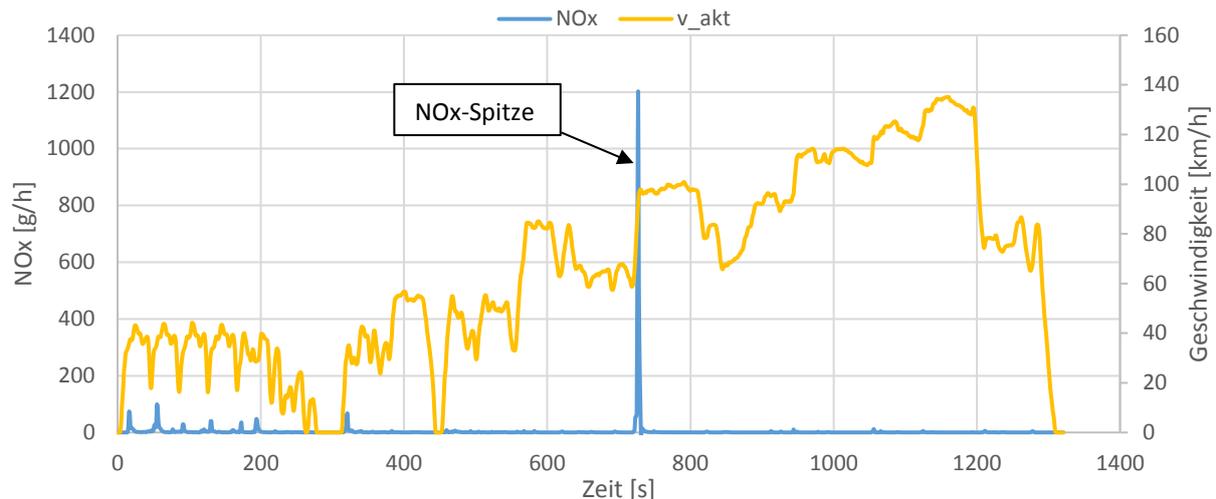


Abbildung 3-17: Messung ERMES-Warmstart beim Fiat Doblo (25 °C), NO_x-Betrachtung

3.4.3 Überprüfung der NEDC, IUFC und ERMES-Messdaten für Kaltstartzusatzemissionen

Bei den Kaltstartzusatzemissionen ist ebenso die Betrachtung der sekundlichen THC- und CH₄-Emissionen notwendig, um zwischen Kaltstartzusatzemissionen mit CNG-Start und Benzin-Start unterscheiden zu können. Es wird dabei mit dem gleichen Prinzip, wie bei den ERMES-Zyklen, analysiert, mit welchem Kraftstoff das jeweilige Fahrzeug beim Start und im Testzyklus betrieben wurde. Dieser zeitliche Vergleich der THC- und CH₄-Emissionen wurde für alle Testzyklen und für alle Fahrzeuge durchgeführt. Es ist zu erwähnen, dass diese Untersuchungen auch für die beiden Fahrzeuge Audi A3 g-tron und VW-EcoUp durchgeführt wurden. Die Ergebnisse sind dazu in Tabelle 3-9 dargestellt. Die Tabelle gliedert sich in Kalt- und Warmstarts (Kaltst. & Warmst.) bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen. Dabei wurden der Zyklusstart sowie der gesamte Zyklus betrachtet.

Tabelle 3-9: Kraftstoffuntersuchungen beim Start und während des Zyklus

	Temperatur	NEDC	NEDC	IUFC	IUFC	ERMES	IUFC	ERMES
		Warmst. 25 °C	Kaltst. 25 °C	Warmst. 25 °C	Kaltst. -7 °C	Warmst. -7 °C	Warmst. -7 °C	Warmst. 25 °C
VW-Caddy	Start	CNG						
	Zyklus	CNG						
Opel Zafira	Start	CNG						
	Zyklus	CNG						
VW-EcoUp UP	Start	CNG						
	Zyklus	CNG						
Fiat Doblo	Start	CNG	CNG	CNG	Benzin	CNG	CNG	CNG
	Zyklus	CNG						
Audi A3 gtron	Start	CNG						
	Zyklus	CNG						

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass nur in einem Zyklus der Start mit Benzin durchgeführt wurde. Hierbei handelt es sich um den IUFC-Kaltstart bei -7 °C mit dem Fahrzeug Fiat Doblo. Der Start erfolgt dabei mit Benzin, wobei nach ungefähr 60 Sekunden auf den

Erdgasbetrieb umgeschaltet wurde. In Abbildung 3-18 sind die ersten 200 Sekunden dieses Zyklus mit den THC- und CH₄-Emissionen im Detail dargestellt. Das Umschalten auf den CNG-Betrieb ist dabei gut ersichtlich.

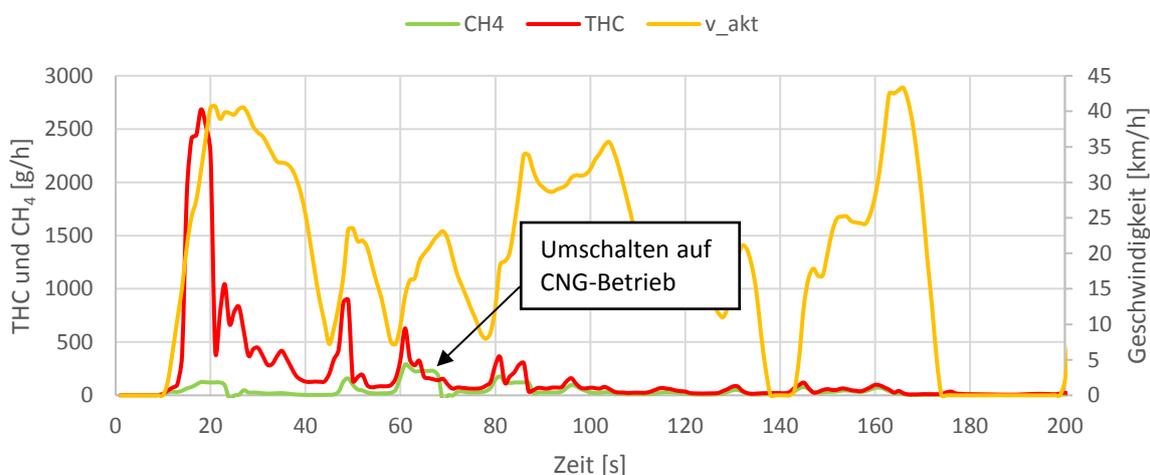


Abbildung 3-18: Messung IUFC-Kaltstart beim Fiat Doblo (-7 °C), Untersuchung Startverhalten

3.4.4 Zusammenfassung der Messdatenüberprüfung

Abschließend werden die Ergebnisse aus den sekundlichen Verläufen zusammengefasst und nochmals diskutiert. Aus der Messdatenauswertung geht hervor, dass bei allen gemessenen Fahrzeugen die kurzen Stillstandszeiten und Pausen zwischen Vorkonditionierung und Zyklusbeginn zu einem geringen Auskühlen des Dreiwegekatalysators führen. Dabei gibt es bereits Auskühleffekte des Dreiwegekatalysators, die zu einer Abnahme der Konvertierungsrate von Methan führen.

Ob diese erhöhten THC-Emissionen zu Beginn des Testzyklus ERMES auch bei einem Zyklusstart mit Benzin auftreten, wurde durch eine zusätzliche Untersuchung abgeklärt. Dazu wird im Zuge dieser Masterarbeit zusätzlich das Startverhalten von zwei Benzinfahrzeugen bei Warmstart mit gleicher Vorkonditionierung betrachtet. Bei der Untersuchung ergab sich, dass bei beiden Benzinfahrzeugen die THC-Spitzen zu Beginn wesentlich geringer ausgeprägt waren. Ursache dafür ist, dass die bei der Verbrennung von Benzin entstehenden HC-Emissionen eine geringere Temperatur zur Konvertierung benötigen als jene bei der Verbrennung von Erdgas.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich alle CNG-Fahrzeuge ähnlich verhalten. Die Messdaten stellen zudem eine geeignete Basis für die Simulation dar.

4 Kaltstartzusatzemissionen

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit war die Bestimmung der Kaltstartzusatzemissionen. Mithilfe von Analysen wurden verschiedene Testzyklen mit Kaltstarts untersucht, um daraus Kaltstartzusatzemissionen bestimmen zu können. Laut dem Messprogramm in Kapitel 3.1 stehen dazu zwei geeignete Testzyklen zur Verfügung. Es handelt sich dabei um einen IUFC bei einer Prüfraumtemperatur von -7 °C sowie um einen NEDC bei 25 °C . Somit können Kaltstartzusatzemissionen bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt und analysiert werden.

4.1 Kaltstartzusatzemissionen IUFC bei -7 °C

Beim IUFC handelt es sich um einen niederlastigen aber dynamischen Zyklus, der vor allem für Kaltstartuntersuchungen konzipiert wurde. Er besteht aus einem zehn Mal aufeinanderfolgenden, gleichen Geschwindigkeitsprofil. Ein solches Profil wird als Mikrozyklus bezeichnet und weist eine Dauer von 190 Sekunden auf. Daraus lässt sich eine Gesamtzyklusdauer von 1900 Sekunden ableiten. Das gesamte Geschwindigkeitsprofil des IUFC sowie die zeitliche Darstellung eines Mikrozyklus ist in Abbildung 4-1 abgebildet. Anhand der zusätzlich abgebildeten THC- und CH_4 -Emissionen vom VW-Caddy ist feststellbar, dass nach einem Mikrozyklus bereits eine hohe Konvertierung vorliegt. Wie bereits in Kapitel 3.4 und 3.4.2 erwähnt, kann anhand der THC- und CH_4 -Emissionen das Warmlaufverhalten gut beobachtet werden, weshalb auch diese für die Untersuchung ausgewählt wurden.

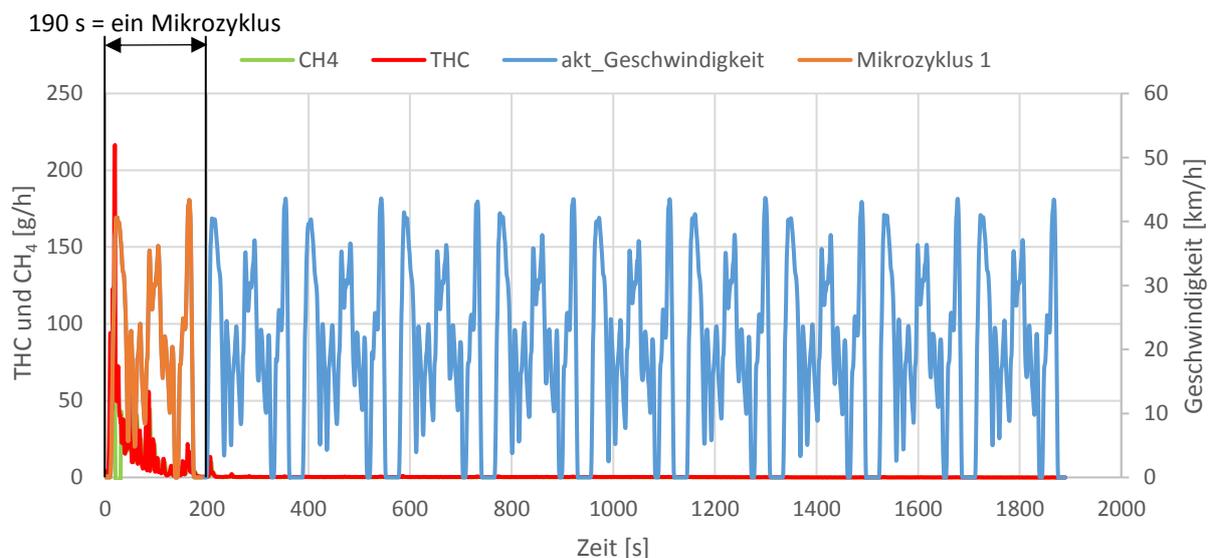


Abbildung 4-1: Messung IUFC-Kaltstart beim VW-Caddy (-7 °C), THC- und CH_4 -Betrachtung

Im nächsten Schritt werden die kumulierten Emissionen - auch absolute Emissionen bezeichnet - in jedem der einzelnen Mikrozyklen bestimmt. In Abbildung 4-2 wird die Vorgehensweise zur Bestimmung dieser kumulierten Emissionen in einem Mikrozyklus anhand des Audi A3 g-tron erläutert. Auf der linken Ordinate sind dabei die CO_2 in $[\text{g}/\text{h}]$ aufgetragen, auf der rechten Ordinate die daraus bestimmten absoluten CO_2 in $[\text{g}]$. Diese Bestimmung der kumulierten Emissionen pro Mikrozyklus erfolgt für alle Schadstoffkomponenten.

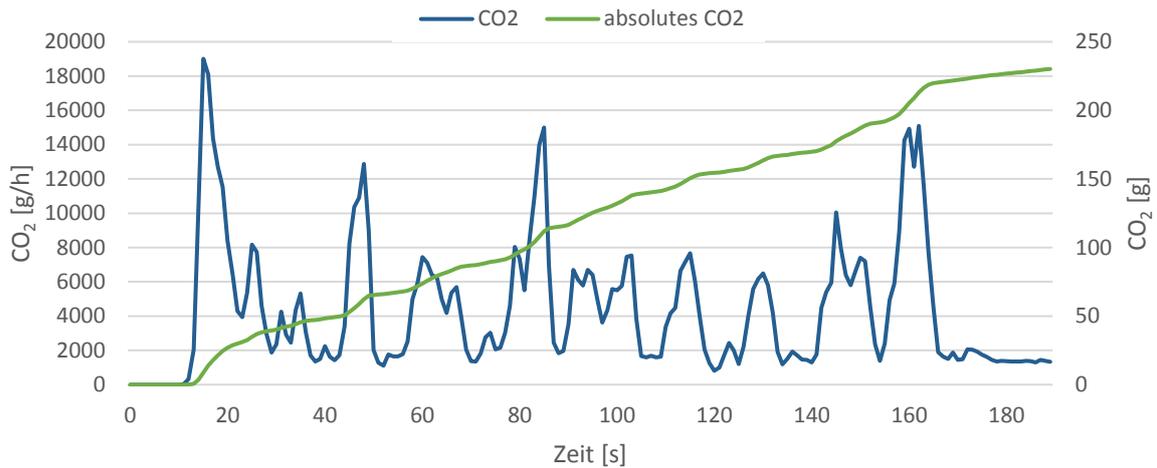


Abbildung 4-2: Bestimmung der absoluten CO₂-Emissionen in jedem der einzelnen Mikrozyklen

Für die Darstellung der Ergebnisse pro Mikrozyklus sind in Abbildung 4-3 die CO₂-Emissionen des VW-Caddy gezeigt. Zur besseren Darstellung wurde die Ordinate ab 100 gCO₂ dargestellt. Durch Betrachtung aller Emissionen wird davon ausgegangen, dass die Betriebstemperatur des Katalysators, ab dem Mikrozyklus 7 erreicht ist. Mit dieser Annahme werden nun die Warmemissionen, die pro Mikrozyklus emittiert werden, bestimmt. Diese bilden sich aus dem Mittelwert der Mikrozyklen 7, 8, 9 und 10 und werden im Folgenden als Warmemission IUFC pro Mikrozyklus bezeichnet. Die CO₂-Warmemission ist zusätzlich auf der rechten Seite der Abbildung schematisch gekennzeichnet. Über der Linie der Warmemissionen können die Kaltstartzusatzemissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus abgelesen werden. Analog erfolgte die Bestimmung der Warmemissionen für alle anderen Schadstoffemissionen.

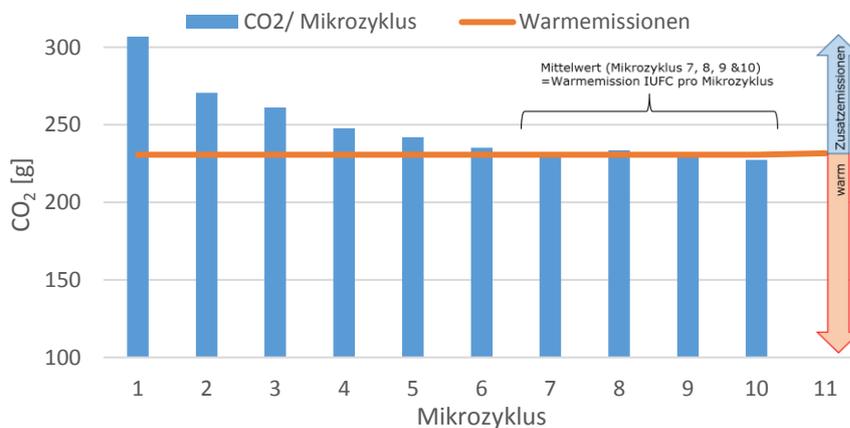


Abbildung 4-3: IUFC-Kaltstart beim VW-Caddy (-7 °C), akkumulierte CO₂-Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus

Im nächsten Schritt wird die Berechnung der Kaltstartzusatzemissionen anhand der Gleichung (4-1) durchgeführt. Es werden die gesamten Emissionen im IUFC bestimmt und dabei zehn Mal die Warmemission IUFC pro Mikrozyklus subtrahiert.

$$\begin{aligned}
 & \text{Zusatzemission } X \text{ beim IUFC} \\
 & = \text{Gesamtem. } X \text{ IUFC (Kaltstart)} \\
 & - 10 * \text{Warmem. } X \text{ IUFC pro Mikrozyklus}
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

Es ergeben sich beim Testzyklus IUFIC mit einer Prüfraumtemperatur von -7 °C Kaltstartzusatzemissionen wie in den folgenden Abbildungen dargestellt. In Abbildung 4-4 sind die Zusatzemissionen von den EURO 5-Fahrzeugen und in Abbildung 4-5 jene von den EURO 6-Fahrzeugen aufgelistet. Die Fahrzeugmasse und -leistung haben großen Einfluss auf die Emittierung von CO_2 . Das geht vor allem durch den Vergleich des VW-Caddy mit dem VW-EcoUp hervor. Zu erwähnen ist, dass die dargestellte Masse von CO_2 mit 100 multipliziert werden muss. Als Beispiel emittiert der VW-Caddy beim IUFIC-Kaltstart gegenüber Warmstart Zusatzemissionen von 218 g CO_2 . Die Partikelmasse vom VW-Caddy wurde bei diesem Zyklus nicht gemessen, wodurch hier keine Zusatzemission bestimmt werden konnten.

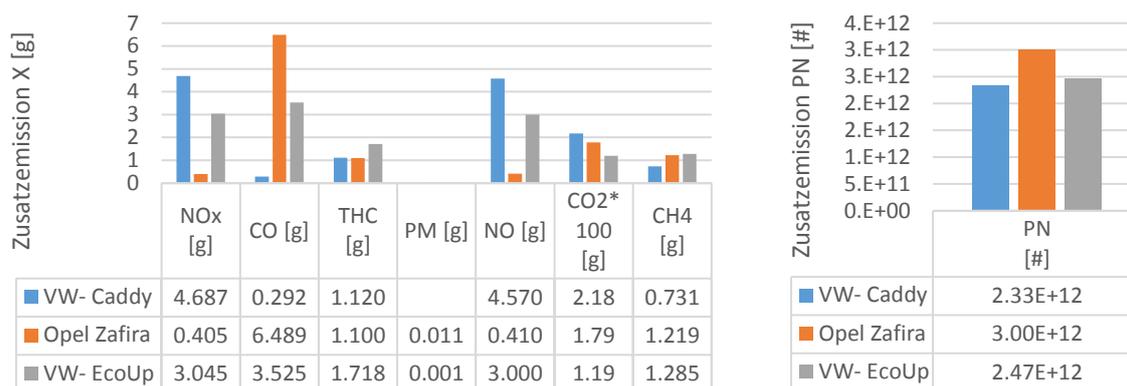


Abbildung 4-4: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 5-Fahrzeuge beim IUFIC bei -7 °C

Aufgrund dessen, dass das Fahrzeug Fiat Doblo im IUFIC nicht mit CNG gestartet wurde, können die Kaltstartzusatzemissionen nicht analog wie bei den anderen Fahrzeugen bestimmt werden. Da erst nach einer bestimmten Zeit auf den CNG-Betrieb umgeschaltet wurde, sind bei diesen Zusatzemissionen jene durch die Verbrennung von Benzin als auch jene durch die Verbrennung von Erdgas enthalten. Eine Differenzierung von Benzin und CNG ist nicht möglich. Aus reinem Interesse des Autors werden die Zusatzemissionen mit der gleichen Methode wie bei den anderen Fahrzeugen bestimmt. Auffällig verhalten sich dabei die wesentlich höheren CO- und CO_2 -Emissionen des Fiat Doblo gegenüber dem Audi A3 g-tron, wie in Abbildung 4-5 gezeigt. Zurückzuführen ist dies auf die Verbrennung von Benzin und dem damit verbundenen ungünstigeren C/H-Verhältnis von Benzin gegenüber Erdgas. Die anderen Emissionen sind stets höher als beim Audi, lediglich die NO_x - und NO-Emissionen sind beim Fiat Doblo geringer.

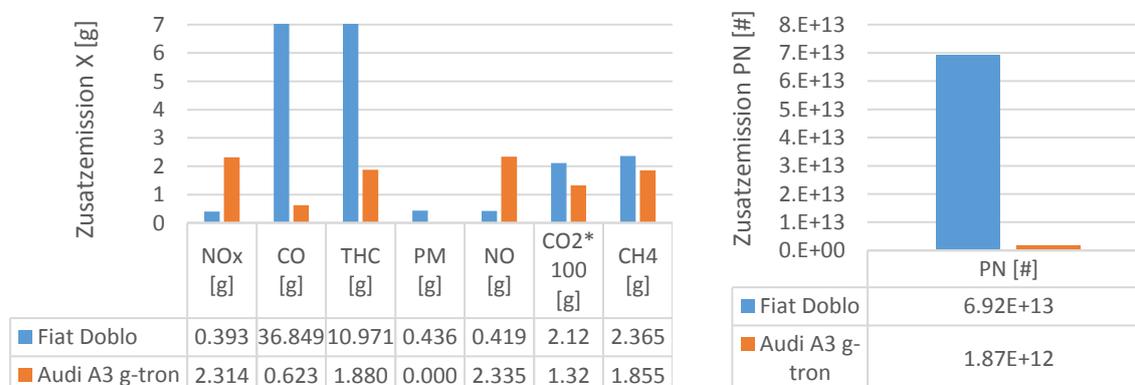


Abbildung 4-5: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 6-Fahrzeuge beim IUFIC bei -7 °C

4.1.1 Validierung der Kaltstartzusatzemissionen im IUFC

Die Validierung der Zusatzemissionen erfolgt mit zwei unterschiedlichen Methoden. Als Basis wurden Messdaten von einem IUFC-Warmstart bei -7 °C für beide Validierungsmethoden herangezogen. Die beiden Validierungsmethoden unterscheiden sich dabei wie folgt:

- Validierungsmethode 1 zieht als Basis für die Validierung den gesamten IUFC-Warmstart heran
- Validierungsmethode 2 vernachlässigt den ersten Mikrozyklus im Warmstart und bildet einen Mittelwert der Mikrozyklen 2-10

4.1.1.1 Validierungsmethode 1

Bei der Validierungsmethode 1 wurden die Summen der kumulierten Emissionen pro Mikrozyklus für den gesamten Testzyklus IUFC-Warmstart berechnet. Dabei erfolgte die Validierung nach Gleichung (4-2). Es wurden zu den absoluten Gesamtemissionen im Testzyklus IUFC-Warmstart, die oben berechneten Zusatzemissionen IUFC vom Kaltstart addiert. Das Ergebnis sind die berechneten Emissionen des Testzyklus IUFC mit berechnetem Kaltstart bei -7 °C .

$$\begin{aligned} \text{Gesamtemission } X \text{ berechneter Kaltstart} \\ = \text{Gesamtemission } X \text{ IUFC (Warmstart)} \\ + \text{Zusatzemissionen } X \text{ beim IUFC} \end{aligned} \quad (4-2)$$

Anschließend erfolgt der Vergleich der berechneten Emissionen im Testzyklus IUFC-Kaltstart mit den absoluten Emissionen aus der Messung IUFC-Kaltstart. Dabei werden die prozentuellen Abweichungen bestimmt.

Bei dieser Validierungsmethode konnten jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden, weshalb die Abweichungen hier auch nicht im Detail gezeigt werden (Grund siehe Kapitel 4.2.1.2).. Die Abweichungen der Validierungsmethode 1 können im Anhang auf Seite 103 und 104 eingesehen werden.

4.1.1.2 Validierungsmethode 2

Weitere Analysen des IUFC-Warmstarts zeigen in Abbildung 4-6, dass im ersten Mikrozyklus erhöhte Emissionen auftraten. Dies könnte wiederum auf ein Auskühlen des Katalysators zwischen den beiden Testzyklen ERMES und IUFC zurückzuführen sein. Für die Validierung nach Gleichung (4-2) ist ein tatsächlicher Warmstart ohne erhöhte Emissionen zu Beginn notwendig. Ansonsten kann die Validierung in dieser Art und Weise nicht korrekt durchgeführt werden. Aufgrund dessen wurde entschieden, den ersten Mikrozyklus nicht für die Berechnung der gesamten Emissionen für den IUFC-Warmstart heranzuziehen. Es wurde, wie in Abbildung 4-6 dargestellt, ein Mittelwert der absoluten Emissionen der Mikrozyklen 2-10 gebildet.

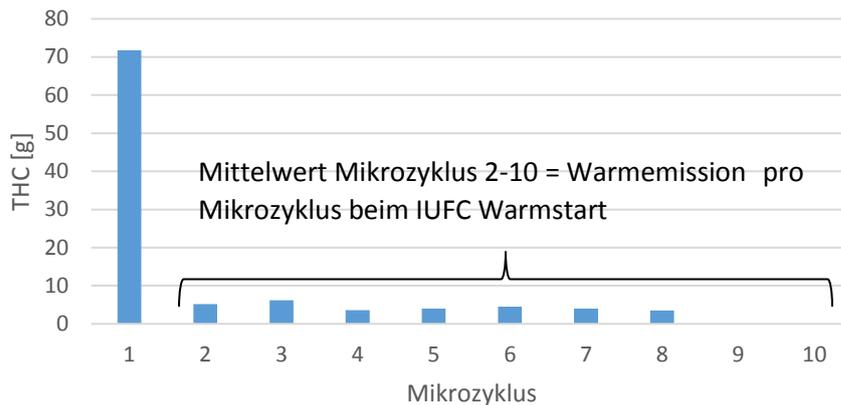


Abbildung 4-6: IUFW-Warmstart beim VW-Caddy (-7 °C), kumulierte THC-Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus

Im nächsten Schritt erfolgte nun die Validierung nach Gleichung (4-3). Dabei wurde von jeder einzelnen Schadstoffkomponente, der berechnete Mittelwert von den Mikrozyklen 2-10 beim IUFW-Warmstart mit zehn multipliziert. Daraus ergeben sich die Emissionen für den gesamten korrigierten IUFW-Warmstart. Im Folgenden wird dieser auch als IUFW-Warmstart-angepasst bezeichnet. Zu diesem werden im nächsten Schritt erneut die Zusatzemissionen IUFW addiert. Daraus ergeben sich die berechneten Gesamtemissionen beim IUFW mit berechnetem Kaltstart.

$$\begin{aligned}
 & \text{Gesamtemission } X \text{ berechneter IUFW Kaltstart angepasst} \\
 & = 10 * \text{Warmem. } X \text{ pro Mikrozyklus beim IUFW Warmstart} \quad (4-3) \\
 & + \text{Zusatzemissionen IUFW}
 \end{aligned}$$

Anschließend erfolgte wiederum der Vergleich der Emissionen im IUFW mit berechnetem Kaltstart mit den Emissionen aus der Messung IUFW-Kaltstart.

Bei dieser Validierungsmethode 2 werden geringere Abweichungen erzielt, als bei der Validierungsmethode 1. Der Grund dafür liegt in erster Linie in der Zeitspanne zwischen den beiden Testzyklen ERMES-Warmstart bei -7 °C und dem darauffolgenden IUFW-Warmstart bei -7 °C. In dieser Zeit sind Arbeiten am Prüfstand, wie das Wechseln der Partikelfilterblätter, notwendig. Wie bereits erwähnt, wirken sich vor allem bei Erdgasfahrzeugen geringe Temperaturabnahmen im Dreiwegekat nachteilig auf die Abgasnachbehandlung aus. Aus diesem Grund ist eine Anpassung des IUFW-Warmstarts für die Untersuchungen dieser Zusatzemissionen empfehlenswert. In den folgenden Abbildungen werden die Abweichungen vom IUFW mit berechnetem Kaltstart zur Messung verglichen und abgebildet. Vorab ist zu erwähnen, dass als Basis immer die Messung herangezogen wurde. Abbildung 4-7 zeigt die Abweichungen für EURO 5-Fahrzeuge.

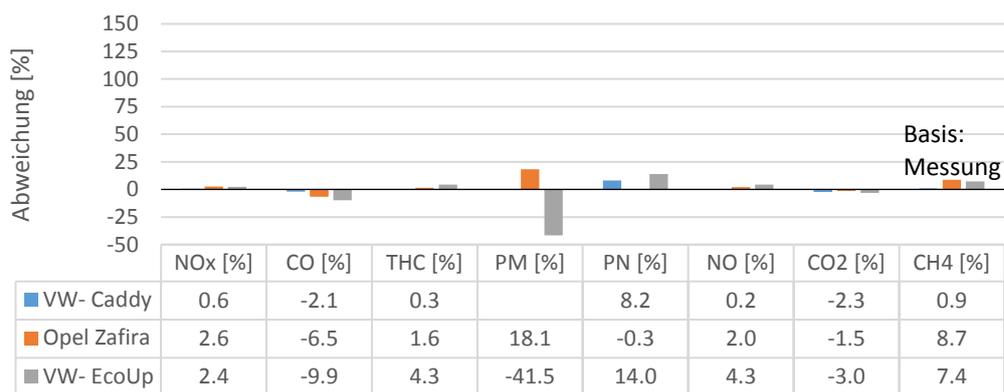


Abbildung 4-7: Abweichung berechneter-IUFV-Kaltstart-angepasst zu Messung der EURO 5-Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2

Aus dieser Validierungsmethode 2 lässt sich ableiten, dass die Methodik zur Bestimmung der Kaltstartzusatzemissionen für den Testzyklus IUFV geeignet ist. Die größten Abweichungen zwischen berechnetem Kaltstart und Messung Kaltstart sind bei PM beim VW-EcoUp und beim Opel Zafira zu beobachten.

Die Validierung der EURO 6-Fahrzeuge konnte nur für den Audi A3 g-tron durchgeführt werden. Wie bereits erwähnt, wurde der Fiat Doblo mit Benzin gestartet, weshalb eine Validierung nicht durchgeführt werden kann. Beim Audi A3 g-tron können plausible und zufriedenstellende Ergebnisse bei der Validierung erzielt werden, wie Abbildung 4-8 zeigt.

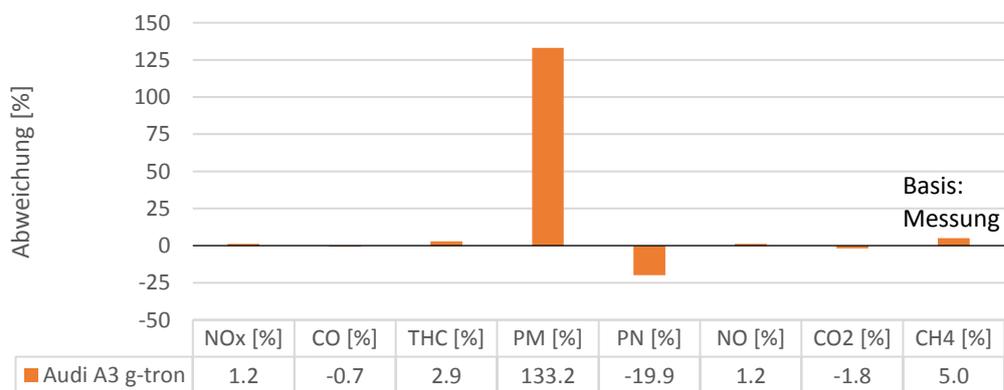


Abbildung 4-8: Abweichung berechneter Kaltstart beim IUFV zu Messung der EURO 6-Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2

Zusammenfassend hat sich aus den Untersuchungen ergeben, dass die beschriebene Methode für die Berechnung der Kaltstartzusatzemissionen herangezogen werden kann. Vereinzelt treten größere Abweichungen bei PN und PM auf, ansonsten liegen zufriedenstellende Ergebnisse bei allen Schadstoffkomponenten vor.

4.2 Kaltstartzusatzemissionen NEDC bei 25 °C

Beim NEDC handelt es sich um einen niederlastigen Zyklus. Das Geschwindigkeitsprofil des Stadtteils ist vier Mal hintereinander gereiht. Deshalb bietet sich auch hier eine Zerlegung in vier Mikrozyklen an, um Kaltstartzusatzemissionen untersuchen zu können. Die Dauer eines solchen Mikrozyklus beläuft sich auf 195 Sekunden. Das Geschwindigkeitsprofil des NEDC und die Zerlegung in Mikrozyklen ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Des Weiteren sind die sekundlichen THC- und CH₄-Emissionen im Diagramm abgebildet, um das Warmlaufverhalten des Dreiwegekatalysators beobachten zu können. Der Überlandteil des NEDC wird für diese Untersuchung vernachlässigt. Somit beziehen sich alle Daten im folgenden Kapitel auf die vier Mikrozyklen bei einer Temperatur von 25 °C.

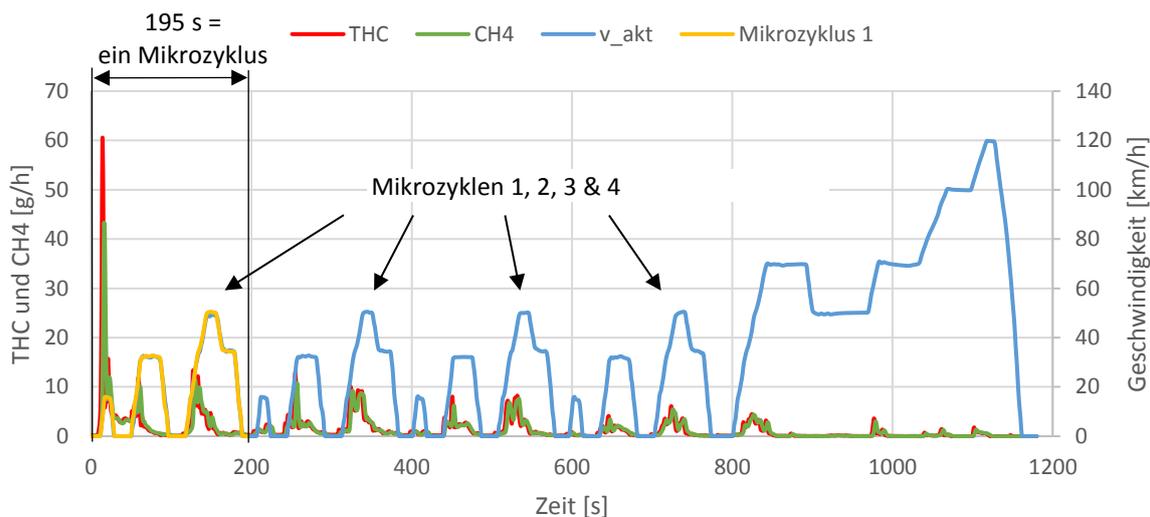


Abbildung 4-9: Messung NEDC-Kaltstart beim Audi A3 g-tron (25 °C), THC- und CH₄-Betrachtung

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Kaltstartzusatzemissionen beim NEDC gleicht der vom IUFC. Zu Beginn erfolgt wiederum die Bestimmung der kumulierten Emissionen in jedem der vier Mikrozyklen. Die Werte hierzu sind in Abbildung 4-10 gezeigt. Zur besseren Darstellung wurde auch hier die Ordinate ab 100 g CO₂ dargestellt. Weitere Analysen zeigen, dass von Mikrozyklus 3 auf Mikrozyklus 4 noch Unterschiede in den absoluten Emissionen vorliegen. Aus diesem Grund wird bei der Untersuchung Mikrozyklus 4 als jener festgelegt, der die Warmemissionen in einem Mikrozyklus repräsentiert. Auch in dieser Abbildung sind die zusätzlichen CO₂-Emissionen, die durch den Kaltstart ausgestoßen werden, über den Warmemissionen abgebildet.

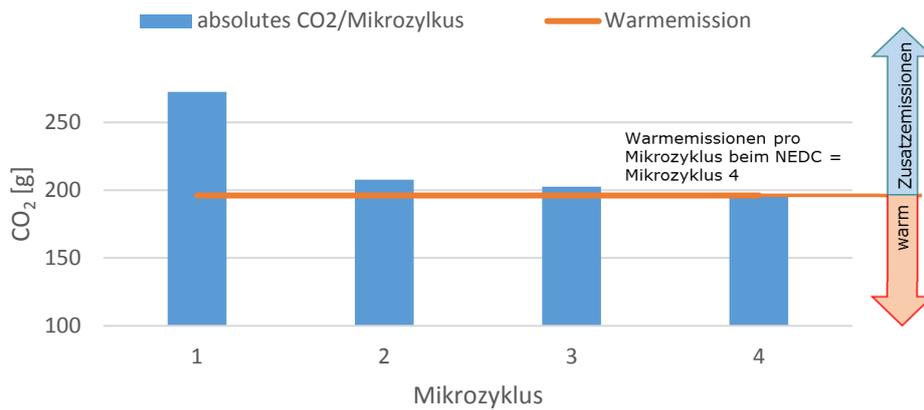


Abbildung 4-10: NEDC-Kaltstart beim VW-Caddy (25 °C), kumulierte CO₂-Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus

Die Bestimmung der Kaltstartzusatzemissionen beim NEDC erfolgt nach Gleichung (4-4).

$$\begin{aligned}
 \text{Zusatzemission } X \text{ beim NEDC} & \\
 &= \text{Gesamtemission } X \text{ NEDC (Kaltstart)} \\
 &- 4 * \text{Emission } X \text{ im Mikrozyklus 4}
 \end{aligned}
 \tag{4-4}$$

Aus diesen Berechnungen ergeben sich die Zusatzemissionen beim NEDC wie in Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 gezeigt. Gegenüber dem IUFC sind deutlich geringere Zusatzemissionen zu verzeichnen, was vermutlich auf die höhere Umgebungstemperatur von 25 °C zurückzuführen ist. Wieder ist bei den CO₂-Emissionen der Einfluss der Fahrzeugmasse und -leistung ersichtlich.

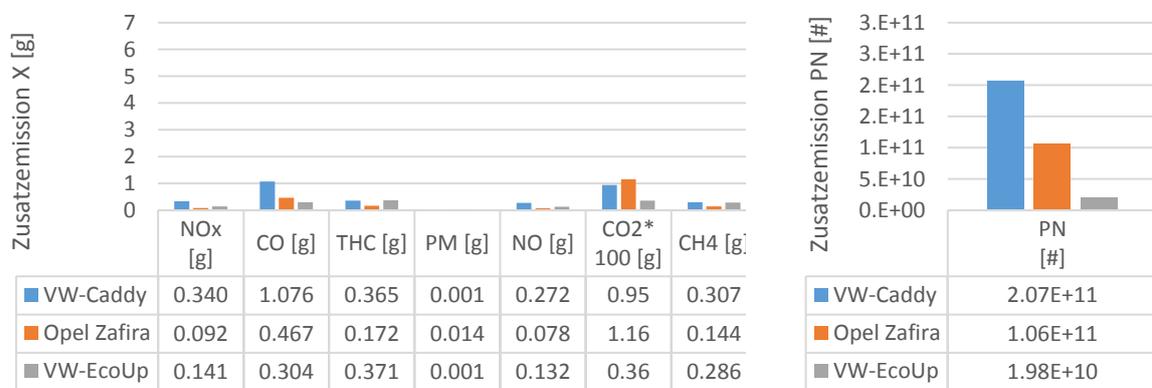


Abbildung 4-11: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 5-Fahrzeuge beim NEDC bei 25 °C

Auffällig hoch verhält sich bei den EURO 6-Fahrzeugen wiederum der Fiat Doblo. Da der Start im NEDC-Zyklus mit CNG erfolgte, können die Ergebnisse mit den anderen Fahrzeugen ohne Einschränkungen verglichen werden. Die CO-Emissionen als auch die PN vom Fiat Doblo sind wesentlich höher als jene vom Audi A3 g-tron. Hingegen ist das NO_x beim Fiat Doblo deutlich geringer als beim Audi A3 g-tron. Der Grund könnte in der gegenseitigen Abhängigkeit von CO und NO_x bei der Abgasnachbehandlung liegen. Der Grund für die erhöhte Partikelanzahl infolge des Kaltstarts kann beim Fiat nicht erklärt werden.

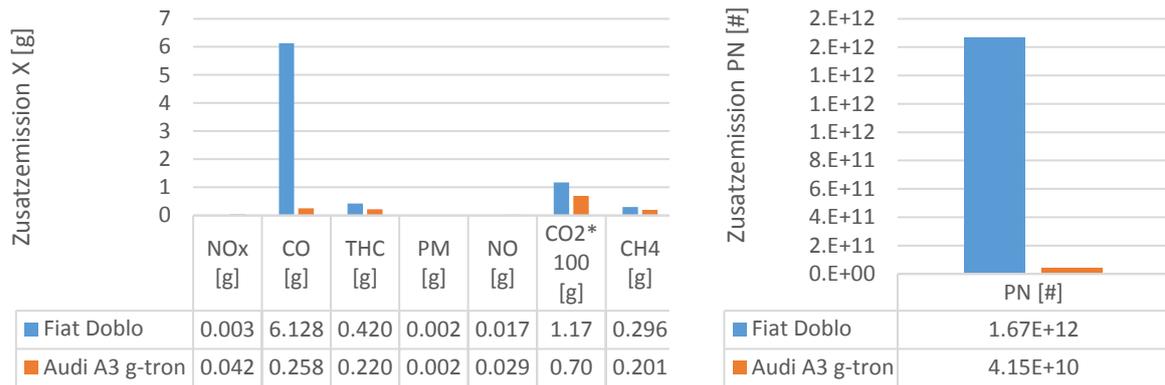


Abbildung 4-12: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 6-Fahrzeuge beim NEDC bei 25 °C

Zur Überprüfung, ob diese Methodik zur Bestimmung der Kaltstartzusatzemissionen auch mit dem NEDC zulässig ist, wurde im nächsten Kapitel ebenfalls eine Validierung durchgeführt.

4.2.1 Validierung der Kaltstartzusatzemissionen im NEDC

Beim NEDC wurden zwei verschiedene Validierungsmethoden eingeführt:

- Bei Validierungsmethode 1 wird beim Warmstart wiederum der gesamte NEDC (4-Mikrozyklen) herangezogen.
- Bei Validierungsmethode 2 wird der erste Mikrozyklus im Warmstart vernachlässigt und ein Mittelwert der Mikrozyklen 2-4 gebildet.

4.2.1.1 Validierungsmethode 1

Anfangs wurden beim NEDC-Warmstart die Emissionen vom gesamten Zyklus anhand des Mikrozyklus-Durchschnittswerts gebildet. Daraufaufgehend wurden die Zusatzemissionen zum NEDC-Warmstart addiert, woraus sich die berechneten Emissionen inklusive Kaltstart im NEDC ergaben. Abschließend wurden die Emissionen im NEDC mit berechnetem Kaltstart mit den Emissionen von der Messung mit Kaltstart verglichen und die Abweichungen bestimmt. Wie bereits beim IUFC sind die Ergebnisse nicht zufriedenstellend und werden deshalb an dieser Stelle nicht gezeigt (Grund siehe Kapitel 4.2.1.2). Sie können jedoch dem Anhang auf Seite 104 entnommen werden.

4.2.1.2 Validierungsmethode 2

Bei der Validierungsmethode 2 wurden beim NEDC-Warmstart nicht die gesamten Emissionen aller 4 Mikrozyklen herangezogen. Es wurden mit den Emissionen der Mikrozyklen 2-4 Mittelwerte gebildet, die die Warmemission im NEDC bei Warmstart pro Mikrozyklus repräsentieren. In Abbildung 4-13 ist dies grafisch gezeigt.

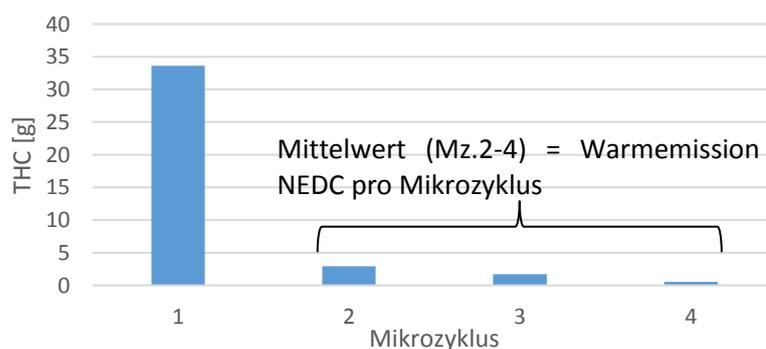


Abbildung 4-13: NEDC-Warmstart beim VW-Caddy (25 °C), kumulierte THC-Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus

Anschließend wurde die Validierungsmethode 2 nach Gleichung (4-5) durchgeführt. Dabei wurden die Warmemissionen NEDC pro Mikrozyklus mit vier multipliziert. Daraus ergeben sich die Emissionen im korrigierten NEDC-Warmstart. Zu diesem werden im nächsten Schritt wiederholt die Zusatzemissionen NEDC addiert. Daraus ergeben sich die berechneten Gesamtemissionen für den NEDC-Kaltstart.

$$\begin{aligned} \text{Gesamtem. } X \text{ berechneter angepasster NEDC Kaltstart} \\ = 4 * \text{Warmem. } X \text{ beim NEDC pro Mikrozyklus} \\ + \text{Zusatzem. } X \text{ NEDC} \end{aligned} \quad (4-5)$$

Nach der Berechnung der absoluten Emissionen des berechneten NEDC-Kaltstart erfolgt wiederum der Vergleich mit den Emissionen der Messung mit Kaltstart. Dabei werden erneut die prozentuellen Abweichungen zwischen Berechnung und Messung bestimmt, wobei als Basis die Messung herangezogen wurde. Die Abweichungen der EURO 5-Fahrzeuge sind in Abbildung 4-14 und die der EURO 6-Fahrzeuge in Abbildung 4-15 abgebildet. Auch bei dem Testzyklus NEDC können mit der Validierungsmethode 2 bessere Ergebnisse als mit der Validierungsmethode 1 erzielt werden.

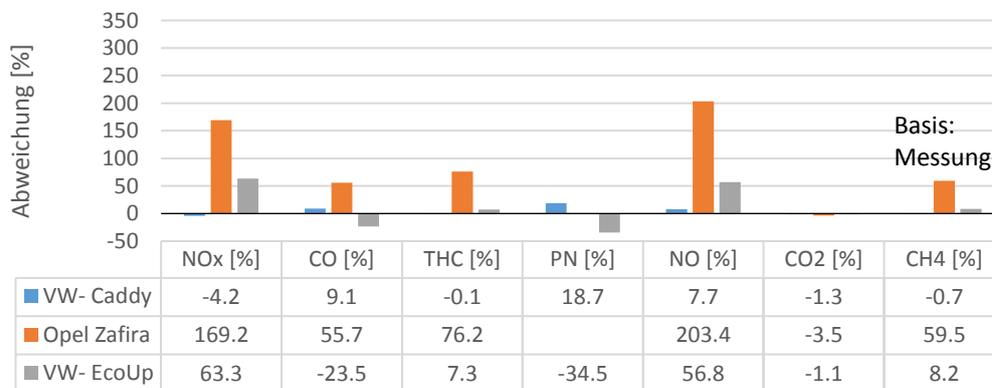


Abbildung 4-14: Abweichung berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung der EURO 5-Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2

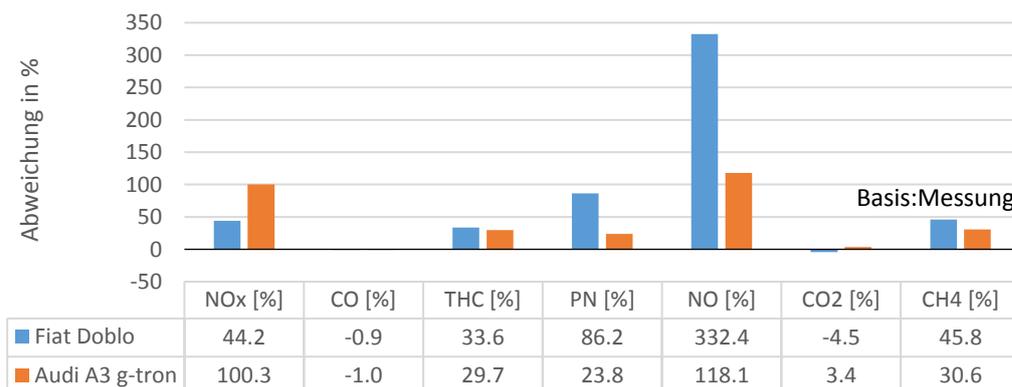


Abbildung 4-15: Abweichung berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung der EURO 6-Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2

Vergleicht man jedoch die Validierungsmethode 2 beim IUFC und NEDC ist ersichtlich, dass beim NEDC die Berechnungen und Messungen der Kaltstarts deutlich mehr voneinander abweichen. Gute Ergebnisse können beim NEDC lediglich beim VW-Caddy erzielt werden. Beim Fiat Doblo und beim Opel Zafira sind beim NEDC deutlich größere Abweichungen gegenüber den anderen Fahrzeugen zu verzeichnen.

Der Grund dafür ist, dass bei den Messungen mit dem Opel Zafira und Fiat Doblo im NEDC-Warmstart bereits mehr emittiert wurde als im NEDC-Kaltstart. Weshalb diese beiden Fahrzeuge bei einigen Schadstoffen im Warmstart mehr emittiert haben als im Kaltstart, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht detektiert werden.

Als Fazit der Untersuchung ergibt sich, dass eingeschränkt auch mit dem NEDC Kaltstartzusatzemissionen berechnet werden können. Allerdings ist der NEDC für die Bestimmung von Kaltstartzusatzemissionen bis auf bei CO₂ weniger geeignet als der IUFC. Der Grund liegt in erster Linie darin, dass nur 4 Mikrozyklen zur Untersuchung zur Verfügung stehen. Beim IUFC kann aufgrund der 10 Mikrozyklen diese Vorgehensweise besser durchgeführt werden.

5 Simulative Untersuchung mit Ergebnissen

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit der Simulation der vermessenen Fahrzeuge. Basis hierfür sind die in Kapitel 3 betrachteten ERMES-Messdaten der drei Fahrzeuge:

- VW-Caddy
- Opel Zafira
- Fiat Doblo

Die Simulationen der beiden anderen Fahrzeuge (Audi A3 g-tron und VW-EcoUp) wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit [24] am Institut durchgeführt und wurden für diese Arbeit übernommen.

Das Kapitel 5 untergliedert sich in folgende Unterkapitel:

- Funktionsweise Simulationssoftware PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model)
- Simulation aller vermessenen Fahrzeuge mit anschließender Validierung der Simulationsergebnisse
- Erstellung der EURO 5- und EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeuge und -kennfelder für die HBEFA Simulation
- Simulation der HBEFA-Zyklen mit den erstellten Durchschnittsfahrzeugen und Durchschnittskennfeldern

5.1 Simulationssoftware PHEM

Bei PHEM handelt es sich um eine am IVT-Institut entwickelte Software. Mit PHEM besteht die Möglichkeit die einzelnen Schadstoffemissionen und den Kraftstoffverbrauch durch zuvor erstellte Emissionskennfelder zu simulieren. Aus [15] zusammengefasst ergibt sich, dass hierzu der Verbrauch sowie die Emissionen in Kennfeldern über Motordrehzahl und Motorleistung vorgegeben werden. Das Simulationsprogramm errechnet sich mittels ebenfalls vorzugebenden Fahrwiderständen, Fahrzeugmasse, Steigung sowie mit der Fahrzeuggeschwindigkeit die sekundlich benötigte Antriebsleistung. Mit der vorgegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit und dem von PHEM bestimmten Gang wird mit den jeweiligen Achs- und Getriebeübersetzungen die sekundliche Motordrehzahl berechnet. Dabei ist die Modellierung des Schaltverhaltens des Fahrers wesentlich. Die Drehzahl kann ebenfalls direkt als Input in PHEM vorgegeben werden. Ist nun Motordrehzahl und Motorleistung bekannt, kann aus den Emissionskennfeldern der Verbrauch sowie die Emissionen für jeden Zeitschritt berechnet werden. Eine grafische Veranschaulichung des Funktionsprinzips von PHEM ist in Abbildung 5-1 abgebildet.

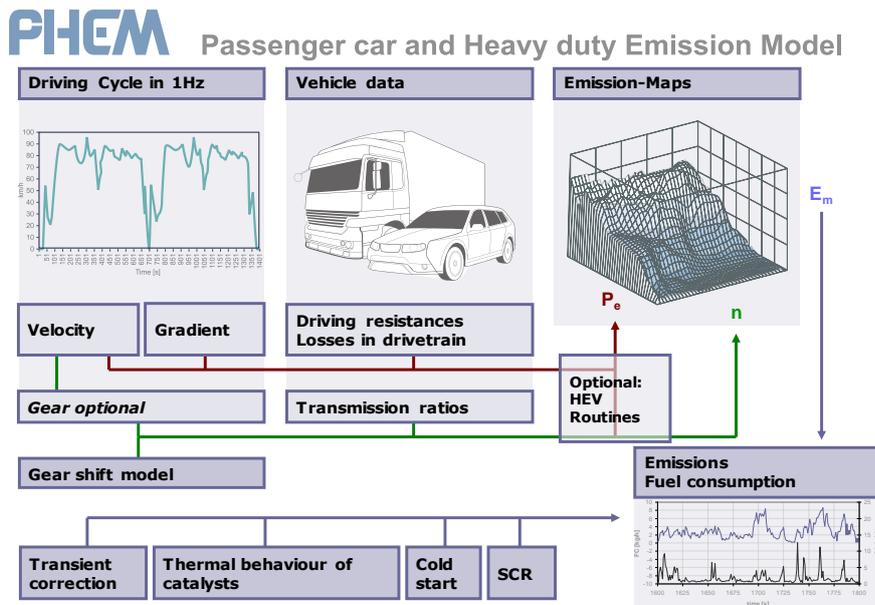


Abbildung 5-1: Funktionsprinzip PHEM [15]

Emissionskennfelder müssen in der Regel selbst erzeugt werden, da sie vom Hersteller nicht zur Verfügung gestellt werden. Werden allerdings Motoren von im Verkehr befindlichen Fahrzeugen am Motorprüfstand für Emissionskennfelder vermessen, ist dies mit großem Aufwand verbunden. Der Motor, die Abgasnachbehandlung und die Steuerelektronik müssen zuerst aus dem Fahrzeug ausgebaut und anschließend am Motorprüfstand aufgebaut werden. Um sich diesen großen Aufwand zu ersparen, besteht mit PHEM auch die Möglichkeit, Emissionskennfelder (auch als Motorkennfelder und Kennfelder bezeichnet) aus Rollenprüfstandsmessungen abzuleiten. Hierzu wird der sekundliche Verlauf der Motordrehzahl und der Antriebsleistung entweder berechnet oder gemessen und die dazu entsprechenden sekundlichen Emissionen in einem Emissionskennfeld eingerastert. Mit den aus den Rollenmessungen erstellten Emissionskennfeldern besteht dann auch die Möglichkeit, Emissionen sowie Kraftstoffverbrauch verschiedener Fahrzyklen zu simulieren.

Bei RDE-Fahrten ist die Radleistung in den meisten Fällen nicht bekannt. Um trotzdem Emissionskennfelder erzeugen zu können, wurde am IVT die CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode entwickelt. Die Berechnung der Leistung erfolgt über den Zusammenhang zwischen Motorleistung, Motordrehzahl und CO_2 . Dieser Zusammenhang ist in einem generischen Kennfeld hinterlegt. Aus diesem Kennfeld wird mittels CO_2 und Motordrehzahl die erforderliche Leistung für jeden Zeitschritt berechnet. Um am Institut einheitliche Simulationen von RDE- und Rollenmessungen zu erhalten, wird die CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode auch bei Rollenmessungen angewendet. Eine genauere Erläuterung der Simulationssoftware PHEM ist in [30] zu finden.

5.1.1 Eingabedaten für das Simulationstool PHEM

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Die grobe Gliederung der Eingabedaten erfolgt dabei in ein VEH-, MAP-, DRI- und FLD-File. Im VEH-File werden alle Fahrzeugdaten eingetragen. Beim MAP-File handelt es sich um das Emissionskennfeld, in dem die Emissionen in Abhängigkeit von Motordrehzahl und Motorleistung eingerastert sind. Das FLD-File beinhaltet die Schlepp- und Vollastkurve. Im DRI-File werden Geschwindigkeitsverlauf und optional die Steigung, Motordrehzahl oder eingelegter Gang für die Simulation vorgegeben. Das NPI-File enthält die Emissionen in Abhängigkeit von der Motordrehzahl und wird u.a. für die Emissionskennfelderstellung benötigt. Für genauere Beschreibungen der einzelnen Dateien wird auf die Literatur [30] verwiesen.

Tabelle 5-1: Eingabedaten PHEM

Daten	Abkürzung /Endung	Eingabeparameter
Fahrzeugdaten	VEH	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugmasse • Beladung • red. Rädermasse • dyn. Reifendurchmesser • Luftwiderstandsbeiwert • Querschnittsfläche • Nebenverbraucherleistung • Rollwiderstandsbeiwerte • Nennleistung • Nenndrehzahl • Leerlaufdrehzahl • Getriebeübersetzungen • Schaltmodellparameter • Getriebeträgheit • Motorträgheit
Motorkennfeld	MAP	Emissionskennfeld (Verbrauch, Emissionen)
Volllastkurve	FLD	Normierte Volllastkurve und Schleppkurve des Verbrennungsmotors
Fahrzyklus	DRI	Fahrzyklus mit Fahrneigung (Geschwindigkeitsverlauf, Steigung, ...)
Messdaten	NPI	Sekündliche Motordrehzahl und Emissionen aus der Messung

Sämtliche Daten für die Erstellung des VEH-Files wurden bereits in Kapitel 0 und Kapitel 3.3.2 aufgelistet. Ergänzend ist zu erwähnen, dass für die Nebenverbraucher bei der Simulation Defaultwerte herangezogen werden. Da bei allen Rollenprüfstandsfahrten Nebenaggregate wie Klimaanlage, Radio, etc. nicht eingeschaltet waren, wurden laut [31] 0.373 kW als Nebenverbraucherleistung, die für den Fahrzeugbetrieb notwendig sind, angenommen.

Weitere erforderliche Daten waren die Volllastkennlinien. Diese wurden in [23] für alle drei Fahrzeuge recherchiert und anschließend normiert. Die Normierung hat den Vorteil, Motoren unterschiedlicher Nennleistung und Nenndrehzahl aber ähnlicher Technologie miteinander vergleichen zu können. Für die Normierung werden die Gleichungen (5-1) bis (5-3) verwendet:

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \tag{5-1}$$

n aktuelle Motordrehzahl [1/min]

n_{idle} Leerlaufdrehzahl [1/min]

n_{rated} Nenndrehzahl [1/min]

$$P_{norm} = \frac{P}{P_{rated}} \tag{5-2}$$

P aktuelle Motorleistung [kW]

P_{rated} Nennleistung [kW]

P_{norm} normierte aktuelle Motorleistung [-]

$$CO_{2_norm} = \frac{CO_2}{P_{rated}} \quad (5-3)$$

CO_2 gemessene CO_2 -Emission [g/h]

CO_{2_norm} normierte CO_2 -Emission [g/kW_{rated}h]

Die Schleppkurven der einzelnen Motoren konnten nicht gefunden werden, weshalb Defaultschleppkurven verwendet wurden. Die Abbildung 5-2, Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die normierten Volllast- und Schleppkurven der im Rahmen dieser Arbeit simulierten Fahrzeuge.

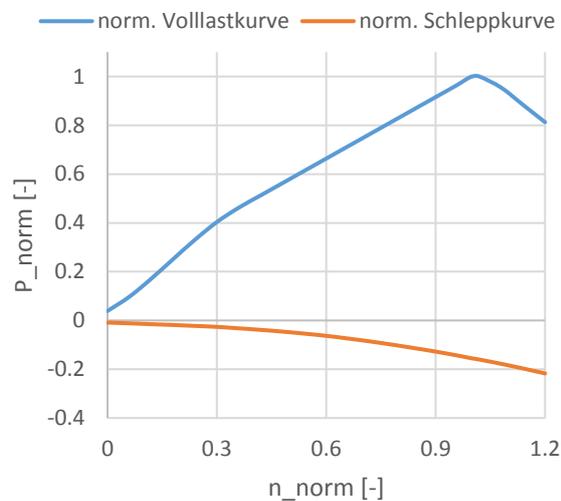


Abbildung 5-2: Normierte Volllast- und Schleppkurve vom Opel Zafira

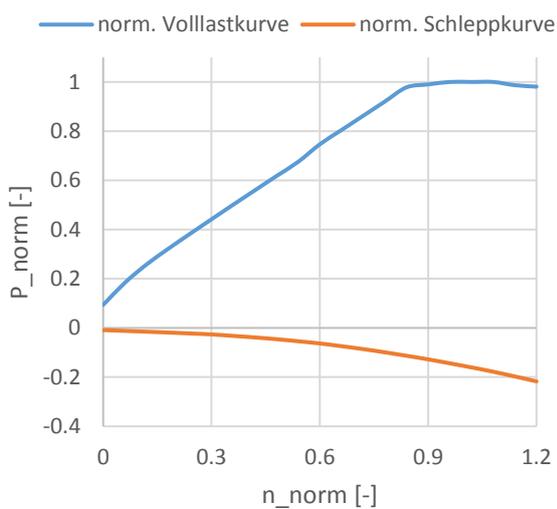


Abbildung 5-3: Normierte Volllast- und Schleppkurve vom VW-Caddy

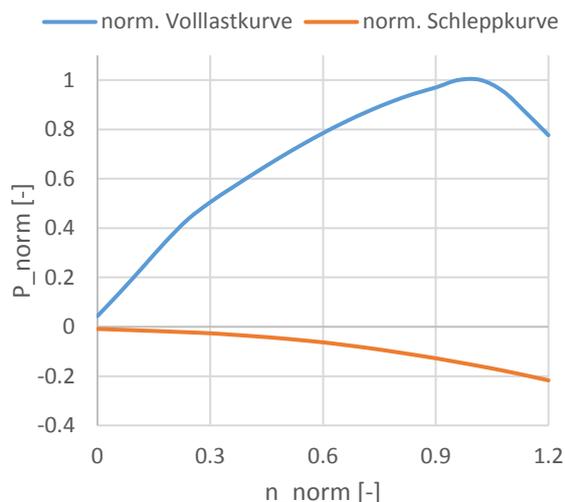


Abbildung 5-4: Normierte Volllast- und Schleppkurve vom Fiat Doblo

5.2 Simulation der Fahrzeuge mit Validierung der Simulationsergebnisse

Ein Kernthema dieser Arbeit war das Erstellen von Emissionskennfeldern, um anschließend ein Durchschnittskennfeld der vermessenen Fahrzeuge zu erzeugen. Der Ablauf der Kennfelderstellung ist bei allen Fahrzeugen ident und wird daher hier nur für den VW-Caddy exemplarisch gezeigt. Der Ablauf für jedes Fahrzeug setzt sich wie folgt zusammen:

1. Kalibrierung des generischen CO₂-Kennfeldes
2. Erstellung der Emissionskennfelder
3. Validierung der erstellten Kennfelder

Nachfolgend sind die einzelnen Punkte im Detail beschrieben.

5.2.1 Kalibrierung des generischen CO₂-Kennfelds

Als Basis wurden im Rahmen dieser Arbeit ein generisches CO₂-Kennfeld eines EURO 5- bzw. EURO 6-Benzinmotors herangezogen, da bis dato noch keine CNG-Kennfelder für die erwähnten Emissionsklassen verfügbar waren und sich die Motoren hinsichtlich Verbrennung und Abgasnachbehandlung ähnlich verhalten.

Für die Kalibrierung wird ein dynamischer Zyklus vom Rollenprüfstand herangezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der ERMES-Zyklus mit Warmstart bei einer Prüfraumtemperatur von 25 °C ausgewählt. In PHEM wird der gemessene Zyklus mit den identen Rolleneinstellungen simuliert. Durch einen Vergleich von gemessenem CO₂ und simuliertem CO₂ über Motorleistung, kann jeweils eine Geradengleichung aufgestellt werden (Abbildung 5-5). Anschließend wird eine Differenzfunktion zwischen Simulation und Messung gebildet. Die sich daraus ergebende Differenz kann im verwendeten generischen Benzinkennfeld aufgeschlagen bzw. abgezogen werden. Abbildung 5-6 zeigt den Verlauf nach der Kalibrierung. Diese Kalibrierung kann iterativ durchgeführt werden. Des Weiteren kann die Kalibrierung ebenfalls über die Motordrehzahl erfolgen, was allerdings aufgrund der guten Übereinstimmung nach der Leistungskalibrierung im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr

durchgeführt wurde.

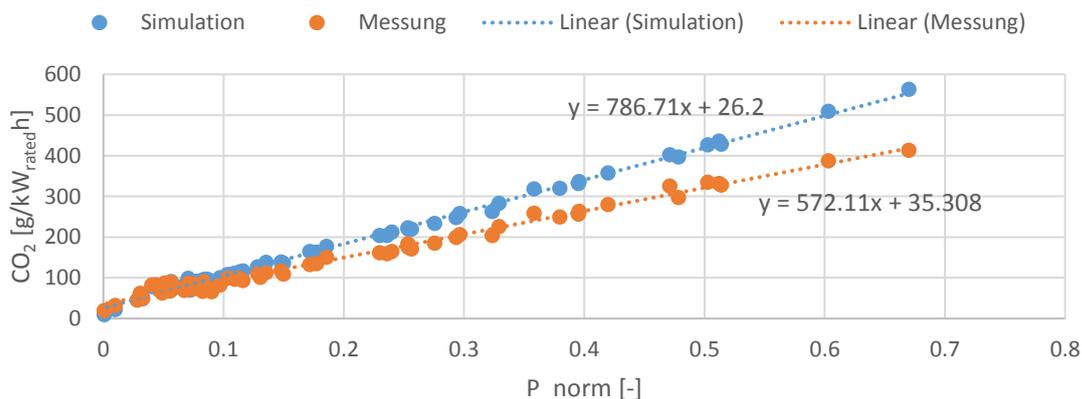


Abbildung 5-5: Vor der Kennfeldkalibrierung - VW-Caddy

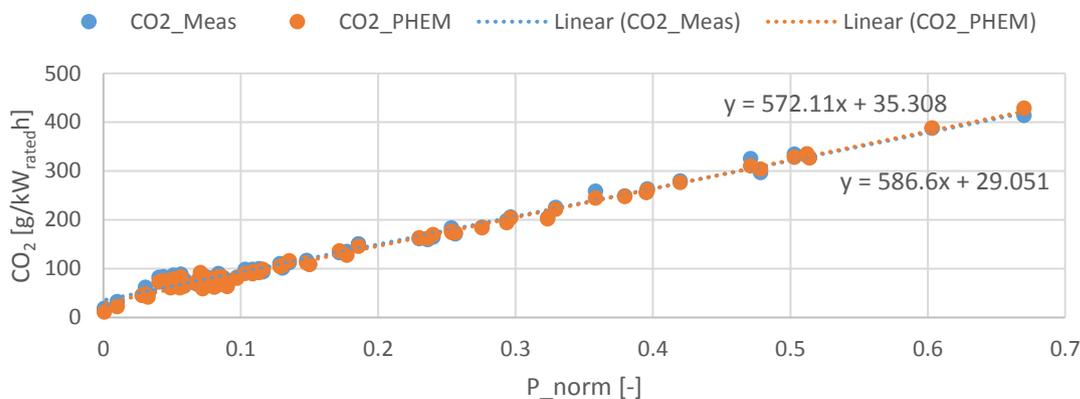


Abbildung 5-6: Nach der Kennfeldkalibrierung - VW-Caddy

Die Abweichungen im ERMES-Zyklus vor und nach der Kalibrierung aller Fahrzeuge werden in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Abweichungen im ERMES-Zyklus vor und nach der Kalibrierung

	Abweichung vor Kalibrierung	Abweichung nach erster Kalibrierung	Abweichung nach zweiter Kalibrierung
Opel Zafira	37.9 %	0.03 %	²
VW-Caddy	26.2 %	-2.5 %	-0.99 %
Fiat Doblo	24.5 %	-1.08 %	-0.5 %

² Aufgrund der geringen Abweichung nach der ersten Kalibrierung keine zweite mehr durchgeführt.

5.2.2 Erstellung der Emissionskennfelder

Die Vorgehensweise von PHEM zur Erstellung von Kennfeldern durch Rollenprüfstandsmessungen wurde bereits erläutert. Für die Kennfelderstellung wurden die ERMES-Zyklen mit Warmstart bei einer Prüfraumtemperatur von 25 °C herangezogen. IUFV und NEDC wurden nicht herangezogen, da es sich bei beiden Zyklen um niederlastige Zyklen handelt.

Zur Erstellung des Emissionskennfeldes wird in PHEM, wie bereits erwähnt, die CO₂-Leistungsinterpolationsmethode herangezogen. Dafür werden u.a. die sekundlichen Motordrehzahlen benötigt, um die Emissionen in einem Kennfeld einrastern zu können. Im Falle des Fiat Doblo und VW-Caddy war die Motordrehzahl als OBD-Signal nicht verfügbar. Deshalb wurde diese über Geschwindigkeit, eingelegtem Gang und dynamischen Reifenradius mit der Gleichung (5-4) berechnet.

$$n_m = \frac{v_F * i_G * i_A * 1000}{2 * r_{dyn} * \pi * 60} \quad (5-4)$$

n_m	Motordrehzahl [1/min]
v_F	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
i_G	Getriebeübersetzung [-]
i_A	Achsübersetzung [-]
r_{dyn}	Dynamischer Radradius [m]

Aufgrund der in Kapitel 3.4.2 erwähnten erhöhten THC- und CH₄-Emissionen zu Beginn des ERMES wurde entschieden, mehrere Varianten der Emissionskennfelderstellung durchzuführen. Die erhöhten Emissionen könnten einen großen Einfluss auf die Emissionskennfelder haben, was folglich die Simulation der HBEFA-Zyklen negativ beeinflussen würde. Um diesen Einfluss der erhöhten Emissionen festzustellen, wurde ebenso ein Kennfeld ohne der Warmlaufphase nach Kapitel 3.4.2.2 erstellt. Da sich die genaue Untersuchung der einzelnen Warmlaufphasen bei einigen Fahrzeugen schwierig gestaltete und alle Fahrzeuge verschiedene Warmlaufverhalten aufweisen, wurde entschieden, ein weiteres Kennfeld zu erstellen. Für diese Variante wurden die ersten 300 Sekunden als Warmlaufphase definiert. Allerdings wird bei dieser Variante ein großer Teil der Messdaten nicht berücksichtigt, was sich negativ auf die Kennfeldqualität auswirken könnte. Die drei Varianten mit deren Bezeichnungen sind in Tabelle 5-3 aufgelistet.

Tabelle 5-3: Beschreibung der drei verschiedenen Kennfelderstellungsvarianten

Abkürzung	Bezeichnung	Beschreibung
ERMES_ges	ERMES gesamt	Gesamte Messdaten aus ERMES als Basis für die Simulation
ERMES_mod_xx	ERMES_modifiziert_xx Sekunden	xx Sekunden gelten als Warmlaufphase und werden für die Kennfelderstellung nicht berücksichtigt xx = 65 s bei Fiat Doblo und VW-Caddy xx =90 s beim Opel Zafira
ERMES_mod_300	ERMES_modifiziert_300 Sekunden	300 Sekunden gelten als Warmlaufphase und werden für die Kennfelderstellung nicht berücksichtigt

Für Variante „ERMES_mod_xx“ wurde die Warmlaufphase anhand des THC und CH₄-Verlaufs visuell abgeschätzt (Abbildung 5-7). Der hinterlegte Bereich in Abbildung 5-7 zu Beginn, der als Warmlaufphase bezeichnet wird, wird nicht als Datenbasis für die Simulation herangezogen.

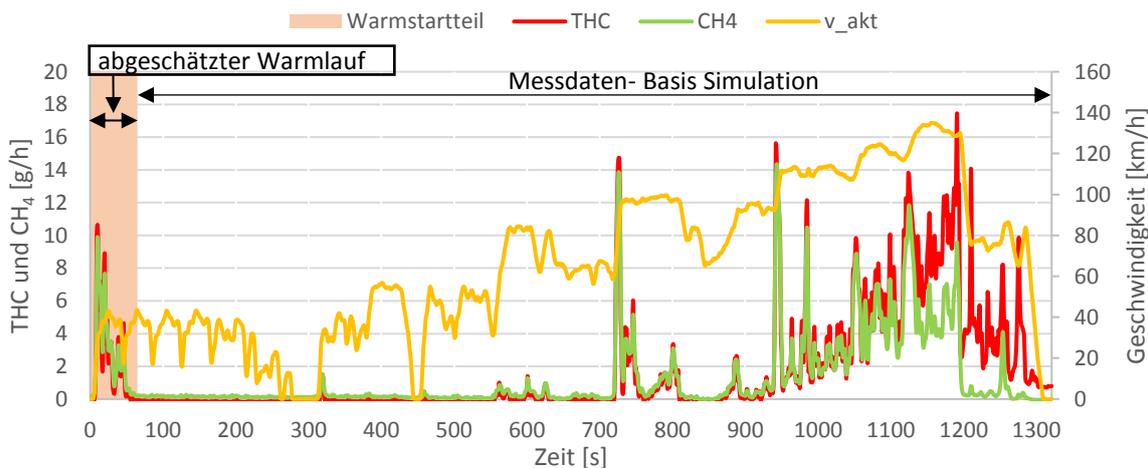


Abbildung 5-7: Kennfelderstellung ohne Warmlaufphase - (Messung ERMES-Warmstart mit VW-Caddy bei 25 °C)

Bei der Variante „ERMES_modifiziert_300 Sekunden“ wurde die Warmlaufphase mit den ersten 300 s definiert (Abbildung 5-8) und nicht für die Kennfelderstellung herangezogen.

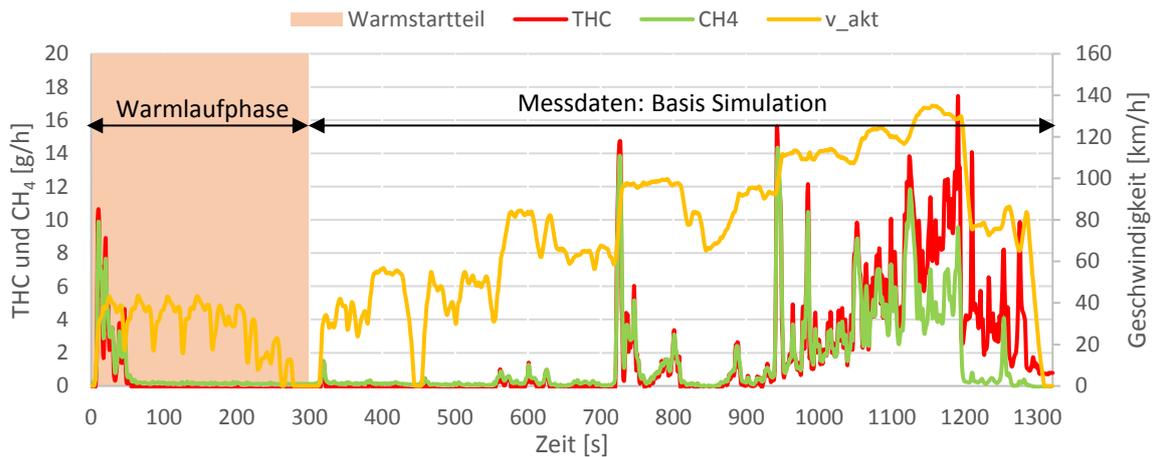


Abbildung 5-8: Kennfelderstellung unter Berücksichtigung des Warmstartteils von 300 Sekunden - (Messung ERMES-Warmstart mit VW-Caddy bei 25 °C)

5.2.3 Validierung der Kennfelder

Für die Validierung der Kennfelder wurden die Simulationsergebnisse mit den dazugehörigen Messdaten verglichen. Voraussetzung dafür sind idente Rolleneinstellungen bei Simulation und Messung. Für die Validierung des Emissionskennfeldes ERMES_ges wird der ERMES gewählt. Für die beiden anderen Kennfelder erfolgt die Validierung mit den einzelnen modifizierten ERMES-Zyklen. Hierzu wird für den Vergleich auch die ERMES-Messung dementsprechend modifiziert (Warmlaufphasen in der Messung nicht berücksichtigt), um folglich korrekt die Messung und Simulation vergleichen zu können. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation erfolgt über die prozentuellen Abweichungen, mit denen Aussagen über die Qualität der einzelnen Kennfelder getroffen werden können. Im Folgenden werden die Validierungsergebnisse der drei Kennfeldoptionen (ERMES_ges, ERMES_mod_xx, ERMES_mod_300) für alle drei Fahrzeuge diskutiert und die Ergebnisse zusammengefasst.

5.2.3.1 Prozentuelle Abweichung Messung und Simulation beim VW-Caddy

In Abbildung 5-9 sind die Abweichungen von Messung und Simulation des VW-Caddy dargestellt. Es ist vor allem bei den Kohlenwasserstoffen und Partikelemissionen eine deutliche Verbesserung der prozentuellen Abweichungen des ERMES_mod_300 gegenüber dem ERMES_ges erkennbar. Dies könnte auf die Warmlaufphase und somit die erhöhten Emissionen zu Beginn zurückzuführen sein.

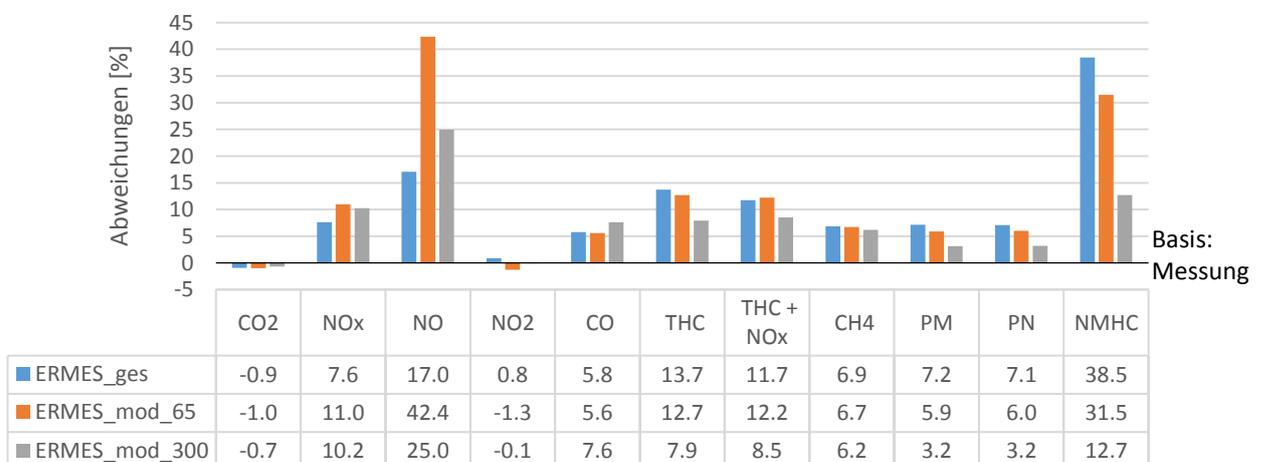


Abbildung 5-9: Vergleich Messung und Simulation ERMES_ges, ERMES_mod_65, und ERMES_mod_300 beim VW-Caddy

5.2.3.2 Prozentuelle Abweichung Messung und Simulation beim Opel Zafira

Abbildung 5-10 zeigt die prozentuellen Abweichungen der simulierten gegenüber den gemessenen Schadstoffemissionen beim Opel Zafira. Wiederum sind Verbesserungen bei den THC- und CH₄-Emissionen des Kennfeldes ERMES_mod_300 gegenüber dem ERMES_ges feststellbar.

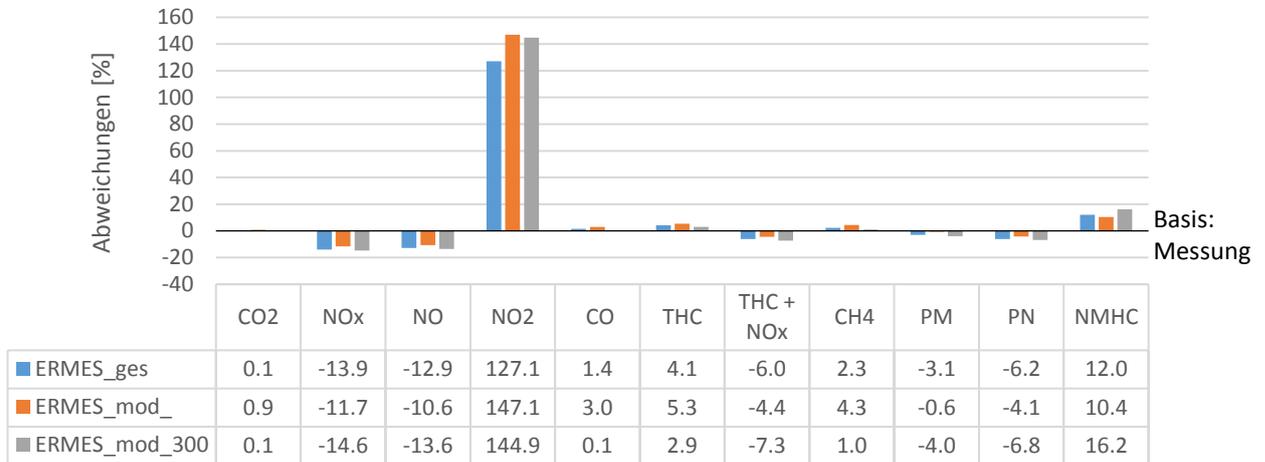


Abbildung 5-10: Vergleich Messung und Simulation von gesamten ERMES, ERMES_mod_65, und ERMES_mod_300 beim Opel Zafira

5.2.3.3 Prozentuelle Abweichung Messung und Simulation beim Fiat Doblo

Abbildung 5-11 zeigt die prozentuellen Abweichungen vom Fiat Doblo. Auch hier bestätigen sich die Verbesserungen der Kohlenwasserstoff- und Partikelmassemissionen beim angepassten Kennfeld ERMES_mod_300 gegenüber dem ERMES_ges. Allerdings sind mit dem Kennfeld ERMES_mod_300 bei den anderen Schadstoffkomponenten die Abweichungen größer.

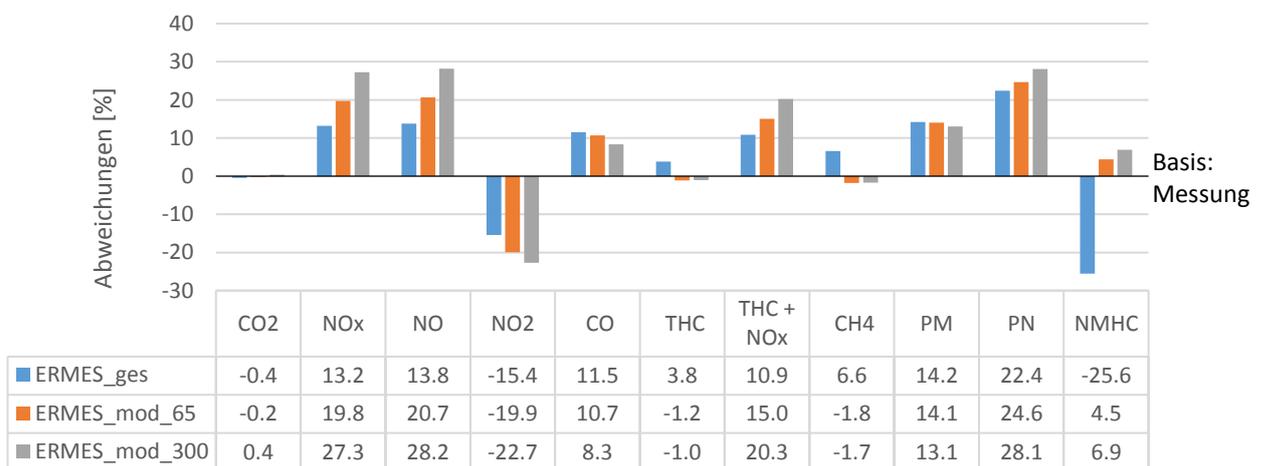


Abbildung 5-11: Vergleich Messung und Simulation von gesamten ERMES, ERMES_mod_65, und ERMES_mod_300 beim Fiat Doblo

5.2.3.4 Zusammenfassung Validierung

Zusammenfassend ergibt sich aus der Validierung der Simulation, dass sich die THC- und CH₄-Emissionen bei beiden modifizierten Kennfeldern stets verbessern. Des Weiteren werden bei den Partikelemissionen und beim CO₂ mit den modifizierten Kennfeldern bessere Validierungsergebnisse erzielt. Ausgenommen ist bei PM und PN der Opel Zafira. Außer beim VW-Caddy können auch beim CO bessere Ergebnisse erzielt werden. Bei den NO_x-Emissionen ist keine Verbesserung der Abweichungen zu beobachten. Der Grund liegt darin, dass durch die geringere Anzahl an Lastpunkten, die NO_x-Spitzen die modifizierten Kennfelder stärker beeinflussen.

Jedoch ist ersichtlich, dass bei allen erstellten Kennfeldern zufriedenstellende Simulationsergebnisse erzielt werden können, was durch die geringen prozentuellen Abweichungen zwischen Messung und Simulation bestätigt wird. Die guten Simulationsergebnisse im ERMES-Zyklus sind darauf zurückzuführen, dass auch die Kennfelderstellung mittels ERMES-Zyklen durchgeführt wurde. Aus den Untersuchungen und Validierungen der Kennfelder wurde entschieden, für die Erstellung des Durchschnittskennfelds die ERMES_mod_300-Emissionskennfelder heranzuziehen. Dadurch ist eine einheitliche Vorgehensweise bei der Kennfelderstellung gewährleistet.

5.3 Erstellung der Durchschnittskennfelder und Durchschnittsfahrzeuge

Um für das HBEFA-Update repräsentative Emissionsfaktoren zu erhalten, bedarf es der Erstellung eines Durchschnittsfahrzeugs sowie Durchschnittskennfelds für die Abgasnorm EURO 5 und EURO 6. Hierzu wurden zwei verschiedene Kennfelder und drei verschiedene Fahrzeuge mit unterschiedlichen Gewichtungsvarianten für die jeweilige Abgasnorm erstellt:

- **Gewichtungsvariante 1** (im Weiteren auch als Variante 1 geführt)

Untersuchte Fahrzeuge werden mit einem Gewichtungsfaktor von 1 zu einem durchschnittlichen Fahrzeug zusammengewichtet. Analoges Vorgehen für das durchschnittliche Emissionskennfeld. Gewichtungsvariante 1 dient zur Validierung.

- **Gewichtungsvariante 2** (im Weiteren auch als Variante 2 geführt)

Das durchschnittliche Emissionskennfeld sowie Fahrzeug wird nach Neuzulassungen der untersuchten Fahrzeuge gewichtet. Diese Gewichtungsvariante dient als Basis für die Validierung.

- **Gewichtungsvariante 3** (im Weiteren auch als Variante 3 geführt)

Die Fahrzeugmassen und die Leistungen werden nach allen neu zugelassenen CNG-Fahrzeuge im Jahr 2013 (EURO 5) und 2016 (EURO 6) gewichtet. Diese Daten dienen als Basis für die Simulation der HBEFA- Zyklen.

Für die Gewichtung nach Neuzulassungen wurden die Zulassungsstatistiken der Europäischen Union [32] herangezogen. Um nun repräsentative Neuzulassungen für die jeweiligen Fahrzeuge zu erhalten, wurde recherchiert, in welchem Jahr lediglich EURO 5 und in welchem Jahr EURO 6 Fahrzeuge neu zugelassen wurden. Hierzu wurde das Datum der Erstzulassungen von den jeweiligen Abgasnormen herangezogen. Diese sind in Tabelle 5-4 aufgelistet. Bei der Erstzulassung handelt es sich laut [33]: „Um den Tag in dem ein Kraftfahrzeug erstmals allgemein und sachlich unbeschränkt zum öffentlichen Verkehr im Inland oder im Ausland amtlich zugelassen oder in Betrieb genommen wird“.

Tabelle 5-4: Erstzulassungen von EURO 5a, EURO 5b und EURO 6b aus [34]

	EURO 5a	EURO 5b	EURO 6b
Typengenehmigung	01.09.2009	01.09.2011	01.09.2014
Erstzulassung	01.01.2011	01.01.2013	01.09.2015

Die Tabelle verdeutlicht, dass für das Durchschnittskennfeld-EURO 5 die Neuzulassungen der Jahre 2011 und 2013 repräsentativ wären. Im Jahr 2014 wurden bereits neue EURO 6-Fahrzeugtypen zugelassen und somit soll dieses Jahr nicht für das gewichtete EURO 5-Durchschnittskennfeld herangezogen werden. Andernfalls würden hierbei Mischungen der Fahrzeuge zwischen den beiden Abgasnormen entstehen. Weitere Betrachtungen zeigen, dass im Jahr 2011 keine Neuzulassungen vom VW-EcoUp stattfanden, wobei dieses Fahrzeug im Jahr 2013 das am öftesten neu zugelassene Fahrzeug war. Aufgrund dessen wird entschieden, das Jahr 2013 als repräsentatives Jahr für die Erstellung des EURO 5-Durchschnittsfahrzeugs und -kennfelds festzulegen.

Für EURO 6-Fahrzeuge hingegen wird das Jahr 2016 als relevantes Jahr gewählt, da hier ausschließlich EURO 6-Fahrzeuge neu zugelassen wurden. Im Jahr 2015 wurden wie im Jahr 2014 sowohl EURO 5- als auch EURO 6-Fahrzeuge neu zugelassen und eine Differenzierung der unterschiedlichen Abgasnormen war anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Wie Abbildung 5-12 zeigt, ergeben sich für die vermessenen Fahrzeuge folgende Neuzulassungen im Jahr 2013 und 2016. Dabei bedeutet im Diagramm „Gesamt“ die Summe der neuzugelassenen Versuchsfahrzeuge in den Jahren 2013 und 2016.

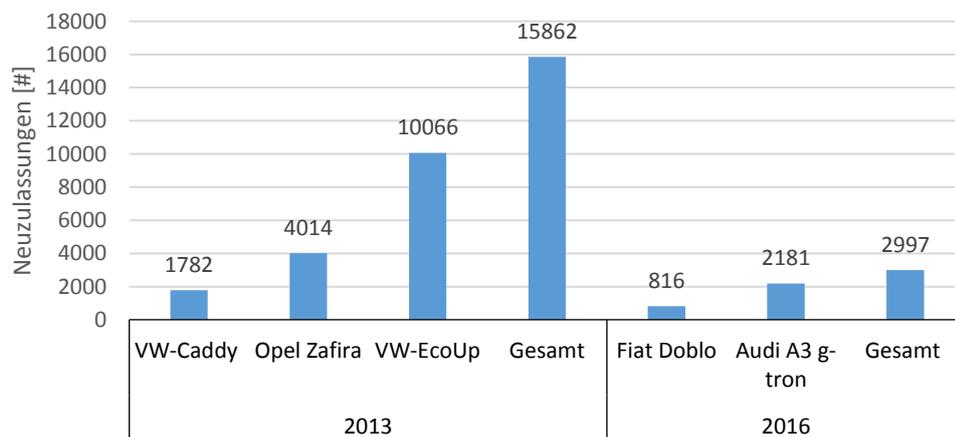


Abbildung 5-12: Neuzulassungen der vermessenen Fahrzeuge im Jahr 2013 und 2016

In der Abbildung 5-13 erfolgt die Gegenüberstellung der vermessenen mit den gesamten neu zugelassenen Fahrzeugen. Im Jahr 2013 stellen die vermessenen EURO 5-Fahrzeuge ungefähr 20 % der gesamten neu zugelassenen Fahrzeuge dar. Dieser Anteil beläuft sich im Jahr 2016 hingegen nur auf ungefähr 5 %. Zurückzuführen ist dies auf die Vermessung von nur zwei EURO 6-Fahrzeugen und auf die geringe Anzahl an Neuzulassungen des Fahrzeugs Fiat Doblo.

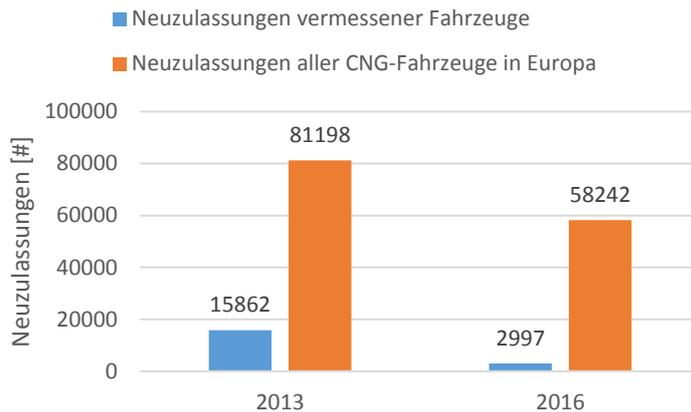


Abbildung 5-13: Vergleich Neuzulassungen der vermessenen Fahrzeuge zu allen neu zugelassenen Fahrzeugen im Jahr 2013 und 2016

5.3.1 Durchschnittliche Emissionskennfelder

Die Vorgehensweisen zur Erstellung des Durchschnittsfahrzeugs und Durchschnittskennfelds sind prinzipiell gleich. Bei der Erstellung der Durchschnittskennfelder ist die Unterscheidung von inter- und extrapolierten Werten an den einzelnen Stützstellen im Kennfeld von Bedeutung. Es werden interpolierte vor extrapolierten Werten bevorzugt.

5.3.1.1 Durchschnittskennfeld mit Gewichtungsvariante 1

In Abbildung 5-14 ist die Vorgehensweise zur Erstellung des EURO 5- bzw. EURO 6-Durchschnittskennfeldes mit Gewichtungsvariante 1 bildlich gezeigt. Hierbei wurde der Durchschnitt der einzelnen Kennfeldstützstellen der jeweiligen Emissionskomponente gebildet, wobei inter- den extrapolierten Werten vorgezogen wurden.

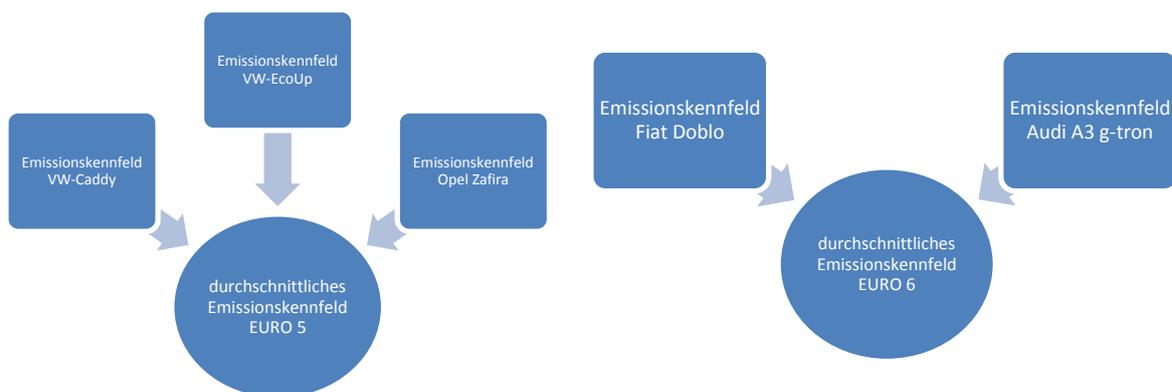


Abbildung 5-14: schematische Vorgehensweise zur Erstellung der durchschnittlichen EURO 5- und EURO 6-Emissionskennfelder nach Gewichtungsvariante 1

5.3.1.2 Durchschnittskennfeld mit Gewichtungsvariante 2

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Erstellung des EURO 5-Durchschnittskennfeldes, mit der Gewichtungsvariante 2 beschrieben. Hierzu werden an den Kennfeldstützstellen die Durchschnittswerte wie in Gleichung (5-5) bestimmt. Berücksichtigung von inter- und extrapolierten Werten erfolgt wie bereits vorhin beschrieben.

$$\begin{aligned} \emptyset Em_{\cdot EURO 5 var.2} &= \frac{1}{\sum Neuz.} * (Neuz_{\cdot Caddy} * Em_{\cdot Caddy} + Neuz_{\cdot Zafira} * Em_{\cdot Zafira} \\ &+ Neuz_{\cdot Up} * Em_{\cdot Up}) \end{aligned} \quad (5-5)$$

$\sum Neuz.$ Summe Neuzulassungen VW-Caddy, Opel Zafira und VW-EcoUp im Jahr 2013

Em_x Stützstellenwert einer Emission des Fahrzeugs x

$Neuz_x$ Neuzulassungen des Fahrzeugs x im Jahr 2013

5.3.2 Durchschnittsfahrzeuge

Wie bei den Durchschnittskennfeldern werden auch bei den Durchschnittsfahrzeugen zu jeder Abgasklasse ein Fahrzeug mit der Gewichtungsvariante 1 sowie Gewichtungsvariante 2 erstellt. Als Basis für die Bildung des Durchschnitts sowie für die Gewichtung dienen wiederum die Daten der vermessenen CNG-Fahrzeuge der jeweiligen Abgasnorm. Dabei wurden die Massen und Leistungen der jeweiligen Versuchsfahrzeuge im Jahr 2013 und 2016 nach Variante 1 und 2 gewichtet. Die Berechnung der Durchschnittsdaten kann dem Anhang auf Seite 105 entnommen werden. Da für die Simulation der HBEFA-Zyklen die Fahrzeugleistung und –masse nach der Gewichtungsvariante 3 herangezogen wurde, war des Weiteren eine Recherche aller im Jahr 2013 und 2016 neu zugelassenen CNG-Fahrzeuge erforderlich. Anhand von [32] konnte bei den recherchierten Fahrzeugmassen nicht eindeutig herausgefunden werden, ob es sich bei der angegebenen Masse um die DIN-Leermasse oder um die EU-Masse des jeweiligen Fahrzeugs handelte. Der Unterschied der beiden Massen liegt darin, dass die EU-Masse einen Fahrer mit einer Masse von 75 kg bereits berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die nicht eindeutig definierten Massen als EU-Massen angenommen. Der Grund dafür ist, dass diese Masse gesetzlich definiert ist und somit auch die am häufigsten angegebene Fahrzeugmasse ist. Die Gegenüberstellung der Daten ist in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 abgebildet.

Tabelle 5-5: Fahrzeugmassen und Leistung des EURO 5-Benzin-Durchschnittsfahrzeugs sowie CNG-Durchschnittsfahrzeugs nach den unterschiedlichen Gewichtungsvarianten

EURO 5	Masse [kg]	Leistung [kW]
EURO 5-Benzin-Durchschnittsfahrzeug	1272 (EU)	80
Gewichtungsvariante 1	1489 (EU)	80
Gewichtungsvariante 2	1291 (EU)	69
Gewichtungsvariante 3	1273 (EU)	64

Der Vergleich der Massen und Leistungen der Gewichtungsvariante 3 mit den jeweiligen Benzin-Durchschnittsfahrzeugen bei EURO 5 und EURO 6 zeigt geringe Unterschiede bei der Masse. Bei der Leistung sind größere Unterschiede zu erkennen. Die Gewichtungsvariante 2 und Gewichtungsvariante 3 haben bei EURO 5 beide ähnliche Massen und Leistungen. Die Gewichtungsvariante 1 zeigt, dass sie bei den Massen deutliche über den anderen Fahrzeugen liegt.

Bei EURO 6 sind die Leistungen von den Gewichtungsvarianten 1 und 2 sowie vom Benzin-Durchschnittsfahrzeug ähnlich. Die Leistung der Gewichtungsvariante 3 liegt jedoch deutlich unter den anderen Varianten. Die Masse der Gewichtungsvariante 3 ist der Masse des Benzin-Durchschnittsfahrzeugs ähnlich.

Tabelle 5-6: Fahrzeugmassen und Leistung des EURO 6 Benzin-Durchschnittsfahrzeugs sowie CNG-Durchschnittsfahrzeugs nach den unterschiedlichen Gewichtungsvarianten

EURO 6	Masse [kg]	Leistung [kW]
EURO 6-Benzin-Durchschnittsfahrzeug	1208 (EU)	84
Gewichtungsvariante 1	1479 (EU)	85
Gewichtungsvariante 2	1418 (EU)	83
Gewichtungsvariante 3	1291 (EU)	71

Für die Validierung der Gewichtungsvarianten 1 und 2 wurden die oben erwähnten Leistungen und Massen verwendet. Auch die Getriebeübersetzungen haben wesentlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Für das nachfolgende Validierungskapitel wurde daher entschieden, die vorhandenen Getriebeübersetzungen der vermessenen Versuchsfahrzeuge und die der Benzin-Durchschnittsfahrzeuge heranzuziehen. Des Weiteren wurden Getriebedaten von Fahrzeugen recherchiert, dessen Massen und Leistungen ähnlich jener von Gewichtungsvariante 1 oder 2 waren. Diese Recherche gestaltete sich schwierig, da CNG-Fahrzeuge mit diesen genauen gewichteten Werten nicht vorhanden sind. Schlussendlich konnten aber aus [23] CNG-Fahrzeuge mit ähnlichen Fahrzeugleistungen und Fahrzeugmassen gefunden werden. Die Tabelle 5-7 zeigt diese Fahrzeuge mit den zugehörigen Daten. Für EURO 6 wurde ein VW-Golf eruiert. Mit dem Fiat Panda sowie Fiat Punto wurden ebenfalls 2 Fahrzeuge der Abgasnorm EURO 5 gefunden.

Tabelle 5-7: Fahrzeuge mit ähnlicher Masse und Leistung wie das Durchschnittsfahrzeug nach Gewichtungsvariante 1 und 2

Fahrzeug	Masse [kg]	Leistung [kW]
VW-Golf (EURO 6)	1324 (EU)	81
Fiat Panda (EURO 5)	1155 (EU)	59
Fiat Punto (EURO 5)	1245 (EU)	51

Welches Getriebe schlussendlich für die HBEFA-Simulation herangezogen wurde, wird mit der nachfolgenden Validierung gezeigt.

5.4 Validierung Durchschnittsfahrzeug und Durchschnittskennfeld

Nachdem die Durchschnittskennfelder sowie Durchschnittsfahrzeuge erstellt wurden, erfolgte die Validierung. Dabei wird ein Prüfzyklus `ERMES_mod_300` simuliert und anschließend mit der modifizierten Messung (wo ebenfalls die ersten 300 Sekunden entfernt wurden) verglichen. Der Ablauf ist für die Abgasnorm EURO 5 und EURO 6 gleich. Als Basis für die Simulation werden die zuvor erstellten Durchschnittsfahrzeuge und -kennfelder mit der Gewichtungsvariante 1 und 2 herangezogen. Die Volllastkurven wurden vom Benzin-Durchschnittsfahrzeug übernommen, da von den CNG-Fahrzeugen keine Daten verfügbar waren. Der schematische Ablauf der Vorgehensweise zur Validierung des Durchschnittsfahrzeugs und -kennfelds nach Gewichtungsvariante 1 wird in Abbildung 5-15 dargestellt. Der Ablauf für die Gewichtungsvariante 2 erfolgt analog.

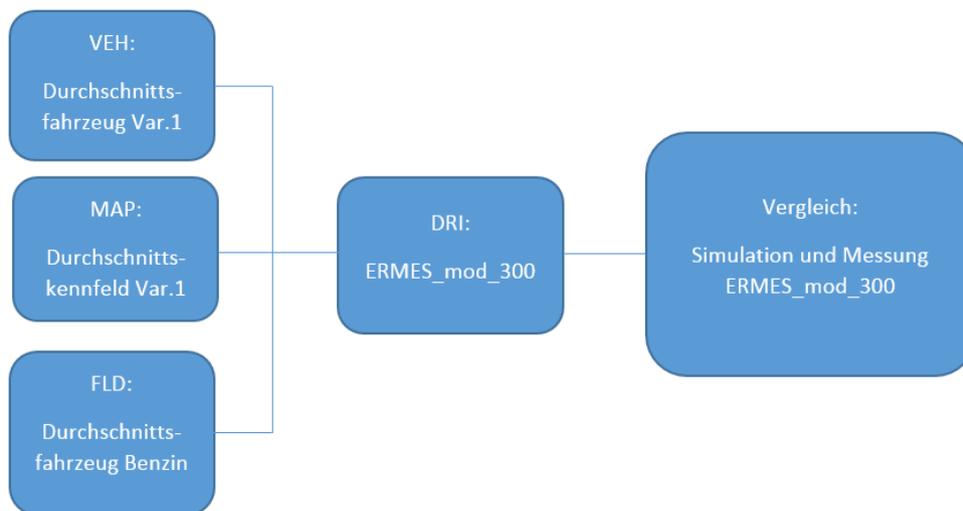


Abbildung 5-15: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Validierung des Durchschnittsfahrzeugs und Durchschnittskennfelds für Gewichtungsvariante 1

In den folgenden Kapiteln erfolgt die Bestimmung der prozentuellen Abweichungen zwischen Messung und Simulation für EURO 5 und EURO 6.



5.4.1.1 Validierung EURO 5

Mit dem Durchschnittsfahrzeug- und kennfeld nach der Gewichtungsvariante 1 wurden in der Simulation zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Die prozentuellen Abweichungen sind in Abbildung 5-16 dargestellt. Demnach hat die Getriebeübersetzung einen wesentlichen Einfluss.

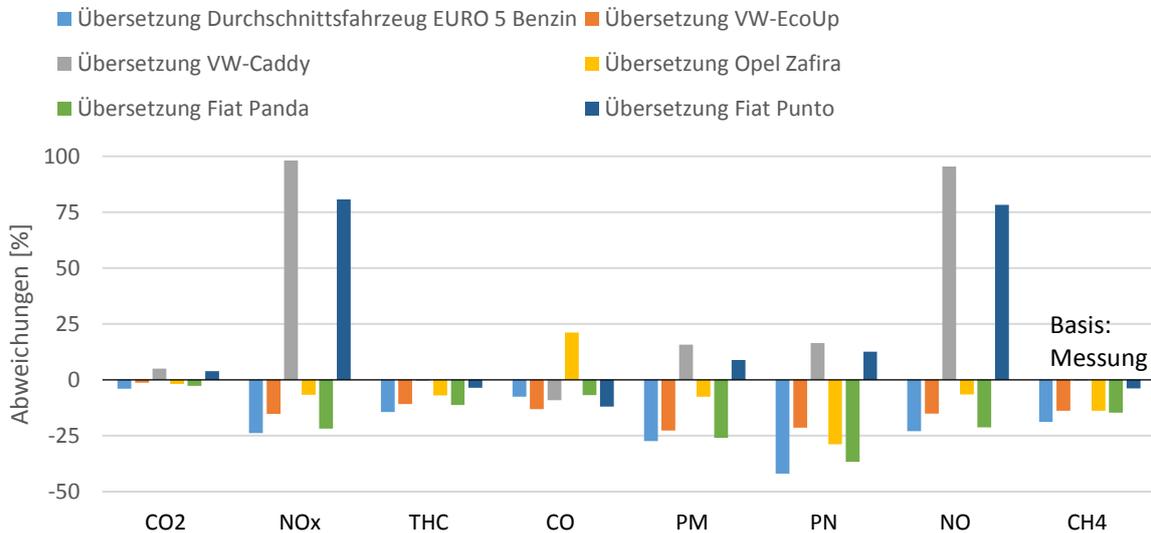


Abbildung 5-16: Validierung von ERMES_mod_300 EURO 5-Durchschnittsfahrzeugs und –kennfelds mit Gewichtungsvariante 1

Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation verhalten sich mit den Getriebeübersetzungen der Fahrzeuge VW-EcoUp und Opel Zafira ähnlich. Bei den anderen Fahrzeugen hingegen sind bei NOx größere Abweichungen erkennbar. Vor allem mit dem Getriebe des VW-Caddy und Fiat Punto liegen die Abweichungen beim NO sowie NOx weit über jenen der anderen Fahrzeuge. Um den Grund dafür zu eruieren, wurden in Abbildung 5-17 die NOx-Emissionskennfelder vom VW-Caddy und vom Opel Zafira nach Gewichtungsvariante 1 abgebildet, sowie die Lastpunkte mit den verschiedenen Getrieben eingezeichnet. In den Kennfeldern sind die spezifischen NOx-Werte in [g/kWh] abgebildet. Ab einer normierten Leistung von 0.8 ist die Bildung von NOx ausgeprägt. Die dabei in der linken Abbildung dargestellten Betriebspunkte des VW-Caddy im ERMES_mod_300 liegen nahe diesem Bereich, was zu den großen Abweichungen führt. Hingegen zeigt die Übersetzung des Getriebes vom Opel, dass die Betriebspunkte weiter in dem Bereich der geringeren NOx-Bildung liegen.

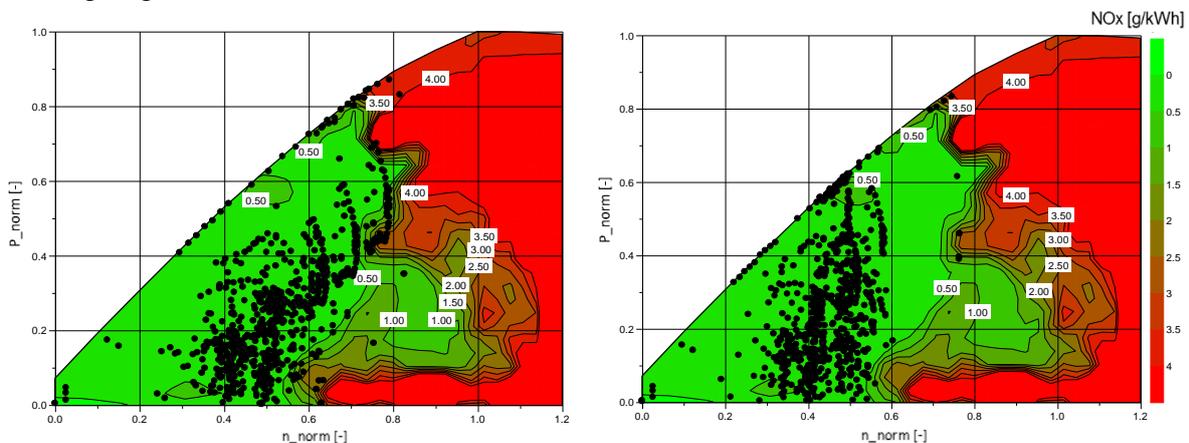


Abbildung 5-17: Vergleich der Betriebspunkte im ERMES_mod_300 vom Getriebe VW-Caddy (links) und Getriebe Opel Zafira (rechts) beim NOx-Durchschnittskennfeld nach Gewichtungsvariante 1

Mit Simulationen nach Gewichtungsvariante 1 werden plausible Ergebnisse erzielt. Wie bereits erwähnt, haben die Getriebeübersetzungen aber einen wesentlichen Einfluss auf das simulierte Emissionsverhalten.

Die prozentuellen Abweichungen für die Gewichtungsvariante 2 werden in Abbildung 5-18 gezeigt.

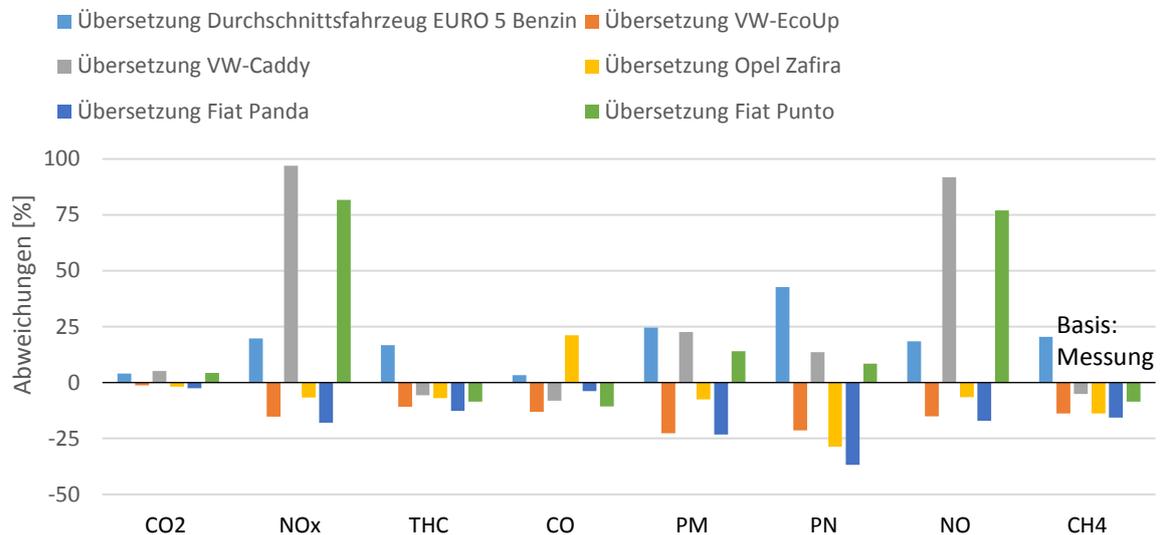


Abbildung 5-18: Validierung von ERMES_mod_300 des EURO 5-Durchschnittsfahrzeugs und -kennfelds mit Gewichtungsvariante 2

Auch hier sind mit den Getriebeübersetzungen des VW-Caddy und Fiat Punto große Abweichungen beim NOx und NO vorhanden. Somit scheidet diese beiden Getriebe für das EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug bei der HBEFA-Simulation aus. Beim Getriebe des Fiat Panda und des Benzin-Durchschnittsfahrzeugs bestehen große Abweichungen bei der Partikelanzahl und Partikelmasse, wodurch auch diese beiden Getriebe ausgeschlossen werden können. Mit den beiden Getrieben vom VW-EcoUp und mit jenem vom Opel Zafira werden die geringsten Abweichungen bei der Validierung erreicht, sowohl für die Validierung mit der Gewichtungsvariante 1 als auch mit der Variante 2. Aufgrund der ungefähr doppelt so hohen Neuzulassungen des VW-EcoUp gegenüber dem Opel Zafira, wurde entschieden, das Getriebe des VW-EcoUp für die HBEFA-Simulation heranzuziehen. Ein weiterer Grund für diese Entscheidung liegt darin, dass die Masse bzw. Leistung des VW-EcoUp näher an der Masse und Leistung der Gewichtungsvariante 3 liegen. In Tabelle 5-8 werden nochmals die Daten aufgelistet.

Tabelle 5-8: Vergleich Neuzulassungen, Leistung, Masse von VW-EcoUp, Opel Zafira und CNG-Durchschnittsfahrzeug nach Gewichtungsvariante 3

	VW-EcoUp	Opel Zafira	Durchschnittsfahrzeug-CNG (Gewichtungsvariante 3)
Neuzulassungen gesamt 2013 [#]	10066	4014	81198 Neuzulassungen an CNG- Fahrzeugen im Jahr 2013
Leistung [kW]	50	110	64
Masse [kg]	1031 (EU)	1735 (EU)	1348 (EU)

5.4.1.2 Validierung EURO 6

Die Methodik der Erstellung eines Durchschnittsfahrzeugs und -kennfelds mit anschließender Simulation und darauffolgendem Vergleich mit der Messung liefert auch bei den EURO 6-Fahrzeugen gute Ergebnisse. Großen Einfluss hat hier erneut die Getriebeübersetzung. Die prozentuellen Abweichungen in Abhängigkeit von den Getrieben sind in Abbildung 5-19 dargestellt. Sehr auffällig verhält sich bei allen Getriebeübersetzungen die Partikelanzahl (PN), die bei der Simulation mit fast allen Übersetzungen ungefähr 70 % über der Messung liegt. Der Fiat Doblo zeigt bei PN geringe Abweichungen, hingegen ist die Abweichung bei den anderen Schadstoffkomponenten höher.

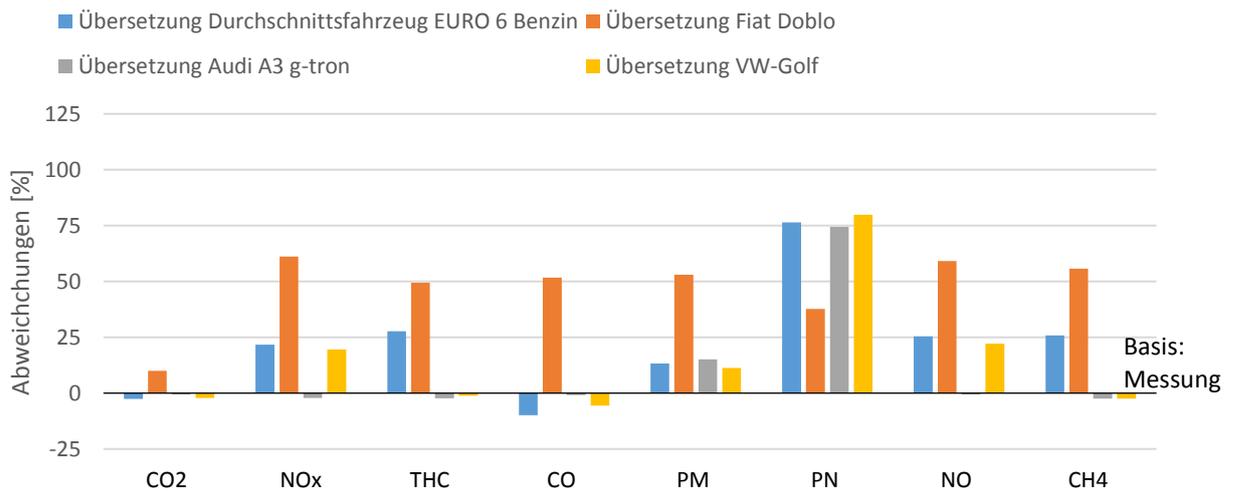


Abbildung 5-19: Validierung von ERMES_mod_300 des EURO 6-Durchschnittsfahrzeug und -kennfeld mit Gewichtungsvariante 1

Es folgt eine genauere Betrachtung des PN-Kennfeldes mit der Gewichtungsvariante 1, um die großen Abweichungen zu untersuchen. Das in Abbildung 5-20 dargestellte PN-Kennfeld hat im niedrigen Drehzahlbereich PN-Spitzen, die sich nachteilig auf die Simulation auswirken. Auch hier sind die spezifischen PN-Werte in [# / kWh] eingetragen.

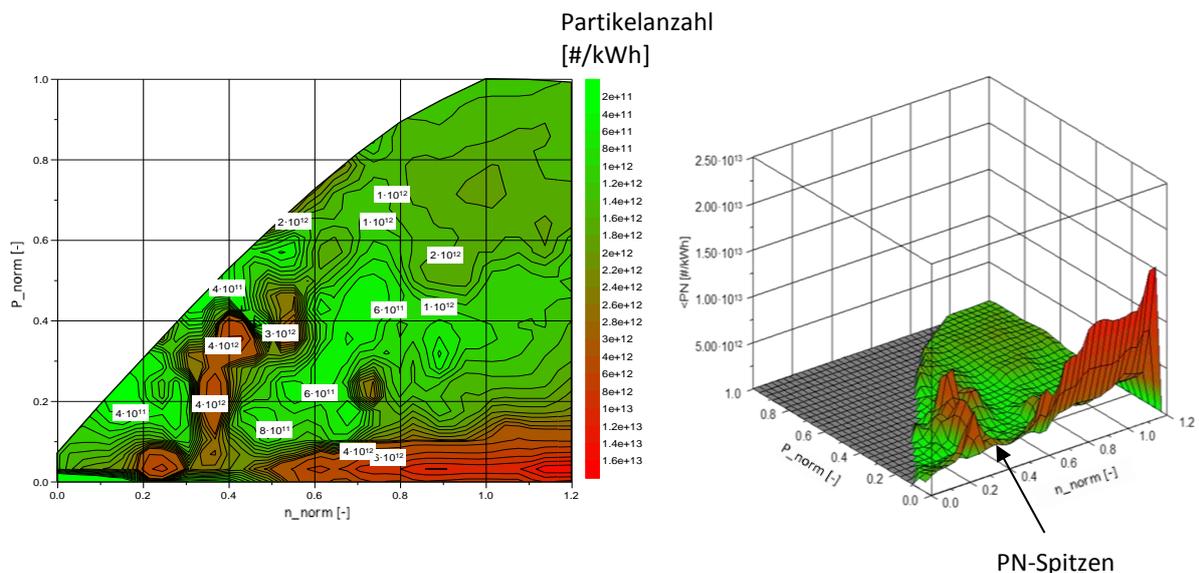


Abbildung 5-20: Partikelanzahlkennfeld EURO 6 Gewichtungsvariante 1

Um zu detektieren, warum die Übersetzungen einen so großen Einfluss haben, wurde ebenfalls eine Untersuchung durchgeführt. Hierfür wurde eine Simulation mit einem Getriebe mit geringeren Abweichungen und eines mit höheren Abweichungen ausgewählt. Gezeigt wird das Fiat Doblo Getriebe und jenes vom Audi A3 g-tron, wobei jenes vom Audi die größeren Abweichungen verursacht. Die Abbildung 5-21 zeigt die Betriebspunkte in dem PN-Kennfeld, wobei eine Vielzahl an Betriebspunkten des Audi A3 g-tron im Bereich dieser PN-Peaks liegen. Hingegen sind die links abgebildeten Betriebspunkte des Fiat Doblo in einem höheren Drehzahlbereich, indem diese PN-Spitzen nicht vorhanden sind.

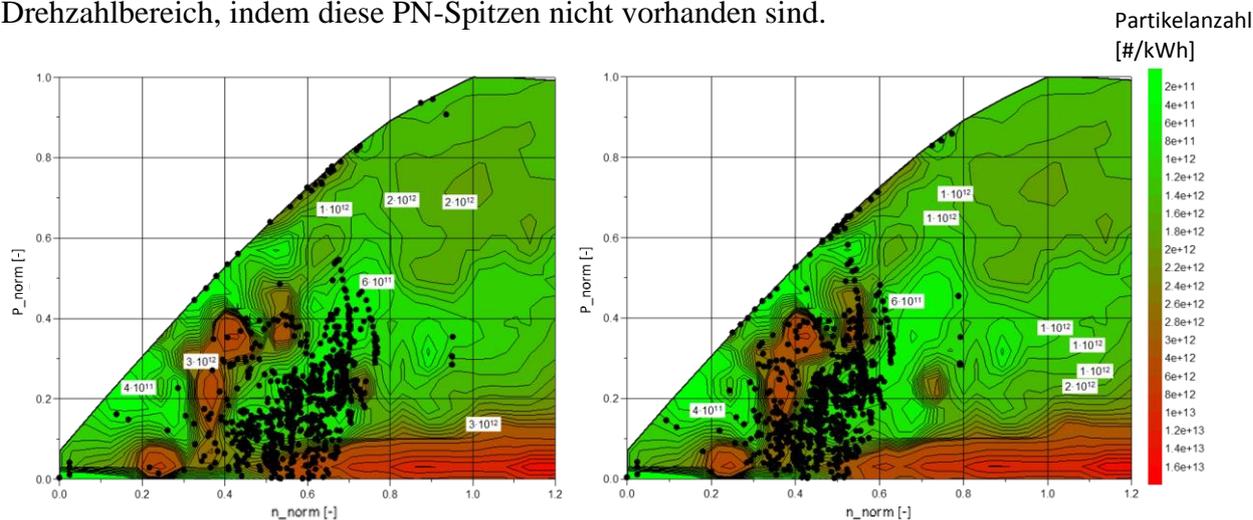


Abbildung 5-21: PN-Kennfeld Gewichtungsvariante 1 mit den Betriebspunkten des ERMES_mod_300 vom Fiat Doblo (links) und Audi A3 g-tron (rechts)

Bei der Validierung mit Gewichtungsvariante 2 ergibt sich bei PN ein ähnliches Verhalten der prozentuellen Abweichungen wie bei der Gewichtungsvariante 1. Die Abweichungen sind in Abbildung 5-22 dargestellt. Aufgrund der größeren Anzahl an Neuzulassungen des Audi A3 g-tron hat dieser bei der Gewichtungsvariante 2 einen größeren Einfluss auf das PN-Kennfeld. Daher nimmt auch die Abweichung der Partikelanzahl bei der Getriebeübersetzung Fiat Doblo bei dieser Validierung zu. Ansonsten werden mit dem Audi A3 g-tron sowie mit dem VW-Golf Getriebe zufriedenstellende Simulationsergebnisse erzielt.

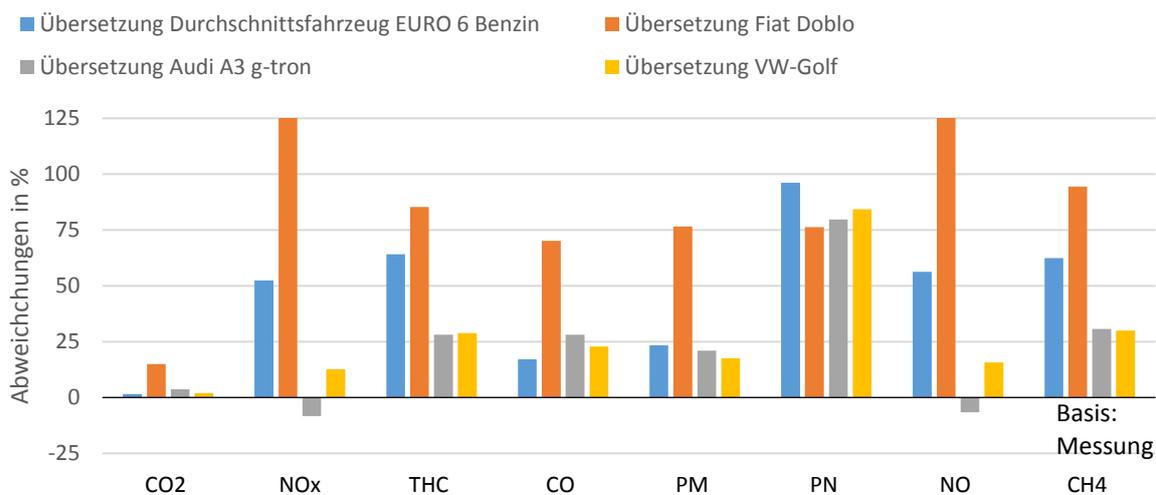


Abbildung 5-22: Validierung von ERMES_mod_300 des EURO 6-Durchschnittsfahrzeugs und -kennfelds mit Gewichtungsvariante 2

Um das Problem der erhöhten simulierten Partikelanzahl zu lösen, wird auch das PN-Kennfeld nach Gewichtungsvariante 2 näher betrachtet. Es sind dabei nur geringe Unterschiede zur

Gewichtungsvariante 1 zu verzeichnen. Dieses wird hier nicht explizit dargestellt, kann aber im Anhang Seite 106 nachgeschlagen werden. Nach der Validierung der Gewichtungsmethoden 1 und 2 für EURO 6-CNG konnte aufgrund der großen PN-Abweichungen mit bis zu 70 % noch kein Getriebe für die HBEFA-Simulation ausgewählt werden.

Aufgrund dessen wurden weitere Simulationsuntersuchungen durchgeführt, wobei das PN-Kennfeld variiert wurde. Die Variation erfolgte sowohl für Gewichtungsvariante 1 sowie für Variante 2. Es wurden folgende Optionen untersucht:

1. Bei der ersten Option wurde eine Unterscheidung zwischen inter- und extrapolierten Werten nicht berücksichtigt und somit der Durchschnitt aus Audi A3 g-tron und Fiat Doblo PN-Kennfeld gebildet.
2. Bei der zweiten Option wurde das PN-Kennfeld des Audi A3 g-tron als Durchschnittskennfeld herangezogen.
3. Bei der dritten Option wurde das PN-Kennfeld des Fiat Doblo als Durchschnittskennfeld herangezogen.

Mit diesen variierten Kennfeldern wurde wiederum eine Simulation mit den unterschiedlichen Getriebeübersetzungen durchgeführt. Die Validierung erfolgte durch einen Vergleich von Simulation und Messung von ERMES_mod_300. Dazu ergeben sich folgende prozentuelle Abweichungen, wie in Abbildung 5-23 dargestellt. Bei der zweiten Option mit dem Audi-PN-Kennfeld ergeben sich bei Gewichtungsvariante 1 und 2 mit den verschiedenen Getriebeübersetzungen die geringsten Abweichungen. Die bestmögliche Kombination mit den geringsten Abweichungen wird somit mit dem PN-Kennfeld vom Audi A3 g-tron sowie mit der Getriebeübersetzung vom Audi A3 g-tron und jener vom VW-Golf erzielt. Es wurden keine weiteren EURO 6-Fahrzeuge im Rahmen dieser Arbeit vermessen. Daher folgte der Entschluss, das PN-Emissionskennfeld vom Audi A3 g-tron (Option 2) für die EURO 6 HBEFA-Simulation festzulegen. Bei der Getriebeübersetzung fällt die Entscheidung auf den VW-Golf, da dieser im Jahr 2016 das am öftesten neu zugelassene CNG-Fahrzeug war und somit die Fahrzeugflotte besser wiedergibt als der Audi A3 g-tron.

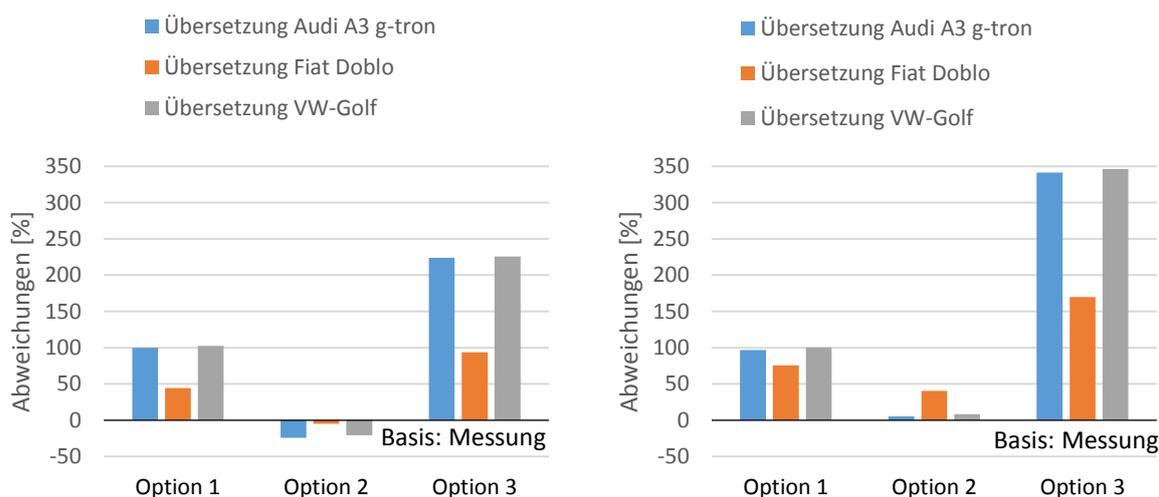


Abbildung 5-23: Abweichungen Messung und Simulation von ERMES_mod_300 bei angepasstem PN-Kennfeld mit verschiedenen Varianten (links = Gewichtungsvariante 1 und rechts = Gewichtungsvariante 2)

Nach der Erstellung der Durchschnittskennfelder und -fahrzeuge folgte die HBEFA-Simulation.

5.5 Simulation der HBEFA-Zyklen

Das letzte Kapitel, das im Rahmen der simulativen Untersuchung behandelt wurde, ist die Simulation der HBEFA-Zyklen. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei HBEFA um das Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr. Die Zyklen, die für diese Simulation herangezogen werden, sollen das reale Fahrverhalten von verschiedenen Fahrzeugkategorien realitätsnah repräsentieren. Insgesamt handelt es sich dabei um 257 Zyklen, die von reinen Stauzyklen, Stadt- und Überlandzyklen sowie Autobahnzyklen reichen. Zusätzlich erfolgt die Simulation dieser Zyklen mit einer Steigung von -6 % bis +6 %. Zum Schluss wurden die CNG-Fahrzeuge mit den bereits vorhandenen HBEFA-Daten der Benzin- und Dieselfahrzeuge der jeweiligen Abgasnorm verglichen. Für den korrekten Vergleich der CNG- mit Benzin- und Dieselfahrzeugen wurden vorab folgende Randbedingungen festgelegt:

- gleiche Beladung
- gleiche Nebenverbraucher
- gleiche Gangschaltparameter und
- gleiche Start-Stop Parameter für alle Fahrzeugtechnologien

Zu Beginn des Kapitels erfolgt eine kurze Erklärung der verwendeten Eingabedaten für die Simulation und anschließend der Vergleich der verschiedenen Benzin-, Diesel- und CNG-Durchschnittsfahrzeuge.

5.5.1 Durchschnittsfahrzeuge HBEFA

Bei der Validierung der jeweiligen Fahrzeuge wurde festgelegt, dass für die Simulation der EURO 5-Fahrzeuge das Getriebe vom VW-EcoUp und für EURO 6 das vom VW-Golf herangezogen wird. Als Fahrzeugmasse und –leistung werden jene nach Gewichtungsvariante 3 herangezogen. Die angenommene durchschnittliche Beladung in Europa setzt sich für ein Fahrzeug wie folgt zusammen (Gleichung (5-6)):

$$\text{Beladung in kg} = 123 \text{ kg} = 75 \text{ kg} * 1.3 + 25 \text{ kg} \quad (5-6)$$

75 kg.....	Masse Fahrers nach Verordnung (EU) 2017/ 1151 [35]
1.3.....	Entspricht in etwa den durchschnittlichen Personen, die sich in einem Fahrzeug befinden (Annahme)
25 kg.....	Entspricht der zusätzlichen durchschnittlichen Masse, die in Europa an Gepäck transportiert wird

Für die HBEFA-Simulation wird sowohl für EURO 5- als auch EURO 6-Fahrzeuge eine Nebenverbraucherleistung $P_{\text{Nebenaggregate}} = 1.5 \%$ von P_{rated} angenommen. Dies ist eine Abschätzung und soll die Nebenverbraucherleistung im realen Betrieb widerspiegeln. Für die Gangvorgabe wird hierzu das PHEM-Gangschaltmodell mit denselben Schaltparametern für alle drei Fahrzeuge herangezogen. Die Schaltparameter können aus [30] entnommen werden.

Weiters ist zu erwähnen, dass für die HBEFA-Simulation die Funktion Start-Stop aktiviert wurde. Hierzu wurden folgende Abschätzungen gemacht (Tabelle 5-9):

Tabelle 5-9: Eingabedaten Start-Stop in PHEM für HBEFA-Simulation

	EURO 5	EURO 6
max. Geschwindigkeit [km/h]	0	0
Min ICE-On Time [s]	5	5
Stop-Emissions [-]	0.65	0.475

max. Geschwindigkeit... Bei einer Geschwindigkeit von 0 km/h erfolgt die Aktivierung von Start-Stop

Min ICE-On Time Ab einer Zeit von 5 Sekunden Leerlaufdrehzahl wird die Start-Stop Funktion aktiviert

Stop-Emissions..... Repräsentiert die Emissionen bei Fahrzeugstillstand. Hierzu bedeutet 0 keine Emissionen bei Motorstopp, hingegen bedeutet 1 100% Leerlaufemissionen. Somit kann z.B. berücksichtigt werden, dass der Motor bei Fahrzeugstillstand nicht immer ausgeschaltet wird.

Als letzte Bedingung wird in der Simulation die Funktion „Cycle Distance Correction“ aktiviert. Mit dieser Funktion wird festgelegt, dass alle Fahrzeuge bei der Simulation die gleiche Strecke zurücklegen, falls die Motorleistung nicht ausreicht, um den vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf zu folgen.

Die gesamten Simulationseinstellungen für das EURO 5- und EURO 6-CNG-Fahrzeug sind im Anhang auf Seite 107 dargestellt und erläutert.

5.5.2 Durchschnittskennfelder HBEFA

Für die EURO 5- und EURO 6-Durchschnittskennfelder werden die Emissionskennfelder nach Gewichtungsvariante 2 herangezogen. Es ist hinzuzufügen, dass für das PN-Kennfeld bei EURO 6 jenes vom Audi A3 g-tron herangezogen wurde. Der Entschluss für diese Wahl und die Erläuterung hierzu erfolgte im Kapitel 5.4. Für die Simulation der Benzin- sowie Dieselfahrzeuge liegen bereits Kennfelder vor.

5.5.3 Volllastkurven HBEFA

Ergänzend erfolgt die Erläuterung der einzelnen Volllastkurven, die für die HBEFA-Simulation herangezogen wurden. Die Volllast- und Schleppkurven der HBEFA-Benzinfahrzeuge werden auch für die CNG-Fahrzeuge der jeweiligen Abgasnormen herangezogen, da von den CNG-Fahrzeugen diesbezüglich keine Daten verfügbar waren.

5.6 Ergebnisse bei der HBEFA-Simulation

Das Ergebnis der HBEFA-Simulation sind die durchschnittlichen Emissionen von jedem der einzelnen HBEFA-Zyklen. Die Angabe der Ergebnisse der einzelnen Schadstoffkomponenten erfolgt dabei in [g/km] bzw. [# /km] über die Durchschnittsgeschwindigkeit für jeden Zyklus. Abschließend werden die HBEFA-Simulationsergebnisse - im Rahmen dieser Arbeit auch als Emissionsfaktoren bezeichnet - in einem Diagramm eingetragen und die Ergebnisse für Benzin, Diesel und CNG miteinander verglichen. Nachfolgend erfolgt die Darstellung der Vergleiche der drei verschiedenen Fahrzeuge exemplarisch anhand der Ergebnisse für 0 % Steigung.

5.6.1 HBEFA-Simulationsergebnisse für EURO 5

Zu Beginn werden die Simulationsergebnisse der CO₂-Emissionen von den EURO 5-Benzin-, Diesel- und CNG-Durchschnittsfahrzeugen miteinander verglichen. Dieser in Abbildung 5-24 dargestellte Vergleich bestätigt die zu Beginn getätigte Aussage, der geringeren CO₂-Emissionen von CNG- gegenüber Benzinfahrzeugen. Beim aktuellen EURO 5 Datensatz haben die CNG-Fahrzeuge auch geringere CO₂-Emissionen als die Diesel-Fahrzeuge. Allerdings hat das durchschnittliche Diesel-Fahrzeug hier höhere Masse und Stirnfläche.

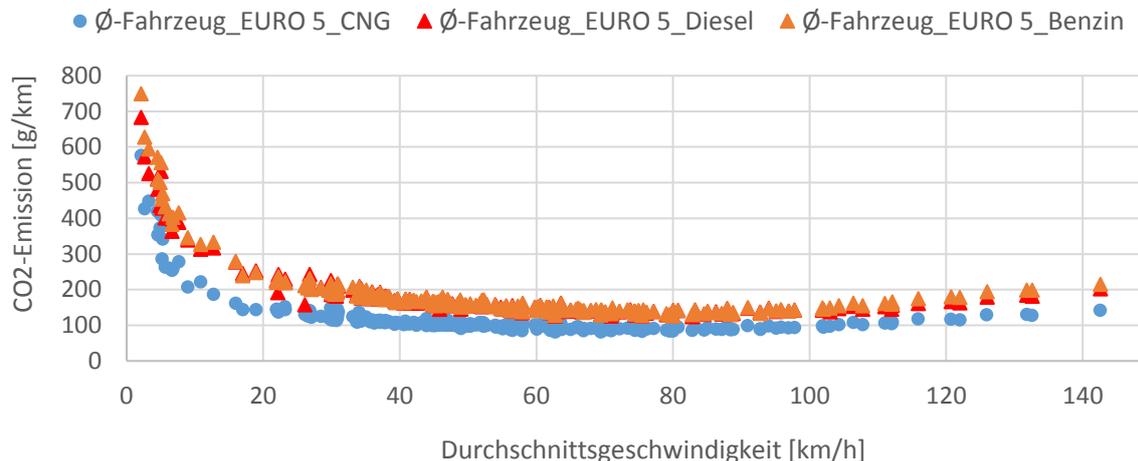


Abbildung 5-24: Vergleich der CO₂-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

In Abbildung 5-25 sind die Simulationsergebnisse der NO_x-Emissionen der drei Fahrzeugkategorien gezeigt. Die hohen NO_x-Emissionen beim EURO 5-Diesel-Durchschnittsfahrzeug sind auf die in dieser EURO-Klasse noch nicht verbauten Abgasnachbehandlungssysteme wie SCR-Katalysator oder NO_x-Speicherkatalysatoren zurückzuführen. Das NO_x-Niveau von Benzin- und CNG-Fahrzeugen ist annähernd gleich, was bei diesen beiden Technologien auf dasselbe Abgasnachbehandlungssystem zurückzuführen werden könnte.

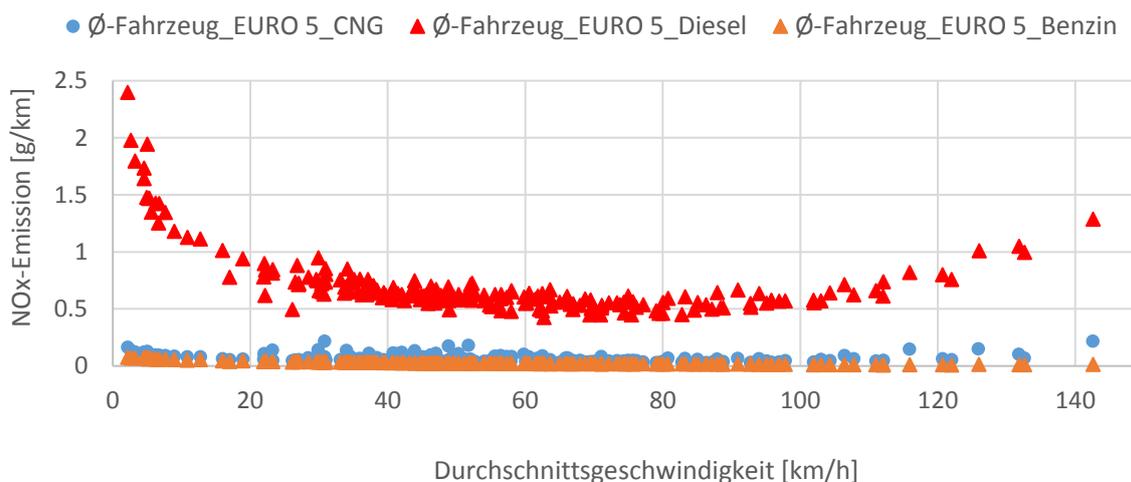


Abbildung 5-25: Vergleich der NO_x-Emissionen EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

Für eine bessere Darstellung des NO_x-Verlaufs für Benzin und CNG wurde Abbildung 5-26 erstellt. Hierbei ist erkennbar, dass die NO_x-Emissionen über jenen der Benzin-Fahrzeuge liegen.

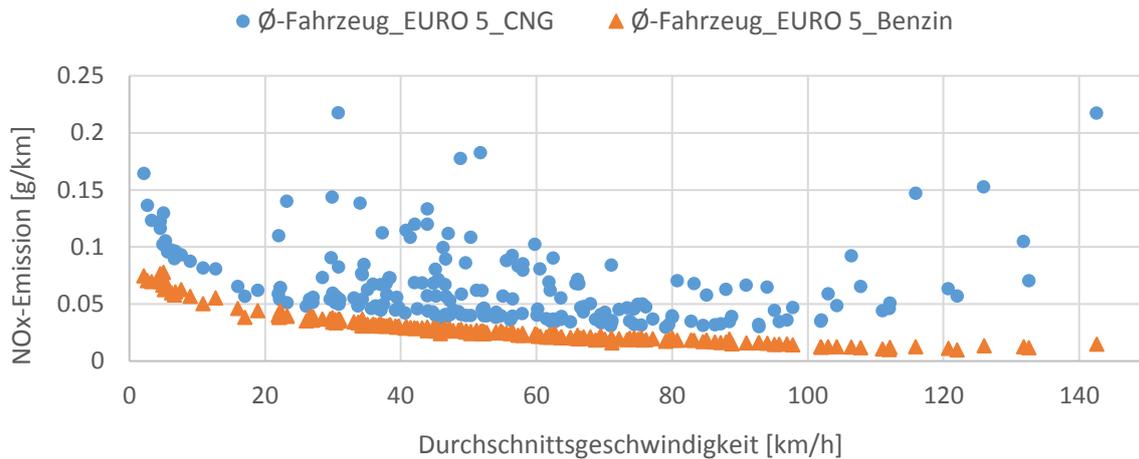


Abbildung 5-26: Vergleich der NO_x-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

Um den Grund für das höhere NO_x-Niveau herauszufinden, erfolgt die Simulation der HBEFA-Zyklen für die untersuchten EURO 5-Einzelfahrzeuge VW-Caddy, Opel Zafira und VW-EcoUp. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 5-27 dargestellt. Daraus geht direkt hervor, dass die erhöhten NO_x-Emissionen bei der HBEFA-Simulation vom NO_x-Kennfeld des Opel Zafira hervorgerufen werden. Die Verläufe von VW-Caddy und VW-EcoUp zeigen einen ähnlichen Verlauf und liegen niedriger.

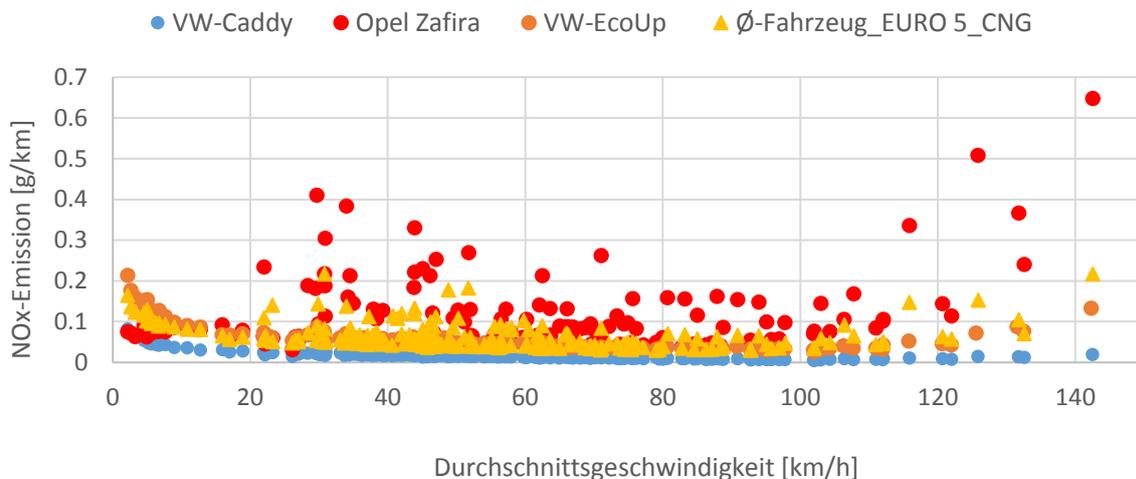


Abbildung 5-27: Vergleich der NO_x-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp mit dem EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Um nun die Ursache für die erhöhten NO_x-Emissionen beim Opel Zafira zu detektieren, werden folgend nochmals die einzelnen modalen Messdaten aus Kapitel 3.4.2 untersucht. Aus der Untersuchung folgt, dass vor allem die zwei NO_x-Spitzen des Opel Zafira im Testzyklus ERMES wesentlichen Einfluss auf das Emissionskennfeld und somit auf die HBEFA-Simulation haben könnten. Ein möglicher Grund für diese NO_x-Spitzen wurde bereits in Kapitel 3.4.2 erläutert und könnte auf regeltechnische Probleme mit den λ-Sonden zurückzuführen sein. Um nun die Annahme des Einflusses der NO_x-Spitzen auf das Emissionskennfeld zu untersuchen, wurde wie nachfolgend beschrieben, vorgegangen.

Zu Beginn erfolgte die Modifizierung der Messung im Bereich, indem die NO_x-Spitzen auftraten. Diese Bereiche wurden aus der Messung geschnitten und somit nicht für die folgende Kennfelderstellung herangezogen. Diese modifizierte Messung wird folgend als Messung ERMES_mod_300_NO_x_cut bezeichnet. Zum besseren Verständnis wird die Vorgehensweise

der Modifizierung der Messung in Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 gezeigt. Dabei sind die schraffierten Bereiche, die Bereiche, die nicht für die Simulation herangezogen wurden.

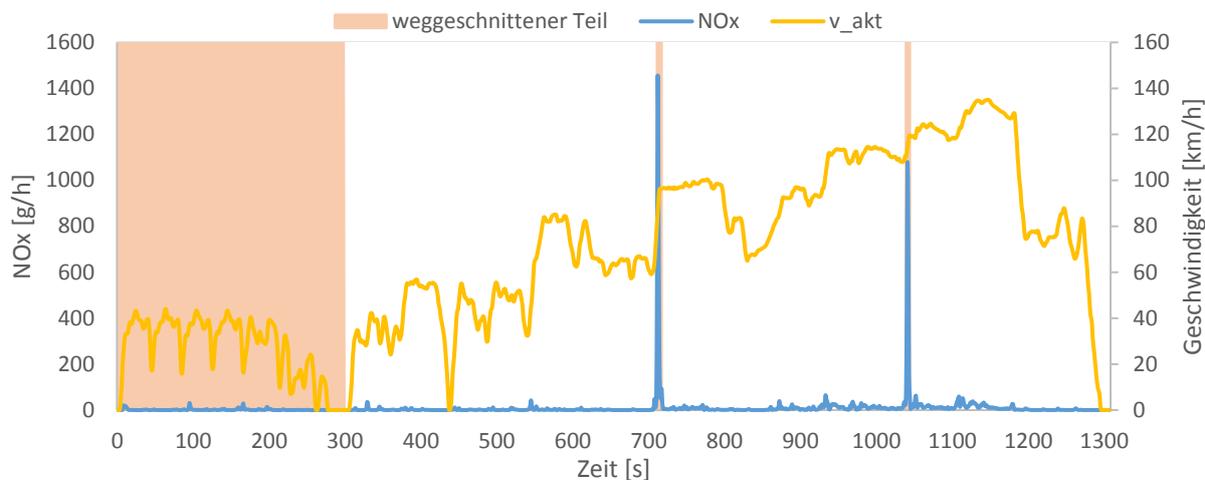


Abbildung 5-28: Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C), NOx-Betrachtung

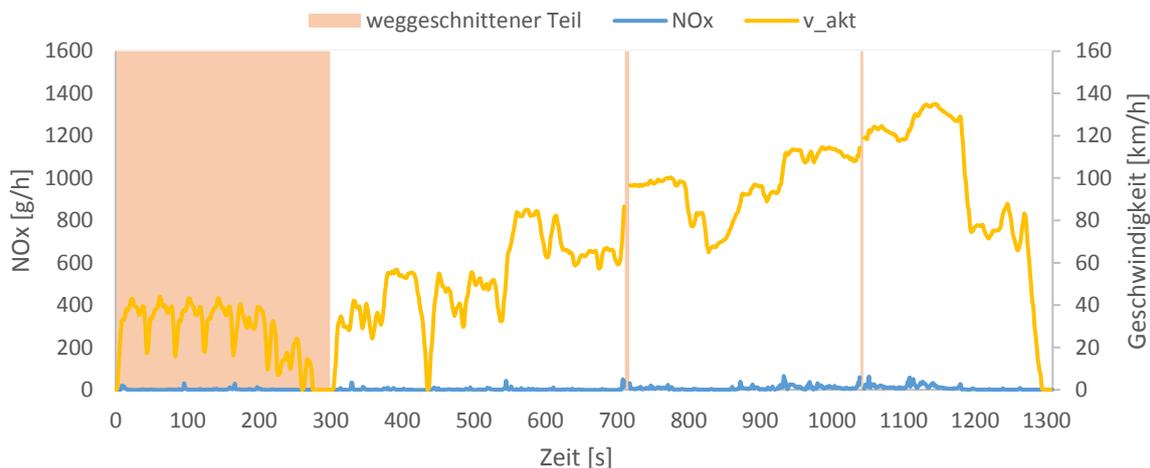


Abbildung 5-29: Modifizierte Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C) mit weggeschnittenen NOx-Spitzen (ERMES_mod_300_NOx_cut)

Im nächsten Schritt wurde mit dieser modifizierten Messung ein neues NOx-Emissionskennfeld erstellt, das im Folgenden als Emissionskennfeld ERMES_mod_300_NOx_cut bezeichnet wird. Erneut wurde eine Validierung mit dem Emissionskennfeld durchgeführt. Dabei wurde der modifizierte ERMES_mod_300_NOx_cut simuliert und mit der modifizierten Messung verglichen. Es konnte eine NOx-Abweichung, wie in Abbildung 5-30 dargestellt, erreicht werden.

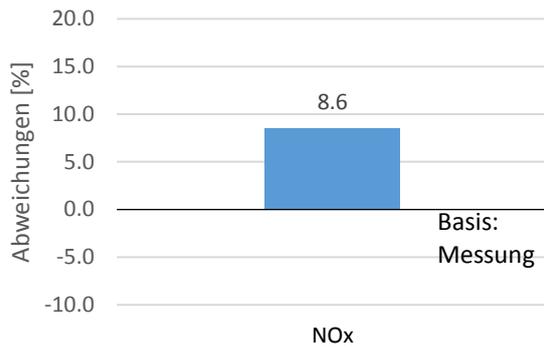


Abbildung 5-30: Abweichung Simulation zur Messung beim modifizierten NO_x-Kennfeld

Abschließend erfolgte eine erneute HBEFA-Simulation des Opel Zafira mit dem Emissionskennfeld ERMES_mod_300_NO_x_cut und der Vergleich mit den beiden Fahrzeugen VW-EcoUp und VW-Caddy in Abbildung 5-31. Dabei ergibt sich mit dem angepassten Emissionskennfeld ERMES_mod_300_NO_x_cut und dem Opel Zafira (Opel Zafira_ohne NO_x-Spitzen) ein ähnlicher Verlauf wie beim VW-EcoUp und beim VW-Caddy. Es wird damit bestätigt, dass die beiden NO_x-Spitzen bei der Messung des Opel Zafira großen Einfluss auf das Emissionskennfeld und somit auf die HBEFA-Simulation haben.

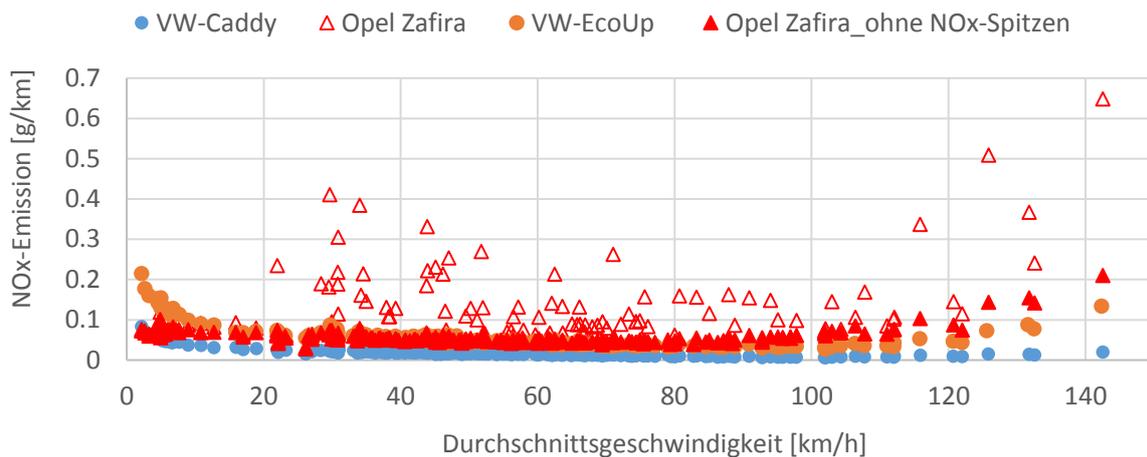


Abbildung 5-31: Vergleich der NO_x-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und mit dem angepassten Opel Zafira-Kennfeld bei den HBEFA-Zyklen

Bei der sekundlichen NO_x-Messdatenuntersuchung ergibt sich beim Opel Zafira bei allen Zyklen in den Beschleunigungsphasen nach den Schubphasen ein ähnliches Verhalten hinsichtlich Emittierung von NO_x, wie z.B. auch beim -7 °C ERMES-Testzyklus. Aufgrund dessen wurde entschieden, die ursprünglichen Ergebnisse vom Opel Zafira für die HBEFA-Simulation heranzuziehen.

Abbildung 5-32 zeigt die THC-Emissionen des CNG-Fahrzeugs im Vergleich zu Diesel- und Benzinfahrzeugen. Zu berücksichtigen ist hier, dass der große Anteil an CH₄-Emissionen in den THC-Emissionen enthalten ist.

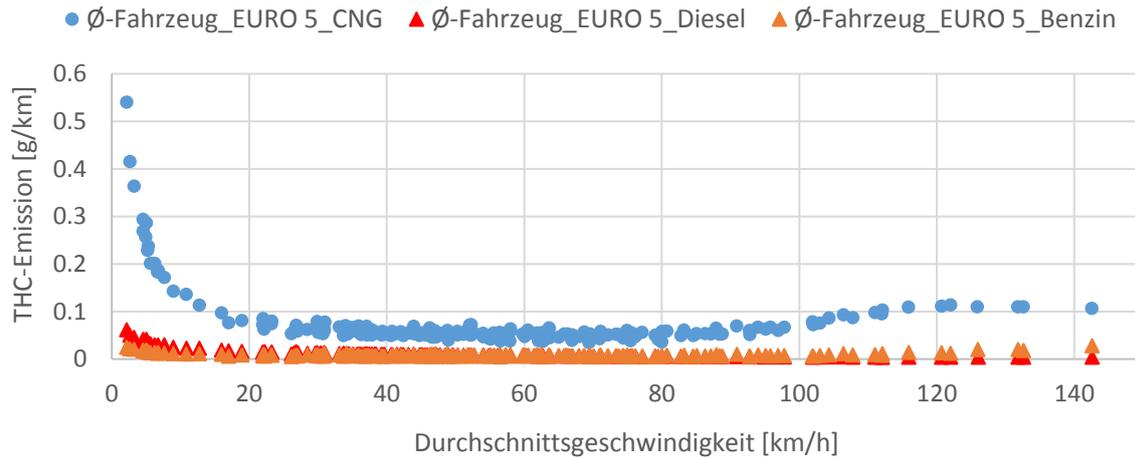


Abbildung 5-32: Vergleich der THC-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

Die hohen THC-Emissionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich könnten darauf zurückgeführt werden, dass die einzelnen THC-Emissionskennfelder im niederlastigen Bereich erhöhte THC-Emittierung aufweisen. Um den Grund für die erhöhten THC-Emissionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu detektieren, werden die HBEFA-Zyklen mit den vermessenen Fahrzeugen einzeln simuliert. Die THC-Simulationsergebnisse der drei Fahrzeuge sind dazu in Abbildung 5-33 veranschaulicht. Auffällig dabei ist, dass bei dieser Simulation die beiden Fahrzeuge VW-EcoUp und Opel Zafira im niedrigen Geschwindigkeitsbereich einen ähnlich hohen Verlauf der THC-Emissionen aufweisen. Der Verlauf der Emissionsfaktoren des VW-Caddy liegt deutlich niedriger. Daraus lässt sich ableiten, dass vor allem die beiden Fahrzeuge VW-EcoUp und Opel Zafira starken Einfluss auf die THC-Simulationsergebnisse des CNG-Durchschnittsfahrzeugs haben. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die große Anzahl an Neuzulassungen dieser beiden Fahrzeuge, die die Gewichtung der Kennfelder und daraus folgend die Simulation stärker beeinflussen.

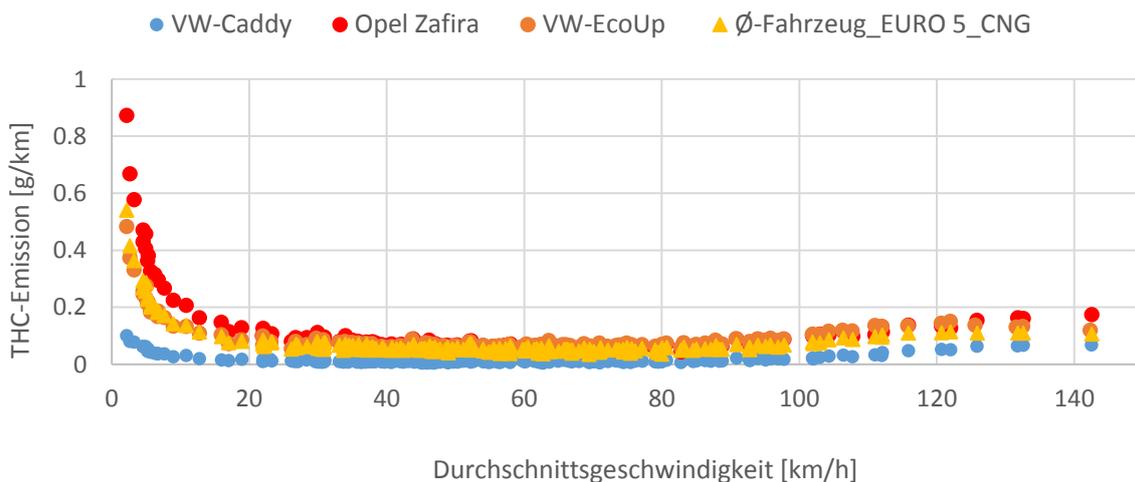


Abbildung 5-33: Vergleich der THC-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Um nun die erhöhten THC-Emissionen beim Opel Zafira und VW-EcoUp und in weiterer Folge beim EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug interpretieren zu können, erfolgt im nächsten Schritt exemplarisch die Untersuchung eines ausgewählten HBEFA-Zyklus mit erhöhten THC-Emissionen vom Opel Zafira sowie vom EURO 5-Durchschnittsfahrzeug. Dabei wird ein niederlastiger Zyklus (ID 7608) mit einer geringen Durchschnittsgeschwindigkeit ausgewählt

und anschließend die sekundlichen Betriebspunkte von diesem Zyklus im THC-Emissionskennfeld dargestellt. Die Betriebspunkte für den Opel Zafira bzw. vom EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug wurden dazu im THC-Emissionskennfeld des Opel Zafira und im EURO 5-CNG-Durchschnittskennfeld eingetragen. Die beiden Emissionskennfelder in Abbildung 5-34 zeigen, dass die Betriebspunkte in einem geringen Drehzahl- und Leistungsbereich liegen. Es bestätigte sich, dass in diesem Bereich der Opel Zafira zu einer erhöhten Emittierung von THC neigt. Das liegt auch beim EURO 5-CNG-Durchschnittskennfeld vor. Selbige Untersuchungen wurden bei CH₄ durchgeführt. Dabei wird im niederlastigen Bereich auch ein ähnliches Verhalten beobachtet.

● Betriebspunkte Zyklus ID7608

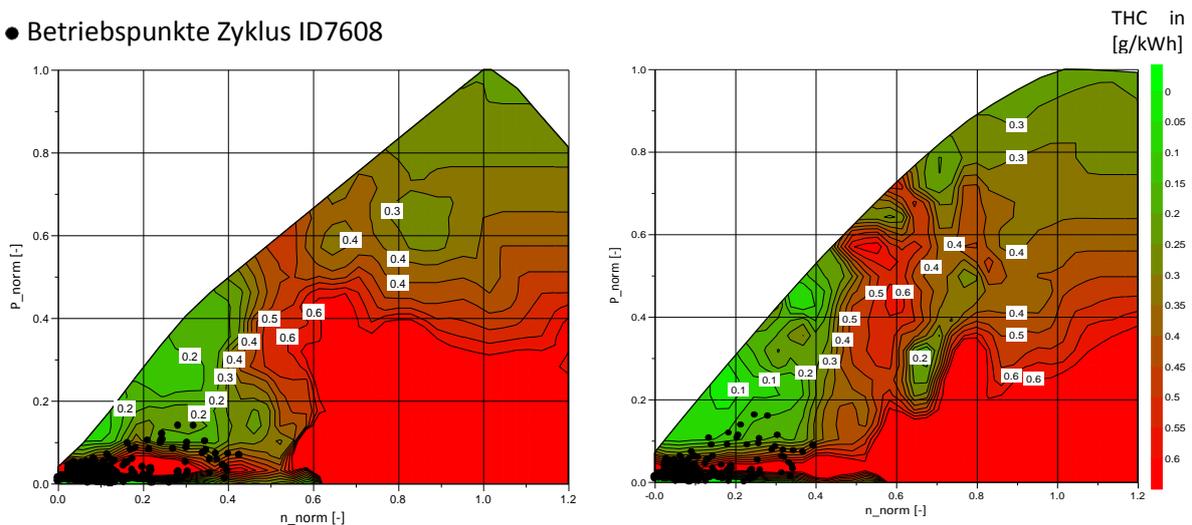


Abbildung 5-34: Vergleich der beiden THC-Emissionskennfelder, Opel Zafira (links) und des EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeugs (rechts) anhand eines niederlastigen Zyklus

Für eine aussagekräftigere Gegenüberstellung beziehungsweise zur besseren Differenzierung von THC und CH₄ werden die NMHC-Emissionen in Abbildung 5-35 dargestellt. Es bestätigt sich die Aussage, dass die CH₄-Emissionen einen großen Anteil der THC-Emissionen ausmachen. Der Verlauf der drei Fahrzeugkategorien CNG, Diesel und Benzin ist bei den NMHC-Emissionen ab einer Geschwindigkeit von 20 km/h ähnlich. Aber auch hier sind erhöhte Emissionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich vorhanden. Untersuchungen zeigten, dass diese erhöhten Emissionen zu Beginn wiederum durch die beiden Fahrzeuge VW-EcoUp und Opel Zafira hervorgerufen werden.

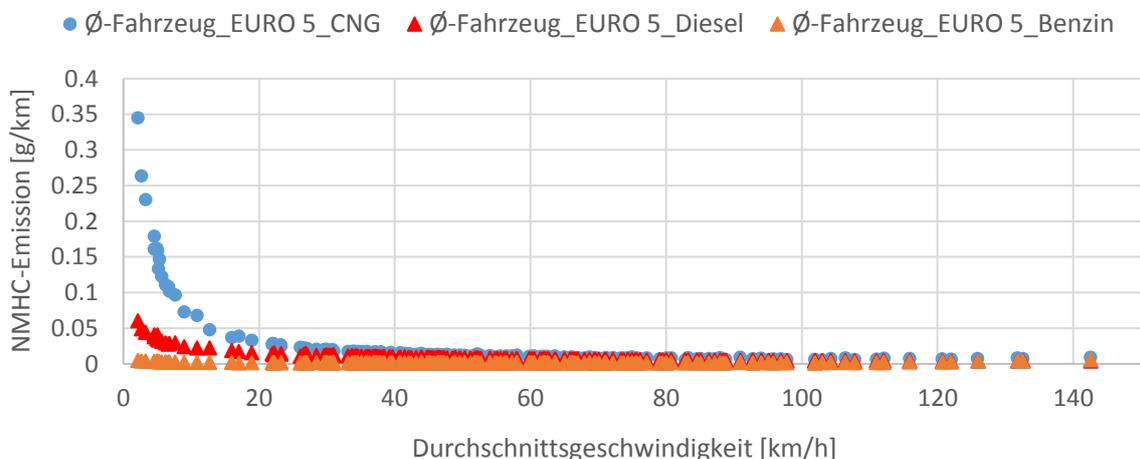


Abbildung 5-35: Vergleich der NMHC-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

In Abbildung 5-36 erfolgt die Betrachtung der CO-Emissionen. Bei denen sind im Wesentlichen keine Auffälligkeiten des CNG-Durchschnittsfahrzeugs erkennbar. Aufgrund des geringeren Kohlenstoffanteils im Erdgas gegenüber Benzin ergibt sich gleich wie beim CO₂, eine Reduktion beim CO-Ausstoß.

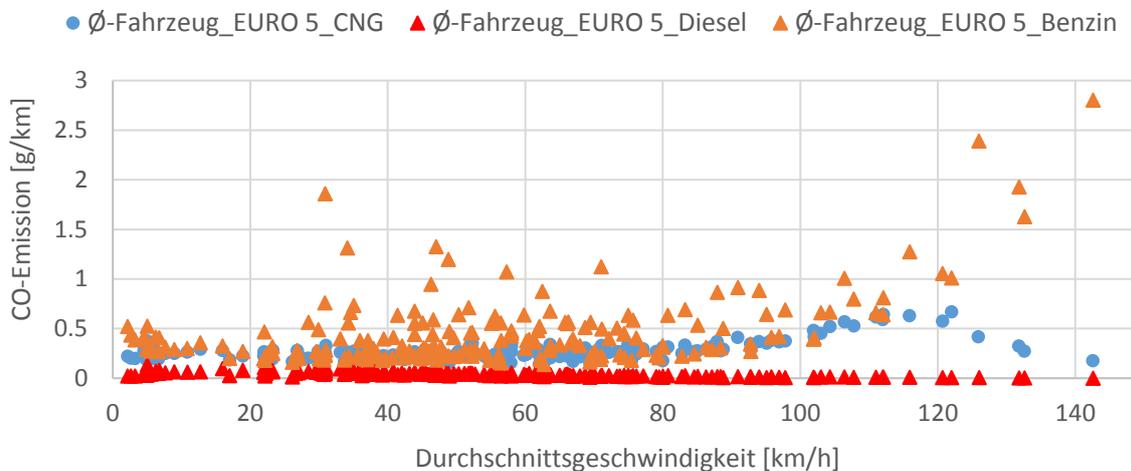


Abbildung 5-36: Vergleich der CO-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

Bei der Betrachtung der Partikelmasse sind in Abbildung 5-37 wiederholt Auffälligkeiten des CNG-Durchschnittsfahrzeugs gegenüber jenen von Diesel und Benzin zu erkennen.

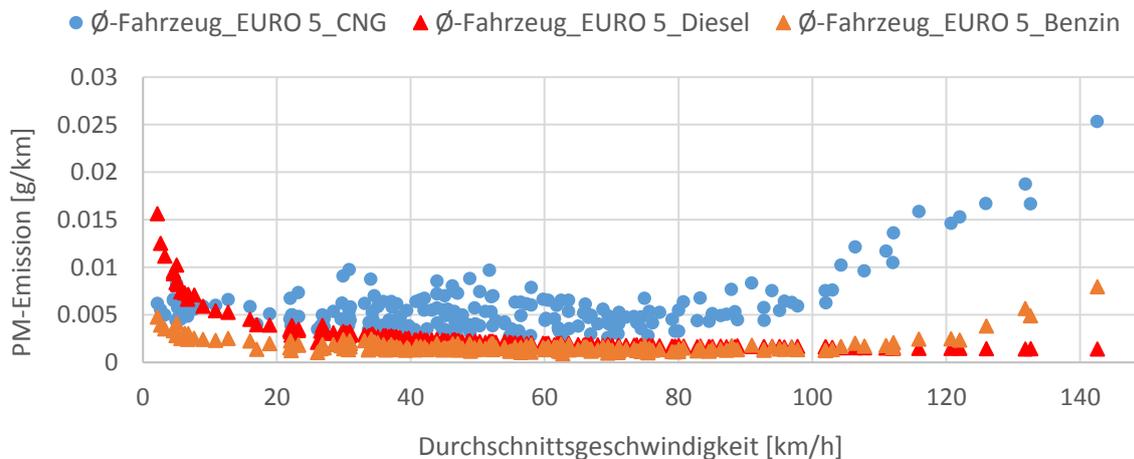


Abbildung 5-37: Vergleich der PM-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

Analog zu den THC-Emissionen erfolgte auch bei der Partikelmasse die Betrachtung der Simulationsergebnisse der HBEFA-Zyklen der vermessenen CNG-Fahrzeuge. Aus den in Abbildung 5-38 dargestellten HBEFA-Simulationsergebnissen der einzelnen Fahrzeuge lässt sich ein ähnlicher Verlauf der Emissionsfaktoren beobachten. Auffällig verhalten sich die Simulationsergebnisse der beiden Fahrzeuge VW-Caddy und Opel Zafira. Dazu wurden bei diesen beiden Fahrzeugen zusätzlich noch weitere Messungen untersucht und dabei die PM betrachtet. Daraus folgt, dass die beiden Fahrzeuge vor allem bei dynamischen Zyklen (ERMES) in Hochlastbereichen erhöhte PM aufweisen. In weniger dynamischeren Zyklen stellen die Partikelmassen keine Probleme dar, wie bereits bei der Messdatenuntersuchung des NEDC in Kapitel 3.4.1 erläutert wurde.

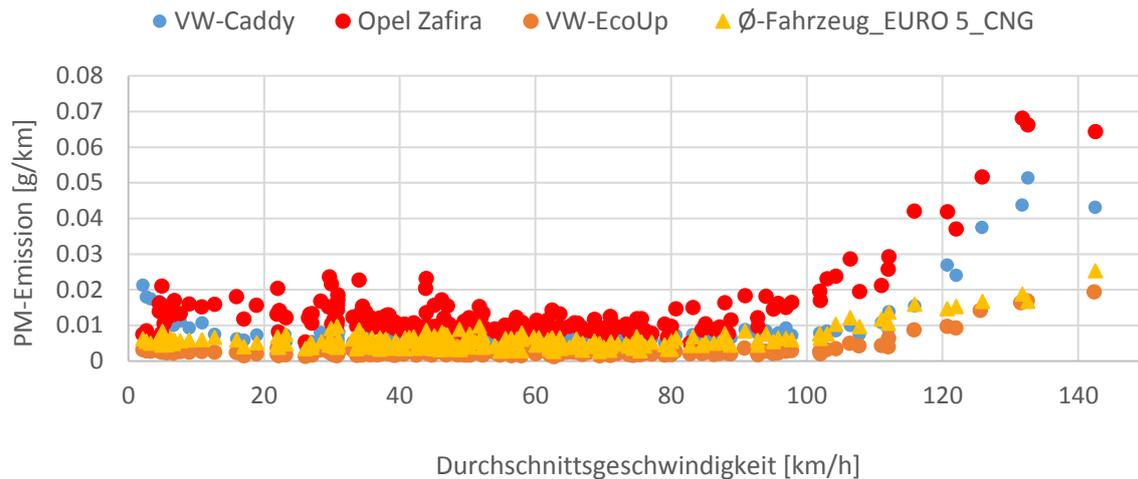


Abbildung 5-38: Vergleich der PM-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Mittels Literaturrecherche werden verschiedene Möglichkeiten gefunden, die zu diesen hohen PM der beiden Fahrzeuge führen könnten. Wie bereits erwähnt, sind Ölabscheider und Filter verbaut, um zu verhindern, dass über den komprimierten CNG-Kraftstoff Schmieröl in den Brennraum gelangt bzw. sich an den Injektoren abscheidet. Es könnten in diesen drehzahlhöheren Bereichen Probleme bei der Abscheidung auftreten, wodurch erhöhte Partikelmassen vorliegen könnten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass durch undichte Turbolader Schmieröl in den Brennraum gelangt und somit erhöhte Partikelmassen zur Folge haben könnten. Eine weitere Ursache könnte sein, dass durch das Funktionsprinzip der Kolbenringe das Ölabstreifen an den Zylinderwänden nur bedingt funktioniert und somit Motoröl mitverbrannt wird. Im Rahmen dieser Arbeit konnte aber keine eindeutige Ursache für die erhöhten PM der beiden Fahrzeuge gefunden werden, da hierzu innermotorische Untersuchungen durchgeführt werden müssten.

Ähnlich wie bei der Partikelmasse verhält sich auch der Verlauf der Partikelanzahl der CNG-Fahrzeuge, wie in Abbildung 5-39 dargestellt. Die geringe Partikelanzahl bei Dieselfahrzeugen lässt sich auf die Einführung des Dieselpartikelfilters zurückführen. Aufgrund des stöchiometrischen Betriebs ($\lambda=1$) und aufgrund des homogenen Gemisches ist auch die Partikelanzahl bei Benzinfahrzeugen gering. Da auch bei der Verbrennung von Erdgas ein annähernd homogener Betrieb besteht, sollte auch die Partikelanzahl bei dieser Verbrennung vergleichsweise gering sein.

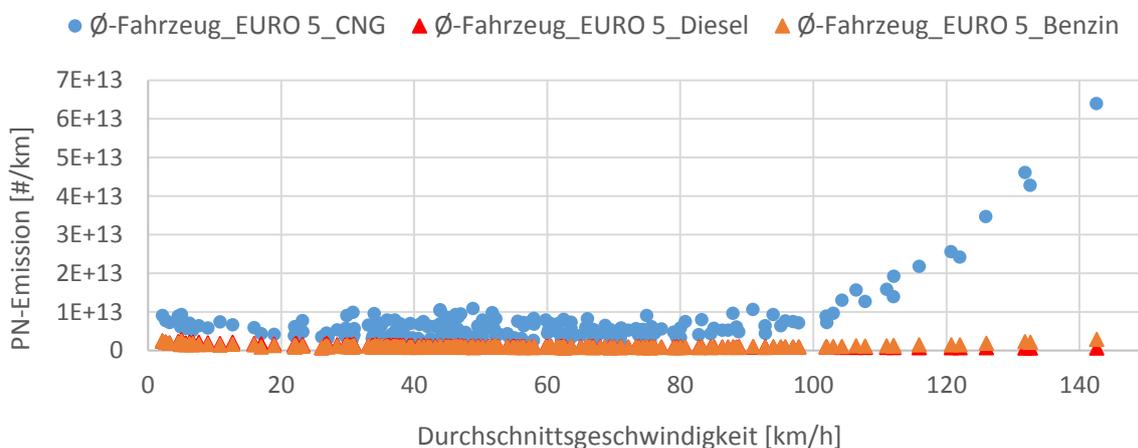


Abbildung 5-39: Vergleich der PN-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen

Die Vorgehensweise zur Untersuchung der Partikelanzahl ist gleich wie jene bei der Partikelmasse. Wieder erfolgt der Vergleich der Simulationsergebnisse der einzelnen CNG-Fahrzeuge in Abbildung 5-40. Die Simulationsergebnisse ergeben wiederum den gleichen Verlauf der einzelnen Fahrzeuge über der Geschwindigkeit, woraus sich ableiten lässt, dass die Partikelanzahl anscheinend mit zunehmender Geschwindigkeit bei CNG-Fahrzeugen ebenfalls steigt.

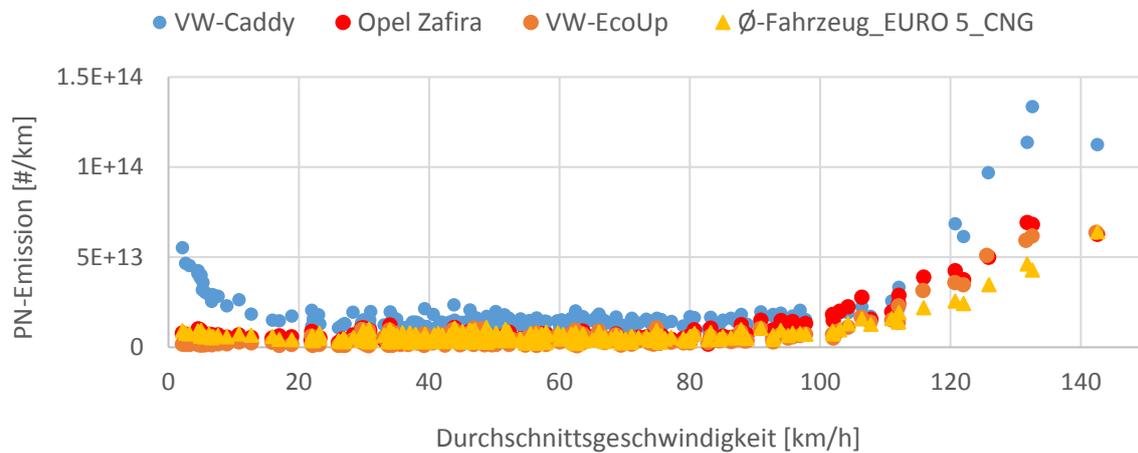


Abbildung 5-40: Vergleich der PN-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Aufgrund des Zusammenhangs von PM und PN können dieselben Ursachen vermutet werden, die bereits vorhin bei PM beschrieben wurden.

5.6.2 HBEFA-Simulationsergebnisse für EURO 6

Zu Beginn erfolgt in Abbildung 5-41 wiederum der Vergleich der CO₂-Emissionen vom EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeug mit dem EURO 6-Benzin-Durchschnittsfahrzeug und -Diesel-Durchschnittsfahrzeug. Des Weiteren sind in den folgenden Diagrammen ebenfalls die Daten des EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeugs dargestellt, um etwaige Verbesserungen bei den Schadstoffemissionen zeigen zu können. Bei den CO₂-Emissionen des EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeugs bestätigt sich wiederholt die Aussage der geringeren CO₂-Emissionen gegenüber Benzinfahrzeugen. Auch gegenüber dem EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug sind leichte Verbesserungen zu beobachten.

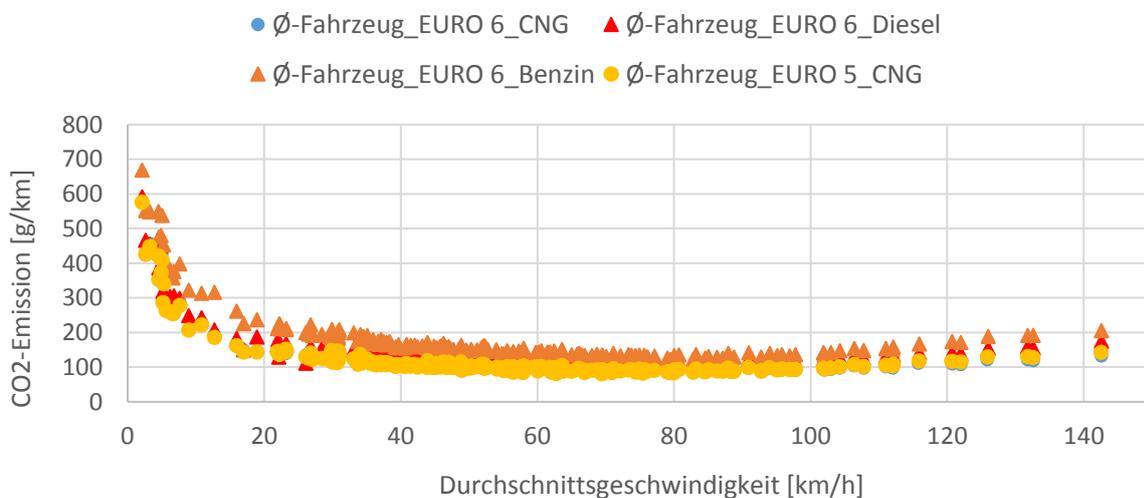


Abbildung 5-41: Vergleich der CO₂-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Beim Vergleich der NO_x-Emissionen weisen bei der Abgasnorm EURO 6 auch die Dieselfahrzeuge erhöhte NO_x-Emissionen auf. Die Verläufe der Emissionsfaktoren sind für die einzelnen Fahrzeugtypen dazu in Abbildung 5-42 dargestellt. Bei Dieselfahrzeugen waren die Systeme SCR und NO_x-Speicherkat noch nicht so ausgereift wie gegenwärtig. Sobald Dieselfahrzeuge nach der Abgasnorm EURO 6d-temp typisiert werden, kann aber davon ausgegangen werden, dass auch das NO_x-Niveau der Dieselfahrzeuge sinkt. Eine deutliche Verbesserung ist auch beim EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug auf EURO 6 zu verzeichnen. Als Fazit der NO_x-HBEFA-Simulation ergibt sich, dass die Emissionsfaktoren des EURO 5- und EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeugs unter jenen der Dieselfahrzeuge liegen, jedoch über jenen der Benzinfahrzeuge. Gründe für die erhöhten NO_x-Emissionen beim Erdgasfahrzeug verglichen mit dem Benzinfahrzeug wurden bereits erwähnt.

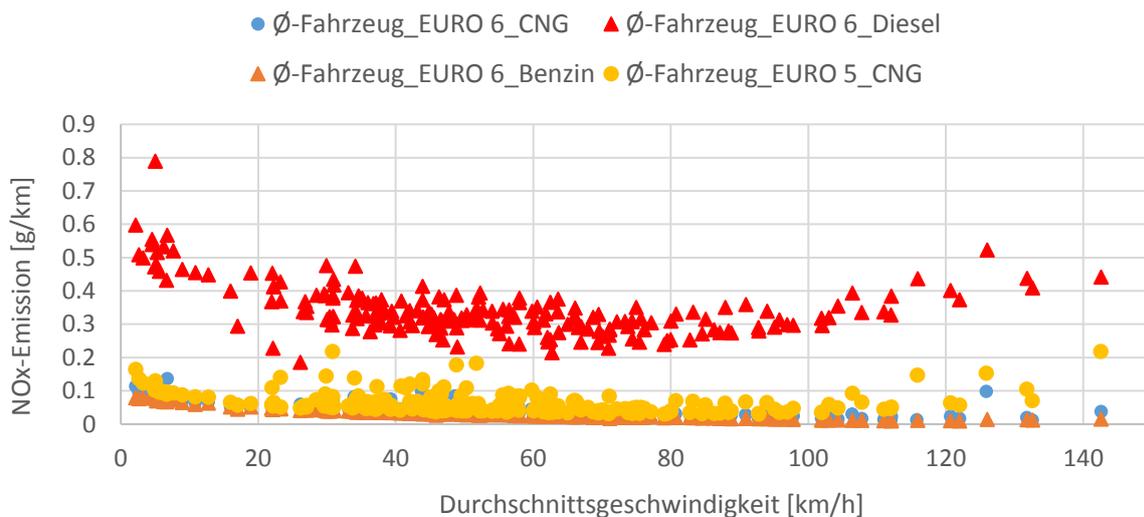


Abbildung 5-42: Vergleich der NO_x-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Bei den THC-Emissionen sind Verbesserungen vom EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug auf jenes von EURO 6 zu verzeichnen, wie es auch in der Abbildung 5-43 grafisch gezeigt wird. Dabei steigt das Emissionsniveau vor allem bei niederlastigen Zyklen an. Ausschlaggebend dafür könnte eine genauere λ -Regelung oder effektivere Katalysatoren sein, die sich positiv auf die Verbrennung und Abgasnachbehandlung von CNG auswirken.

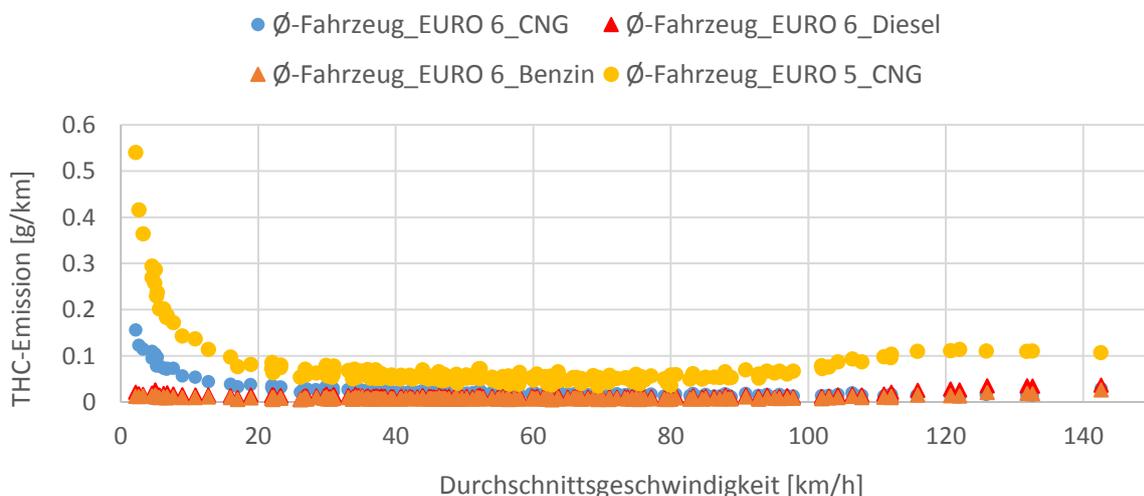


Abbildung 5-43: Vergleich der THC-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Auch bei den HBEFA-Simulationsergebnissen von EURO 6 werden die NMHC-Emissionen betrachtet. Diese dienen zur besseren Differenzierung von THC und CH₄ und sind in Abbildung 5-44 abgebildet. Bei dem EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeug sind gegenüber EURO 5-CNG deutliche Verbesserungen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu verzeichnen.

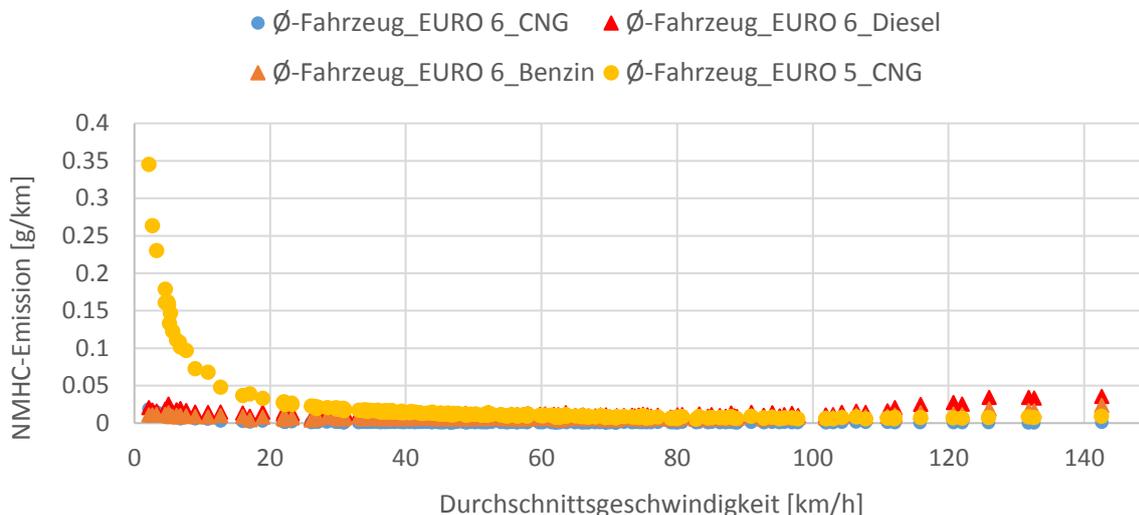


Abbildung 5-44: Vergleich der NMHC-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Bei den Untersuchungen der Simulationsergebnisse von CO wurden beim EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeug wiederholt bessere Ergebnisse als bei EURO 5 erzielt. Auch bei EURO 6 liegen die Emissionsfaktoren des CNG-Durchschnittsfahrzeugs unter denen des Benzinfahrzeugs, wie in Abbildung 5-45 gezeigt.

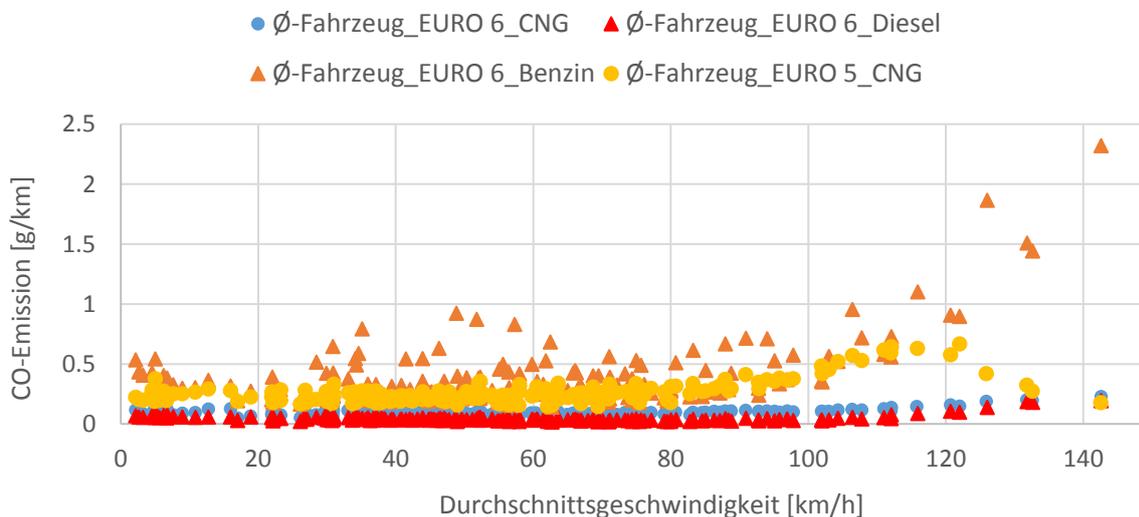


Abbildung 5-45: Vergleich der CO-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

In Abbildung 5-46 ist ersichtlich, dass eine merkliche Verbesserung der PM bei den EURO 6-CNG-Fahrzeugen gegenüber EURO 5 stattfindet.

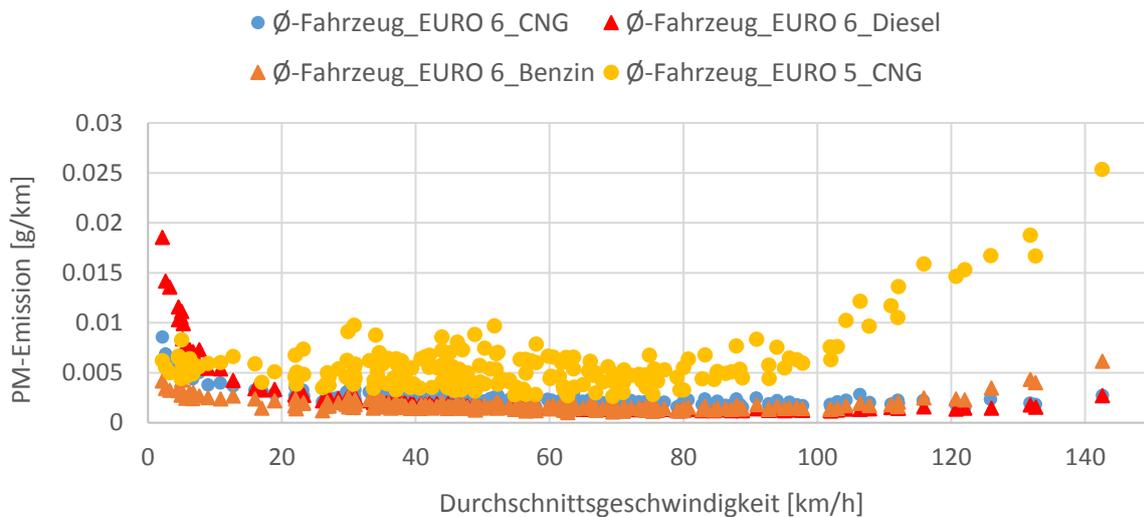


Abbildung 5-46: Vergleich der PM-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Die detaillierte Betrachtung zeigt, dass das EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeug bis circa 20 km/h bei der Emittierung von PM zwischen dem Diesel- und Benzinfahrzeug liegt. Ab einer Geschwindigkeit von 20 km/h liegt es jedoch über den beiden anderen Durchschnittsfahrzeugen. Die Gründe, die zur erhöhten PM führen könnten, wurden bereits in Kapitel 5.6.1 beschrieben. Untersuchungen des PM-Emissionskennfeldes zeigten, dass im niedrigen Drehzahlbereich mit geringer Last erhöhte PM-Bildung auftritt, was sich vor allem bei HBEFA-Zyklen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich auf die PM-Emissionen auswirkt.

Die Analyse von PN zeigt in Abbildung 5-47, dass das EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug weit über den drei EURO 6-CNG-, Diesel- und Benzin-Durchschnittsfahrzeugen liegt. Es ist zu erwähnen, dass die Limitierung der Partikelanzahl erst bei der Abgasnorm EURO 6 eingeführt wurde.

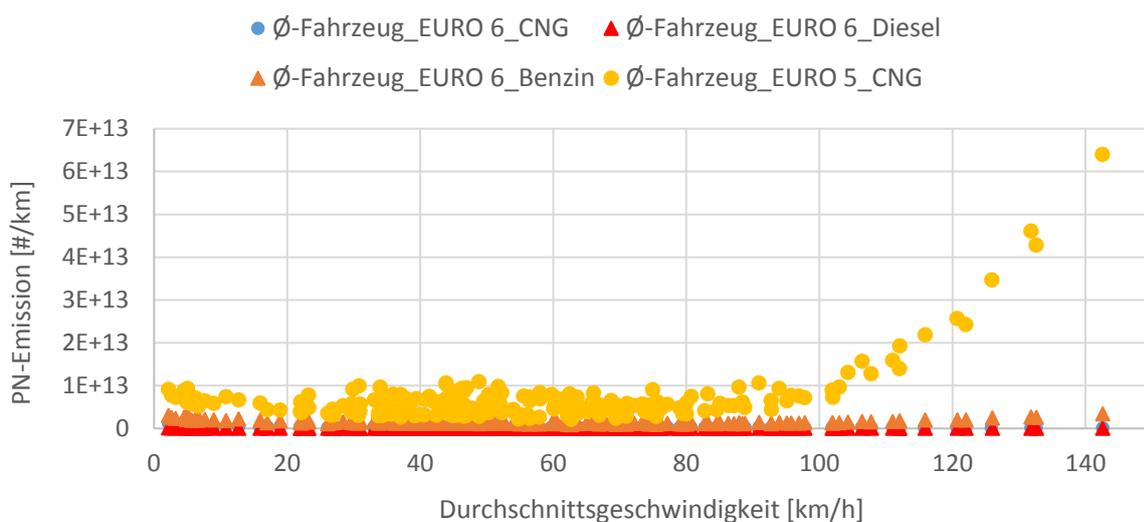


Abbildung 5-47: Vergleich der PN-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen

Für die detaillierte Betrachtung der PN werden die einzelnen EURO 6-Durchschnittsfahrzeuge in Abbildung 5-48 gezeigt. Auffällig hohe Emissionen sind beim Benzinfahrzeug zu verzeichnen. Diese sind vermutlich auf die neue Technologie des direkteinspritzenden Benzinmotors zurückzuführen. Bei DI-Benzinmotoren wird vor allem im Teillastbereich eine nicht so hohe Qualität der Homogenisierung wie bei der Saugrohreinspritzung erreicht. Dabei führen die aufgrund geringer Homogenisierung entstehenden lokalen fetten Zonen u.a. zu Partikelbildung. Bei EURO 6-CNG stellt die Partikelanzahl zumeist kein Problem dar.

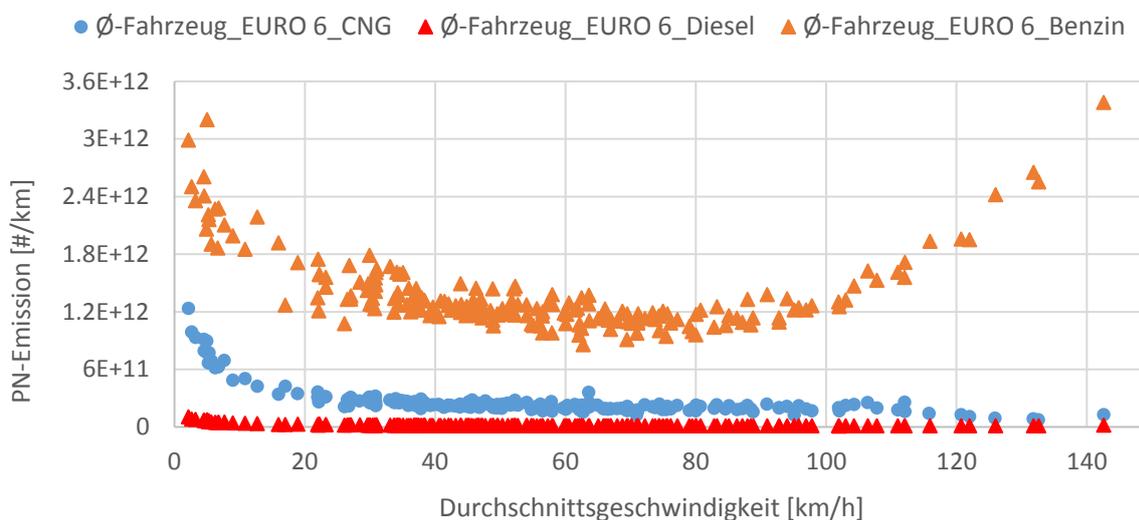


Abbildung 5-48: Vergleich der PN-Emissionen der EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel und CNG bei den HBEFA-Zyklen

5.6.3 Fazit der HBEFA-Simulation

Zusammenfassend geht aus den HBEFA-Simulationsergebnissen hervor, dass vor allem bei den klimarelevanten CO_2 -Emissionen deutliche Reduktionen mit dem CNG-Durchschnittsfahrzeug gegenüber Benzin erreicht werden können. Der Grund liegt in den chemischen Eigenschaften des Erdgases, das einen geringeren Kohlenstoffanteil als Benzin und Diesel aufweist und somit – bei etwa gleichem Motorwirkungsgrad wie bei Benzinbetrieb – gegenüber Benzinfahrzeugen zu einer deutlichen Reduktion von CO_2 führt. Gegenüber Diesel-PKW ist der Motorwirkungsgrad von CNG niedriger, so dass bei gleicher Fahrzeuggröße nur ein geringer Vorteil bleibt. Dasselbe gilt für die CO -Emissionen bei Erdgasfahrzeugen, die im Vergleich zu Benzinfahrzeugen deutlich geringer sind. Nachteilig wirkt sich der geringe Anteil an CO -Emissionen aber auf die Abgasnachbehandlung von NO_x aus, da CO für die Reduktion der Stickoxide erforderlich ist. Eingangs wurde erwähnt, dass für eine zufriedenstellende Abgasnachbehandlung bei Erdgasfahrzeugen $\lambda=0.996$ betragen sollte. Dies erfordert somit eine genaue Regelung und des Weiteren genaue λ -Sonden. Dies zu realisieren ist in der Praxis allerdings nicht einfach. Weiters zeigen die Ergebnisse, dass sich die Abgasnachbehandlung bei den THC - und CH_4 -Emissionen schwieriger als bei den Benzinfahrzeugen gestaltet. Die hohe Stabilität des Methans führt vor allem im niederlastigen Bereich zu hohen Emissionen. Bei der Partikelanzahl als auch von der Partikelmasse treten bei EURO 5- und vereinzelt auch bei EURO 6-Fahrzeugen höhere Niveaus auf. Verbesserungen von EURO 5-CNG auf EURO 6-CNG sind aber für alle Emissionskomponenten zu erkennen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Anhand der Messungen und Simulationen wurde bestätigt, dass bei CNG-Fahrzeugen deutliche CO₂-Reduktionen im Vergleich zu Benzinfahrzeugen möglich sind. Somit könnten zukünftige Klimaziele besser erreicht werden. Es bestätigt sich auch die hohe chemische Stabilität des Methans, dass vor allem bei der Abgasnachbehandlung eine wesentliche Rolle spielt. Vor allem bei Kaltstarts ist eine längere Zeitspanne nötig, um die Betriebstemperatur des Katalysators zu erreichen. Das führt zu erhöhten Methanemissionen in der Kaltstartphase, die zur Klimaerwärmung beitragen. Das Treibhausgaspotential des Methans liegt nämlich um den Faktor 25 höher als das von CO₂.

Die Methode zur Erstellung des Durchschnittsfahrzeugs und Durchschnittskennfelds anhand der Neuzulassungen wird durch gute Validierungsergebnisse bestätigt. Beim Vergleich der Simulation der HBEFA-Zyklen ergibt sich, dass vor allem bei den EURO 5-Fahrzeugen deutliche Probleme bei der Partikelmasse als auch Partikelanzahl im höherlastigeren Betriebsbereich auftreten. Beim Typisierungszyklus NEDC wurden die Grenzwerte aber nicht überschritten. Mögliche Gründe für erhöhten PM- und PN-Emissionen wurden in den einzelnen Kapiteln erklärt, jedoch konnte schlussendlich nicht eindeutig festgestellt werden, welche Faktoren dafür letztendlich verantwortlich waren. Bestätigt wird auch die Annahme der geringeren CO-Emissionen bei CNG-Fahrzeugen. Dies ist wie beim CO₂ auch auf das C/H-Verhältnis zurückzuführen. Weiters geht aus der HBEFA-Simulation hervor, dass die Fahrzeugsettings großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Ebenfalls ist eine zuvor durchgeführte Validierung bzw. modale Messdatenuntersuchung zwingend notwendig, um Messfehler oder sonstige Auffälligkeiten nicht in die Simulation zu übertragen.

Für zukünftige Projekte wäre eine größere Anzahl an vermessenen Fahrzeugen vorteilhaft. Dadurch könnte ein größerer Teil der gegenwärtig zugelassenen Fahrzeuge abgedeckt werden. Bereits bei den fünf vermessenen Fahrzeugen sind deutliche Unterschiede im Emittierungsverhalten der einzelnen Schadstoffe zu beobachten. Bei einer größeren Anzahl an Fahrzeugen könnte auch das unterschiedliche Verhalten möglicherweise besser analysiert werden.

In dieser Arbeit wurde ein dynamischer Zyklus herangezogen um eine gute Kennfeldqualität bestmöglich gewährleisten zu können. Trotz der Verwendung eines dynamischen Zyklus folgt eine Anzahl an extrapolierten Punkten im Kennfeld, die das Simulationsergebnis deutlich beeinflussen können. Für zukünftige Projekte wäre eine größere Anzahl an vermessenen dynamischeren Zyklen von Vorteil, um das reale Fahrverhalten von Erdgasfahrzeugen noch besser abbilden zu können. Zum Beispiel könnte ein zusätzlicher CADC die Kennfeldqualität eventuell deutlich erhöhen. Weiters könnten auch RDE-Fahrten die Kennfeldqualität positiv beeinflussen. Um ein Auskühlen des Katalysators vor einem Warmstart zu vermeiden, sollte gleich nach der Vorkonditionierung oder der davor durchgeführten Messung die Messung mit Warmstart durchgeführt werden.

Damit Erdgasfahrzeuge zukünftig attraktiver werden, wäre vor allem der Ausbau des Tankstellennetzes in Europa zu forcieren. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verbesserung der Mindestreichweiten von monovalenten Erdgasfahrzeugen, die gegenwärtig noch nicht zufriedenstellend ist. Ob Erdgasfahrzeuge zukünftig präsenter werden, ist im Rahmen dieser Arbeit schwierig zu prognostizieren.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Statista GmbH. Zusätzliche Quelle: Scotiabank.
[Online], Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/247129/umfrage/weltweite-neuzulassungen-von-pkw/> [Zugegriffen:19.04.2018]
- [2] van Basshuysen, R.: Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb, Reihenherausgeber: List H.: Der Fahrzeugantrieb, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-07159-2 (eBook)
- [3] Thinkstep AG: Greenhouse Gas Intensity of Natural Gas (Final Report), Client: Natural & Bio Gas Vehicle Association (NGVA) Europe, Mai 2017
- [4] Eichlseder, H.: Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2014
- [5] Wimmer, A.: Thermodynamik des Verbrennungsmotors, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
- [6] Altfeld, K.; Schley, P.: Entwicklung der Erdgasbeschaffenheiten in Europa, Fachbericht Gaswärme International, Februar 2012
- [7] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; Täschner, I. als Ansprechpartnerin: Erdgas, Zahlen Fakten Daten, Januar 2017
- [8] Wikipedia: Tank to Wheel. [Online], Verfügbar: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tank-to-Wheel> [Zugegriffen: 08.04.2018]
- [9] Edwards, R.; Larive, J.F.; Rickeard, D.; Weindorf, W.: Well-To-Tank Report Version 4.1 JEC Well-To-Wheels analysis, ISBN 978-92-79-33888-5, 2014
- [10] Carbon Market Watch, Heinrich Böll Stiftung: The Role of international Offsets in the Fuel Quality Directive, Dezember 2014
- [11] Natural & bio Gas Vehicle Association Europe (NGVA-Europe), Map of fillig NG-Stations. [Online], Verfügbar: <http://www.ngva.eu/get-directions>. Map Data: Google 2018 [Zugegriffen: 18.03.2018]
- [12] Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen: CNG-Fahren mit Erdgas. [Online], Verfügbar: http://www.erdgasautos.at/media/medialibrary/2014/04/fgw_broschuere_cng.pdf. [Zugegriffen: 20.03.2018]
- [13] van Basshuysen, R.: Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung, 4.te Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-12215-7 (eBook)
- [14] Sams, T.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil 1, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2016
- [15] Hausberger St.: Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil 1. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2017
- [16] Hausberger St.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil 2, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2016

- [17] Mladenov N.: Modellierung von Autoabgaskatalysatoren, Dissertation Universität Karlsruhe (THJ), Fakultät Maschinenbau, 2009
- [18] Wikipedia: Abgasnorm. [Online], Verfügbar: <https://de.wikipedia.org/wiki/Abgasnorm> [Zugegriffen 12.04.2018]
- [19] Amtsblatt der Europäischen Union; Rechtsakte von Gremien, die im Rahmen internationaler Übereinkünfte eingesetzt wurden, Änderungsserie 07, Version 3.7.2015
- [20] Wikipedia: NEDC. [Online], Verfügbar: <https://de.wikipedia.org/wiki/Abgasnorm> [Zugegriffen: 16.04.2018]
- [21] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor, 8. überarbeitete Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-10902-8 (eBook)
- [22] Keller, M.; Hausberger, St.; Matzer, C.; Wüthrich, Q.; Notter, B.: HBEFA Version 3.3. Hintergrundbericht. Bern, 25. April 2017
- [23] Zal, P.: Automobil catalog the complete catalog of cars since 1945. [Online], Verfügbar: <http://www.automobile-catalog.com>. ISBN 978-83-931772-0-2 automobile-catalog.com. [Zugegriffen: Jänner- Februar 2018]
- [24] Sieghartsleitner, D.: Messung und Simulation von CNG-Fahrzeugen für HBEFA. Bachelorarbeit Technische Universität Graz, Institut IVT, Bereich Emissionen. Graz 2018
- [25] Fachverband Gas Wärme (FGW). „erdgasautos.at“, [Online], Verfügbar: <http://www.erdgasautos.at/fahren/fahrzeuge/pkw/> [Zugegriffen: 18.04.2018]
- [26] ADAC-Autotest VW Caddy 2.0 EcoFuel Trendline. „adac.de“, [Online], Verfügbar: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/autotest/detail.aspx?IDTest=4955>. [Zugegriffen: 18.04.2018]
- [27] Carspector, automotive technical specifications and performance data, comparisons, superlatives & dictionary. [Online], Verfügbar: <http://carspector.com/car/volkswagen/056154/> [Zugegriffen: 18.04.2018]
- [28] Fiat Group Automobiles Germany AG. Presse Information, Technisches Datenblatt. Stand 09.04.2014. [Online], Verfügbar: http://www.fiatpress.de/download/DE/2014/FIAT/Technische_Daten/140409_F_Doblo_TD.pdf. [Zugegriffen: 18.04.2018]
- [29] Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz. ERMES-Tool V2.0.0 User Guide, 2018
- [30] IVT-TU Graz, PHEM User Guide“, 2017

- [31] N. Hill, E. Windisch, S. Hausberger, C. Matzer, I. Skinner, 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; Service Request 4 to LDV Emissions Framework Contract; Final Report for DG Climate Action; Ref. CLIMA.C.2/FRA/2012/0006; Ricardo AEA, UK, 2015
- [32] European Environment Agency. „[eea.europa.eu](https://www.eea.europa.eu)“, [Online], Verfügbar: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/vans-10> [Zugegriffen: Februar 2018]
- [33] Erstzulassung, Wikipedia. [Online], Verfügbar: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erstzulassung> [Zugegriffen: 24.04.2018]
- [34] Delphi Technologies, Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty vehicles, Verfügbar: <https://www.delphi.com/innovations#emissionstandards> [Version 2018/19]
- [35] Amtsblatt der Europäischen Union; Verordnung (EU) 2017/1151 Der Kommission vom 1.Juni 2017

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Anzahl der weltweiten PKW-Neuzulassungen in den Jahren 2013 bis 2018 (in Millionen) [1]	1
Abbildung 2-1: Vergleich spezifischer Heizwerte verschiedener Kraftstoffe über den stöchiometrischen Luftbedarf [2]	4
Abbildung 2-2: Unterscheidung CNG und LNG	4
Abbildung 2-3: Speichervolumen verschiedener Kraftstoffe für 250 MJ [2]	5
Abbildung 2-4: Prozesskette des Erdgases von der Bohrung bis zum Rad [3].....	7
Abbildung 2-5: Well-To-Tank-Analyse in Europa in [g CO ₂ -eq/MJ] [3]	9
Abbildung 2-6: Vergleich von CO ₂ -Emissionen verschiedener Kraftstoffe im NEDC [3]	9
Abbildung 2-7: Well-To-Wheel-Analyse für Benzin, Diesel und Erdgas in [g CO ₂ -eq/km] [3]	10
Abbildung 2-8: Erdgastankstellennetz in Europa [11].....	11
Abbildung 2-9: Grundlegende Bauteile eines CNG-Fahrzeugs [12]	12
Abbildung 2-10: Aufbau eines Dreiwegekatalysators und Abbildung der katalytischen Reaktionen [17].....	16
Abbildung 2-11: Konvertierungsrate (CH ₄ , NO _x und CO) über λ im Dreiwegekatalysator bei Erdgas und Benzin [2].....	18
Abbildung 2-12: Umsetzungsrate von Kohlenwasserstoffen bei Benzin und bei CNG-Betrieb über der Temperatur am gleichen Katalysator [2]	19
Abbildung 2-13: Wirkungsgrad und Abgastemperatur über das Verdichtungsverhältnis bei CNG-Fahrzeugen [2].....	19
Abbildung 2-14: Optimaler Arbeitspunkt der λ -Regelung und Konzentrationen der Schadstoffe bei CNG-Fahrzeugen [2].....	20
Abbildung 3-1: Testzyklus NEDC	23
Abbildung 3-2: Testzyklus WLTC Klasse drei.....	23
Abbildung 3-3: Testzyklus ERMES V8.....	24
Abbildung 3-4: Testzyklus IUFC	24
Abbildung 3-5: Aufbau PKW-Rollenprüfstand und CVS-Anlage [15].....	29
Abbildung 3-6: CO ₂ (links) und limitierte Schadstoffe (rechts) im NEDC-Kaltstart (25 °C) beim Opel Zafira	32
Abbildung 3-7: Opel Zafira Abweichungen von Messung zur Zulassung im NEDC mit Kaltstart (25 °C).....	33
Abbildung 3-8: CO ₂ (links) und limitierte Schadstoffe (rechts) im NEDC-Kaltstart (25 °C) beim VW-Caddy	34
Abbildung 3-9: VW-Caddy Abweichungen von Messung zur Zulassung im NEDC mit Kaltstart (25 °C).....	34
Abbildung 3-10: CO ₂ (links) und limitierte Schadstoffe (rechts) im NEDC-Kaltstart (25 °C) beim Fiat Doblo.....	35
Abbildung 3-11: Fiat Doblo Abweichung von Messung zur Zulassung im NEDC mit Kaltstart	

(25 °C).....	35
Abbildung 3-12: Messung ERMES-Warmstart beim VW-Caddy (25 °C), THC und CH ₄ - Betrachtung	37
Abbildung 3-13: Messung ERMES-Warmstart beim VW-Caddy (25 °C), NO _x -Betrachtung	38
Abbildung 3-14: Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C), THC- und CH ₄ - Betrachtung	38
Abbildung 3-15: Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C), NO _x -Betrachtung	39
Abbildung 3-16: Messung ERMES-Warmstart beim Fiat Doblo (25 °C), THC- und CH ₄ - Betrachtung	39
Abbildung 3-17: Messung ERMES-Warmstart beim Fiat Doblo (25 °C), NO _x -Betrachtung.	40
Abbildung 3-18: Messung IUFC-Kaltstart beim Fiat Doblo (-7 °C), Untersuchung Startverhalten	41
Abbildung 4-1: Messung IUFC-Kaltstart beim VW-Caddy (-7°C), THC- und CH ₄ -Betrachtung	42
Abbildung 4-2: Bestimmung der absoluten CO ₂ -Emissionen in jedem der einzelnen Mikrozyklen	43
Abbildung 4-3: IUFC-Kaltstart beim VW-Caddy (-7 °C), akkumulierte CO ₂ -Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus	43
Abbildung 4-4: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 5-Fahrzeuge beim IUFC bei -7 °C.....	44
Abbildung 4-5: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 6-Fahrzeuge beim IUFC bei -7 °C.....	44
Abbildung 4-6: IUFC-Warmstart beim VW-Caddy (-7 °C), kumulierte THC-Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus	46
Abbildung 4-7: Abweichung berechneter-IUFC-Kaltstart-angepasst zu Messung der EURO 5- Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2.....	47
Abbildung 4-8: Abweichung berechneter Kaltstart beim IUFC zu Messung der EURO 6- Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2.....	47
Abbildung 4-9: Messung NEDC-Kaltstart beim Audi A3 g-tron (25 °C), THC- und CH ₄ - Betrachtung	48
Abbildung 4-10: NEDC-Kaltstart beim VW-Caddy (25 °C), kumulierte CO ₂ -Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus	49
Abbildung 4-11: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 5-Fahrzeuge beim NEDC bei 25 °C.	49
Abbildung 4-12: Kaltstartzusatzemissionen der EURO 6-Fahrzeuge beim NEDC bei 25 °C.	50
Abbildung 4-13: NEDC-Warmstart beim VW-Caddy (25 °C), kumulierte THC-Emissionen in jedem einzelnen Mikrozyklus	50
Abbildung 4-14: Abweichung berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung der EURO 5- Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2.....	51
Abbildung 4-15: Abweichung berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung der EURO 6- Fahrzeuge bei der Validierungsmethode 2.....	51
Abbildung 5-1: Funktionsprinzip PHEM [15]	54
Abbildung 5-2: Normierte Vollast- und Schleppkurve vom Opel Zafira	56
Abbildung 5-3: Normierte Vollast- und Schleppkurve vom VW-Caddy	56

Abbildung 5-4: Normierte Vollast- und Schleppkurve vom Fiat Doblo.....	57
Abbildung 5-5: Vor der Kennfeldkalibrierung - VW-Caddy.....	58
Abbildung 5-6: Nach der Kennfeldkalibrierung - VW-Caddy.....	58
Abbildung 5-7: Kennfelderstellung ohne Warmlaufphase - (Messung ERMES-Warmstart mit VW-Caddy bei 25 °C).....	60
Abbildung 5-8: Kennfelderstellung unter Berücksichtigung des Warmstartteils von 300 Sekunden - (Messung ERMES-Warmstart mit VW-Caddy bei 25 °C).....	61
Abbildung 5-9: Vergleich Messung und Simulation ERMES_ges, ERMES_mod_65, und ERMES_mod_300 beim VW-Caddy.....	61
Abbildung 5-10: Vergleich Messung und Simulation von gesamten ERMES, ERMES_mod_65, und ERMES_mod_300 beim Opel Zafira.....	62
Abbildung 5-11: Vergleich Messung und Simulation von gesamten ERMES, ERMES_mod_65, und ERMES_mod_300 beim Fiat Doblo.....	62
Abbildung 5-12: Neuzulassungen der vermessenen Fahrzeuge im Jahr 2013 und 2016.....	64
Abbildung 5-13: Vergleich Neuzulassungen der vermessenen Fahrzeuge zu allen neu zugelassenen Fahrzeugen im Jahr 2013 und 2016.....	65
Abbildung 5-14: schematische Vorgehensweise zur Erstellung der durchschnittlichen EURO 5- und EURO 6-Emissionskennfelder nach Gewichtungsvariante 1.....	65
Abbildung 5-15: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Validierung des Durchschnittsfahrzeugs und Durchschnittskennfelds für Gewichtungsvariante 1.....	68
Abbildung 5-16: Validierung von ERMES_mod_300 EURO 5-Durchschnittsfahrzeugs und –kennfelds mit Gewichtungsvariante 1.....	69
Abbildung 5-17: Vergleich der Betriebspunkte im ERMES_mod_300 vom Getriebe VW-Caddy (links) und Getriebe Opel Zafira (rechts) beim NOx-Durchschnittskennfeld nach Gewichtungsvariante 1.....	69
Abbildung 5-18: Validierung von ERMES_mod_300 des EURO 5-Durchschnittsfahrzeugs und –kennfelds mit Gewichtungsvariante 2.....	70
Abbildung 5-19: Validierung von ERMES_mod_300 des EURO 6-Durchschnittsfahrzeug und –kennfeld mit Gewichtungsvariante 1.....	71
Abbildung 5-20: Partikelanzahlkennfeld EURO 6 Gewichtungsvariante 1.....	71
Abbildung 5-21: PN-Kennfeld Gewichtungsvariante 1 mit den Betriebspunkten des ERMES_mod_300 vom Fiat Doblo (links) und Audi A3 g-tron (rechts).....	72
Abbildung 5-22: Validierung von ERMES_mod_300 des EURO 6-Durchschnittsfahrzeugs und –kennfelds mit Gewichtungsvariante 2.....	72
Abbildung 5-23: Abweichungen Messung und Simulation von ERMES_mod_300 bei angepasstem PN-Kennfeld mit verschiedenen Varianten (links = Gewichtungsvariante 1 und rechts = Gewichtungsvariante 2).....	73
Abbildung 5-24: Vergleich der CO ₂ -Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen.....	76
Abbildung 5-25: Vergleich der NO _x -Emissionen EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen.....	76
Abbildung 5-26: Vergleich der NO _x -Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei	

den HBEFA-Zyklen	77
Abbildung 5-27: Vergleich der NO _x -Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp mit dem EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	77
Abbildung 5-28: Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C), NO _x -Betrachtung	78
Abbildung 5-29: Modifizierte Messung ERMES-Warmstart beim Opel Zafira (25 °C) mit weggeschnittenen NO _x -Spitzen (ERMES_mod_300_NO _x _cut)	78
Abbildung 5-30: Abweichung Simulation zur Messung beim modifizierten NO _x -Kennfeld .	79
Abbildung 5-31: Vergleich der NO _x -Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und mit dem angepassten Opel Zafira-Kennfeld bei den HBEFA-Zyklen	79
Abbildung 5-32: Vergleich der THC-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen	80
Abbildung 5-33: Vergleich der THC-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	80
Abbildung 5-34: Vergleich der beiden THC-Emissionskennfelder, Opel Zafira (links) und des EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeugs (rechts) anhand eines niederlastigen Zyklus.....	81
Abbildung 5-35: Vergleich der NMHC-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen	81
Abbildung 5-36: Vergleich der CO-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen	82
Abbildung 5-37: Vergleich der PM-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen	82
Abbildung 5-38: Vergleich der PM-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	83
Abbildung 5-39: Vergleich der PN-Emissionen von EURO 5-Benzin, -Diesel und -CNG bei den HBEFA-Zyklen	83
Abbildung 5-40: Vergleich der PN-Emissionen von VW-Caddy, Opel Zafira, VW-EcoUp und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	84
Abbildung 5-41: Vergleich der CO ₂ -Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	84
Abbildung 5-42: Vergleich der NO _x -Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	85
Abbildung 5-43: Vergleich der THC-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	85
Abbildung 5-44: Vergleich der NMHC-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	86
Abbildung 5-45: Vergleich der CO-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	86
Abbildung 5-46: Vergleich der PM-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	87
Abbildung 5-47: Vergleich der PN-Emissionen von EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel, CNG und vom EURO 5-CNG-Fahrzeug bei den HBEFA-Zyklen	87
Abbildung 5-48: Vergleich der PN-Emissionen der EURO 6-Fahrzeugen Benzin, Diesel und	

CNG bei den HBEFA-Zyklen	88
Abbildung 10-1: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO _x -Emissionen im NEDC-Kaltstart beim Opel Zafira	102
Abbildung 10-2: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO _x -Emissionen im NEDC-Kaltstart VW-Caddy	102
Abbildung 10-3: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO _x -Emissionen im NEDC-Kaltstart Fiat Doblo	103
Abbildung 10-4: Abweichungen berechneter Kaltstart beim IUFC zu Messung (Prüfraumtemperatur: -7 °C, EURO 5-Fahrzeuge)	103
Abbildung 10-5: Abweichungen berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung (Prüfraumtemperatur: 25 °C, EURO 5-Fahrzeuge).....	104
Abbildung 10-6: Abweichungen berechneter Kaltstart beim IUFC zu Messung (Prüfraumtemperatur: -7 °C, EURO 6-Fahrzeuge)	104
Abbildung 10-7: Abweichungen berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung (Prüfraumtemperatur: 25 °C, EURO 6-Fahrzeuge).....	104
Abbildung 10-8: Eingabedaten PHEM für das EURO 5-Durchschnittsfahrzeug Gewichtungsvariante 1	105
Abbildung 10-9: Eingabedaten PHEM für das EURO 5-Durchschnittsfahrzeug nach Gewichtungsvariante 2	106
Abbildung 10-10: Partikelanzahlkennfeld EURO 6 nach Gewichtungsvariante 2	106
Abbildung 10-11: Fahrzeugeingabedaten in PHEM für das EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug.....	107
Abbildung 10-12: Fahrzeugeingabedaten in PHEM für das EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeug.....	107

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Einteilung der Erdgastypen nach Methananteil und Vorkommen [2]	6
Tabelle 2-2: Erdgaszusammensetzungen in verschiedenen Gebieten [6]& [7]	6
Tabelle 2-3: Gasbeschaffungsparameter von Erdgas in unterschiedlichen Gebieten	7
Tabelle 2-4: Grenzwerte der einzelnen Schadstoffkomponenten nach [19] und [20] für fremdzündende Motoren	21
Tabelle 3-1: Messprogramm aller CNG-Fahrzeuge	22
Tabelle 3-2: Vermessene EURO 5- und EURO 6-CNG-Fahrzeuge	25
Tabelle 3-3: Fahrzeugdaten Opel Zafira [23]	26
Tabelle 3-4: Fahrzeugdaten VW-Caddy [25], [26]und [27]	27
Tabelle 3-5 Fahrzeugdaten Fiat Doblo [23] und [28]	28
Tabelle 3-6: Prüfstandseinstellungen für die vermessenen Fahrzeuge im NEDC	31
Tabelle 3-7: Prüfstandseinstellungen für die vermessenen Fahrzeuge im ERMES und IUFC	31
Tabelle 3-8: Messergebnisse ERMES-Zyklus mit Warmstart bei 25 °C	36
Tabelle 3-9: Kraftstoffuntersuchungen beim Start und während des Zyklus	40
Tabelle 5-1: Eingabedaten PHEM	55
Tabelle 5-2: Abweichungen im ERMES-Zyklus vor und nach der Kalibrierung	58
Tabelle 5-3: Beschreibung der drei verschiedenen Kennfelderstellungsvarianten	60
Tabelle 5-4: Erstzulassungen von EURO 5a, EURO 5b und EURO 6b aus [34]	64
Tabelle 5-5: Fahrzeugmassen und Leistung des EURO 5-Benzin-Durchschnittsfahrzeugs sowie CNG-Durchschnittsfahrzeugs nach den unterschiedlichen Gewichtungsvarianten	66
Tabelle 5-6: Fahrzeugmassen und Leistung des EURO 6 Benzin-Durchschnittsfahrzeugs sowie CNG-Durchschnittsfahrzeugs nach den unterschiedlichen Gewichtungsvarianten	67
Tabelle 5-7: Fahrzeuge mit ähnlicher Masse und Leistung wie das Durchschnittsfahrzeug nach Gewichtungsvariante 1 und 2	67
Tabelle 5-8: Vergleich Neuzulassungen, Leistung, Masse von VW-EcoUp, Opel Zafira und CNG-Durchschnittsfahrzeug nach Gewichtungsvariante 3	70
Tabelle 5-9: Eingabedaten Start-Stop in PHEM für HBEFA-Simulation	75
Tabelle 10-1: Treibhausgasfaktoren	99
Tabelle 10-2: Fahrzeugdaten VW-EcoUp [23], [24] und [25]	100
Tabelle 10-3: Fahrzeugdaten Audi A3 g-tron [24], [29]	101

10 Anhang

10.1 Treibhausgas-Koeffizienten aus [9]

Tabelle 10-1: Treibhausgasfaktoren

Treibhausgas	t CO_{2eq}/t
CO ₂	1
Methan (CH ₄)	25
Lachgas (N ₂ O)	298

10.2 Fahrzeugdaten VW-EcoUp und Audi A3 g-tron

Tabelle 10-2: Fahrzeugdaten VW-EcoUp [23], [24] und [25]

Motor	Einheit	Wert
Motorbauart	-	Reihen-Dreizylinder-Ottomotor
Hubraum	cm ³	999
Verdichtung	-	11.5:1
Einspritzung	-	Multipointinjection (MPI)
Aufladung	-	nein
Nennleistung	kW	50
Maximales Drehmoment	Nm	90 bei 3000 U/min
Nenn Drehzahl	U/min	6200
Leerlaufdrehzahl	U/min	800
Abgasnachbehandlung	-	Dreiwegekatalysator
Antrieb/ Kraftübertragung		
Antriebsart	-	Frontantrieb
Getriebeart	-	5-Gang manuelles Schaltgetriebe
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5	-	3.643/1.955/1.27/0.959/0.796
Achsübersetzung	-	4.167
Bereifung (bei Messungen)	-	165/70 R14
Masse		
DIN-Leermasse	kg	956
Karosserie/Abmessungen		
Luftwiderstandbeiwert c_w	-	0.32
Stirnfläche A	m ²	2.07
Weitere Fahrzeugdaten		
Tankinhalt CNG/Benzin	kg/l	11/10
Tachostand bei Testbeginn	km	13500
Erstzulassung (aus Zulassung)	-	2014
EG-Genehmigungsdatum (aus Zul.)	-	08.04.2014

Tabelle 10-3: Fahrzeugdaten Audi A3 g-tron [24], [29]

Motor	Einheit	Wert
Motorbauart	-	Reihen-Vierzylinder-Ottomotor
Hubraum	cm ³	1395
Verdichtung	-	10.5:1
Einspritzung	-	Multipointinjektion (MPI)
Aufladung	-	Abgasturboaufladung
Nenneistung	kW	81
Maximales Drehmoment	Nm	210 bei 1500-3500
Nenndrehzahl	U/min	4800-6500
Leerlaufdrehzahl	U/min	650
Abgasnachbehandlung	-	Dreiwegekatalysator
Antrieb/ Kraftübertragung		
Antriebsart	-	Frontantrieb
Getriebeart	-	6-Gang manuelles Schaltgetriebe
Getriebeübersetzung 1/2/3/4/5/6/7	-	3.765/2.273/1.531/1.122/1.176/0.951/0.795
Achsübersetzung	-	1-4 Gang 4.438/5-7 Gang 3.227
Bereifung (bei Messungen)	-	205/55 R16
Masse		
DIN-Leermasse	kg	1280
Karosserie/Abmessungen		
Luftwiderstandbeiwert c_w	-	0.32
Stirnfläche A	m ²	2.13
Weitere Fahrzeugdaten		
Tankinhalt CNG/Benzin	kg/l	14.4/50
Tachostand bei Testbeginn	km	7500
Erstzulassung (aus Zulassung)	-	2017
EG-Genehmigungsdatum (aus Zul.)	-	18.05.2017

10.3 NEDC-Kaltstarts aller Fahrzeuge

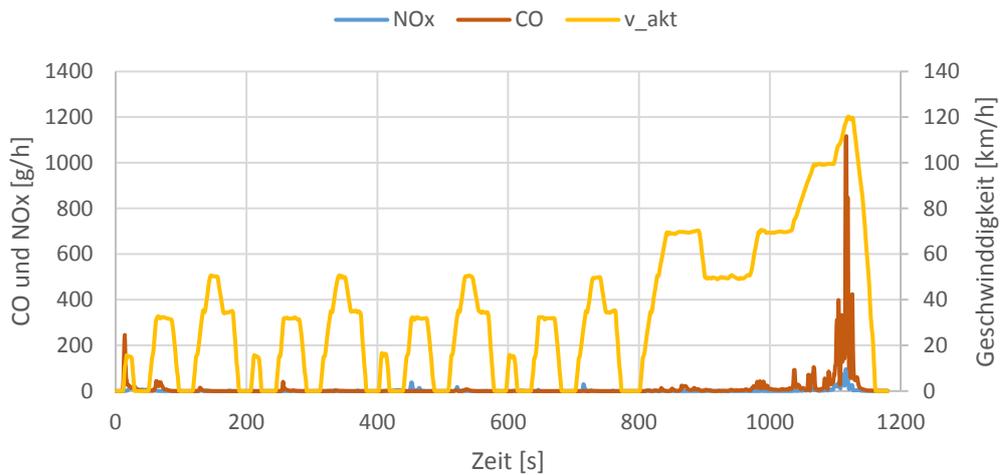


Abbildung 10-1: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO_x-Emissionen im NEDC-Kaltstart beim Opel Zafira (25 °C)

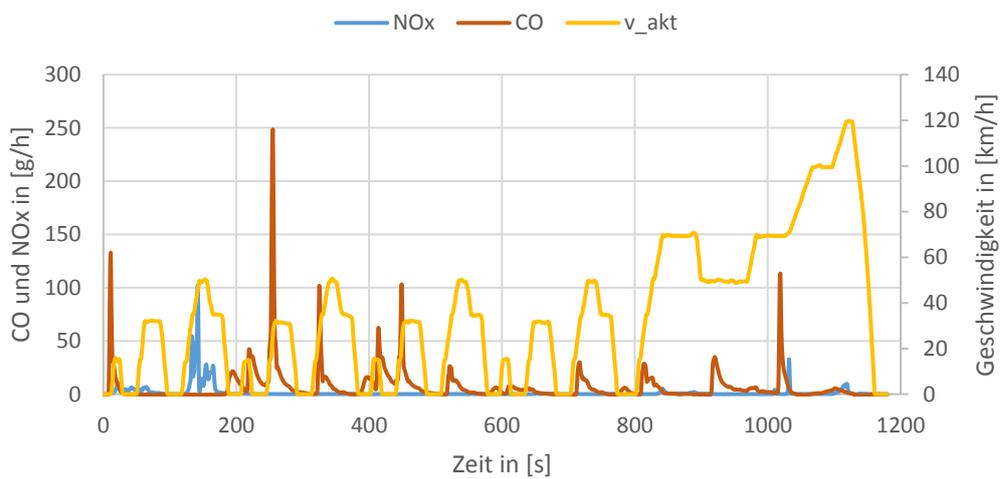


Abbildung 10-2: Zeitlicher Verlauf der CO- und NO_x-Emissionen im NEDC-Kaltstart VW-Caddy (25 °C)

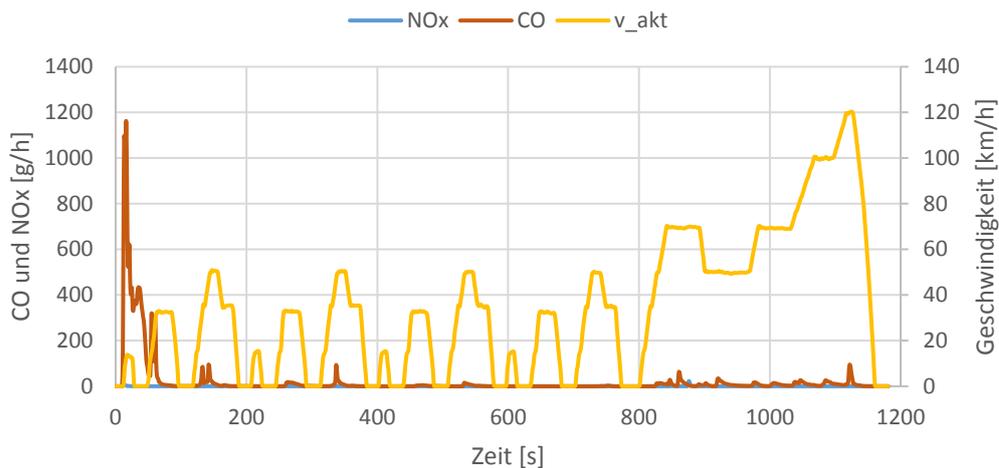


Abbildung 10-3: Zeitlicher Verlauf der CO- und NOx-Emissionen im NEDC-Kaltstart Fiat Doblo (25 °C)

10.4 Kaltstartzusatzemissionen

Validierungsmethode 1

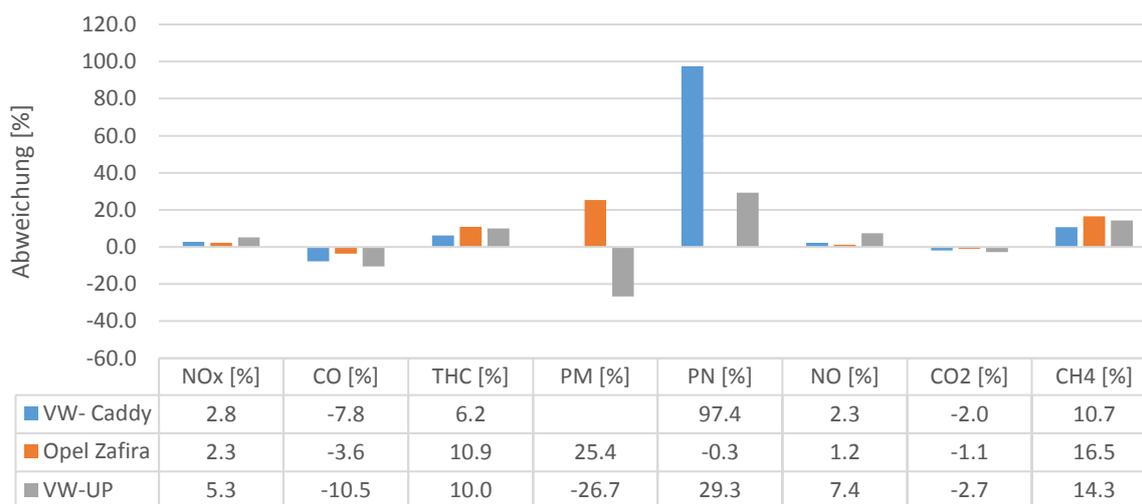


Abbildung 10-4: Abweichungen berechneter Kaltstart beim IUFC zur Messung (Prüfraumtemperatur: -7 °C, EURO 5-Fahrzeuge)

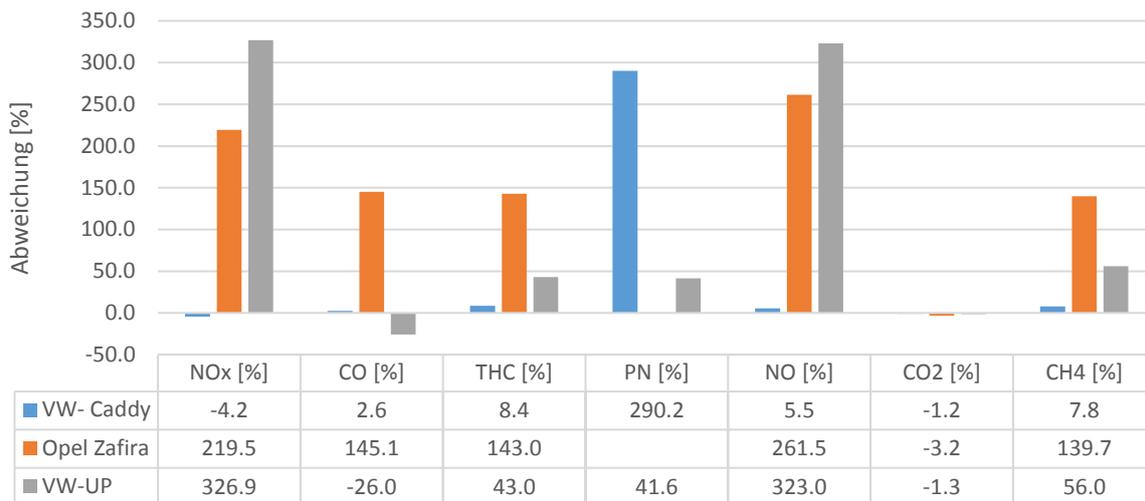


Abbildung 10-5: Abweichungen berechneter Kaltstart beim NEDC zur Messung (Prüfraumtemperatur: 25 °C, EURO 5-Fahrzeuge)

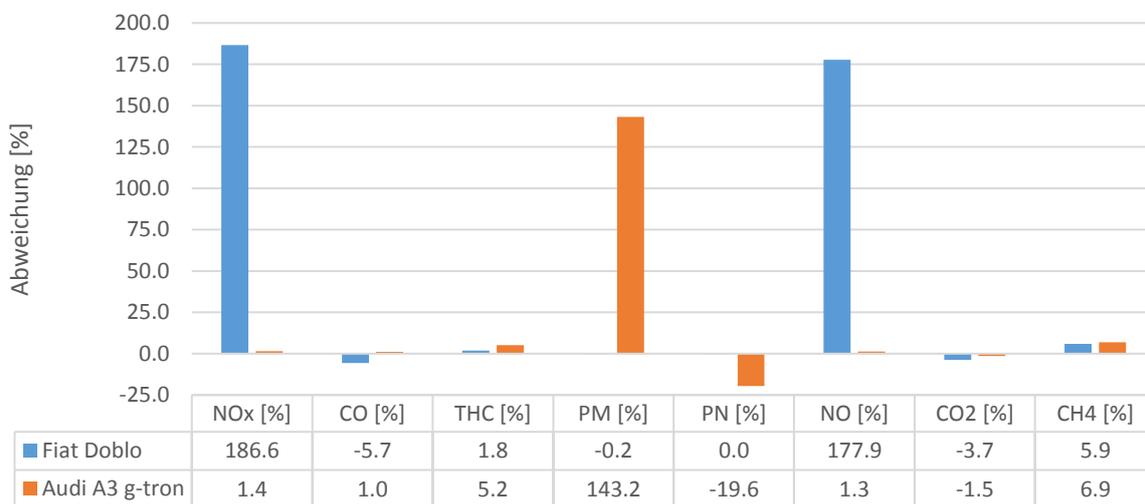


Abbildung 10-6: Abweichungen berechneter Kaltstart beim IUFC zu Messung (Prüfraumtemperatur: -7 °C, EURO 6-Fahrzeuge)

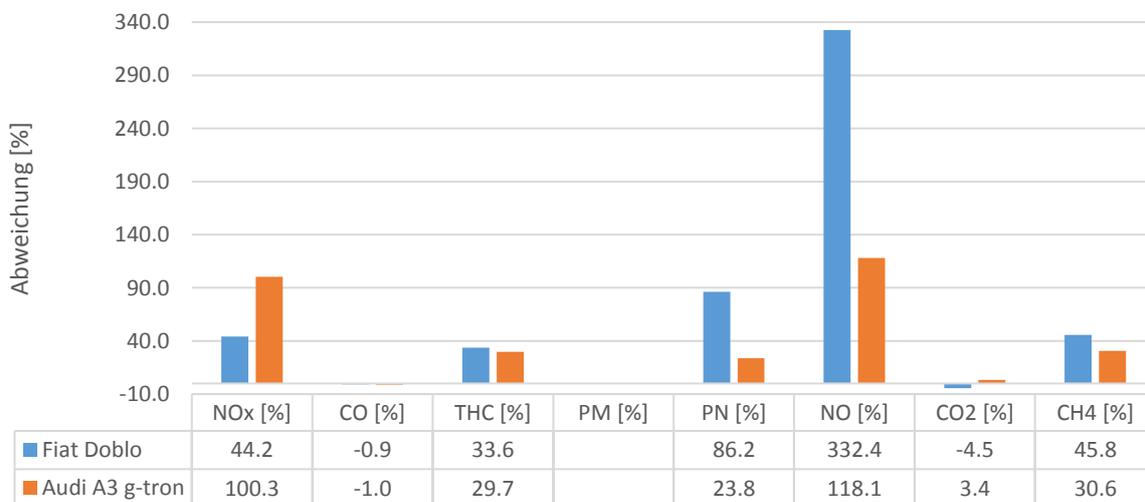


Abbildung 10-7: Abweichungen berechneter Kaltstart beim NEDC zu Messung (Prüfraumtemperatur: 25 °C, EURO 6-Fahrzeuge)

10.5 Erstellung Durchschnittsfahrzeuge

10.5.1 Durchschnittsfahrzeug mit Gewichtungsvariante 1

Die Vorgehensweise zur Erstellung des Fahrzeuges mit Gewichtungsvariante 1 wurde bereits im Kapitel 5.3.1 erwähnt. Die Eingabedaten für PHEM sind hierfür in Abbildung 10-8 für das EURO 5-Durchschnittsfahrzeug mit Gewichtungsvariante 1 dargestellt. Es werden dabei die gebildeten Mittelwerte aller vermessenen Fahrzeugdaten im VEH-File eingetragen. Zu beachten sind die Fahrwiderstandsbeiwerte. Hierbei werden die durchschnittlichen Absolutwerte gebildet und die Beiwerte hierfür werden mit der mit Variante 1 gewichteten Schwungmasse berechnet. Weiters zu beachten sind die Getriebe- und Motorträgheit, die als Basis die durchschnittliche Leistung der drei vermessenen EURO 5-Fahrzeuge beziehen. Die Bestimmung der Fahrzeugdaten für das EURO 6-Fahrzeug erfolgt analog und wird hier nicht explizit erklärt.

Die Auswahl des Getriebes erfolgt nach der Validierung, da dieses die Simulation stark beeinflusst. Die für die Validierung herangezogenen Getriebeübersetzungen der EURO 5- und EURO 6-Durchschnittsfahrzeuge sind Abbildung 10-8 abgebildet.

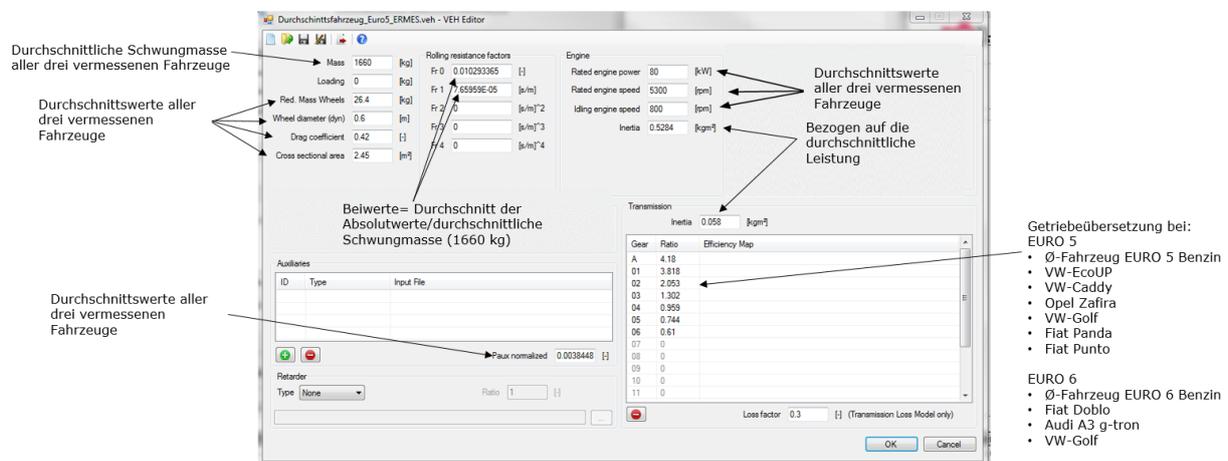


Abbildung 10-8: Eingabedaten PHEM für das EURO 5-Durchschnittsfahrzeug Gewichtungsvariante 1

10.5.2 Durchschnittsfahrzeug mit Gewichtungsvariante 2

Für die Erstellung des Durchschnittsfahrzeugs nach Gewichtungsvariante 2, erfolgt die Vorgehensweise ähnlich. Zu Beginn werden die Daten der vermessenen Fahrzeuge nach Neuzulassungen gewichtet. Dies dient zur Validierung und anschließend zur Festlegung einer Getriebeübersetzung. Zuletzt wird für die HBEFA-Simulation die Fahrzeugleistung und -masse im VEH-File mit jenen gewichteten Daten aller neu zugelassen CNG-Fahrzeuge im Jahr 2013 und 2016 angepasst.

Die gewichteten Eingabedaten in PHEM für die Validierung und die Vorgehensweise zur Bestimmung der einzelnen Parameter sind hierzu für das EURO 5-Fahrzeug in Abbildung 10-9 abgebildet. Die Ermittlung der einzelnen Parameter erfolgt nicht durch die Bildung des Durchschnitts, sondern die einzelnen Parameter werden nach Neuzulassungen gewichtet. Die Getriebeübersetzungen, die für EURO 5 und EURO 6 zur Validierung herangezogen werden, sind auch in dieser Abbildung dargestellt.

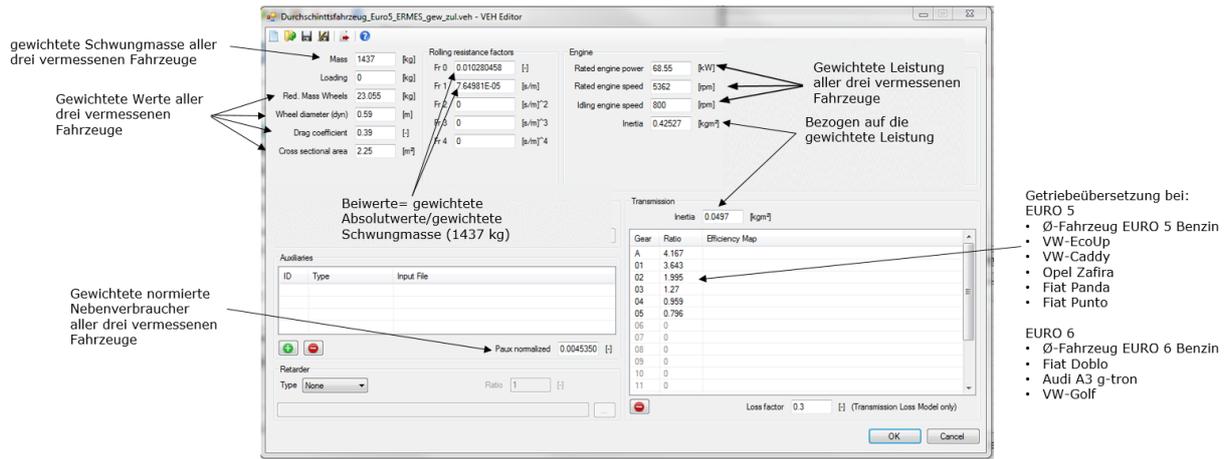


Abbildung 10-9: Eingabedaten PHEM für das EURO 5-Durchschnittsfahrzeug nach Gewichtungsvariante 2

10.6 Partikelanzahlkennfelder (PN-Kennfelder)

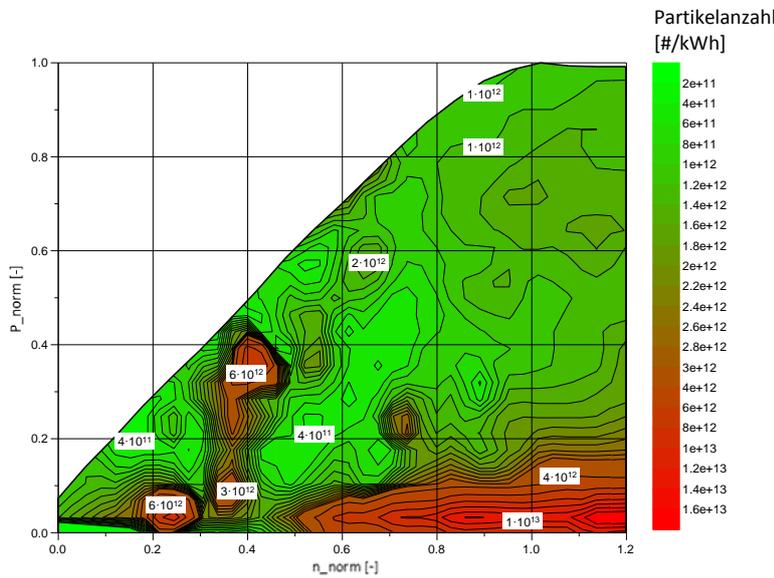


Abbildung 10-10: Partikelanzahlkennfeld EURO 6 nach Gewichtungsvariante 2

10.7 Eingabedaten HBEFA-Simulation

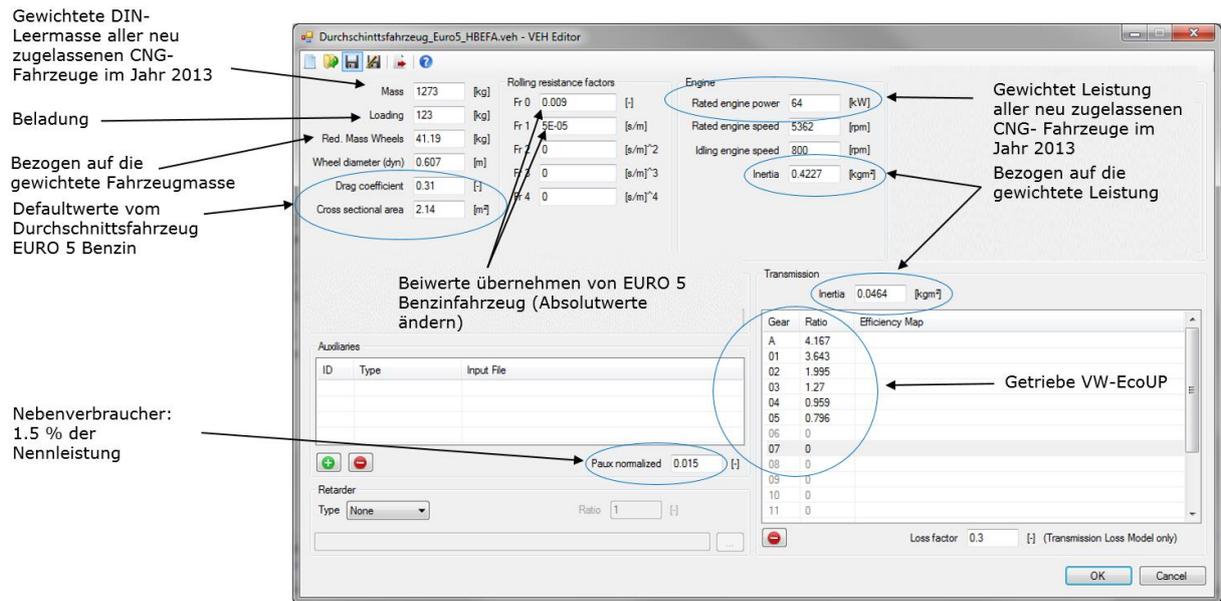


Abbildung 10-11: Fahrzeugeingabedaten in PHEM für das EURO 5-CNG-Durchschnittsfahrzeug

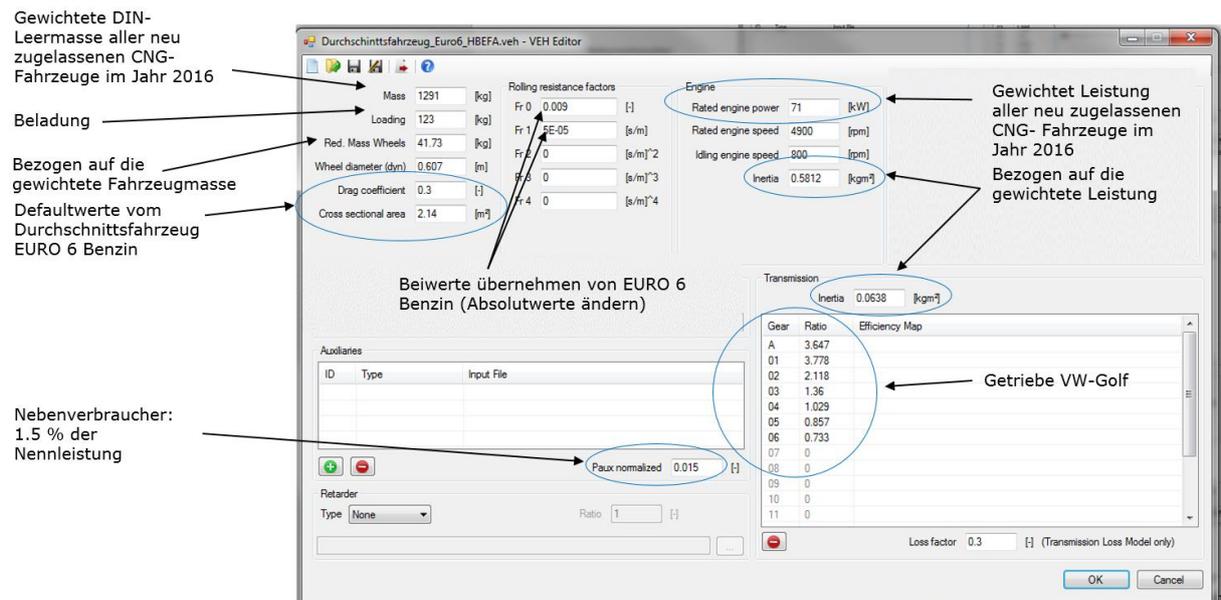


Abbildung 10-12: Fahrzeugeingabedaten in PHEM für das EURO 6-CNG-Durchschnittsfahrzeug