



Maximilian Wurm, BSc

Messung und Simulation von Partikelemissionen von PKW mit Ottomotoren

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
DiplomingenieurIN
Masterstudium Maschinenbau / 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 Verbrennungsmotoren und Thermodynamik

Zweitbetreuerin
Dipl.-Ing. Silke Lipp BSc
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, August 2017



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

Vorwort

Das Thema „saubere Mobilität“ gewinnt zunehmend an Wichtigkeit. Damit einhergehend nimmt die Bedeutung der Emissionsmesstechnik stark zu. Das Messen und Reduzieren von Emissionen (inner- und außermotorisch) vereint dabei die beiden Themenschwerpunkte „Fahrzeugtechnik“ und „Motorentechnik“ miteinander, weshalb das Thema dieser Arbeit für mich von großem Interesse war.

Der praktische Zugang und das Arbeiten am Fahrzeug selbst machte die Arbeit besonders interessant und lehrreich.

Ich möchte der Belegschaft des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik für die Unterstützung und die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit danken. Insbesondere danken möchte ich Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger, über den ich durch seine äußerst kompetente und freundliche Art zu dieser Masterarbeit gekommen bin und der mich während der gesamten Zeit exzellent betreut hat.

Auch meiner Betreuerin Frau Dipl.-Ing. Silke Lipp BSc. möchte ich herzlich für ihre Arbeit danken, da sie für mich immer ansprechbar war und mich bei meiner Arbeit perfekt unterstützt hat.

Zwei weiteren Einrichtungen gilt ebenfalls mein Dank, da sie mich mit Material, Wissen und Verpflegung versorgt haben. Zum einen der Maschinenbau Zeichensaal, in dem ein Großteil dieser Arbeit entstand, und der mir bis in die Nachtstunden ein Quartier zum Arbeiten gegeben hat, sowie seinen Mitgliedern, die mir immer mit Rat und Kritik beistanden.

Zum anderen möchte ich dem TU Graz Racing Team danken, dass ich durch die dort durchgeführten Tätigkeiten während meines Studiums mit Themen in Kontakt treten konnte, die ich so in der Form nicht kennen gelernt hätte. Die gesammelte Erfahrung konnte ich auch für diese Arbeit gut einsetzen.

Schlussendlich bedanke ich mich aufs Allerherzlichste bei meiner Familie, die mich geduldig unterstützt und mir das Studium überhaupt erst möglich gemacht hat.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VII
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	X
ZUSAMMENFASSUNG	XI
ABSTRACT	XII
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 SCHADSTOFFBILDUNG	2
2.1.1 Stickstoff (N_2)	3
2.1.2 Wasser (H_2O)	3
2.1.3 Kohlenstoffdioxid (CO_2)	3
2.1.4 Kohlenstoffmonoxid (CO)	3
2.1.5 Kohlenwasserstoffe (HC)	3
2.1.6 Stickoxide (NO_x)	3
2.1.7 Partikel	4
2.2 GESETZGEBUNG	5
2.2.1 Grenzwerte der Euro Norm	5
2.2.2 Messzyklen	6
2.2.3 Real Driving Emission (RDE) Tests	7
2.3 MESSGERÄTE	9
2.3.1 Messprinzipien	9
2.3.2 Constant Volume Sampling (CVS) Anlage	11
2.3.3 Portable Emission Measurement System (PEMS)	12
2.3.4 Fourier Transform Infrarotspektrometer (FTIR)	13
3 SIMULATION VON EMISSIONEN MIT PHEM	14
3.1 PHEM (PASSENGER CAR AND HEAVY DUTY EMISSION MODEL)	14
3.1.1 Längsdynamik Grundlage	14
3.1.2 Input Daten für PHEM	16
3.2 KENNFELDERSTELLUNG AUS MESSDATEN	17
3.2.1 Leistungsinterpolation aus generischem Kennfeld	17
3.2.2 Zyklussimulation	18
3.2.3 Kalibrierung des generischen Kennfelds	18
3.2.4 Zyklusauswahl Kennfelderstellung	20
3.3 SIMULATIONSERGEBNISSE	23
4 DURCHSCHNITTSFAHRZEUG	23
4.1 ERSTELLUNG DURCHSCHNITTSFAHRZEUG	24
4.1.1 Mittelung der Fahrzeugwerte	24
4.1.2 Durchschnittskennfeld	24
4.1.3 Getriebe des Durchschnittsfahrzeugs	26
4.2 VERGLEICH MIT ANDEREN DURCHSCHNITTSFAHRZEUGEN	29
4.2.1 EU- Durchschnitt	30
4.2.2 PHEM Euro 6	31
4.2.3 HBEFA Zyklen	34
4.2.4 Vergleich mit dem generischem CO_2 Kennfeld	35
5 EMISSIONSMESSUNG HYBRIDFAHRZEUG	37
5.1 FAHRZEUGBESCHREIBUNG	37
5.2 AUSROLLVERSUCH	38
5.3 PRÜFSTANDSMESSUNGEN	40
5.3.1 Prüfstandsaufbau	40
5.3.2 Einstellen des Prüfstands- „Loss-run“	42
5.3.3 Abgasmessung in der CVS Anlage	44
5.3.4 Abgasmessung mit dem FTIR	44
5.3.5 Messprogramm	44

5.4	REAL DRIVING EMISSIONS	46
5.4.1	<i>PEMS Aufbau</i>	46
5.4.2	<i>Messprogramm</i>	46
5.5	AUSWERTUNG DER MESSERGEBNISSE	47
5.5.1	<i>Auswertung mit dem ERMES (European Research on Mobile Emission Sources) Tool</i>	47
5.5.2	<i>Vergleich der Emissionsmessung von CVS und PEMS auf dem Rollenprüfstand</i>	48
5.5.3	<i>Auswertung von RDE Fahrten</i>	50
5.5.4	<i>Auswertung FTIR</i>	53
5.6	PARTIKELMESSUNGEN	56
5.6.1	<i>Prüfstands Aufbau Partikelmessungen</i>	56
5.6.2	<i>Verluste im Leitungssystem</i>	57
5.6.3	<i>Partikelgrößenverteilung bei Stationärmessungen</i>	59
5.6.4	<i>Kleinstpartikelemissionen im RWC Zyklus</i>	63
5.6.5	<i>Kaltstarteinfluss Partikel</i>	65
	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	67
	LITERATUR	68
	FORMELVERZEICHNIS	71
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	72
	TABELLENVERZEICHNIS	74
	ANHANG	75

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A	m^2	Querschnittsfläche
a	m/s^2	Beschleunigung
$A/B/C_{up/down}$	-	Schaltparameter PHEM
AP_{10}	-	Averaged Power, Normalisierte gemittelte Motorleistung +-5 s
$B_{1/2/3}$	-	Beiwerte der Rollenbremspolynom
CO	$g/h, g/km, ppm$	Kohlenstoffmonooxid
CO_2	$g/h, g/km, Vol \%$	Kohlenstoffdioxid
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
C_xH_y		Kohlenwasserstoff
d_{dyn}	m	Dynamischer Reifendurchmesser
DF	-	Dillution Factor
dN	$\#/cm^3$	Partikelkonzentration
D_p	nm	Mittlerer elektrodynamischer Partikeldurchmesser
$Fr_{0/1/4}$	-	Widerstandsbeiwerte Rollwiderstandspolynom
H_2		Wasserstoff
H_2O		Wasser
HC	$g/h, g/km, ppm$	Kohlenwasserstoff
i	-	Übersetzung
$L_{1/2/3}$	-	Widerstandsbeiwerte Eigenverluste Rollenprüfstand
m	kg	Masse
$m_{rotatorisch}$	kg	Äquivalente Masse rotierender Teile
n	$1/min, 1/s, rpm$	Motordrehzahl
n	mol	Stoffmenge
N_2		Stickstoff
n_{idle}	$1/min, 1/s, rpm$	Leerlaufdrehzahl
n_{norm}	-	Normierte Drehzahl
$nn_{up/down}$	-	Normierte Schaltdrehzahl rauf/runter
NO	$g/h, g/km, ppm$	Stickstoffmonooxid
NO_2	$g/h, g/km, ppm$	Stickstoffdioxid
NO_x	$g/h, g/km, ppm$	Gesamte Stickoxide
n_{rated}	$1/min, 1/s, rpm$	Nenn Drehzahl
NTE	$g/h, g/km$	Not To Exceed, Grenzwert
O_2		Sauerstoff
P	$(k)W$	Leistung
P_e	$(k)W$	Effektive Motorleistung
P_{rated}	$(k)W$	Nennleistung
p_{me}	bar	Effektiver Mitteldruck
PN	$\#$	Particle Number, Partikelanzahl
PNC	$\#/cm^3$	Particle Number Concentration, Partikelkonzentration
$R_{1/2/3}$	-	Widerstandsbeiwerte des Ausrollversuchs
TF	-	Transfer Function
v	$m/s, km/h$	Geschwindigkeit
V_h	l, m^3	Hubvolumen

v_{norm} - Normierte Geschwindigkeit

Konstanten

$g = 9.8067$ m/s² Normfallbeschleunigung
 $\pi = 3.14\dots$ - Kreiszahl

Griechische Formelzeichen

α ° Fahrbahnneigung
 Δ % Differenz
 λ - Luftverhältnis
 ω 1/min, 1/s, rpm Winkelgeschwindigkeit
 ρ kg/m³, kg/dm³ Dichte

Weitere Indices und Abkürzungen

ACEA Europäischer Automobilherstellerverband
 AVL Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
 CADC Common Artemis Driving Cycle
 CAN Controller Area Network
 CH₄ Methan
 CLD Chemoluminiszenzdetektor
 CPC Kondensationspartikelzähler
 CVS Constant Volume Sampling
 d.h. Das heißt
 DSG Doppelkupplungsgetriebe
 ECE Wirtschaftskommission für Europa
 EFM Exhaust Flow Meter
 EG Europäische Gemeinschaft
 ERMES European Research on Mobile Emission Sources
 EU Europäische Union
 EUDC Extra Urban Driving Cycle
 EV Electric Vehicle
 FID Flammenionisationsdetektor
 FTIR Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
 GPS Global Positioning System
 GWP Global Warming Potential
 HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
 Hz Hertz
 i.A. Im Allgemeinen
 Kfz Kraftfahrzeug
 min Minute
 MT Manual Transmission, Schaltgetriebe
 N₂O Distickstoffmonoxid, Lachgas
 NDIR Nichtdispersiver Infrarot Analysator
 NDUV Nichtdispersiver Ultraviolett Analysator
 NEDC New European Driving Cycle
 NH₃ Harnstoff
 PAH Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
 PEMS Portable Emission Measurement System

PHEM	Passenger car and Heavy-Duty Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
RDE	Real Driving Emissions
RPA	Relative Positive Acceleration
rpm	Revolutions per minute
RWC	Real World Cycle
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SOC	State of Charge
THC	Total Hydrocarbons
u.a.	unter anderem
UDC	Urban Driving Cycle
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
usw.	und so weiter
VPR	Volatile Particle Remover
WLTC	World Harmonized Light-Duty Vehicle Test Cycle
WLTP	World Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure
z.B.	zum Beispiel

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Maximilian Wurm

Graz, Datum

Zusammenfassung

Der Druck auf die Automobilindustrie steigt, da die Anforderung nach sauberer Mobilität derzeit größer ist als je zuvor. Wegen der starken Kritik am Dieselmotor und neuen Möglichkeiten der Hybridisierung gewinnt der Benzinmotor immer mehr an Bedeutung. Die neuen Lösungsansätze für eine saubere Mobilität bringen aber auch Problematiken mit sich. Die Betriebsstrategien werden immer komplexer, Emissionsgrenzwerte kontinuierlich gesenkt und die Prüfverfahren weiterhin verschärft. Daher ist eine genaue Untersuchung der Emissionsentstehung für die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte und die Sicherstellung einer möglichst sauberen Mobilität essentiell.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit wird versucht ein Grundverständnis über kritische Emissionskomponenten, deren Entstehung und der messtechnischen Erfassung dieser zu geben. Um den gesetzlichen Rahmen und die daraus entstehenden Randbedingungen für die durchgeführten Emissionsmessungen zu verstehen, wird die EU Abgasgesetzgebung erläutert.

Zur Abschätzung der Emissionen der Fahrzeuge in beliebigen Fahrsituationen werden aus Messdaten in definierten Testzyklen Modelle erstellt, mit denen dann Verbrauch und Emissionen auch in nicht gemessenen Zyklen simuliert werden können. Die Modelle werden im Fahrzeuglängsdynamik- und Emissionsmodell PHEM des IVT je Fahrzeug erzeugt. Danach werden aus den einzelnen Kfz-Modellen für jede Fahrzeugschicht und jede Emissionsklasse Durchschnittsfahrzeuge erstellt. In dieser Arbeit wurde basierend auf Messdaten von Rollenprüfstands-Messungen ein Datensatz für ein Euro 6 Benzin Durchschnittsfahrzeug erzeugt. Zum Vergleich wird das entstandene Durchschnittsfahrzeugmodell mit statistischen Durchschnittswerten der EU verglichen. Ebenso wurden mit dem Euro 6 Benzin Durchschnittsfahrzeug Verbrauch und Emissionen für die Verkehrssituationen des HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) simuliert und mit den bestehenden Ergebnissen des HBEFA 3.3 verglichen, die aber nur aus einem Versuchsfahrzeug bestanden. Aufgrund der geringen Anzahl gemessener Euro 6 Benzin PKW sind die aktuellen Ergebnisse statistisch nicht repräsentativ für die EU PKW Flotte, zeigen aber, dass ein Update des HBEFA 3.3 mit weiteren Messdaten notwendig ist.

Weiteres wurden an einem Hybridfahrzeug mit Benzinmotor Messungen nach dem Standard der ab September 2017 gültigen Euro 6d Abgasnorm durchgeführt. Dazu zählen neben Rollenprüfstands-Messungen auch RDE (Real Driving Emissions) Messungen auf der Straße. Die Ergebnisse der verschiedenen Messgeräte und verschiedenen Messzyklen wurden verglichen und festgestellt, dass die Messung mit portablen Messgeräten eine gute Vergleichbarkeit zu stationären Messsystemen hat. Bei dynamischeren Zyklen und vor allem bei RDE Fahrten entstehen aber deutlich mehr Emissionen als im Typprüfzyklus WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) insbesondere Partikelemissionen.

Die Entstehung von Partikelemissionen wurde durch die Verwendung von mehreren Partikelzählern mit unterschiedlichem Messbereich genauer untersucht. Dadurch ließ sich feststellen, dass Kleinstpartikel unter 23 nm erst in sehr hohem Lastbereich eine signifikant hohe Konzentration aufweisen und einen zweiten Peak in der Partikelverteilung bilden. Kaltstarttests hatten zwar eine erhöhte Partikelanzahl zur Folge, allerdings nicht im Kleinstpartikelbereich. Weitere Analysen zur Partikelentstehung sollten die Messung der Partikelverteilung bis in den Kleinstbereich beinhalten und dynamisch messen, da konstante Lastpunkte keine zusätzliche Kleinstpartikelentstehung aufweisen. Zusätzlich ist eine separate Analyse von Hybridfahrzeugen und Benzinfahrzeugen ratsam, da die Regelstrategie des Hybridfahrzeuges durchaus einen Einfluss auf die Entstehung von Partikel hat.

Abstract

The pressure on the automotive sector for a clean mobility constantly rises. Because of the strong criticism of the Diesel engine and new possibilities of hybridization, the gasoline engine gains in importance. But the new solutions to clean mobility also bring problems with them. The operating strategies become more and more complex, emission limits are constantly lowered and emission test become stricter. Therefore an exact research of the origin of emissions is essential to meet those emission limits and secure a clean mobility.

In the theoretical part of this thesis, a fundamental understanding of critical emission components, their origination and measurement is described. To understand the legal boundaries for the performed emission tests, the EU emission legislation is explained.

To estimate the emissions of a vehicle in any driving situation, models are created from measurement data of defined test cycles. With those models you can simulate emissions even in not measured cycles. They are created in the IVT own vehicle longitudinal and emission model PHEM. From all the vehicle models average vehicles are created for each vehicle layer and emission class. In this thesis a dataset for an average Euro 6 gasoline vehicle was created based on dyno testbed measurements. For comparison the developed average vehicle was checked against statistical data from the EU. Additionally, emissions and fuel consumption of the average Euro 6 gasoline passenger car were simulated for HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) defined driving situations and compared to existing results of HBEFA 3.3, which were only represented by one vehicle. Because of the low number of measured Euro 6 gasoline passenger cars, the results are not yet statistically significant for the EU passenger car fleet, but show the need for an update of HBEFA 3.3 with further measurement data.

Measurements on a hybrid vehicle with gasoline engine have been performed according to the new Euro 6d emission standard coming in September 2017. Next to measurements on the dyno testbed this standard includes RDE (Real Driving Emissions) measurements on the road. The results of the different measurement devices and different test cycles were compared with the result that portable emission test systems have a good correlation to stationary measurement systems. Dynamic cycles and in particular RDE drives produce way more emissions than the type test cycle WLTC (World Harmonized Light-Duty Test Cycle), especially particle emissions.

The origination of particle emissions was investigated through the use of particle number measurement devices with different effective range. This lead to the observation that very small particles under 23 nm diameter only show a significantly high concentration and form a second peak in the particle distribution in areas of very high engine power. Cold starts did indeed show an increased emission of particles, but not particles of a diameter below 23 nm. Further analyses of the origination of small particles should include the measurement of the particle distribution down to areas of very small particles as well as dynamic distribution measurement, because static load points didn't show an additional emission of very small particles. It is also advised to look at hybrid and gasoline vehicles separately, because the hybrid strategy in fact has an effect on the origination of particles.

1 Einleitung

Es gibt momentan wohl kein brisanteres Thema in der Automobilindustrie als die Emissionsthematik. Obwohl die Emissionsforschung kein neues Thema ist und bereits 1968 mit dem „Clean Air Act“ in den USA der Grundstein der Abgasgesetzgebung gelegt wurde [1], steigt jetzt durch Skandale, wie den Diesel Abgasskandal oder Fahrverbote in Innenstädten, das öffentliche Interesse und der Druck auf die Fahrzeughersteller. Die Automobilhersteller müssen auf die verschärften Emissionsgrenzwerte reagieren. Beim Dieselfahrzeug führt das schon jetzt bei einigen Herstellern zum Einstellen der Entwicklung. Doch komplett auf den Verbrennungsmotor verzichten kann man nicht. Mobilität ist eines der wichtigsten Güter der Menschheit. Der Benzinmotor gewinnt an Bedeutung, da er in Zukunft weiterhin einen großen Bereich der Fahrzeugantriebe abdecken wird und auch für die Hybridisierung spielt er eine wichtige Rolle. Doch auch wenn das Augenmerk gerade auf dem vermeintlich „dreckigen“ Diesel liegt, bedeutet das keineswegs, dass ein Benzinmotor sauberer ist. Die Grenzwerte für den Ottomotor werden ebenfalls immer strenger und für die Entwickler schwerer einzuhalten. Komplexere Betriebsstrategien, wie Direkteinspritzung, Schichtbetrieb oder Downsizing, führen zu neuen Emissionsproblemen. Diese Arbeit analysiert daher anhand von Emissionsmessungen die Entstehung von Emissionen von Euro 6 Benzinfahrzeugen. Die ermittelten Daten dienen für die Simulation zur Erstellung von Durchschnittsfahrzeugen, die repräsentativ für den gesamten Verkehr stehen und somit Emissionen in gewissen Bereichen zuverlässig abgeschätzt werden können.

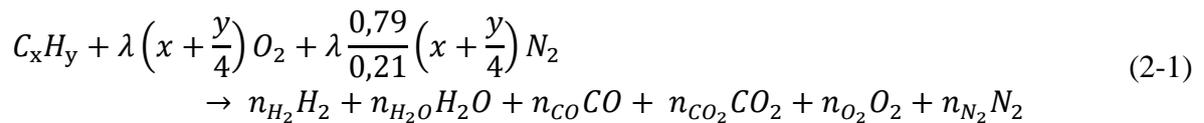
Da der Benzinmotor aufgrund der Verwendung eines Drei-Wege-Katalysators weniger Probleme mit Stickoxidemissionen hat als der Dieselmotor, ist der wohl kritischste Emissionswert für den direkteingespritzten Benziner die Partikelanzahlemission. Vor allem Kleinstpartikel, die für den Menschen und auch für die Umwelt weit schädlicher sind als größere Partikel, werden untersucht. An einem Versuchsfahrzeug wurden neben den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten auch nicht limitierte Emissionen mittels FTIR sowie Partikelanzahl unter der gesetzlichen Cut-Off Grenze von 23 nm aufgezeichnet und insbesondere die Partikelentstehung anhand verschiedener Messgeräte analysiert.

Der Vergleich von Simulation und Messung der Emissionsdaten gibt weiteren Aufschluss über deren Entstehung und validiert gleichzeitig die verwendeten Modelle.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Schadstoffbildung

Das Rohabgas eines Ottomotors besteht aus vielen Komponenten, die sich am besten durch die chemische Reaktionsgleichung der Oxidation von Kohlenwasserstoffen beschreiben lassen. Benzin ist ein Gemisch von mehr als 100 verschiedenen Kohlenwasserstoffen, ebenso komplex ist das Reaktionsverhalten. Das Prinzip der unvollständigen Verbrennung ist in Gleichung (2-1) dargestellt.[2]



Mit: C_xH_y ...Kohlenwasserstoff

λ ...Luftverhältnis

x, y ...Koeffizienten

O_2 ...Sauerstoff

N_2 ...Stickstoff

H_2 ...Wasserstoff

H_2O ...Wasser

CO ...Kohlenmonooxid

CO_2 ...Kohlendioxid

n ...Stoffmenge [mol]

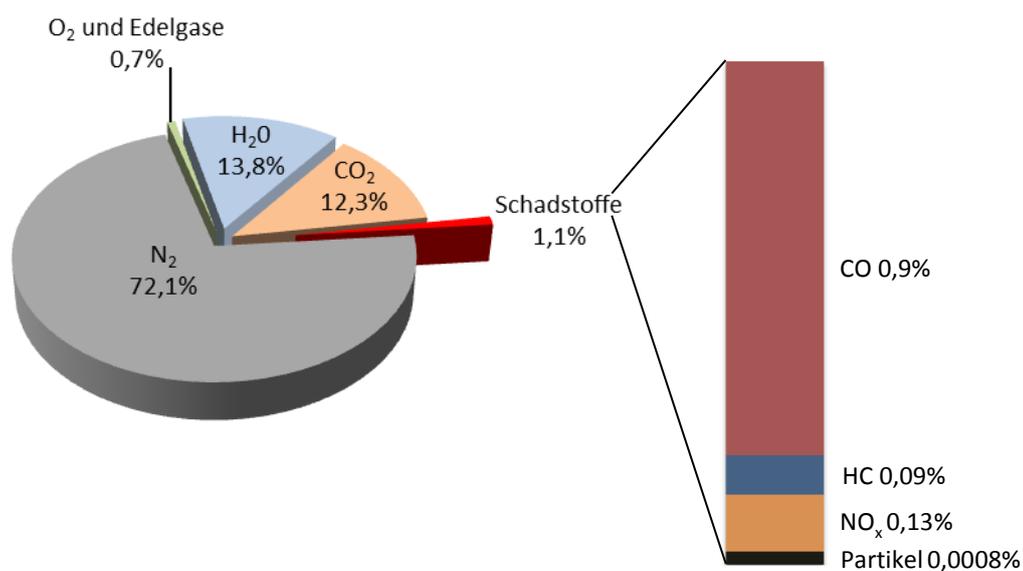
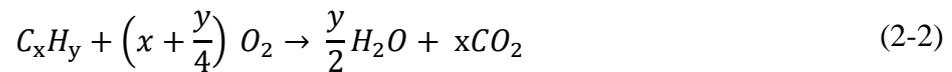


Abbildung 2-1: Abgaszusammensetzung eines Ottomotors [3]

Bei stöchiometrischer ($\lambda=1$) vollständiger Verbrennung vereinfacht sich die Reaktionsgleichung auf die folgend dargestellte Form. Sie wird vor allem für die CO_2 - Bilanz eines Kraftstoffes verwendet.



Im Folgenden werden die wichtigsten Produkte einer Verbrennung von Kohlenwasserstoffen beschrieben.

2.1.1 Stickstoff (N_2)

Stickstoff ist der Hauptbestandteil der Luft und somit auch Hauptbestandteil des Abgases. In reiner Form ungefährlich wird es nur bei der Bildung von Stickstoffoxiden zum Problem.

2.1.2 Wasser (H_2O)

Wasserdampf entsteht bei der Verbrennung aus dem im Brennstoff gebundenen Wasserstoff und dem Sauerstoff der Luft.

2.1.3 Kohlenstoffdioxid (CO_2)

CO_2 ist ein farb- und geruchsloses Gas, welches ein gewünschtes Produkt der Oxidation des chemisch gebundenen Kohlenstoffes ist. Dennoch hat es als Treibhausgas einen immensen Einfluss auf die Umwelt.[4]

2.1.4 Kohlenstoffmonoxid (CO)

CO ist ein Atemgift, das die Bindungsplätze für Sauerstoff im Bluthämoglobin besetzt und somit zu Sauerstoffmangel führt. Es entsteht bei Luftmangel, wenn der Kohlenstoff nicht vollständig oxidiert werden kann. CO -Emissionen sind durch die Oxidation im Dreiwegekatalysator sehr gut kontrollierbar.[5]

2.1.5 Kohlenwasserstoffe (HC)

Bei der unvollständigen Verbrennung entstehen eine Vielzahl von verschiedenen HC Verbindungen, die auf sehr unterschiedliche Weise schädlich wirken können. Einerseits sind die Kohlenwasserstoffe sogenannte „Ozonvorläufersubstanzen“, d.h. sie unterstützen die Bildung von bodennahem Ozon, andererseits können sie sowohl gesundheitsgefährdend wirken (z.B. Benzol – krebserregend) oder als Treibhausgas fungieren (z.B. Methan).[5]

2.1.6 Stickoxide (NO_x)

Bei hohen Temperaturen und lokalem Luftüberschuss entstehen im Brennraum Stickoxide aus dem Stickstoff der Luft. Bei der Verbrennung entsteht hauptsächlich Stickstoffmonoxid (NO), das erst nach längerer Verweildauer in der Atmosphäre fast vollständig zu Stickstoffdioxid (NO_2) umgewandelt wird.[6]

NO_2 ist als Atemgift und Ozonvorläufer schädlicher als NO , wird aber für die Abgasnachbehandlung (Passive Regeneration des Partikelfilters) benötigt, was zu einem

Konflikt führen kann.[5]

2.1.7 Partikel

Partikelemissionen sind durch die Direkteinspritzung längst nicht mehr nur ein Thema für den Dieselmotor. Sie bestehen i.A. aus einem festen Kohlenstoffkern und daran angelagerten flüssigen und festen Stoffen. Prinzipiell lassen sie sich in 3 Gruppen nach ihrer Entstehung einteilen:

- Nukleationspartikel: Entstehung des Partikels ohne Kohlenstoff als Kondensationskern durch Kondensation von gasförmigen Komponenten. (aerodynamischer Durchmesser ca. $< 30 \text{ nm}$)
- Akkumulationspartikel: Durch Zusammenschlüsse mehrerer Primärpartikel (mit Kohlenstoffkern) und Anlagerung von Kondensaten entstehen Partikel im Durchmesserbereich von $0,02$ bis $1 \text{ }\mu\text{m}$
- Grobpartikel: Entstehung hauptsächlich durch mechanische Prozesse (Abrieb Reifen, Bremsen etc.) und bilden mit Durchmessern von $> 1 \text{ }\mu\text{m}$ die größte Gruppe der Partikelemissionen

Die ökologischen Einflüsse von Partikeln können sehr unterschiedlich sein. Einerseits haben besonders kleine Partikel gesundheitliche Folgen, da sie wie auf Abbildung 2-2 zu sehen tief lungengängig sind und sich in den Alveolen ablagern können, was unter anderem zu Entzündungen führen kann und das Lungenkrebsrisiko erhöht. Auch an den Partikeln angelagerte Schadstoffe wie Schwermetalle, PAH (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) oder Dioxine erhöhen das Risiko der Gesundheitsgefährdung.[5], [7]

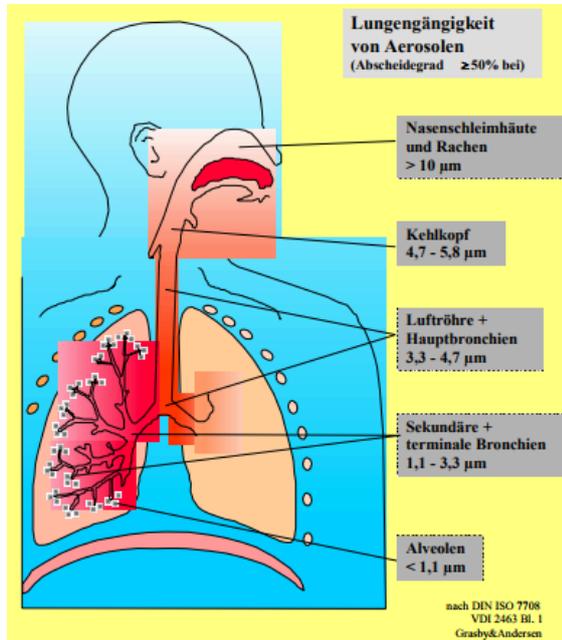


Abbildung 2-2: Abscheidecharakteristik von Partikeln in der menschlichen Lunge [8]

Andererseits absorbieren langlebige Partikel in der Atmosphäre die eintreffende Sonnenstrahlung und tragen so erheblich zum Treibhauseffekt und der globalen Erwärmung bei.[9]

2.2 Gesetzgebung

Früher standen in der Automobilbranche Werte, wie Leistung und Haltbarkeit im Vordergrund, heute sind Verbrauch und Emissionen dominierende Themen. Was 1971 in der EU mit einem 20-seitigen Dokument zur Regelung der CO und HC Emissionen begann, ist mittlerweile zu einem eigenen Fachgebiet der Fahrzeugtechnik geworden. [10]

Gerade jetzt steht mit der Einführung der Euro 6d Norm ab September dieses Jahres, unter großem öffentlichem Interesse aufgrund verschiedenster Skandale, einer der größten Schritte der europäischen Emissionsgesetzgebung bevor.

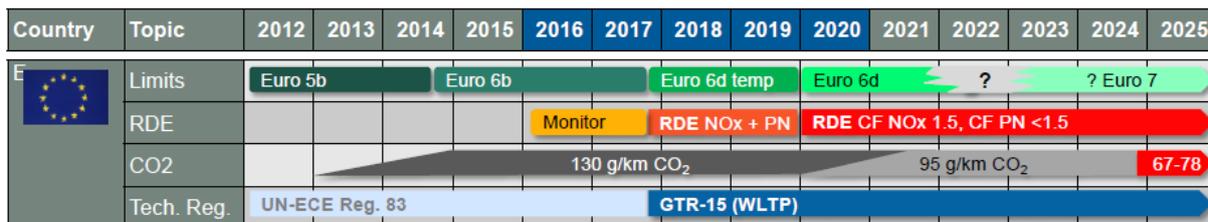


Abbildung 2-3: Zeitplan der Euro Abgasgesetzgebung [10]

2.2.1 Grenzwerte der Euro Norm

Während früher CO und HC Emissionen als Hauptproblem betrachtet wurden, sind diese durch geeignete Betriebsstrategien ($\lambda=1$) und Katalysatoren weitestgehend unter Kontrolle gebracht. Dafür wurden bereits ab Euro 1 NO_x Grenzwerte eingeführt, die heute beim Dieselmotor zu den kritischsten Emissionen zählen. Ein zusätzlicher Schritt war die Einführung der On-Board-Diagnose bei Euro 3, die alle abgasbeeinflussenden Funktionen überwacht und Fehler detektiert.

EURO 1-4 passenger cars Class M (≤ 2.500 kg GVW, ≤ 6 seats)

Directive	Euro 1 (EC 93)		Euro 2 (EC 96)		Euro 3 (EC 2000)		Euro 4 (EC 2005)	
	91/441/EEC or 93/59/EEC		94/12/EC or 96/69/EC		70/220/EC, as amended by 98/69/EC and 2003/76/EC		TA 1/2005, FR 1/2006	
Application date	TA 7/1992, FR 1/1993		TA 1/1996, FR 1/1997		TA 1/2000, FR 1/2001		TA 1/2005, FR 1/2006	
Test type	Urban (40 sec idle) + EUDC				Revised Urban + EUDC			
Combustion type	Positive ignition (PI)	Compression ignition (CI)	Positive ignition (PI)	Compression ignition (CI) ²⁾	Positive ignition (PI)	Compression ignition (CI)	Positive ignition (PI)	Compression ignition (CI) ⁴⁾
HC	g/km	-	-	-	0.2	-	0.1	-
NOx	g/km	-	-	-	0.15	0.5	0.08	0.25
HC+NOx	g/km	0.97 (1.13) ¹⁾	0.97 (1.13) ¹⁾	0.5	0.7	-	0.56	-
CO	g/km	2.72 (3.16) ¹⁾	2.72 (3.16) ¹⁾	2.2	1.0	2.3	0.64	1.0
PM	mg/km	-	140 (180) ¹⁾	-	80	-	50	-
Deterioration factors	CO, HC, NOx: 1.4	CO: 1.1 HC+NOx, NOx: 1.0 PM: 1.2	CO, HC, NOx: 1.5	CO: 1.1 HC+NOx, NOx: 1.0 PM: 1.3	CO, HC, NOx: 1.2	CO: 1.1 HC+NOx, NOx: 1.0 PM: 1.2	CO, HC, NOx: 1.2	CO: 1.1 HC+NOx, NOx: 1.0 PM: 1.2
Durability	km	80,000	80,000	80,000	80,000	80,000 or 5 years	80,000 or 5 years ³⁾	100,000 or 5 years ³⁾
EOBD		-	-	-	-	EOBD	EOBD	EOBD

Tabelle 2-1: Entwicklung der Abgasgesetzgebung Euro 1-4 für PKW [11]

Partikelemissionen waren beim Dieselmotor bereits früh ein Thema, für den Ottomotor kamen erst mit der Einführung der Direkteinspritzung und der Euro 5 Auflagen für die Partikelmasse hinzu. Die Abgasnorm Euro 6 beinhaltet auch eine Emissionsobergrenze für die Partikelanzahl, da man zu der Einsicht kam, dass vor allem kleine Partikel, die in der Partikelmasse zwar wenig Unterschied machen, aber aufgrund ihrer tieferen Lungengängigkeit gesundheitsschädlicher sind als größere Partikel, reduziert werden müssen. Durch die Verschärfung dieses Grenzwertes bei der ab September 2017 gültigen Euro 6d Norm auf $6 \cdot 10^{11}$ Partikel pro Kilometer wird die Ottomotorenentwicklung vor eine neue Herausforderung gestellt, welche vielleicht den Einsatz von Partikelfiltern, wie es beim

Dieselmotor bereits gängig ist, notwendig macht.

Emissions	Unit	PC M ¹ , LCV N1 CL 1			LCV N1 CL 2			LCV N1 CL 3, N2		
		Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d
EURO 5-6 Positive ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)										
THC	mg/km	100	100	100	130	130	130	160	160	160
NMHC		68	68	68	90	90	90	108	108	108
NOx		60	60	60	75	75	75	82	82	82
CO		1000	1000	1000	1810	1810	1810	2270	2270	2270
PM ^{2.5}		5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5
PN ²	Nb/km	–	–	6x10 ^{11.4}	–	–	6x10 ^{11.4}	–	–	6x10 ^{11.4}

Tabelle 2-2: Abgasgesetzgebung Euro 5 und 6 für PKW mit Ottomotor[11]

Im Gegensatz zu den oben erwähnten Schadstoffen wird bei der Euro Abgasnorm kein Verbrauchs- oder Kohlendioxid Grenzwert vorgeschrieben. Die Verbrauchsreduzierung hat meist marktwirtschaftliche Gründe, aber der europäische Automobilherstellerverband (ACEA) hat eine Verpflichtung mit der EU-Kommission vereinbart, um aus Klimaschutzgründen den CO₂ Ausstoß zu senken [1]. Die Verordnung (EG) Nr. 443/2009 verpflichtet zu einer Flottenemission von 130 g/km bis 2017 und einer weiteren Reduzierung auf 95 g/km bis 2020. Da diese Werte auf Basis des NEDC (New European Driving Cycle) Testzyklus vereinbart wurden, welcher ab September durch einen anderen Typprüfzyklus ersetzt wird, müssen die Emissionswerte durch geeignete Modelle wie das CO₂mpas umgerechnet werden. [12], [13]

2.2.2 Messzyklen

Mit der Einführung der Euro 6d Norm im September 2017 ändern sich nicht nur die Emissionsgrenzwerte. Die größte Änderung passiert bei der Ermittlung der Einhaltung dieser Grenzwerte, bei der Typprüfprozedur. Um ein innerhalb der EU einheitliches und reproduzierbares Prüfverfahren zu verwenden, wurde der NEDC entwickelt, der sich aus dem ECE-15 (Economic Commission for Europe – 15) oder Urban Drive Cycle (UDC), der viermal wiederholt wird, und dem Extra-Urban Driving Cycle (EUDC) zusammensetzt. Dies soll eine Fahrsituation in der Stadt mit anschließender Überlandfahrt repräsentieren. Da der NEDC aber nur einen sehr geringen Teil des Motorkennfeldes abdeckt, viele Fahranteile mit konstanter Geschwindigkeit und geringen Beschleunigungen enthält und auch der Leerlaufanteil sehr hoch ist, entspricht der NEDC keinesfalls einer realen Fahrsituation.[14]

Aufgrund der steigenden Kritik am NEDC wurde von Experten aus der Automobilbranche unter dem Dach der UNECE (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen) ein neues Testverfahren entwickelt. Dieses Testverfahren sollte dieselben Vorteile der weltweiten Reproduzierbarkeit des NEDC's haben aber auf die realen Fahrbedingungen besser angepasst sein. Das Ergebnis ist ein neuer Fahrzyklus, der sogenannte WLTC (World Harmonized Light-Duty Vehicle Cycle). In Abbildung 2-4 ist dieser für die relevanteste Fahrzeugklasse 3b dargestellt, die ab einer Motorleistung von 34 kW und einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h gilt. Der Zyklus ist länger, hat einen geringeren Standzeitanteil, die Durchschnitts- sowie die Höchstgeschwindigkeit sind höher und die benötigte Antriebsleistung ist größer. Zusätzlich ist der WLTC deutlich dynamischer mit steileren Lastanstiegen und mehr Lastwechseln. [15]

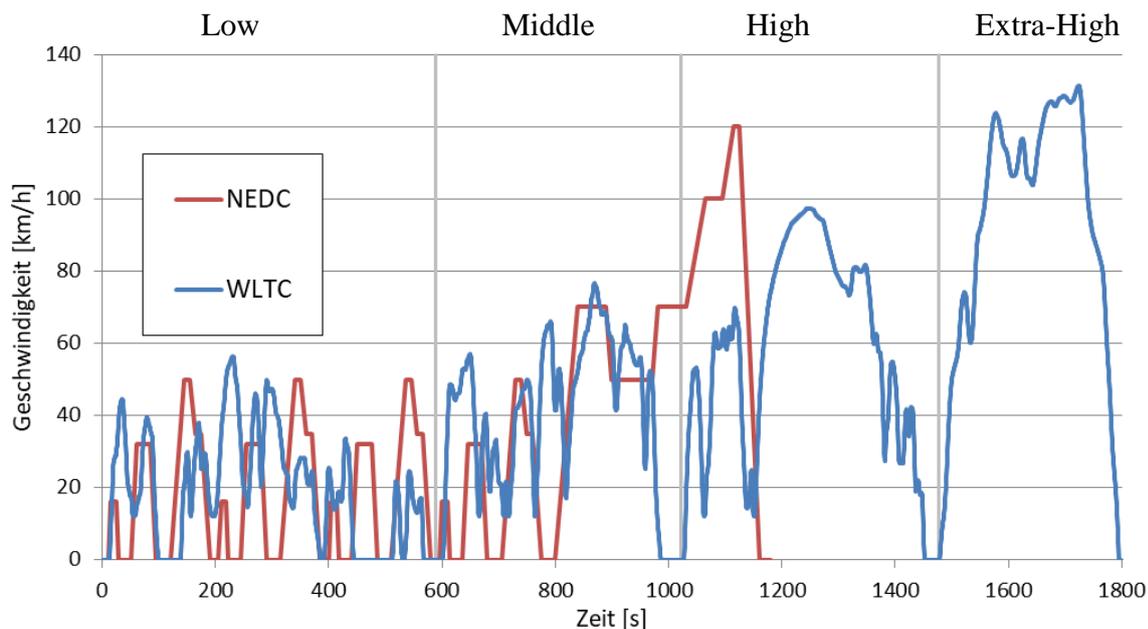


Abbildung 2-4: Vergleich von WLTC und NEDC

2.2.3 Real Driving Emission (RDE) Tests

Zusätzlich zu der Messung der Fahrzeugemissionen am Rollenprüfstand sind bei der World Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP) RDE Tests vorgesehen, die bei realen Fahrbedingungen auf der Straße vorgenommen werden. Das soll zusätzlich zu einer einheitlichen, reproduzierbaren Messung die Sicherheit gewähren, dass ein Fahrzeug auch im wirklichen Betrieb sämtliche Grenzwerte einhält. Die Vorteile sind unter anderem reale Fahrwiderstände, die nicht wie am Rollenprüfstand simuliert werden, der Einfluss des Fahrers sowie Verkehrsaufkommens und daraus entstehendes dynamisches Fahren kann mit in Betracht gezogen werden. Außerdem muss das Fahrzeug vollständig fahrbereit sein und Optimierungen auf den Zyklus oder Änderung der Betriebsstrategie bei gewissen vorgegebenen Zyklen sind dadurch nicht mehr möglich.

Die RDE Messung muss bestimmte Randbedingungen einhalten, um „normale“ Fahrbedingungen zu gewährleisten. Die Tabelle 2-3 zeigt eine Zusammenfassung der einzuhaltenden Parameter, um eine RDE Fahrt gültig durchzuführen. [16]

Trip requirements for a valid RDE test ⁶⁾			
Driving portion	Urban	Rural	Motorway
	Speed ≤ 60 km/h	$60 < \text{Speed} \leq 90$ km/h ¹⁾	$90 \text{ km/h}^{1)} < \text{Speed}$
Minimum distance	16 km	16 km	16 km
Distance share	29 - 44%	23 - 43%	23 - 43%
Total trip duration	90 - 120 minutes		
Average speed including stops	$15 < \text{Avg} < 40$ km/h ³⁾	–	–
Total stop time ⁴⁾ ($v < 1$ km/h)	6 - 30% Urban time	–	–
Individual stop time ⁵⁾	≤ 300 sec	–	–
$v > 100$ km/h ^{1) 2)}	–	–	≥ 5 min
$v > 145$ km/h	–	–	$< 3\%$ Motorway time
Cumulative positive elevation gain	< 1200 m/100 km		
Start/end test elevation difference	≤ 100 m		

Tabelle 2-3: RDE Test Anforderungen[11]

Ebenfalls reglementiert ist die Dynamik der RDE Fahrt, sie muss in einem gewissen Bereich liegen. Die erste Zeile in Tabelle 2-4 gibt die Obergrenze einer gültigen Testfahrt an, 95 Prozent der Werte aus Produkt von Fahrgeschwindigkeit und der positiven Beschleunigung ($>0.1 \text{ m/s}^2$) müssen unterhalb der vorgegebenen Geraden liegen, um exzessives Fahren und somit unnötig verursachte Emissionen zu vermeiden. Auch eine Mindestgrenze für die Dynamik ist erforderlich, welche durch den Parameter RPA (Relative Positive Acceleration) festgelegt wird.

Trip dynamics requirements		
No Excess	$v \leq 74.6$ km/h	$v > 74.6$ km/h
95th percentile (v.a+)	$\max (v.a+) = 0.136 \cdot v + 14.44$	$\max (v.a+) = 0.0742 \cdot v + 18.966$
Sufficiency	$v \leq 94.05$ km/h	$v > 94.05$ km/h
Relative Positive Acceleration	$\min (RPA) = -0.0016 \cdot v + 0.1755$	$\min (RPA) = 0.025$

Tabelle 2-4: Dynamikparameter RDE Test[11]

Diese Parameter werden nach der Testfahrt geprüft, sind diese und auch die allgemeinen Randbedingungen erfüllt ist die Testfahrt gültig und die Emissionen können ausgewertet werden. Die Emissionsgrenzwerte der RDE Fahrt werden über Faktoren der Euro 6d Grenzwerte bestimmt, dies wird bei der Auswertung der RDE Testfahrten in Kapitel 5.5.3 genauer behandelt.

2.3 Messgeräte

Bei einer Emissionsmessung kommt eine Vielzahl von Messgeräten zum Einsatz. Im Folgenden werden die verschiedensten verwendeten Emissionsmessgeräte beschrieben und deren Funktionsprinzip erklärt.

2.3.1 Messprinzipien

Jeder Schadstoff lässt sich auf eine andere Art und Weise am besten detektieren, indem spezielle Eigenschaften des zu messenden Schadstoffs ausgenutzt werden. Die gesetzlich reglementierten Schadstoffe werden durch folgende Messprinzipien ermittelt:

CO/CO₂:

Um die Kohlenstoffoxid-Emissionen zu ermitteln, wird sich die Wirkung deren elektrischen Dipolmoments mit Hilfe der nichtdispersiven Infrarottechnologie (NDIR) zu Nutze gemacht. Moleküle mit einem elektrischen Dipol absorbieren nur Licht in ganz bestimmten Frequenzbereichen, dieser Bereich ist dann klar einem Molekül zuzuordnen. Es gibt auch Überschneidungen, z.B. bei H₂O und CO₂, diese Querempfindlichkeit muss dann bei der Auswertung berücksichtigt werden.[5]

Als Lichtquelle wird ein Breitbandstrahler, der das gesamte Wellenlängenspektrum der zu analysierenden Komponenten abdeckt, verwendet. Für Kohlenstoffoxid Emissionen wird daher das Messgas in einer Messkammer mit infrarotem Licht bestrahlt. Am Ende der Messkammer befindet sich ein pyroelektrischer Detektor, der die Intensität der einfallenden infraroten Strahlung misst. Da es sich um eine nichtdispersive Messung handelt, also über ein breites Wellenlängenspektrum Strahlung emittiert wird, muss das Licht vor dem Detektor noch durch einen Schmalbandpassfilter auf die richtige Frequenz gefiltert werden. Dadurch wird nur die Intensität in dem Wellenlängenbereich gemessen, in dem das gesuchte Gas Strahlung absorbiert. Die Intensitätsminderung in diesem Wellenlängenbereich ist dann ein Maß für die Konzentration des Gases in der Messkammer.[17]

HC:

HC-Emissionen lassen sich theoretisch auch durch Infrarottechnologie messen. Allerdings bestehen HC Emissionen aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen, die alle andere Dipoleigenschaften besitzen. Deshalb wird zur Detektion von der Gesamten HC Emissionen (THC) ein Flammenionisationsdetektor (FID) verwendet. Die Funktionsweise eines FID ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

Der kohlenwasserstoffhaltige Analyt wird in eine Wasserstoffflamme geleitet. Dort reagieren freie Wasserstoffatome mit dem gebundenen Wasserstoff der Kohlenwasserstoffe. Zurück bleiben reaktionsfreudige Radikale mit einem freien Bindungselektron. Reagieren diese Radikale weiter, bilden sie jeweils ein Ionen-/Elektronenpaar, das an der Elektrode über der Flamme für einen Stromfluss sorgt. Der verstärkte Strom ist nun proportional zur Anzahl der Kohlenstoffatome. Bei kurzen unverzweigten Ketten ist dies exakt der Fall, bei längeren, zyklischen Kohlenwasserstoffen und Verbindungen mit Doppel- oder Dreifachbindungen nur mehr näherungsweise. Daher müsste die genaue Zusammensetzung des Abgases bekannt sein, um die Näherungsfaktoren für diese Gase richtig zu implementieren. Als Kalibriergas wird Propan verwendet, da es den mittleren Kohlenstoffgehalt der Kohlenwasserstoffe im Abgas sehr gut abbildet.[18]

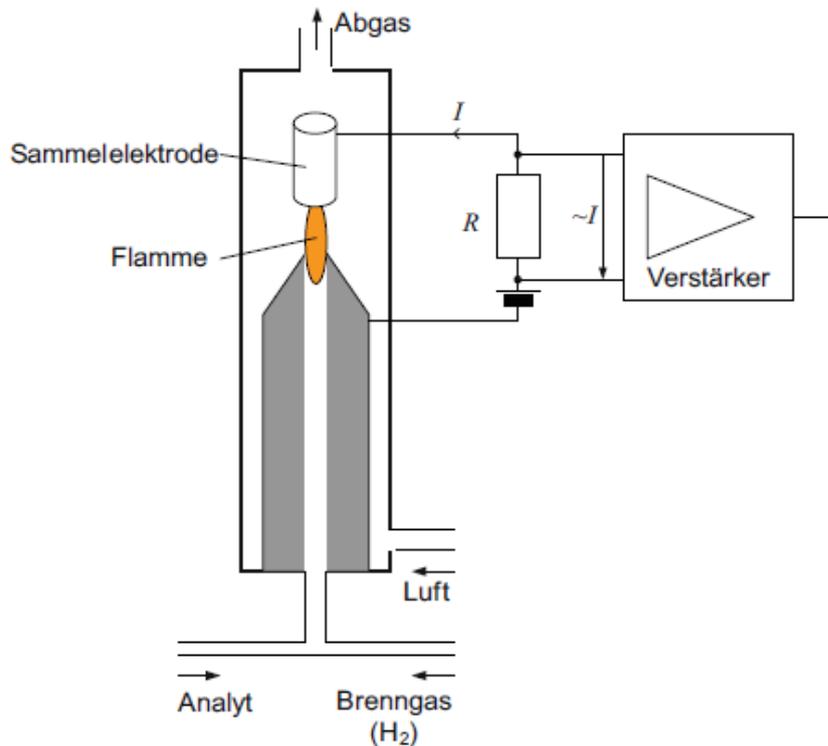


Abbildung 2-5: Funktionsweise eines Flammenionisationsdetektors [18]

NO_x:

Mit einem Chemoluminiszenzdetektor (CLD) lässt sich die NO Konzentration im Abgas messen. Da für die Abgasmessung aber die Summe der Stickoxide, also NO_x relevant ist, muss NO₂ in einem Konverter zu NO umgewandelt werden. Im Ozonator wird aus Luftsauerstoff Ozon gebildet, das in der Messkammer mit NO reagiert. Bei dieser Reaktion wird in 90 % der Fälle NO₂ gebildet, bei 10 % der Reaktionen entsteht ein NO₂ Molekül im angeregten Zustand. Dieses fällt sofort aus dem angeregten Zustand in den Basiszustand und dabei wird Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung, sprich Licht, frei. Dieses Licht wird von einer Fotodiode erfasst, die Intensität ist direkt proportional zur NO Konzentration in der Messkammer.[6]

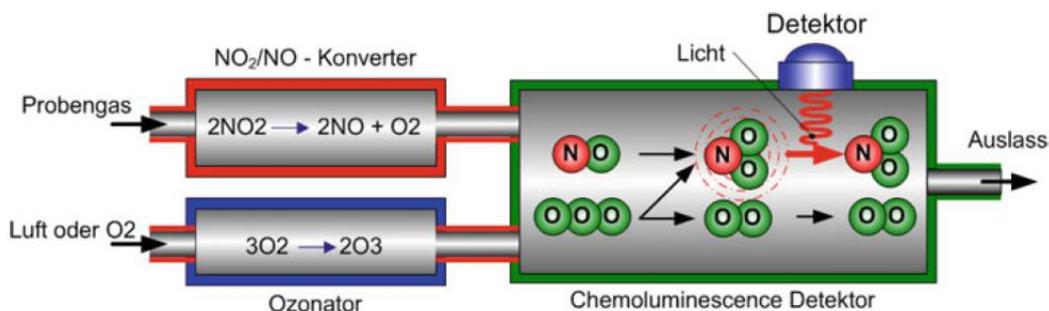


Abbildung 2-6: Schema eines Chemoluminiszenzdetektors [6]

Partikelanzahl (PN):

Das Messen der Partikelanzahl ist deutlich aufwändiger als die bisher vorgeschriebene Messung der Partikelmasse. Das gängigste Verfahren ist die Zählung mittels eines

Kondensationspartikelzählers (CPC). Um das Abgas optimal auf die Messung im CPC vorzubereiten, muss es laut UNECE aufbereitet werden[19]. Das Abgas wird verdünnt aus der CVS Anlage entnommen und wird nochmals verdünnt und erhitzt, um den Partialdruck von flüssigen Komponenten im Abgas zu senken. In einer Verdunstungseinheit, dem sogenannten VPR (Volatile Particle Remover) wird das Abgas erhitzt, um flüchtige Komponenten zu verdampfen, da diese als nicht relevant für die Partikelanzahlmessung angesehen werden. Erneutes Verdünnen verhindert ein Kondensieren der eben verdampften Komponenten.

Anschließend tritt das aufbereitete Abgas in den CPC ein. Da die zu messenden Partikel zu klein sind, um sie optisch zu erfassen, wird das Abgas mit Alkoholdampf gesättigt, meist Butanol. Wird das Abgas abgekühlt, kondensiert der verdampfte Alkohol an den festen Kohlenstoffkernen und vergrößert sie somit. Dadurch sind sie optisch besser erfassbar, da sie das auftreffende Laserlicht streuen. Die Häufigkeit und Intensität des detektierten Streulichts ist ein Maß für die Partikelkonzentration im Abgas.[18]

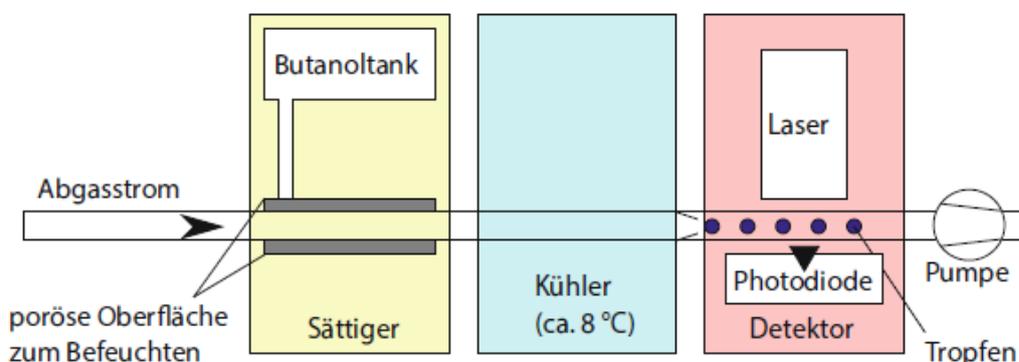


Abbildung 2-7: Aufbau eines Kondensationspartikelzählers (CPC) [18]

2.3.2 Constant Volume Sampling (CVS) Anlage

Das Kernstück zur Emissionsmessung am Rollenprüfstand ist die CVS Anlage, schematisch in Abbildung 2-8 dargestellt. Der gesamte Abgasmassenstrom wird verdünnt (Vollstromverdünnung) und somit werden Nachreaktionen oder Kondensation von Abgaskomponenten verhindert. Um später eindeutig auf die Rohabgasemission zurückrechnen zu können wird der Volumenstrom aus Verdünnungsluft und Abgas konstant gehalten. Außerdem muss die CVS Anlage die Probertemperatur auf ein für die Messung optimales Level bringen.

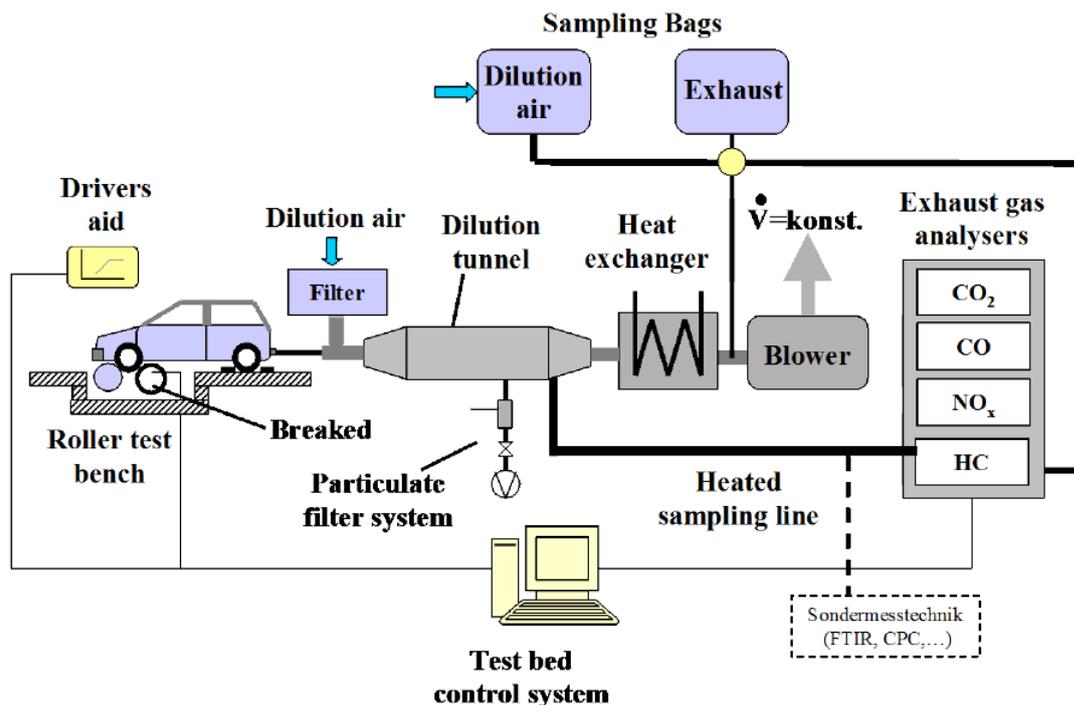


Abbildung 2-8: Aufbau eines Rollenprüfstandes mit CVS Anlage[5]

Die CVS Anlage ermittelt mittels oben erwähnten Messgeräten sekundlich Partikelanzahl, CO, CO₂, HC und NO_x Emissionen. Die Probenentnahme erfolgt dabei aus dem verdünnten Vollabgasstrom. Zusätzlich wird das Abgas über den gesamten Zyklus in Beuteln gesammelt um den Durchschnittswert der Emissionen über den Zyklus zu ermitteln.

2.3.3 Portable Emission Measurement System (PEMS)

Portable Emissionsmessung wird durch die Einführung von RDE Tests sehr wichtig. Eines dieser Messgeräte ist jenes der Firma „AVL“, das sogenannte „M.O.V.E“. Es besteht aus einem Gas PEMS, zur Messung der gasförmigen Schadstoffe, aus einem PN PEMS, welches die Partikelanzahl misst, aus einer System Control und einem EFM (Exhaust Flow Meter) zur Messung des Abgasmassenstroms. Im Gegensatz zur CVS Anlage wird hier nur ein Teilstrom des Abgases entnommen und verdünnt, was beim Berechnen der Rohemissionen zu berücksichtigen ist.

Im AVL M.O.V.E Gas PEMS iS werden die CO₂ und CO Emissionen mittels NDIR im verdünnten Teilabgasstrom gemessen. Anders als die CVS Anlage misst das PEMS die NO_x Emissionen allerdings nicht mittels eines CLD, sondern nutzt dafür die Nichtdispersive UV-Absorptionsfotometrie (NDUV). Diese funktioniert ähnlich wie das NDIR Verfahren, verwendet aber ultraviolettes Licht statt infrarotem. Im ultravioletten Wellenlängenbereich absorbieren NO und NO_x deutlich mehr Strahlung, was zu besseren Messergebnissen führt. Auch die Querempfindlichkeit mit Wassermolekülen ist im ultravioletten Bereich nicht gegeben. Ein weiterer großer Vorteil ist die separate Messung der NO und NO₂ Konzentration, eine Umwandlung in einem Konverter wie bei der CLD Messung ist nicht erforderlich. [20], [21]

Zusätzlich ist zur Partikelanzahlmessung ein PN PEMS in die Messeinrichtung eingebunden. Auch hier wird ein anderes Messprinzip verwendet als in der CVS Anlage. Die Partikel

werden mittels Diffusionsladung gezählt. Dazu werden die Partikel im Diffusionsladegerät (1) mit Ionen aus der Koronaentladung geladen. Dies geschieht durch Kollidieren der kleinen Partikel mit den Ionen und der entstehende Ladestrom wird gemessen (2). Der anschließende gepulste Elektrofilter (3) erzeugt eine Ladungsmodulation, die dann im Faraday Käfig (4) erkannt wird. Strömen geladene Partikel durch den Faraday Käfig, wird ein elektrostatischer Strom induziert, der von einem Elektrometer kompensiert wird. Der Signalausschlag durch diesen Kompensationsstrom ist proportional zur Partikelladung und somit proportional zur Partikelanzahl. [22]

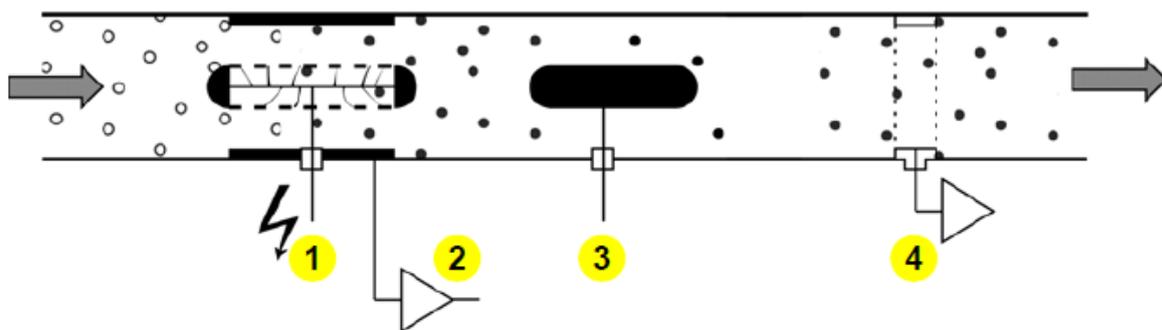


Abbildung 2-9: Funktionsprinzip der Partikelzählung im PN PEMS[22]

2.3.4 Fourier Transform Infrarotspektrometer (FTIR)

Als zusätzliches Messgerät für insbesondere nicht gesetzlich geregelte Schadstoffe (eine gesamte Liste zeigt Tabelle 0-1) wird ein FTIR verwendet. Dieses Messgerät basiert wie das NDIR auf dem Prinzip der Absorption von elektromagnetischer Strahlung bei gewissen Wellenlängen. Der große Unterschied ist allerdings, dass das Gerät nicht auf eine Wellenlänge eingestellt werden muss, bei der das zu messende Molekül Strahlung absorbiert, sondern dass es das gesamte Spektrum analysiert und die Absorption aus dem Interferogramm exakt einem Schadstoff zuweisen kann.

Durch ein Michelson Interferometer mit einem beweglichen Spiegel werden zwei Infrarotlichtstrahlen getrennt und wieder zusammengeführt. Je nach Position des Spiegels entsteht konstruktive oder destruktive Interferenz, d.h. die Amplituden der Wellen verstärken sich oder löschen sich aus. Der Spiegel wird einmal hin und zurückgefahren, so entsteht ein Interferogramm, das die gemessene Intensität in Abhängigkeit der Spiegelposition darstellt. Diese Intensitätsverteilung wird nun über die Fourier Transformation in eine spektrale, also wellenlängenabhängige Intensitätsverteilung umgerechnet. Das ist möglich, da die Interferenz der Lichtwellen von ihrer Wellenlänge und der Position des Spiegels abhängig ist. Vergleicht man diese Intensitätsverteilung mit einer Referenzmessung von Luft, erhält man die Absorptionsintensitäten der Schadstoffe und somit deren Konzentration.[23] Detaillierte Informationen zur Mathematik der Fourier Transformation gibt z.B. Professor Woisetschläger [24].

Der große Vorteil gegenüber der NDIR Messung ist eine höhere Genauigkeit der Messung, da das Licht nicht erst gefiltert werden muss. Außerdem lässt sich gleichzeitig das gesamte Spektrum analysieren, und das mit einer Abtastrate von bis zu 5 Hz. [25], [26]

3 Simulation von Emissionen mit PHEM

Um die Emissionen von Kfz (Kraftfahrzeugen) im realen Verkehr korrekt darzustellen, sind gewisse Emissionsmodelle notwendig, da die reale Fahrsituation deutlich komplexer ist als das Emissionsverhalten im Typrüfzyklus. Die Messung der Emissionen in realen Fahrzyklen wäre natürlich genauer als die Simulation, wäre wegen der vielen unterschiedlichen Verkehrssituationen, die abgebildet werden müssen, zu aufwändig.

Als gut geeignete Variante um Emissionen für alle Fahrsituationen und eventuelle Einflüsse darauf richtig vorausszusagen hat sich das Längsdynamikmodell auf Basis von Motorkennfeldern erwiesen.

3.1 PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model)

PHEM ist ein an der TU Graz entwickeltes Emissionsmodell. Es berechnet die Emissionen und den Verbrauch für einen gegebenen Fahrzyklus in 1 Hz Schritten, basierend auf der Längsdynamik und den Emissionskennfeldern des Fahrzeugs.

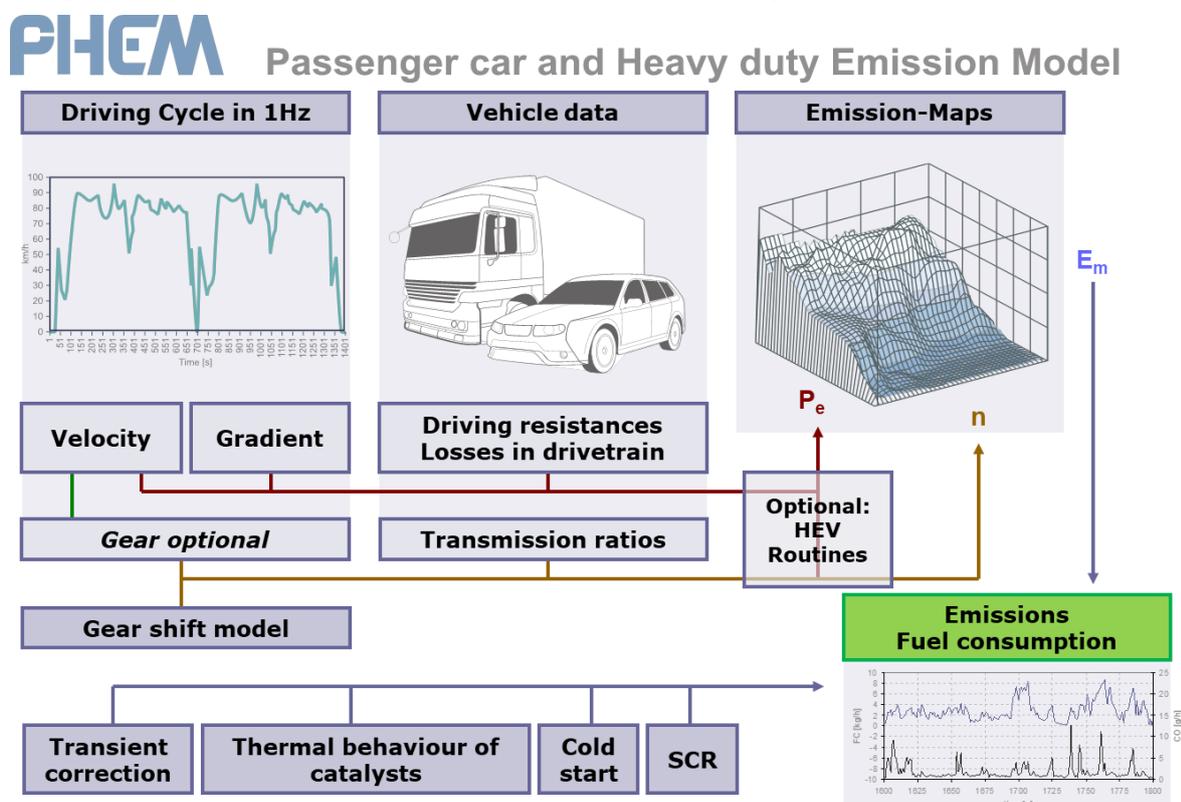


Abbildung 3-1: PHEM Berechnungsprinzip [27]

3.1.1 Längsdynamik Grundlage

Die oben genannte Grundlage dieses Modells ist die Längsdynamik, die die genaue Aufteilung der Leistungsanteile angibt. Dazu wird zu jedem Zeitpunkt des Zyklus anhand der in Formel (3-1) angegebenen Leistungsanteile auf die erforderliche Motorleistung zurückgerechnet. Hier ergibt sich ein entscheidender Vorteil zu z.B. reinen Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsmodellen, da diese Leistung bei unterschiedlicher Beladung oder unterschiedlichem Fahrverhalten sehr stark schwanken kann.

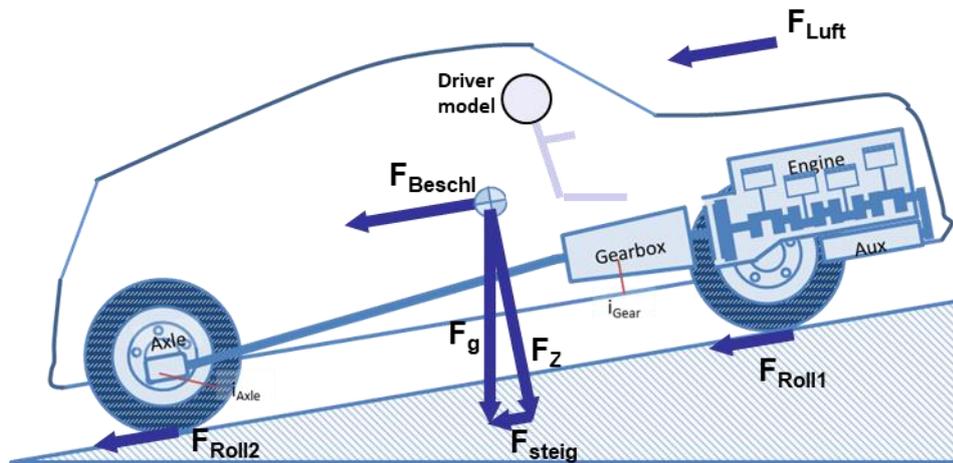


Abbildung 3-2: Längsdynamik Modell [28]

Die in Abbildung 3-2 gezeigten Leistungskomponenten setzen sich zur erforderlichen Motorleistung zusammen.[27]

$$P_e = P_{Luft} + P_{Roll} + P_{Beschleunigung} + P_{Steigung} + P_{Getriebe} + P_{Nebenverbraucher} \quad (3-1)$$

- $P_{Luft} = c_w * A * \frac{\rho_{Luft}}{2} * v^3$ [W] (3-2)

Mit c_w ...Luftwiderstandsbeiwert [-]

A ...projizierte Fläche [m²]

ρ_{Luft} ...Luftdichte [kg/m³]

v ...Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

- $P_{Roll} = (m_{Fahrzeug} + m_{Beladung}) * g * v * (F_{r0} + F_{r1} * v + F_{r4} * v^4)$ [W] (3-3)

Mit m ...Masse [kg]

g ...Erdbeschleunigung [m/s²]

F_r ...Widerstandsbeiwerte [-]

Der Rollwiderstand wird durch ein Polynom 4ter Ordnung angenähert, die Widerstandsbeiwerte stammen aus Ausrollversuchen.

- $P_{Beschl.} = (m_{Fahrzeug} + m_{Beladung}) * a * v + P_{rot}$ [W] (3-4)

Mit a ...Fahrzeugbeschleunigung [m/s²]

Die rotatorische Leistung bezieht sich auf alle drehenden Teile am Fahrzeug:

$$P_{rot} = M * \omega = I * 4\pi^2 * n * \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad [W] \quad (3-5)$$

Mit M ...Motormoment [Nm]

ω ...Winkelgeschwindigkeit [1/s]

I...Trägheitsmoment der drehenden Teile [kg m²]

n...Motordrehzahl [1/s]

$$\bullet P_{steigung} = v * m * g * \sin\alpha \text{ [W]} \quad (3-6)$$

Gibt die Leistung zur Überwindung der Fahrbahnneigung α an.

$$\bullet P_{Getriebe} = (1 - 0.92) * P_{Rad} \text{ [W]} \quad (3-7)$$

Der Getriebewirkungsgrad wird konstant mit 0.92 vom Rad bis Zur Motorkupplung angenommen.

$$\bullet P_{Nebenverbraucher} = P_0 * P_{rated} \text{ [W]} \quad (3-8)$$

Nebenverbraucher werden zur Vereinfachung über einen Faktor P_0 der Nennleistung angegeben.[28] In dieser Arbeit wurde der Wert konstant bei 0.005 angenommen.

Der Schlupf der Reifen wird vernachlässigt, da eine genaue Simulation sehr aufwändig wäre und der Einfluss sehr gering ist.

3.1.2 Input Daten für PHEM

Alle Fahrzeugdaten werden im vehicle File definiert (siehe Abbildung 3-3). Aus ihnen lässt sich sowohl der Leistungsbedarf nach Formel (3-1) berechnen, als auch über alle Übersetzungen und dem dynamischen Raddurchmesser die nötige Motordrehzahl. Diese beiden Größen spannen das Emissionskennfeld auf.

The screenshot shows the PHEM Vehicle File input interface. It contains several sections for defining vehicle parameters:

- Mass:** Mass (1200 [kg]), Loading (50 [kg]), Red. Mass Wheels (40.06 [kg]), Wheel diameter (dyn) (0.607 [m]), Drag coefficient (0.3 [-]), Cross sectional area (2.14 [m²]).
- Rolling resistance factors:** Fr 0 (0.009 [-]), Fr 1 (5E-05 [s/m]), Fr 2 (0 [s/m²]), Fr 3 (0 [s/m³]), Fr 4 (1.6E-09 [s/m⁴]).
- Engine:** Rated engine power (84 [kW]), Rated engine speed (5247 [rpm]), Idling engine speed (706 [rpm]), Inertia (0.473 [kgm²]).
- Gear shift parameters:** Heavy Duty (Fast: 0.73, Eco: 0.45), Light Duty / Passenger Car (Down: 0.18, Up: 0.3, A: 0.28, B: 0.3, C: 0.46, 0.4).
- Cross Wind Correction:** No Correction.
- Auxiliaries:** Table with columns ID, Type, Input File.
- Retarder:** Type (None), Ratio (0 [-]).
- Transmission:** Inertia (0.05848 [kgm²]), Traction Interruption (0 [s]).
- Efficiency Map:** Table with columns Gear, Ratio, Efficiency Map.
- Loss factor:** 0.3 [-] (Transmission Loss Model only).

Abbildung 3-3: Vehicle File PHEM

Die Zyklusvorgabe wird im Driving Cycle gegeben. Diese Datei beinhaltet im minimalsten Fall einen Geschwindigkeitsverlauf mit 1 Hz Auflösung, der entweder gemessen oder vorgegeben werden kann. Zusätzliche Optionen wie Steigung oder vorgegebene Schaltpunkte können ebenfalls hier eingegeben werden.

Mit der sekundlichen Geschwindigkeitsvorgabe und der daraus errechneten Leistung und

Drehzahl interpoliert PHEM nun aus dem im File „*.MAP“ vorgegebenen Emissionskennfeld die sekundlichen Emissionen des Zyklus. Das Emissionskennfeld stammt entweder von einem Motorprüfstand, basiert auf Erfahrungswerten oder ist wie in Kapitel 3.2 beschrieben aus Rollenprüfstandsdaten erzeugt.

3.2 Kennfelderstellung aus Messdaten

Die in Kapitel 3.1 beschriebene Vorgehensweise wird angewendet, um bei bestehenden Kennfeldern die Emissionen für beliebige Fahrsituationen zu simulieren. Um solche Kennfelder aus bestehenden Messdaten eines Rollenprüfstandes zu erstellen, kann der Prozess auch umgekehrt angewendet werden, d.h. aus bestehenden sekundlich gemessenen Emissionen wird ein n - P_e -Emissionskennfeld (Emissionen über Drehzahl und Leistung) erzeugt, das später für beliebige Zyklen verwendet werden kann.

3.2.1 Leistungsinterpolation aus generischem Kennfeld

Bei der Kennfelderstellung aus Messdaten gestaltet sich die Zuordnung der Emissionen zu der Leistung schwierig, da das Motormoment am Fahrzeug schwer gemessen werden kann. Um dies zu kompensieren bietet PHEM die Option ein generisches CO_2 -Kennfeld zu verwenden, aus dem mittels Drehzahl und gemessenem CO_2 Wert, aus einer Rollenprüfstands- oder RDE-Messung, die Leistung interpoliert wird. Dieser Vorgang wird für jeden Zeitschritt des Zyklus durchgeführt und ist für einen Zeitpunkt in Abbildung 3-4 dargestellt.

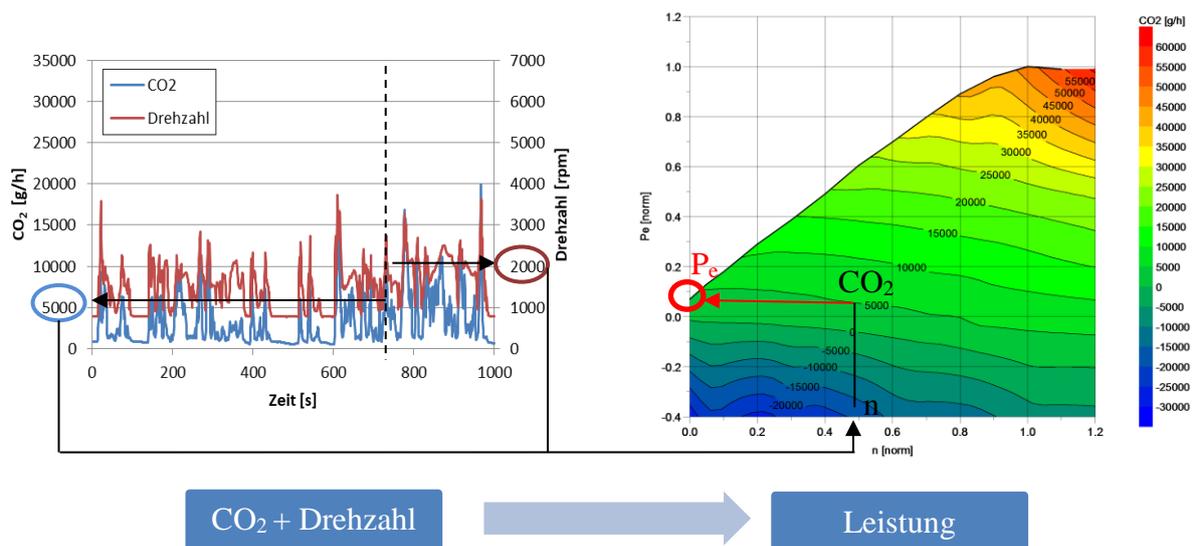


Abbildung 3-4: Leistungsinterpolation mit generischem Kennfeld

Das generische Kennfeld basiert auf Erfahrungs- bzw. Messwerten und wird je Abgasnorm und Antriebsart erstellt (z.B. Benzinfahrzeug Euro 6). Die Qualität und Richtigkeit wird in Kapitel 3.2.3 überprüft.

Mit der so ermittelten Leistung, der gemessenen Drehzahl und den gemessenen Emissionskomponenten wird ein Emissionskennfeld erstellt, das als Input für die Zyklussimulation in Kapitel 3.2.2 verwendet wird.

3.2.2 Zyklussimulation

Da nun die erforderliche Leistung ermittelt wurde, kann der gemessene Zyklus simuliert werden. Dies erfolgt nach „Vorwärts- Prinzip“, d.h. mit vorgegebenem Zyklus (Zeit und Geschwindigkeit) wird aus dem Emissionskennfeld interpoliert.

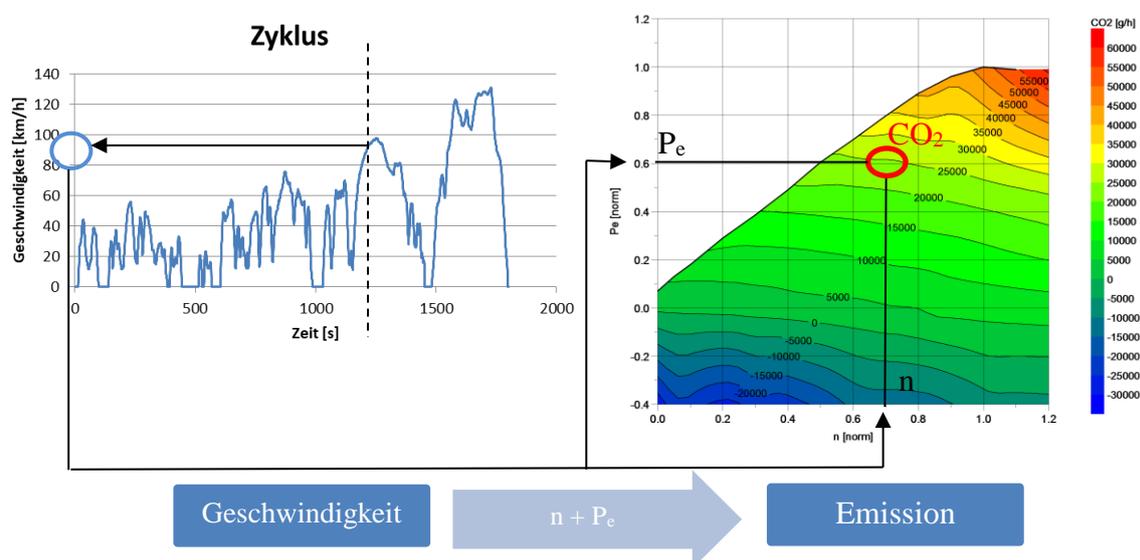


Abbildung 3-5: Interpolation aus Emissionskennfeld

3.2.3 Kalibrierung des generischen Kennfelds

Um die Qualität des verwendeten generischen Kennfelds zu überprüfen, wird der gemessene Zyklus nachsimuliert, d.h. der gemessene Zyklus samt gemessenen CO₂ Emissionen wird vorgegeben. Dadurch werden die CO₂ Emissionen einmal simuliert und einmal die gemessenen Werte ins Ergebnisfile eingetragen. Um Ausreißer zu glätten und einen Trend besser zu erkennen wird nicht die sekundliche Auflösung verglichen, sondern eine 30 Sekunden Mittelung. Diese Überprüfung kann mit Messdaten vom Rollenprüfstand durchgeführt werden, da dort die eingestellten Fahrwiderstände genau bekannt sind. Bei RDE Fahrten sind Fahrwiderstände und Fahrbahnlängsneigung nicht genau genug bekannt bzw. variabel (Wind, Fahrbahnoberfläche), so dass eine Überprüfung des generischen Motorkennfeldes mit PEMS Messungen nur sehr grob möglich ist.

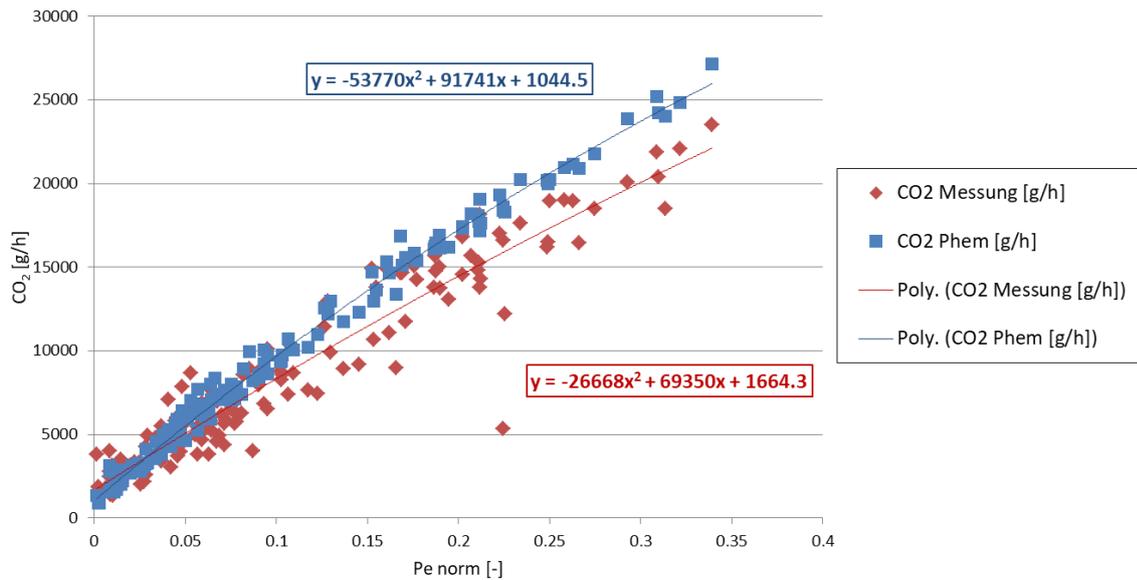


Abbildung 3-6: Ermittlung der Kalibrierfunktion am Beispiel einer WLTC Messung an einem Euro 6 Benzin PKW

Bei der Kalibrierung in Abbildung 3-6 ist eine deutliche Abweichung der Simulation zur Messung zu erkennen, besonders im Bereich höherer Leistung. Um das zu korrigieren werden die einzelnen Messpunkte durch eine quadratische Trendfunktion angenähert. Die Differenz dieser beiden Polynome bildet somit die Kalibrierfunktion, um die das ursprüngliche generische Kennfeld „daneben“ lag.

Nachdem die Kalibrierfunktion auf das generische Kennfeld angewendet wurde, wird die Vorgehensweise aus Kapitel 3.2.1 wiederholt um ein verbessertes Emissionskennfeld zu erstellen. Das Ergebnis der Kalibrierung zeigt die Tabelle 3-1. Eine deutliche Verbesserung bei einem WLTP Zyklus eines Mini Coopers durch die Kalibrierung zeigt die untere Tabelle (G_2013_modified).

Cycle average results

G_2013

EmComp	Unit	Meas	Sim	Diff	Delta
CO2	[g/h]	7964	9063	1099	13.8%
NOx	[g/h]	3.9	5.0	1.1	29.9%
CO	[g/h]	14.4	16.7	2.3	16.4%
PN	[1/h]	8.03E+13	9.63E+13	1.60E+13	19.9%

Cycle average results

G_2013_modified

EmComp	Unit	Meas	Sim	Diff	Delta
CO2	[g/h]	7964	8084	120	1.5%
NOx	[g/h]	3.9	4.5	0.6	16.6%
CO	[g/h]	14.3	14.7	0.4	2.5%
PN	[1/h]	8.03E+13	8.15E+13	1.22E+12	1.5%

Tabelle 3-1: Verbesserung der Emissionswerte durch ein kalibriertes Kennfeld

3.2.4 Zyklusauswahl Kennfelderstellung

Sind mehrere Messdaten unterschiedlicher Zyklen vorhanden, stellt sich die Frage, welcher Zyklus am besten für die Kennfelderstellung geeignet ist. Dazu wird bei 2 Fahrzeugen jeweils aus zwei Zyklen ein Kennfeld erzeugt und anschließend der jeweils andere Zyklus mit dem Kennfeld simuliert.

Dazu wurden die Messwerte von zwei Fahrzeugen verwendet, Seat Leon und Toyota Yaris. Bei beiden Fahrzeugen wurde als Grundlage der WLTC gemessen, als Real World Cycle (RWC) wurde beim Toyota Yaris der Common Artemis Driving Cycle (CADC) gemessen, beim Seat Leon ein eigens erstellter RWC.

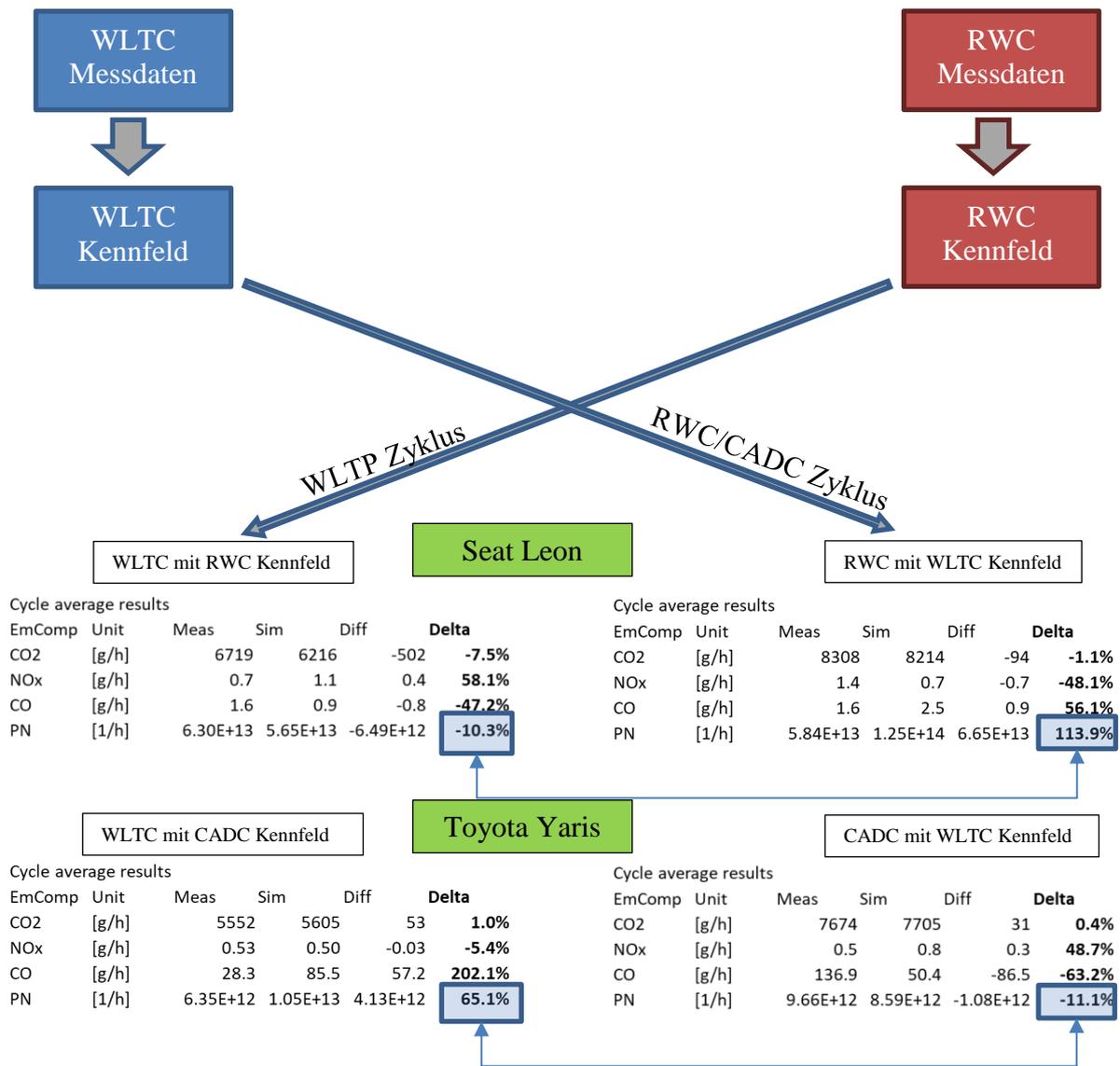


Tabelle 3-2: Vergleich der Zyklen für die Kennfelderstellung

Tabelle 3-2 zeigt diesen Vergleich bei zwei Fahrzeugen. Die CO₂ Werte sind bei beiden Varianten gut vergleichbar, das liegt an derselben Grundlage, dem generischen Kennfeld. Bei den anderen Emissionskomponenten und im Detail bei den für diese Arbeit interessanten Partikelemissionen kommt es zu sehr großen Unterschieden. Die RWC Simulation mit WLTC Kennfeld überschätzt die Partikelemissionen deutlich mit 114 %. Beim Toyota ist dieser Trend genau andersherum zu beobachten, die WLTC Simulation mit CADC Kennfeld liegt bei den Partikeln weit daneben.

Aus dieser Auswertung lässt sich also keine klare Aussage treffen welcher Zyklus am besten geeignet ist um ein Kennfeld zu erstellen. In Abbildung 3-7 sind die Lastpunkte der jeweiligen Zyklen aufgetragen, begrenzt von Vollast- und Schleppekurve. Theoretisch sollte der Zyklus besser geeignet sein, der mehr Leistungsbereiche abdeckt, da bei einem zu langsamen und dynamischen Zyklus (z.B. NEDC) der Rest des Kennfeldes extrapoliert werden muss. Der WLTC hingegen deckt auch im Vergleich zu realen Zyklen einen sehr weiten Bereich ab.

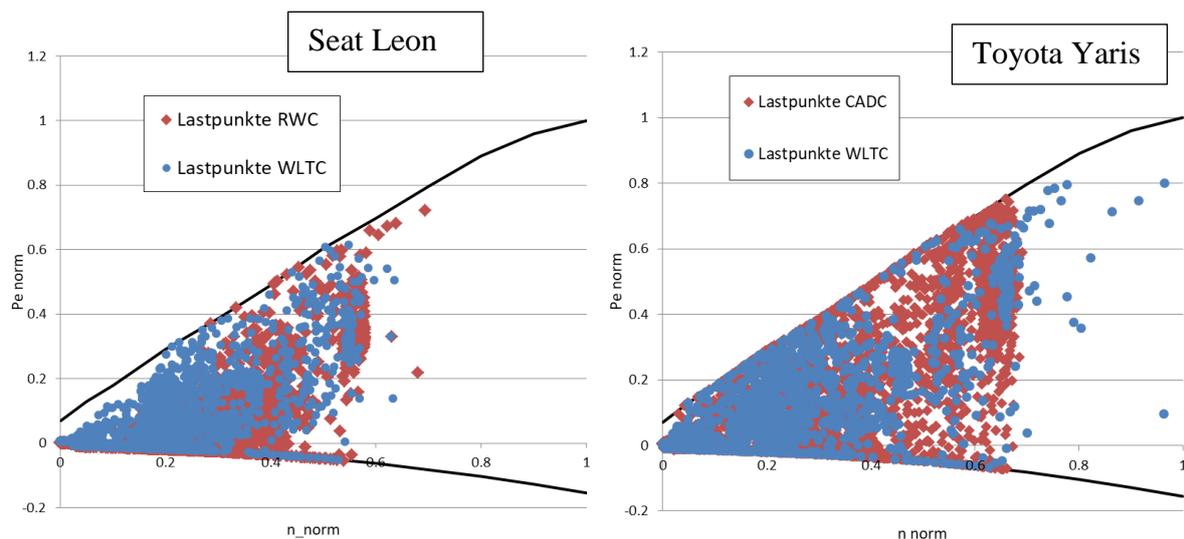


Abbildung 3-7: Lastpunkte von WLTC und RWC Zyklen

Dass dennoch ein gravierender Unterschied der Kennfelder entsteht, kann auch auf dynamische Einflüsse zurückzuführen sein, die aber durch eine einfache Kennfeldinterpolation nicht abgebildet werden können. Die Unterschiede im Verlauf der Mess- und Simulationswerte in Abbildung 3-8 gehen in beide Richtungen. Bei Leistungsanstiegen ist die Messung der Partikelanzahl teilweise höher (1700 s – mehr gemessene Partikel als berechnet) und teilweise deutlich niedriger (1900 s – Simulation sagt Partikel voraus, es werden aber keine gemessen). Diese individuelle Charakteristik der Emissionentstehung ist in dem 3-dimensionalen Kennfeld nicht abbildbar.

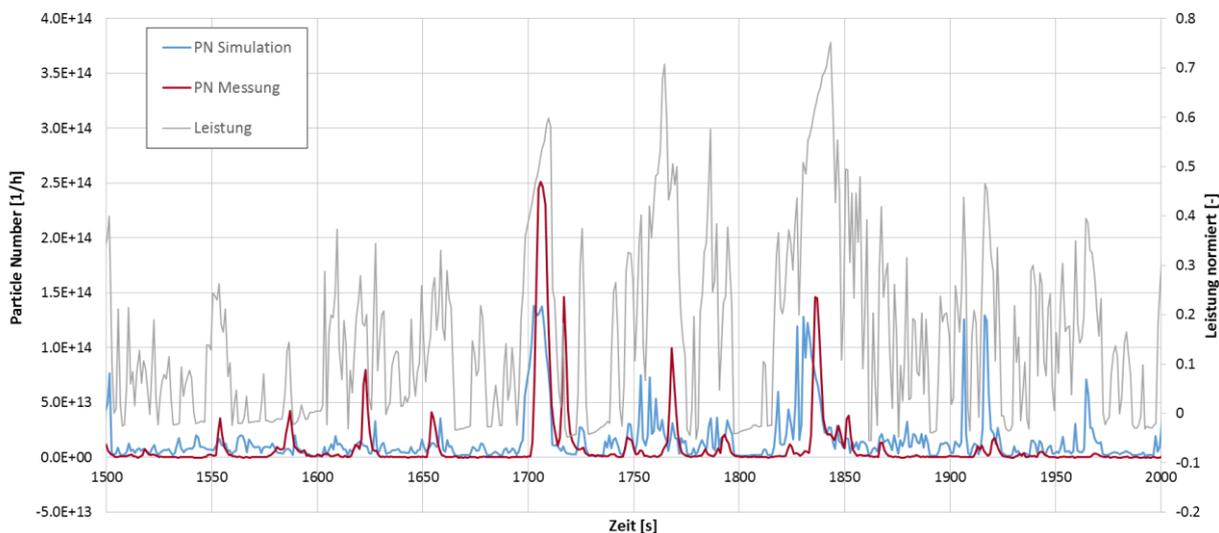


Abbildung 3-8: Partikelanzahlverlauf beim CADC des Toyota Yaris

Grundsätzlich bietet der WLTC aber eine gute Basis zur Kennfelderstellung und wird daher in dieser Arbeit verwendet, da er aufgrund der neuen Gesetzgebung bei fast jedem Fahrzeug gemessen wird und daher viele Daten zur Verfügung stehen. Für die noch nach NEDC typisierten PKW ist anzunehmen, dass noch keine gezielte Optimierung auf den WLTC erfolgt. Bei späteren Modellen, die nach WLTP typisiert sind, wird der WLTC eventuell nicht mehr repräsentativ für reale Emissionszustände sein.

3.3 Simulationsergebnisse

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden folgende Fahrzeuge simuliert, die davor am Rollenprüfstand der TU Graz vermessen wurden:

Nummer	Fahrzeug	Hubraum [l]	Leistung [kW]	Masse [kg]	Getriebe
209	Toyota Yaris	1	51	1206	5-Gang MT
216	Seat Leon	1.2	81	1515	6-Gang MT
217	Seat Leon	1.2	81	1515	7-Gang DSG
222	Fiat 500	1.2	51	1038	5-Gang MT
246	Mini Cooper	1.5	100	1267	5-Gang MT

Tabelle 3-3: Benzinfahrzeuge der Rollenprüfstandsmessungen (MT...Manual Transmission/Schaltgetriebe, DSG...Doppelkupplungsgetriebe)

Für jedes dieser Fahrzeuge wurde die Vorgehensweise von Kapitel 3.2 angewendet und so ein Kennfeld zur Emissionsabschätzung jeder beliebigen Fahrsituation erstellt.

4 Durchschnittsfahrzeug

Die gemessenen Fahrzeuge sollen nun in einem Durchschnittsfahrzeug zusammengefasst werden. Die Mittelung bildet sich repräsentativ aus den oben genannten Fahrzeugen. Dies dient der Vergleichbarkeit der Messergebnisse und den daraus entstandenen Kennfeldern mit anderen Durchschnittswerten von Euro 6 Benzinern, sowie als Input für Emissionsabschätzungen, z.B. dem HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs). Hier wird je nach Ort der Anwendung eine Verkehrszusammensetzung aus verschiedenen Fahrzeugschichten angewendet und aus den Emissionsfaktoren jeder Schicht eine Gesamtabschätzung des Emissionsniveaus gegeben [29].

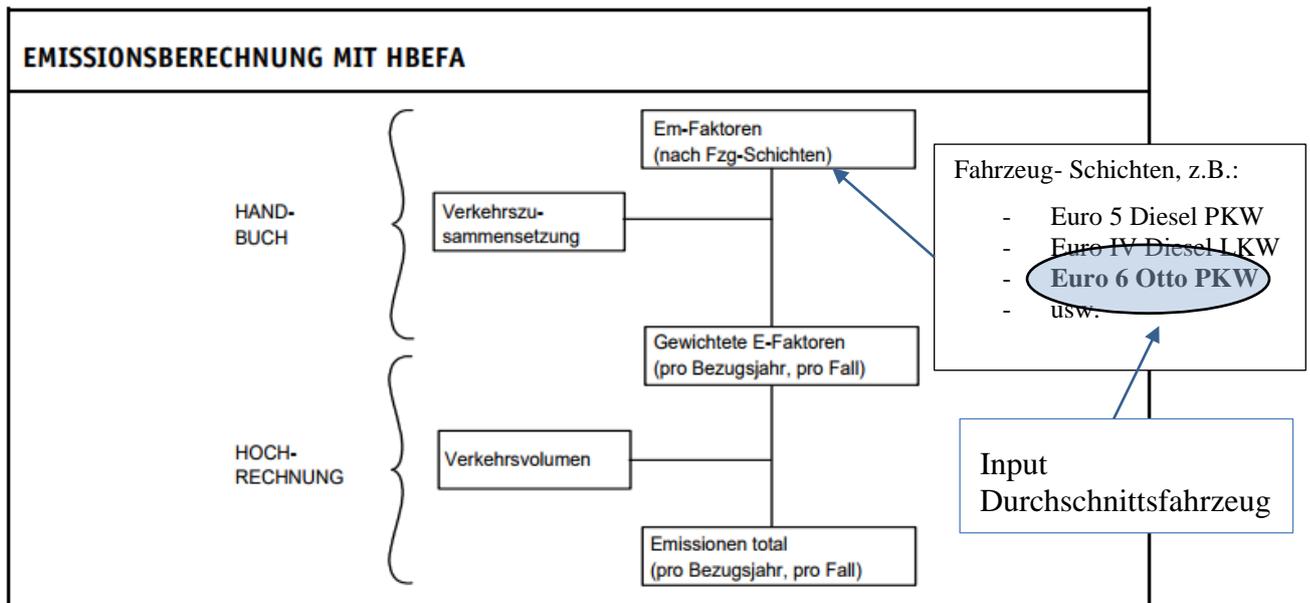


Abbildung 4-1: Prinzip der Emissionsabschätzung mit HBEFA[29]

4.1 Erstellung Durchschnittsfahrzeug

4.1.1 Mittelung der Fahrzeugwerte

Die Erstellung dieses Durchschnittsfahrzeugs erfolgt aus den 5 Simulationen bzw. Messungen aus Kapitel 3. Je mehr Fahrzeuge in die Mittelung einfließen, desto repräsentativer wird das Ergebnis, das ständig erweiterbar ist. Die Fahrzeuge wurden zudem so ausgewählt, dass sie im Mittel dem EU Durchschnitt der 2015 zugelassenen Fahrzeuge ähneln.[30]

Durchschnittsfahrzeug		
m	1308.3 [kg]	Masse
P_{rated}	72.8 [kW]	Nennleistung
n_{rated}	5040 [1/min]	Nenndrehzahl
n_{idle}	725 [1/min]	Leerlaufdrehzahl
d_{dyn}	0.5978 [m]	dynamischer Raddurchmesser
R_0	113.096 [N]	
R_1	0.7436 [Ns/m]	Fahrwiderstandsbeiwerte
R_2	0.3904 [Ns ² /m ²]	

Tabelle 4-1: Durchschnittswerte aller Fahrzeugdaten

4.1.2 Durchschnittskennfeld

Ebenso wie die Fahrzeugwerte wird auch das Durchschnittskennfeld durch arithmetische

Mittelung aus allen Einzelkennfeldern erzeugt. Dazu wird der Emissionswert je Drehzahl – Leistungspaar über alle Fahrzeuge gemittelt. Als Ergebnis erhält man Kennfelder für jeden Emissionswert, dargestellt in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3. Begrenzt wird das Kennfeld durch die Volllastkurve, um unrealistische Extrapolationswerte zu vermeiden. Das in der Berechnung verwendete Kennfeld hingegen deckt den gesamten Leistungs-Drehzahl-Bereich ab, da PHEM die Volllastkurve selbst auf das Kennfeld anwendet und die Volllastwerte interpoliert.

Die zur Vergleichbarkeit der Kennfelder verwendete Normierung von Leistung und Drehzahl ist in den folgenden Formeln beschrieben.

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad (4-1)$$

$$P_{norm} = \frac{P}{P_{rated}} \quad (4-2)$$

mit: P/n_{rated} ...Nennleistung/-drehzahl

n_{idle} ...Leerlaufdrehzahl

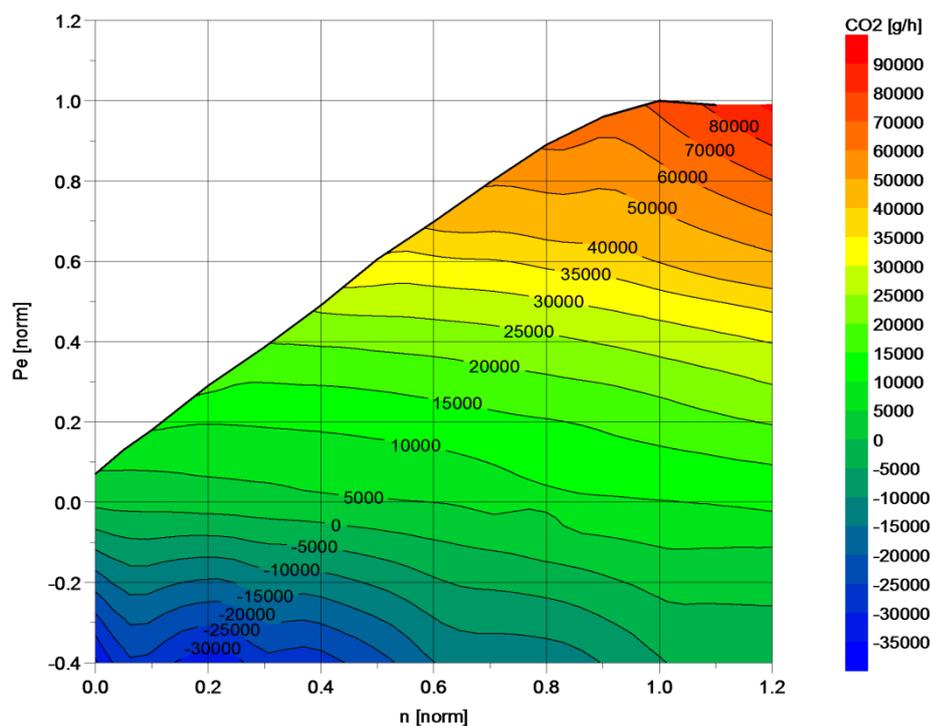


Abbildung 4-2: CO₂ - Durchschnittskennfeld

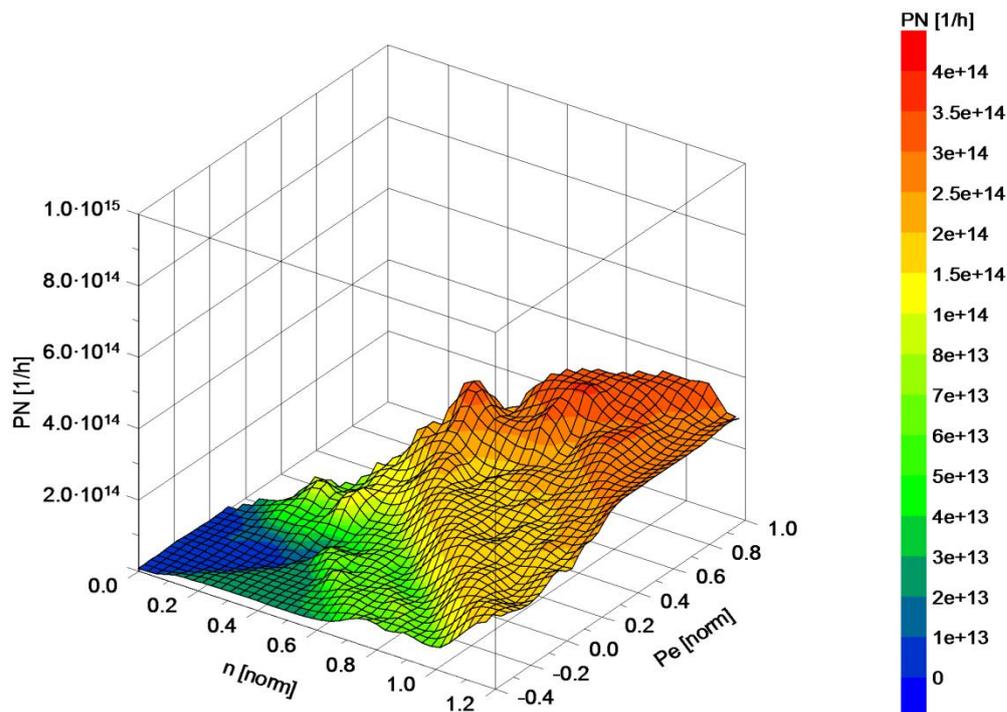


Abbildung 4-3: Partikelanzahl – Durchschnittskennfeld

4.1.3 Getriebe des Durchschnittsfahrzeugs

Grundsätzlich wird bei jedem Fahrzeugwert das arithmetische Mittel aus allen Fahrzeugen gebildet. Dies funktioniert bei einfachen Kennwerten wie Masse, Leistung oder Widerstandsbeiwerten gut. Kritisch ist die Ermittlung eines Durchschnittsgetriebes, da alle Fahrzeuge sowohl eine unterschiedliche Anzahl an Gängen als auch andere Getriebetypen (Schaltgetriebe, Doppelkupplungsgetriebe).

Um ein möglichst akkurates Durchschnittsfahrzeug zu bilden werden zwei Varianten verwendet. Bei Variante 1 wird das arithmetische Mittel der einzelnen Übersetzungen gebildet. Um Fahrzeuge mit wenigen Gängen auch bei hohen Gängen einfließen zu lassen, wird bei solchen Fahrzeugen ein virtueller sechster und siebter Gang eingefügt, der dieselbe Übersetzung hat wie der fünfte. So wird sichergestellt, dass das sieben-Gang-Durchschnittsfahrzeug auch die negativen Einflüsse der fehlenden „Spritspargänge“ bei höheren Geschwindigkeiten beinhaltet.

Bei Variante 2 wird das Gangverhältnis gemittelt, sodass die einzelnen Gangsprünge konstant bleiben. Die Gangverhältnisse sind in Tabelle 4-2 mittig dargestellt, ihr Einfluss ist erst bei höheren Gängen erkennbar, hier fallen die Übersetzungen im Vergleich zu Variante 1 länger aus.

Die Achsübersetzung ist in beiden Varianten der Mittelwert aller Fahrzeuge.

	i Variante 1	Gangverhältnis		i Variante 2	
i_1	3.690			3.690	i_1
i_2	2.049	i_2/i_1	0.555	2.047	i_2
i_3	1.369	i_3/i_2	0.668	1.367	i_3
i_4	1.042	i_4/i_3	0.763	1.042	i_4
i_5	0.837	i_5/i_4	0.804	0.839	i_5
i_6	0.754	i_6/i_5	0.829	0.695	i_6
i_7	0.731	i_7/i_6	0.836	0.581	i_7
i_{Achse}	3.929				

Tabelle 4-2: Varianten des Durchschnittsgetriebes

Zur Feststellung der besseren Variante wird die Simulation des Durchschnittsfahrzeugs mit dem Durchschnitt aller einzelnen Simulationsergebnisse verglichen. Da bei dem Durchschnittsfahrzeug nun keine Messwerte vorhanden sind und es sich um ein 7-Gang DSG Getriebe handelt und somit keine Schaltpunkte im WLTC vorgegeben sind, wird als Schaltmodell das in PHEM integrierte Modell nach Formel (4-3) [27] und (4-4) [27] verwendet. Die Parameter A, B und C stammen aus Erfahrungswerten und wurden stichprobenmäßig beim Seat Leon überprüft, indem die simulierte und gemessene Drehzahl verglichen wurden (siehe Abbildung 4-5).

$$nn_{\text{up}} = A_{\text{up}} + B_{\text{up}} * v_{\text{norm}} + C_{\text{up}} * AP_{10} \quad (4-3) [27]$$

$$nn_{\text{down}} = A_{\text{down}} + B_{\text{down}} * v_{\text{norm}} + C_{\text{down}} * AP_{10} \quad (4-4) [27]$$

$nn_{\text{up/down}}$...normalisierte Drehzahl für Hoch-/Runterschalten (Normalisiert wird mit der Nenndrehzahl)

A/B/ $C_{\text{up/down}}$...PHEM Schaltparameter

v_{norm} ...normalisierte Geschwindigkeit (Normalisiert durch Division durch Maximalgeschwindigkeit)

AP_{10} ...gemittelte normalisierte Motorleistung -/+ 5 s (Normalisiert wird durch Division durch Nennleistung)

Coefficient	Gasoline	
	Downshift	Upshift
A	0.0426	.234
B	0.4246	-0.0148
C	0.08	.2173

Tabelle 4-3: Schalparameter PHEM [27]

Die simulierte Drehzahl passt bis auf wenige Ausnahmen sehr gut zur gemessenen (siehe Abbildung 4-4), auch die daraus simulierten Emissionswerte korrelieren gut (siehe Tabelle 4-4), weswegen das Schaltmodell mit den vorgegebenen Parametern verwendet wird.

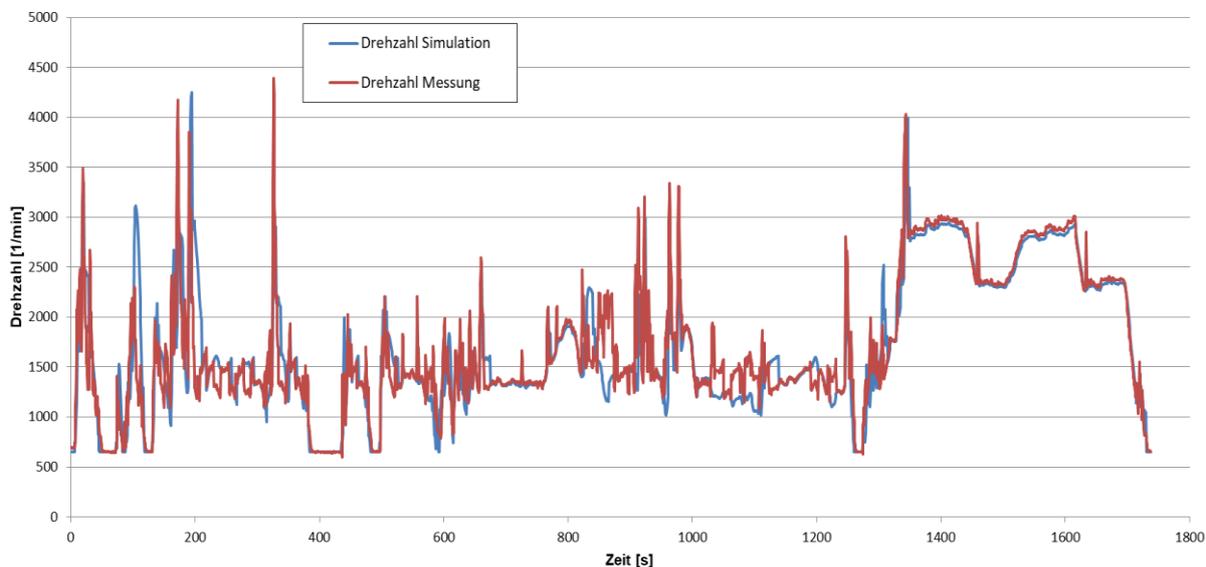


Abbildung 4-4: Vergleich gemessener und simulierter Drehzahl mit dem PHEM Schaltmodell beim WLTC eines Seat Leon

Cycle average results

EmComp	Unit	Meas	Sim	Diff	Delta
CO ₂	[g/h]	8391	8439	49	0.6%
NO _x	[g/h]	0.87	0.98	0.10	11.7%
CO	[g/h]	15.1	13.7	-1.4	-9.0%
PN	[1/h]	7.07E+13	7.05E+13	-2.49E+11	-0.4%

Tabelle 4-4: Vergleich Messung und Simulation mit PHEM Schaltmodell beim Seat Leon im WLTC

Das Durchschnittsfahrzeug wird nun mit den Fahrzeugwerten aus Kapitel 4.1.1, dem Kennfeld aus Kapitel 4.1.2 und dem oben bestätigten Schaltmodell einmal mit den Übersetzungen von Variante 1 und einmal mit den Übersetzungen von Variante 2 simuliert und anschließend die Ergebnisse mit der Mittelung aller einzelnen Fahrzeuge verglichen.

Variante 1

CO ₂	NO _x	CO	PN
[%]	[%]	[%]	[%]
-5.86%	-3.41%	-42.87%	0.20%

Variante 2

CO ₂	NO _x	CO	PN
[%]	[%]	[%]	[%]
-8.41%	3.94%	-46.51%	-12.36%

Tabelle 4-5: Vergleich Simulationsergebnis der Getriebevarianten

Laut Tabelle 4-5 erhält man mit Getriebevariante 1 das deutlich bessere Ergebnis. CO₂ Emissionen sind um ca. 3 % genauer, bei den Partikeln ist Variante 1 fast exakt richtig und um 12 % besser als Variante 2. Die große Differenz beider Varianten bei CO Emissionen ist eventuell durch den generell niedrigen CO Messwert, der nur ungefähr 25 % des zulässigen

Grenzwertes betrug, zu erklären.

Um nun auszuschließen, dass die gute Korrelation nur den integralen Wert betrifft und er eventuell Streuungen in beide Richtungen ausgleicht, wird der WLTC in seine einzelnen Phasen aufgebrochen und der sekundliche Verlauf verglichen.

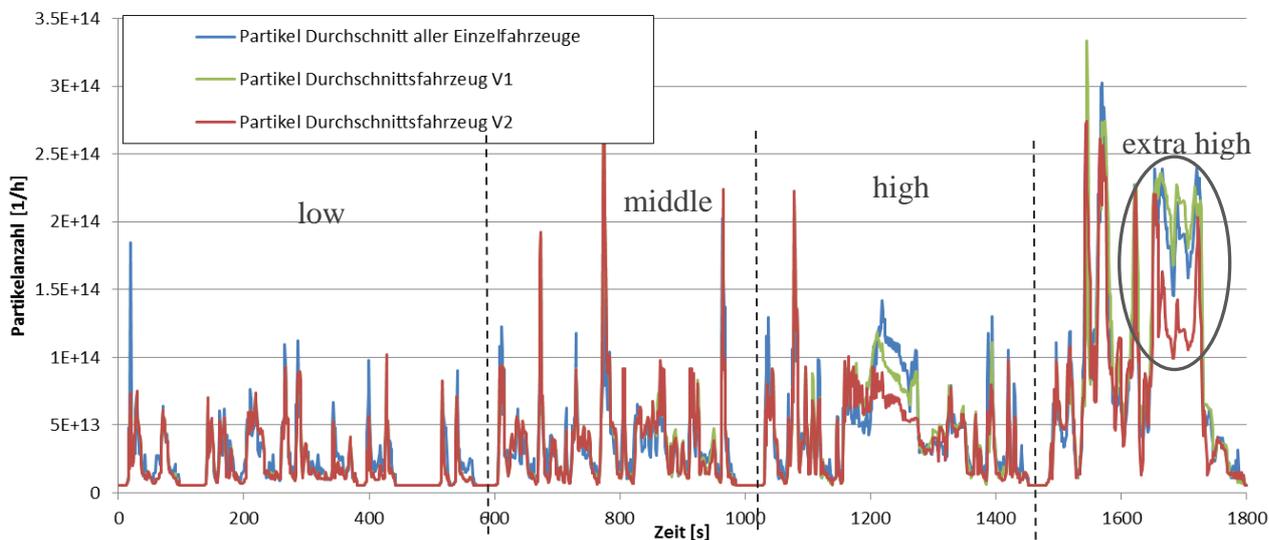


Abbildung 4-5: Partikelanzahl WLTC Verlauf

Durchschnittsfahrzeug V1					Durchschnittsfahrzeug V2				
	CO ₂ [g/h]	NO _x [g/h]	CO[g/h]	PN[1/h]		CO ₂ [g/h]	NO _x [g/h]	CO[g/h]	PN[1/h]
low	-8.0%	-11.5%	-37.9%	-14.4%	Low	-8.1%	-11.8%	-38.0%	-14.8%
middle	-5.7%	-9.3%	-23.8%	6.1%	middle	-6.4%	-14.3%	-25.5%	4.5%
high	-6.4%	5.8%	-13.1%	-2.4%	high	-9.7%	12.9%	-33.6%	-13.0%
extra high	-4.6%	-1.6%	-55.9%	4.8%	extra high	-8.6%	27.7%	-56.4%	-18.2%

Tabelle 4-6: Emissionswerte des Durchschnittsfahrzeugs im WLTC nach Phasen

Der Partikelverlauf in Abbildung 4-5 veranschaulicht den Ursprung der integralen Abweichung. Im „low“ und „middle“ Teil des Zyklus haben die Varianten sehr geringe Unterschiede, was aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten und somit niedrigen Gängen und den geringen Unterschieden der Varianten in diesem Bereich zu erwarten war. Im „high“ und „extra high“ Teil des WLTC's ist nun der Einfluss der Modifikationen des sechsten und siebten Gangs erkennbar. Bei Variante 2 sind diese Gänge länger übersetzt, was zu verringerten Emissionen führt. Der Unterscheid ist dann auch in Tabelle 4-6 im integralen Wert des „extra high“ Teils erkennbar.

Aufgrund dieser Analyse wird für weitere Berechnungen Variante 1 des Getriebes verwendet.

4.2 Vergleich mit anderen Durchschnittsfahrzeugen

Da das Durchschnittsfahrzeug dieser Arbeit nur aus einer geringen Anzahl an Fahrzeugen besteht, ist ein Vergleich mit anderen Durchschnittsfahrzeugen sinnvoll. Hierzu dient zum einen ein EU Durchschnittsfahrzeug, zum anderen ein PHEM Fahrzeug.

4.2.1 EU- Durchschnitt

Zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft und zur Verringerung der CO₂ Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen schreibt die Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union vor, dass alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union Informationen zu neu in ihrem Land zugelassenen Fahrzeugen aufzeichnen und an die Europäische Kommission übermitteln müssen. Im Detail heißt das, dass für jeden neu zugelassenen PKW Hersteller, Typprüfnummer, Typ, Variante, Version, Produktions- und Verkaufsname, spezifische CO₂ Emission, Fahrzeugmasse, Radstand, Spurweite, Hubraum und Kraftstoff an die EU übermittelt werden muss. Zusätzlich wird in der Datenbank noch die Motorleistung registriert.[31]

Mass [kg]				Power [kW]			
A_161b_Mass_by_FT				A_162b_KW_by_FT			
Ft	2013	2014	2015	Ft	2013	2014	2015
	1,418.5	1,596.4	1,309.9		76.3	129.8	67.4
Biodiesel	1,296.7	1,590.0	1,857.3	Biodiesel	84.3	147.0	90.3
Diesel	1,539.2	1,517.7	1,525.7	Diesel	97.2	98.8	100.4
Diesel-Electric	1,951.1	1,891.8	1,614.2	Diesel-Electric	143.6	137.5	99.9
E85	1,490.8	1,432.5	1,474.7	E85	113.4	111.1	113.7
Electric	1,459.6	1,509.3	1,589.4	Electric	50.9	54.0	76.5
Hydrogen	1,921.0	1,921.0	1,921.9	Hydrogen	53.0	53.0	58.0
LPG	1,197.9	1,213.5	1,214.7	LPG	65.4	66.6	67.6
NG-biomethane	1,275.2	1,290.2	1,292.0	NG-biomethane	63.6	66.7	70.3
OTHER			1,921.4	Petrol	80.1	82.0	83.0
Petrol	1,218.4	1,207.3	1,214.4	Petrol-Electric	73.3	83.4	99.0
PETROL-ELECTRIC	1,458.9	1,556.3	1,665.9				
Petrol-Gas		1,279.0					
All	1,390.05	1,375.46	1,381.38	All	85.06	90.80	98.35

Capacity [l]				CO ₂ emission [g/km]			
A_163b_CAP_by_FT				A_164b_CO2_by_FT			
Ft	2013	2014	2015	Ft	2013	2014	2015
	1,619	2,319	1,676		123	110	84
Biodiesel	1,720	1,835	1,780	Biodiesel	122	147	158
Diesel	1,819	1,813	1,811	Diesel	127	123	119
Diesel-Electric	2,350	2,265	1,982	Diesel-Electric	54	69	76
E85	1,658	1,633	1,771	E85	155	144	145
Electric	1	859		Electric	0	0	-
LPG	1,331	1,328	1,329	Hydrogen			
NG-biomethane	1,137	1,167	1,182	LPG	121	120	122
Petrol	1,386	1,366	1,358	NG-biomethane	101	98	100
PETROL-ELECTRIC	1,687	1,764	1,725	Petrol	128	126	123
Petrol-Gas		998		PETROL-ELECTRIC	70	67	56
				Petrol-Gas		114	
All	1,012.25	1,429.96	957.93	All	101.57	97.67	89.09

Tabelle 4-7: EU Durchschnitt Neuzulassungen [32]

Es ist ersichtlich, dass die Masse im Verlauf der betrachteten 3 Jahre etwa konstant bleibt, der Hubraum geringfügig sinkt, was auf das „Downsizing“ der Ottomotoren zurückzuführen ist, und die Leistung bei sinkendem Verbrauch steigt. Aus Tabelle 4-7 wird nun der 2015 PKW mit Ottomotor zum Vergleich herangezogen. Der EU Durchschnittsbenziner ist demnach ein 1214.4 kg schwerer 1.36 Liter Fahrzeug mit 83 kW Leistung bei einem CO₂ Ausstoß von 123 g/km.

	Durchschnittsfahrzeug	EU-Durchschnitt	Delta
Masse [kg]	1216	1214	0.2%
Leistung [kW]	72.8	83	-12.3%
CO ₂ [g/km]	117	123	-5.1%
Hubraum [l]	1.22	1.36	-10.3%

Tabelle 4-8: Vergleich Durchschnittsfahrzeug Euro 6 zum EU- Durchschnitt

Masse: Das Durchschnittsfahrzeug dieser Diplomarbeit ist wie in Kapitel 4.1.1 etwas schwerer, da das Fahrzeuggewicht des EU Fahrzeugs noch auf der NEDC Bezugsmasse basiert. Diese beinhaltet zwar seit 2003 zusätzlich zum Leergewicht einen Fahrer und pauschal 25 kg Zuladung, etwaige Extras sind dabei aber nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie die im WLTP vorgeschriebene Zuladung laut Formel (4-5).

$$\text{Zuladung} = 0.15 * (\text{zulässiges Gesamtgewicht} - (\text{Fahrzeuggewicht} + 25 \text{ kg pauschal} + 25 \text{ kg Extras})) \quad (4-5)[33]$$

Laut dem International Council on clean Transportation hat das EU- Durchschnittsfahrzeug von 2015 eine zulässige Zuladung von 528 kg [34]. Da hier alle Fahrzeuge mit einfließen und ein kleiner Benziner tendenziell weniger zulässiges Gesamtgewicht hat (z.B. Toyota Yaris 395 kg), ergibt sich eine mit Formel (4-5) und einer zulässigen Zuladung von 450 kg eine Zuladung im WLTP von 67.5 kg. Addiert man hierzu das Gewicht der Extras von 25 kg erhält man eine Differenz von 92.5 kg zwischen NEDC und WLTC Bezugsmasse. Diese Differenz entspricht ziemlich genau dem Unterschied zwischen dem Durchschnittsfahrzeug und dem EU Durchschnitt in Tabelle 4-8.

Leistung/Hubraum: Der geringere Hubraum resultiert aus der Auswahl der Fahrzeuge. Für diese Arbeit wurden hauptsächlich kleine Motoren („Downsizing“) ausgewählt. Aufgrund des geringeren Hubraums ist die durchschnittliche Leistung dementsprechend geringer.

CO₂ Emission: Aufgrund der geringeren Leistung und umgerechnet ähnlicher Masse wäre ein geringerer Verbrauch zu erwarten. Der EU- Durchschnitt wird als spezifische Emission des NEDC angegeben und in dieser Arbeit wurde zur Kennfelderstellung der deutlich dynamischere WLTC verwendet. Wird das Durchschnittsfahrzeug mit reduzierter Masse, reduziertem Rollwiderstand (ca. 20 % niedriger als im WLTC aufgrund höheres Reifendrucks und geringerer Masse), reduziertem Luftwiderstand (ca. 5 % niedriger als im WLTC aufgrund geringeren cw-Wertes, durch unterschiedliche Messvorschriften, z.B. durch abgeklebte Spalte) und ausgeschalteten Nebenaggregaten (Lichtmaschine im NEDC i.A. im Leerlauf, Klima und Radio sind ausgeschaltet) im NEDC simuliert, ergibt sich ein CO₂ Ausstoß von 117 g/km, also deutlich unter dem EU Durchschnitt.

4.2.2 PHEM Euro 6

An der TU Graz wird das Programm PHEM seit 1998 entwickelt und Daten in standardisierter Form in der ERMES Datenbank gesammelt. Dazu kann PHEM nahezu alle Messdatenquellen nutzen, daher gibt es eine große Datengrundlage (>1000 PKW). Für jede Emissionsschicht kann so ein Durchschnittsfahrzeug erstellt werden, in dem alle Fahrzeuge einer Emissionsschicht zusammengefasst sind.[35]

The screenshot shows a software interface for configuring vehicle parameters. The sections and their values are as follows:

- Mass:** Mass [1200] [kg], Loading [50] [kg], Red. Mass Wheels [40.06] [kg], Wheel diameter (dyn) [0.607] [m], Drag coefficient [0.3] [-], Cross sectional area [2.14] [m²].
- Rolling resistance factors:** Fr 0 [0.009] [-], Fr 1 [5E-05] [s/m], Fr 2 [0] [s/m]², Fr 3 [0] [s/m]³, Fr 4 [1.6E-09] [s/m]⁴.
- Engine:** Rated engine power [84] [kW], Rated engine speed [5247] [rpm], Idling engine speed [706] [rpm], Inertia [0.473] [kgm²].
- Gear shift parameters:** Heavy Duty (Fast: 0.73, Eco: 0.45), Light Duty / Passenger Car (Down: A: 0.18, B: 0.28, C: 0.46; Up: 0.3, 0.3, 0.4). Share mixed [1] [-].
- Cross Wind Correction:** No Correction.
- Auxiliaries:** Table with columns ID, Type, Input File.
- Retarder:** Type [None], Ratio [0] [-].
- Transmission:** Inertia [0.05848] [kgm²], Traction Interruption [0] [s]. Efficiency Map table:

Gear	Ratio	Efficiency Map
A	3.876	
01	3.672	
02	1.991	
03	1.334	
04	0.988	
05	0.789	
06	0	
07	0	
08	0	
09	0	
10	0	
11	0	
- Loss factor:** [0.3] [-] (Transmission Loss Model only).

Abbildung 4-6: PHEM Euro 6 Passenger Car Benziner

Der PHEM Euro 6 Benziner ist dem Durchschnittsfahrzeug dieser Arbeit sehr ähnlich, Masse und Widerstandskoeffizienten sind fast identisch. Die Leistung des PHEM Fahrzeugs ist mit 84 kW allerdings etwas höher. Der größte Unterschied ist allerdings das Getriebe. Das PHEM Fahrzeug ist als fünf Gang Handschalter konzipiert, das Durchschnittsfahrzeug als sieben Gang Doppelkupplungsgetriebe. Das PHEM EURO 6 Benzinfahrzeug wurde bereits im Jahr 2012 für das HBEFA Version 3.2 erarbeitet (www.hbefa.net). Zu diesem Zeitpunkt war erst ein entsprechender PKW gemessen, so dass es sich um eine Technologieabschätzung handelt.

Die CO₂ Kennfelder sind in Abbildung 4-7 verglichen. Hier sind ebenfalls bereits deutliche Unterschiede zu erkennen. Der Unterschied im negativen CO₂ Bereich ist zu vernachlässigen, da hier durch die Schleppkurve eine natürliche Begrenzung besteht und negative CO₂ Werte nur ein theoretisches Phänomen zur Leistungsberechnung im Schleppbereich sind, aber als Messwert natürlich nie auftreten können.

Zum Vergleich eines Teillastpunktes (z.B. 2000 rpm/ 5 bar Mitteldruck) rechnet man die Werte anhand Formel (4-6) in eine Leistung des Durchschnittsfahrzeugs von ca. 10 kW bei 2000 Umdrehungen pro Minute um. Normiert ergibt das laut Formel (4-6) einen Lastpunkt von (P=0.14/ n=0.4).

$$p_{me} = \frac{4\pi * M}{V_h} = \frac{1.2 * 10^3 * P_e}{n * V_h} \quad (4-6)$$

mit: p_{me} ...Effektiver Mitteldruck [bar]

M...Motormoment [Nm]

V_h ...Hubvolumen [l]

P_e ...effektive Leistung [kW]

n...Drehzahl [1/min]

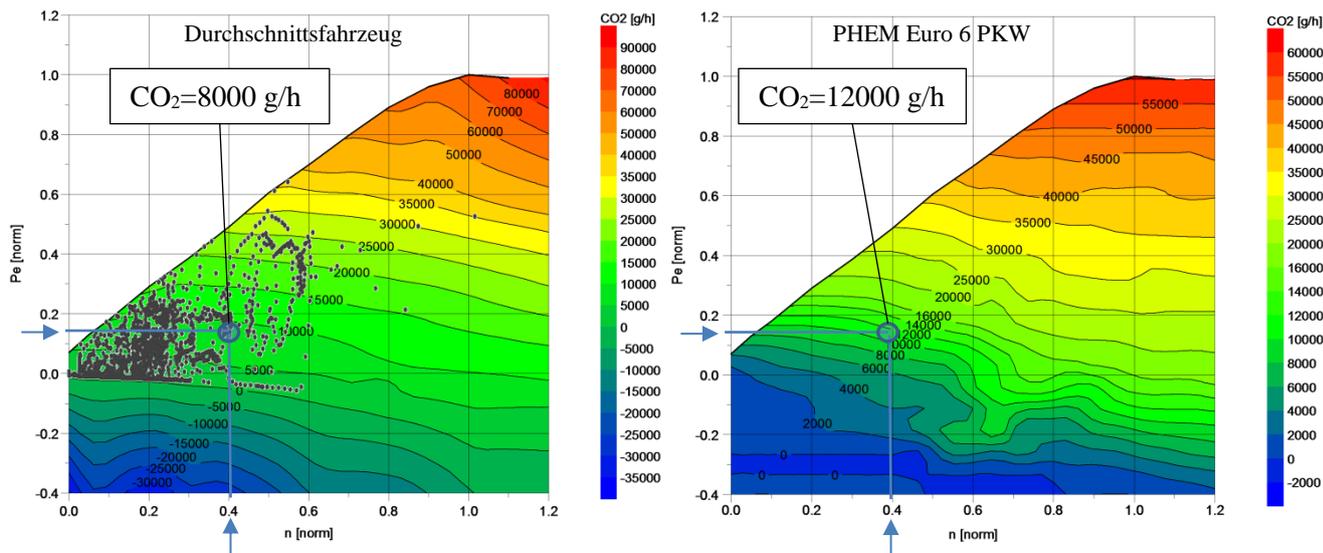


Abbildung 4-7: Vergleich CO₂ Kennfeld Durchschnittsfahrzeug (links) und PHEM Euro 6 Benziner (rechts)

Die Emissionen bei sehr hohen Drehzahlen und hoher Last hingegen sind beim Durchschnittsfahrzeug wieder höher, da diese Lastbereiche bei den meisten Testzyklen nur sehr spärlich abgedeckt sind, fällt dieser Unterschied weniger ins Gewicht. Um das zu verdeutlichen sind die Lastpunkte eines WLTC beim CO₂ Kennfeld des Durchschnittsfahrzeugs eingetragen, der relevante Bereich liegt unter 0.6 Normleistung sowie unter 0.6 Normdrehzahl.

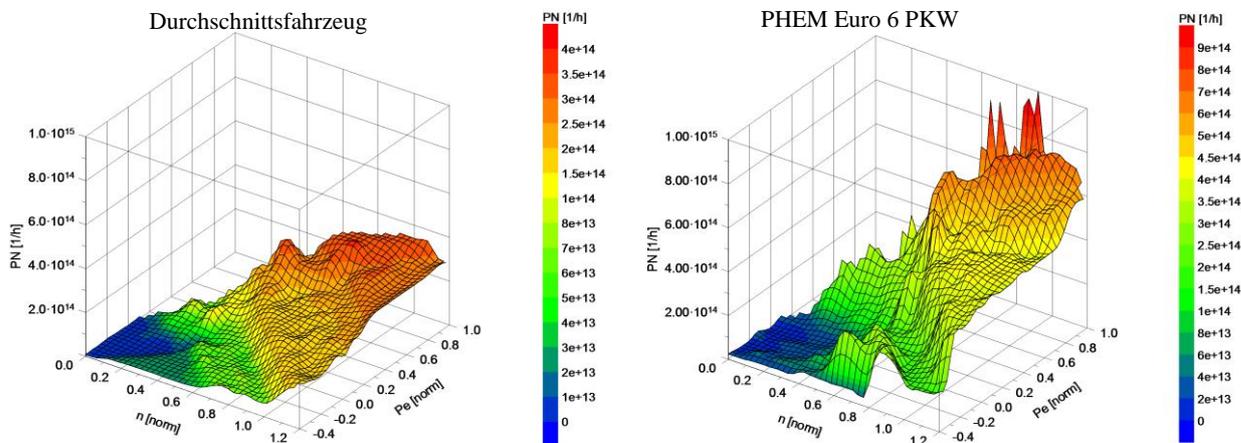


Abbildung 4-8: Vergleich Partikelanzahl Kennfeld Durchschnittsfahrzeug (links) und PHEM Euro 6 PKW (rechts)

Die Partikelkennfelder zeigen sowohl im Teillast- als auch im Vollastbereich Unterschiede. Der PHEM Euro 6 Benziner neigt in allen Lastbereichen zu deutlich mehr Partikelemissionen.

Die Fahrzeugwerte des PHEM Euro 6 Benziners stammen laut HBEFA Bericht [36] von den Durchschnittswerten der in der EU zugelassenen Fahrzeuge, also ist die Fahrzeugspezifikation sehr ähnlich wie in Kapitel 4.2.1. Das Emissionskennfeld des PHEM Euro 6 Benziners stammt von Rollenprüfstandsmessungen der TU Graz, den Durchschnitt bildet laut Tabelle 4-9 allerdings nur ein vermessenes Fahrzeug. Die großen Unterschiede sind daher durch

fehlende Messungen zu erklären, das PHEM Euro 6 Fahrzeug könnte aber mit den Messungen dieser Arbeit bestückt werden um dahingehend eine Verbesserung zu erzielen.

Labora- tory	EURO 5 petrol		EURO 5 diesel		EURO 6 petrol		EURO 6 diesel	
	bag data	modal data	bag data	modal data	bag data	modal data	bag data	modal data
ADAC	1		3				1	
TUG	8	8	15	15	1		5	5
EMPA	11	10	12	12				
TNO			16				13(*)	
JRC	11		4					
LAT	4		2					
Total	31	18	50	27	1	0	19	5

Tabelle 4-9: Verfügbare Messungen zur Kennfelderstellung von PHEM Durchschnittsfahrzeugen für HBEFA 3.2

4.2.3 HBEFA Zyklen

HBEFA, das Handbuch der Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr, ermöglicht Berechnungen von Schadstoffbelastungen des Straßenverkehrs. Dazu werden wie in Abbildung 4-1 gezeigt für jede Emissionsschicht Emissionsfaktoren ermittelt. Zur Ermittlung dieser Faktoren benötigt man sowohl Durchschnittsfahrzeuge und Kennfelder als auch verschiedene Fahrsituationen. Die 257 HBEFA Zyklen für PKW decken eine Vielzahl an Fahrsituationen mit verschiedensten Geschwindigkeitsbereichen (10-130 km/h) und Steigungen (+-6 %, +-4 %, +-2 %, 0 %) ab. Jeder dieser Zyklen wird mit PHEM berechnet und aus den Ergebnissen setzt sich über die Gewichtungsfaktoren jedes einzelnen Zyklus ein Gesamtemissionsfaktor jeder Emissionsschicht zusammen.

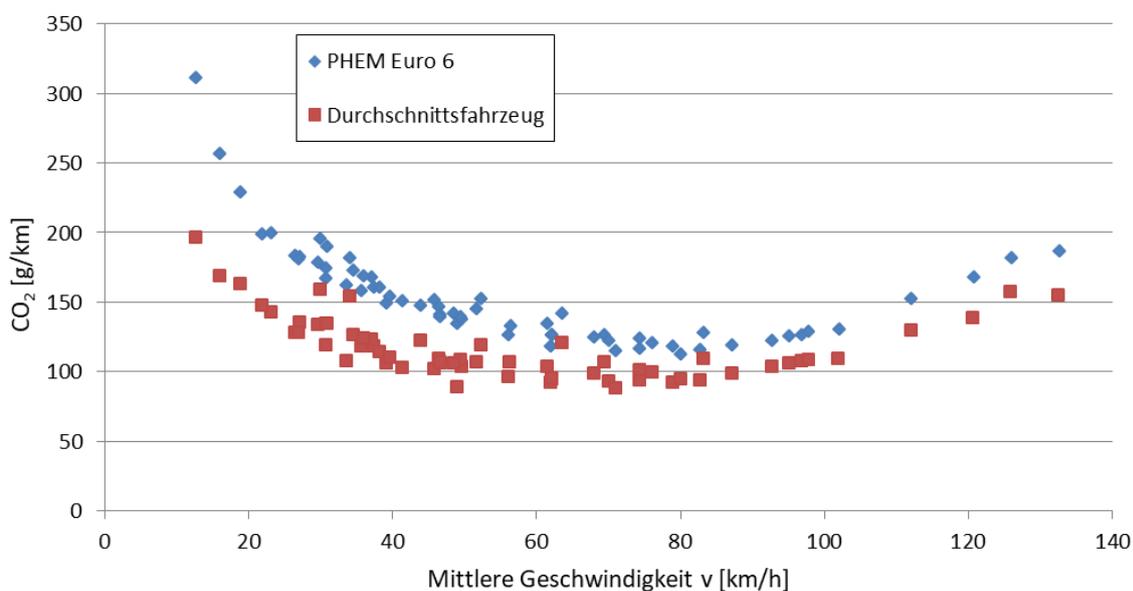


Abbildung 4-9: Emissionsfaktoren HBEFA bei 0 % Steigung

Wie bereits in den Kennfeldern zu erkennen war, zeigen sich deutliche Unterschiede der CO₂ Emissionen. Dieser Unterschied ist bei langsamen Zyklen und somit in der Teillast noch größer. Die Emissionsfaktoren des PHEM Euro 6 Fahrzeugs liegen aber immer höher als die des Durchschnittsfahrzeugs. Auch nach Gewichtung anhand der Faktoren ergeben sich unterschiedliche Emissionsfaktoren. Der PHEM Euro 6 PKW stößt deutlich mehr CO₂, CO und Partikel aus, einzig die NO_x Emissionen sind niedriger.

	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	Partikel [1/km]
Durchschnittsfahrzeug	124.18	0.04	0.27	9.68E+11
PHEM Euro 6	157.04	0.02	0.54	1.43E+12
Delta	26.46%	-41.38%	97.11%	47.98%

Tabelle 4-10: Emissionsfaktoren nach Gewichtung der HBEFA Zyklen

4.2.4 Vergleich mit dem generischem CO₂ Kennfeld

Rückwirkend kann man nun auch das entstandene CO₂ Durchschnittskennfeld mit dem ursprünglichen generischen Kennfeld vergleichen, um die Auswirkungen der Kalibrierung zu erkennen, die bei jedem Testfahrzeug gemacht wurde. Dazu wird ein Differenzkennfeld erzeugt, das die prozentuelle Abweichung anzeigt.

Auffällig ist der Bereich entlang der Schleppkurve mit den größten Abweichungen. Das ist aber aufgrund der sehr geringen Werte in diesem Bereich (keine Einspritzung → keine Emissionen) durchaus nachvollziehbar. Der interessante Lastbereich des Kennfelds ($P_e < 0.6$, $n < 0.6$) weist geringe Abweichungen von meist unter fünf Prozent auf und je näher man sich den niedrigen Lasten bzw. der Schleppkurve nähert, desto stärker werden die Unterschiede. Die Bereiche unterhalb der Schlepp- bzw. oberhalb der Volllastkurve resultieren aus der Extrapolation der Kalibrierfunktion und sind zu vernachlässigen, da sie sich nicht auf Messwerte stützen. Da bei der Kennfeldkalibrierung mit gemessenen Zyklen auch Unsicherheiten bezüglich des Leistungsbedarfes der Nebenaggregate und der Verluste in Achse und Getriebe in die Kalibrierfunktion einfließen, könnten die hohen prozentuellen Abweichungen bei niedrigen Lasten zumindest zum Teil auch auf diese Effekte zurückzuführen sein. Speziell die Nebenaggregate haben bei niedrigerem Leistungsbedarf zur Bewegung des Kfz einen relativ hohen Anteil am momentanen Verbrauch.

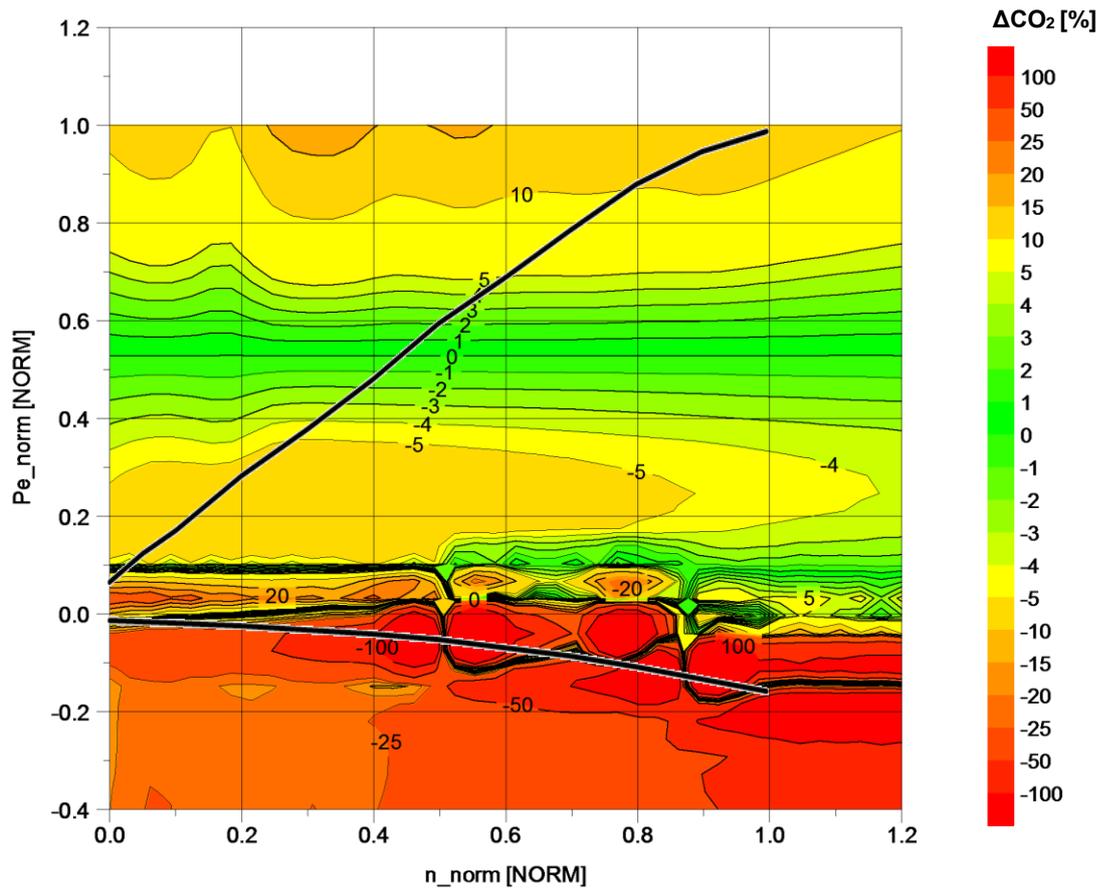


Abbildung 4-10: Kennfeld zur Abweichung der CO₂ Emissionen des kalibrierten Durchschnittsfahrzeuges vom generischen Kennfeld

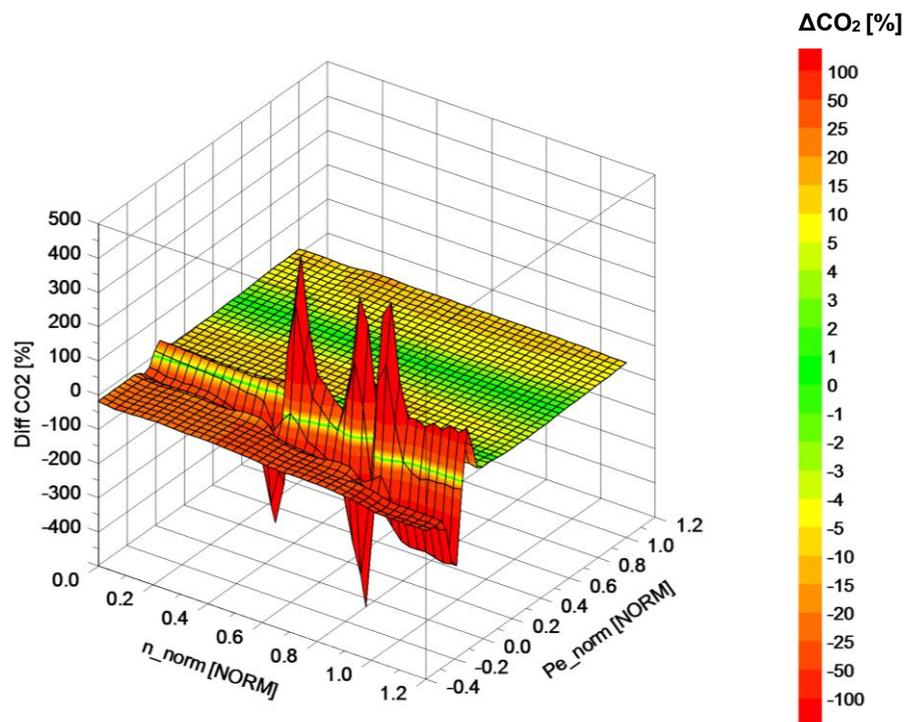


Abbildung 4-11: 3D Kennfeld zur Abweichung der CO₂ Emissionen des kalibrierten Durchschnittsfahrzeuges vom generischen Kennfeld

5 Emissionsmessung Hybridfahrzeug

Um die Emissionen von PKW mit direkteinspritzenden Ottomotoren genauer zu untersuchen, wurde ein Versuchsfahrzeug an der TU Graz vermessen. Die Fahrzeugwahl wurde gemeinsam mit einem Masterstudenten, Herrn Lukas Schreiber, getroffen, da er in seiner Arbeit die Simulation und Messung von Emissionen bei Hybridfahrzeugen behandelt.

5.1 Fahrzeugbeschreibung

Bei dem für die messtechnische Untersuchung verwendeten Fahrzeug handelt es sich um einen Audi A3 Sportback e-tron mit Hybridantrieb. Der Plug-In-Hybrid verbindet einen 75 kW Elektromotor mit einem 1.4 Liter 110 kW Ottomotor.

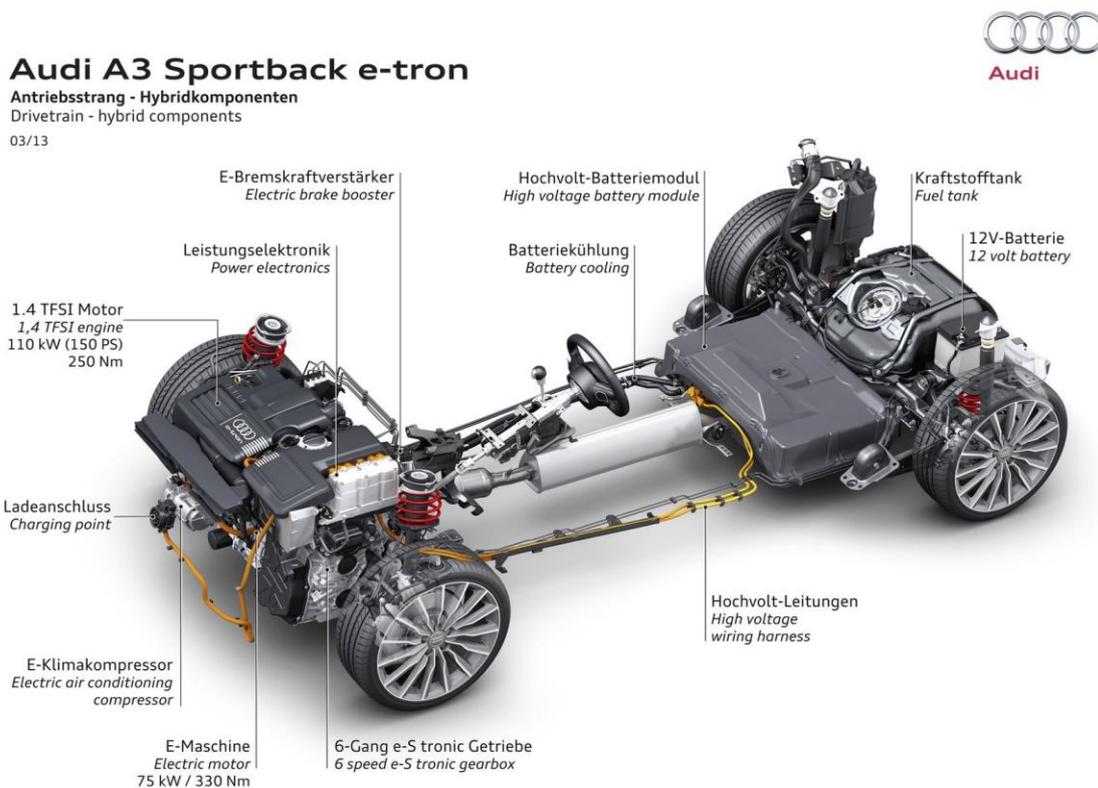


Abbildung 5-1: Audi A3 Sportback e-tron Aufbau [37]

Je nach Modus lässt sich somit rein elektrisch (EV), Batterieladung nutzend, Batterieladung erhaltend oder Batterie ladend fahren. Um den Einfluss des Verbrennungsmotors auch emissionstechnisch besser zu erfassen wurde meistens der „Battery Hold“ Modus verwendet, der die Batterieladung erhält und den Elektromotor nur situationsbedingt zum Beschleunigen, zur Lastpunktverschiebung und zum Rekuperieren einsetzt. Dieser Modus ist ebenfalls in der Testprozedur des WLTP für Hybridfahrzeuge vorgeschrieben.[15]

Die relevanten Fahrzeugdaten sind dem Typenschein in Abbildung 5-2 zu entnehmen.

A7	Nationaler Code	208176		
J	Klasse / Fahrzeugart	M1/Personenkraftwagen		
D1	Marke	Audi		
D3	Handelsbezeichnung	A3 Sportback e-tron		
D2	Type/Variante/Version	8V/SCUKBF1/FD6DD001P8V237MMEM0		
A8	Aufbau	Schräghecklimousine		
R	Farbe	Grau	A16 Beg Plakette	weiß
G	Eigengewicht	1598 kg	S1/S2 Sitz-/Stehplätze	5/-
F1	Techn. zul. Gesamtmasse	2050 kg	N höchste	1 1065 kg
F2	Höchste(s) zulässige(s)	Gesamtgewicht	N zulässige Achslasten	2 1050 kg
A10		Nutzlast		3
A12		Stütz-/Sattelast		4
O1		Anhängelast geb.		1400 kg
P5	Motor type	CUK		
P3	Antriebsart	Hybr. Benzin/E		
T	Höchstgeschw.	222 km/h	P1 Hubraum	1395 ccm
P2	Leistung	110 kW	P4 bei Drehzahl	5000 min ⁻¹
Q	Leistung/Gewicht		U3 Fahrgeräusch	73 dBA
U1	Standgeräusch	76 dBA	U2 bei Drehzahl	3750 min ⁻¹
V9	Abgasklasse/-verhalten nach	Euro 6/136/2014W		
V1	CO	0,0554	V3 NOx	0,0095
V2	HC	0,0085	V4 HC+NOx	
V6	Korr. Absorptionskoeff.		V5 Partikel	
V8	Kraftstoffverbrauch gesamt	1,7 l/100 km	V7 CO ₂	39 g/km

Abbildung 5-2: Typenschein des Audi A3 e-tron

5.2 Ausrollversuch

Um die Fahrwiderstände des Versuchsfahrzeuges auf der PKW Rolle richtig nachzubilden, wurden sogenannte Ausrollversuche mit dem Fahrzeug durchgeführt. Diese dienen dazu, die fahrzeugspezifischen Widerstände aus Kapitel 3.1.1 zu ermitteln. Dazu wird das Fahrzeug auf einer ebenen Strecke (0 % Steigung) bei Windstille auf 120 km/h beschleunigt, dann ausgekuppelt und in neutraler Stellung des Getriebes ausgerollt. Der Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit wird dabei aufgezeichnet (1Hz) und über die Formel (5-1) wird die sekundliche Beschleunigung ermittelt.

$$a = \frac{\Delta_v}{\Delta_t} \quad (5-1)$$

Mit: a...Beschleunigung [m/s²]

Δ_v ...sekundliche Geschwindigkeitsänderung [m/s]

Δ_t ...1 Sekunde bei 1 Hz Aufzeichnungsrate [s]

Die Trägheitskraft des Fahrzeugs muss aufgrund des Kräftegleichgewichts nun genauso groß sein wie der Luft- und Rollwiderstand. Dazu müssen allerdings die rotatorischen Trägheiten korrekt betrachtet werden. Multipliziert man die Fahrzeugmasse nun mit der sekundlichen Beschleunigung, erhält man den Verlauf der Widerstandskräfte (Luft- und Rollwiderstand).

$$F_{Widerstand} = (m_{Fahrzeug} + m_{Beladung} + m_{rotatorisch}) * a \text{ [N]} \quad (5-2)[5]$$

Mit: $m_{Fahrzeug/Beladung}$...Masse des Fahrzeugs/der Zuladung [kg]

$m_{rotatorisch}$...äquivalente Masse der rotierenden Teile [kg]

a ...Fahrzeugbeschleunigung [m/s^2]

Die Fahrzeugmasse und Beladung wird vor dem Versuch gewogen (1855 kg mit 2 Fahrern und Messequipment), die rotatorischen Massen werden aus Erfahrungswerten bestimmt.

Der berechnete Widerstandsverlauf lässt sich nun durch ein Polynom 2ter Ordnung annähern, das durch die drei Widerstandsbeiwerte R_0 , R_1 und R_2 bestimmt ist.

$$F_{Widerstand} = R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 \text{ [N]} \quad (5-3)[5]$$

Mit: $R_{0/1/2}$...Widerstandsbeiwerte des Ausrollversuchs [N]/[Ns/m]/[Ns²/m²]

v ...Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

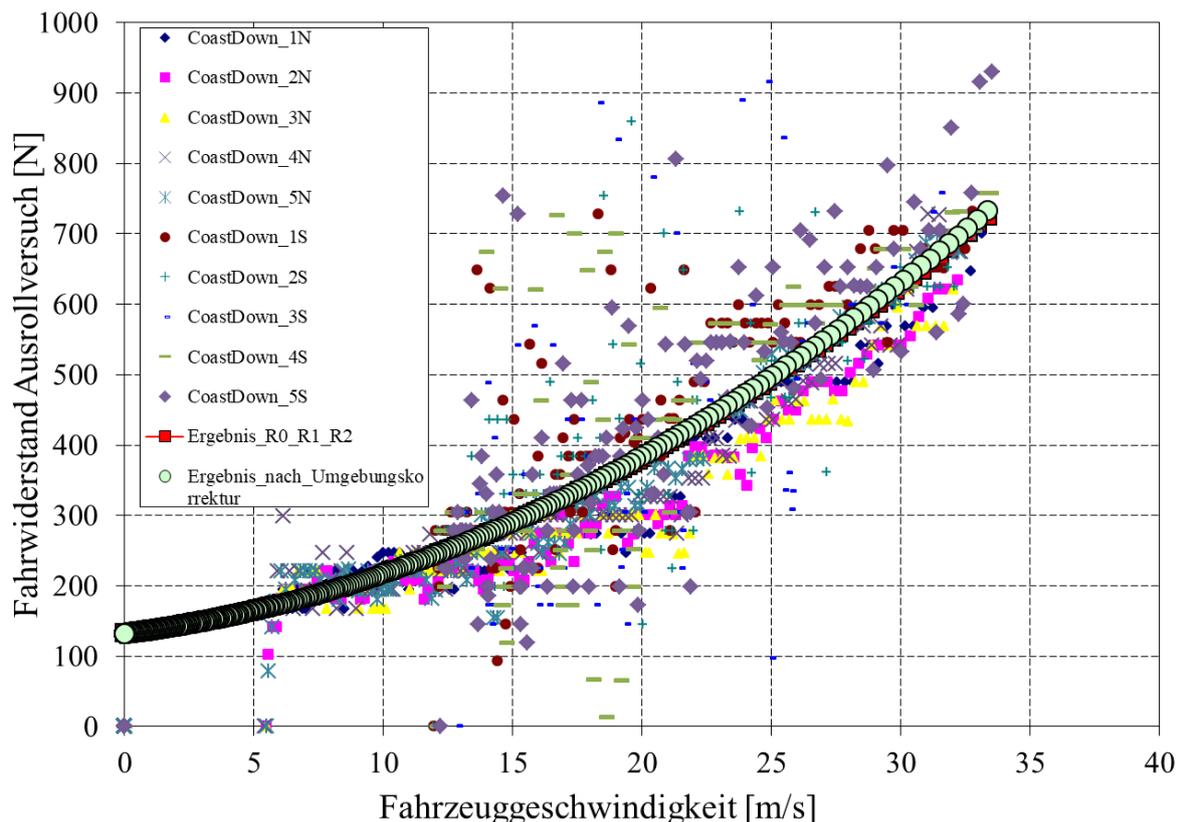


Abbildung 5-3: Ergebnisse Ausrollversuche am Audi A3 e-tron

Der Ausrollversuch wurde in beide Richtungen der Wegstrecke mehrmals wiederholt und am Ende eine Mittelung durchgeführt, um Einflüsse der Steigung zu korrigieren. Die Umgebungskorrektur erfolgt über Korrekturfaktoren, die aus der Abweichung der Normbedingungen (20 °C Temperatur und 1000 mbar Luftdruck) bestimmt werden, da die

Temperatur den Rollwiderstand und der Luftdruck den Luftwiderstand beeinflusst.[5]

Wie in Abbildung 5-3 ersichtlich streuen die Ergebnisse der Ausrollversuche allerdings deutlich. Dies kann an schlechten Messbedingungen liegen (viel Wind, schnell wechselnde Bedingungen, hohes Verkehrsaufkommen → Luftverwirbelungen). Zusätzlich konnte der Ausrollversuch in Richtung „Süden“ nicht vollständig gefahren werden, da die Strecke zu kurz war, und musste somit bei 40 km/h beendet werden.

5.3 Prüfstandsmessungen

Nach der Vorbereitung wurde das Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand der TU Graz montiert und vermessen. Im Folgenden werden der Versuchsaufbau sowie das Messprogramm beschrieben.

5.3.1 Prüfstandsaufbau

In Abbildung 5-4 ist das Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand dargestellt.

Der Prüfstand der TU Graz ist ein Zweirollenprüfstand für Fahrzeuge mit nur einer angetriebenen Achse. Die angetriebene Achse (Vorderachse) wird zwischen der mit einem Elektromotor gebremsten (1) und einer ungebremsten Rolle (2) positioniert und die nicht angetriebene Achse (Hinterachse) wird fixiert (3). Die Fahrzeugmasse wird durch adaptierbare Schwungmassen äquivalent simuliert. Die Bremskraft der gebremsten (bzw. angetriebenen) Rolle wird über eine Kraftmessdose gemessen. Über ein Gebläse (4) wird der Fahrtwind entsprechend der aktuellen Geschwindigkeit simuliert. Das Fahrerleitsystem (5) dient dem Testfahrer als Vorgabe des Geschwindigkeitsverlaufs und des dazugehörigen Toleranzbandes des Zyklus sowie den Schaltpunkten. Ebenfalls ist der Fahrer über Funk mit der Kontrollwarte (6) verbunden. Von hier aus wird die Rolle gesteuert sowie alle Messdaten mit dem Programm Tornado aufgezeichnet. Die Emissionsmesssysteme FTIR (7) und der Eingang zum CVS Tunnel (8) werden später beschrieben. Auch das bereits im Auto montierte mobile PEMS System wird später beschrieben.

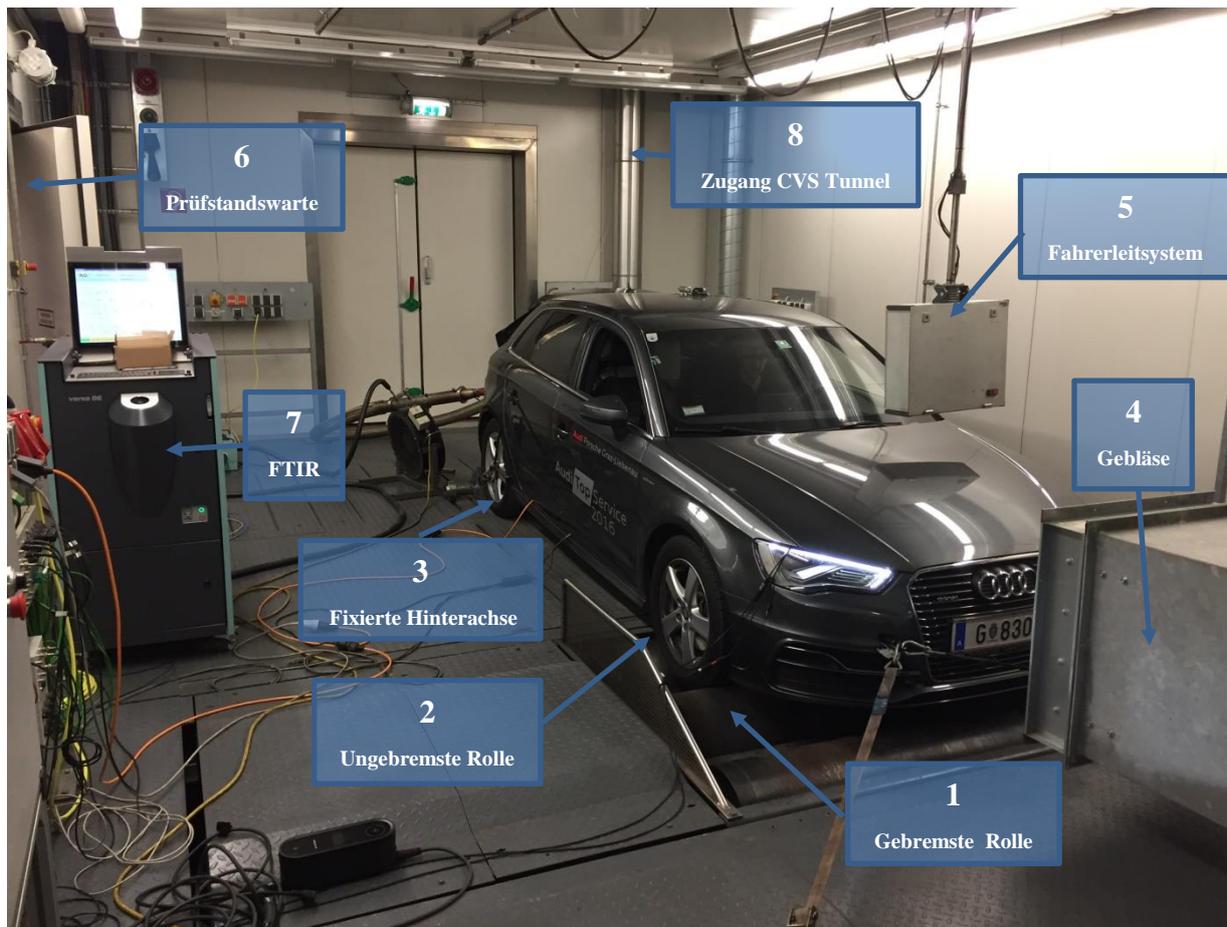


Abbildung 5-4: Audi A3 e-tron auf dem Rollenprüfstand der TU Graz

Zusätzlich zu den Emissionswerten ist es möglich über die CAN-Bus (Controller Area Network Datenverarbeitung) Diagnose Anschluss des Fahrzeugs Daten des Motorsteuergeräts auszulesen. Besonders wichtig ist das für das Auslesen der Motordrehzahl, aber auch Fahrzeuggeschwindigkeit, Batteriestrom oder Ladezustand können wichtige Daten sein. Zu Bedenken ist jedoch, dass die Auflösung, mit der die Daten erfasst werden können mit jeder weiteren Messgröße halbiert wird.

Zur Kontrolle der Regelstrategie des Elektromotors werden zusätzlich die Spannung und der Ladestrom der Hochvoltbatterie gemessen. Diese werden nicht direkt an der Batterie abgegriffen, da diese im hinteren Unterboden schwer zu erreichen ist (siehe Abbildung 5-1), sondern im Motorraum direkt am Elektromotor. Die Spannung wird mit einem Voltmeter (9) gemessen, der Strom mit einer Strommesszange (10), die über den Leiter geschlossen wird.



Abbildung 5-5: Messaufbau am Elektromotor

5.3.2 Einstellen des Prüfstands- „Loss-run“

Um die Bedingungen auf der Straße möglichst genau am Prüfstand abzubilden, müssen die ermittelten Widerstandswerte aus 5.2 möglichst genau abgebildet werden. Die Widerstandswerte der Bremse einfach vorzugeben wäre allerdings nicht korrekt, da die Rolle selbst auch schon Reibungsverluste erzeugt und ein Teil des ermittelten Rollwiderstandes auf der Rolle ebenfalls auftritt. Auch Verluste im Antriebsstrang treten sowohl beim Ausrollversuch als auch am Rollenprüfstand auf.

Daher muss der Prozess des Ausrollversuchs auf der Straße analog am Prüfstand durchgeführt werden. Wichtig ist wieder ein betriebswarmer Zustand, weswegen das Fahrzeug zuvor 20 min bei 80 km/h eingefahren wird. Danach wird das Fahrzeug im ausgekuppelten Zustand von der Rolle auf 120 km/h geschleppt (jedoch mit Fahrer) und dann wieder die modale Beschleunigung aus der gemessenen Geschwindigkeit ermittelt. Die Trägheitskräfte von Rolle und Schwungmasse sowie rotierende Massen des PKW müssen demnach wieder gleich den auftretenden Widerstandskräften sein.

Das daraus resultierende Widerstandspolynom ist das bereits am Prüfstand auftretende und muss nicht noch zusätzlich durch die Gleichstrommaschine erzeugt werden.

Das resultierende Fahrwiderstandspolynom wird dementsprechend aus der Differenz der beiden Polynome gebildet:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Rolle-soll}} &= R_0 + R_1 * v + R_2 * v^2 \text{ [N]} \\
 -F_{\text{Eigenverluste}} &= L_0 + L_1 * v + L_2 * v^2 \text{ [N]} \\
 \hline
 = F_{\text{Bremse}} &= (R_0 - L_0) + (R_1 - L_1) * v + (R_2 - L_2) * v^2 \text{ [N]} \quad (5-4)[5]
 \end{aligned}$$

Mit: $F_{\text{Rolle-soll}}$... Sollwiderstandskraft der Rolle aus dem Ausrollversuch [N]

$R_{0/1/2}$... Widerstandsbeiwerte aus dem Ausrollversuch [N]/[Ns/m]/[Ns²/m²]

$F_{\text{Eigenverluste}}$... Eigenwiderstandskraft des Rollenprüfstandes [N]

$L_{0/1/2}$... Widerstandsbeiwerte aus dem Loss-run [N]/[Ns/m]/[Ns²/m²]

F_{Brems} ... Zusätzliche Bremskraft durch den Elektromotor [N]

Der Loss-run wird zur Überprüfung der Stabilität der Werte mindestens zweimal durchgeführt, so wie der danach zur Kontrolle durchgeführte „Coast-down“. Dabei werden die eingestellten Widerstandsbeiwerte überprüft, indem bei eingeschalteter Gleichstrommaschine ein Ausrollversuch durchgeführt wird und der Geschwindigkeitsverlauf mit dem beim Ausrollversuch gemessen verglichen wird.

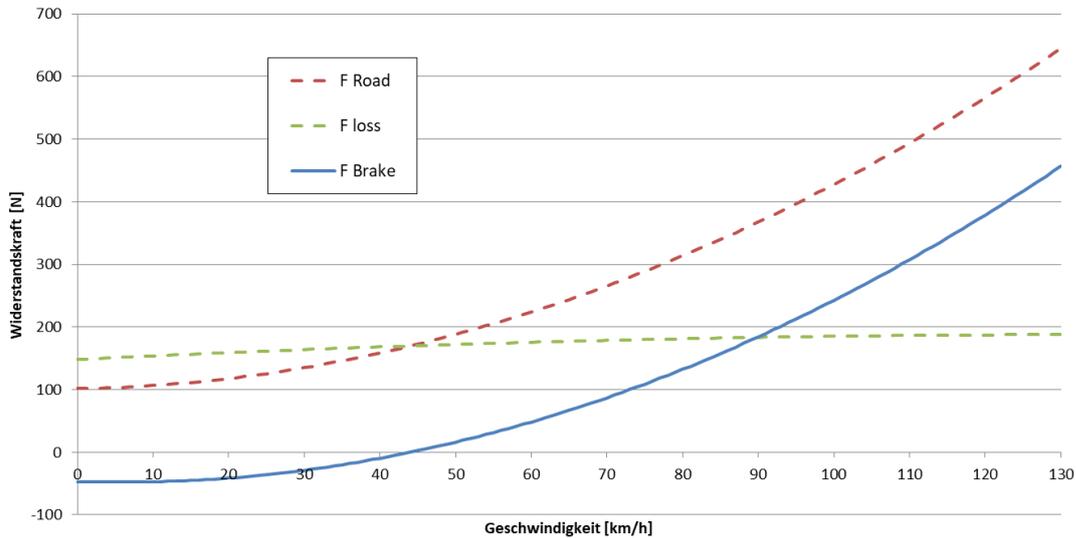


Abbildung 5-6: Widerstandspolynome für den WLTC

Die beim A3 für den WLTC ermittelten Werte zeigt Tabelle 5-1. Auffällig ist hier, dass die Eigenverluste der Rolle bei niedrigen Geschwindigkeiten bereits größer sind als die Vorgabe. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Rolle bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 45km/h beim Beschleunigen nicht bremsen muss, sondern zusätzlich antreiben, um ihre eigenen Verluste zu überwinden. Beim Bremsen muss sie dann zusätzlich bremsen, um Ihre eigene Trägheit zu reduzieren.

Road load coefficient R0	101.360	[N]	Brake coefficient B ₀	-46.869	[N]
Road load coefficient R1	0.750	[Ns/m]	Brake coefficient B ₁	-1.357	[Ns/m]
Road load coefficient R2	0.396	[Ns ² /m ²]	Brake coefficient B ₂	0.424	[Ns ² /m ²]
Loss coefficient L0	148.229	[N]			
Loss coefficient L1	2.107	[Ns/m]			
Loss coefficient L2	-0.028	[Ns ² /m ²]			

Tabelle 5-1: Widerstandsbeiwerte für den WLTC

Die Widerstandsbeiwerte werden in der Prüfstandswarte für den Test vorgegeben. Da bei Real World Zyklen andere Widerstandsvorgaben und Fahrzeugmassen zu beachten sind als beim WLTP, muss die Einstellung vor jedem Zyklus überprüft werden. Ändert sich durch die höhere Masse beim RWC die Schwungmassenklasse des Rollenprüfstandes, muss der Loss-run und die Ermittlung der Fahrwiderstände erneut durchgeführt werden. Bei diesem Testfahrzeug war das nicht der Fall, es genügte ein Umstellen der Bremsfunktion auf die entsprechenden Widerstände.

5.3.3 Abgasmessung in der CVS Anlage

Die wichtigsten Abgaskomponenten werden in der CVS Anlage ermittelt. Dazu wird das gesamte Abgas des Testfahrzeugs entnommen und verdünnt. Die Messgeräte in der Haustechnik messen dann im vollstromverdünnten Abgas Schadstoffkonzentrationen.

In Abbildung 5-7 ist die Abgasentnahme beim Testfahrzeug dargestellt. Das Abgas wird mit T-Stücken und Silikonschläuchen dicht direkt vom Endrohr (1) des Testfahrzeugs entnommen und weitergeleitet. Mit dem EFM (2) wird der Abgasmassenstrom gemessen. Danach befindet sich die isolierte Entnahmestelle des PEMS (3) sowie die Entnahmestelle des FTIR (4). Erst danach geht das Abgas weiter in den CVS- Tunnel (5).



Abbildung 5-7: Abgasentnahme beim Audi A3 e-tron

5.3.4 Abgasmessung mit dem FTIR

Die Entnahmestelle des FTIR ist oben in Abbildung 5-7 gezeigt. Das Abgas wird von dort über eine beheizte Leitung und einen Vorfilter zum Messgerät geleitet. Dort werden verschiedenste Abgaskomponenten ermittelt. Bei diesem Versuch behinderte ein Defekt der Volumenstrommessung konstant gute Ergebnisse, nur bei einigen wenigen Messungen funktionierte das FTIR zuverlässig.

5.3.5 Messprogramm

Mit dem nun fertig eingerichteten Prüfstand wurden folgende Messungen durchgeführt:

Messnummer	Zyklus	Anmerkung
7490	WLTC Reichweite	Test der elektrischen Reichweite
7491	WLTC cold	(Ladungserhaltung) ohne AVL M.O.V.E

7492	WLTC hot	(Ladungserhaltung)
7493	CADC urban hot	(Ladungserhaltung)
7494	CADC road hot	(Ladungserhaltung)
7495	CADC motorway hot	(Ladungserhaltung)
7496	Ermes V8 hot	(Ladungsnutzung SOC Start 64,9% Ende 45,6%)
7497	CADC urban cold	(Ladungserhaltung)
7498	CADC road cold	(Ladungserhaltung)
7499	CADC motorway cold	(Ladungserhaltung)
7500	Ermes V8 hot	(Ladungserhaltung)
7501	CADC urban hot	(Ladungsnutzung 90% auf 72%)
7502	CADC road hot	(Ladungsnutzung 72% auf 45%)
7503	CADC motorway hot	(Ladungsnutzung 45% auf)
7504	Stationär 50 km/h	Messung Partikelverteilung
7505	Stationär 70 km/h	
7506	Stationär 100 km/h	
7507	WLTC cold	(Ladungserhaltung)
7508	WLTC hot	(Ladungsnutzung 86,55% auf 53,61%)

Tabelle 5-2: Messprogramm Audi A3 e-tron

Die Anmerkungen beziehen sich meist auf die in Kapitel 5.1 erwähnten Hybridmodi. Die Bezeichnung hot oder cold beschreibt den Zustand des Fahrzeugs vor dem Zyklus. Ist das Fahrzeug warmgefahren und somit auf Betriebstemperatur handelt es sich um einen Zyklus „hot“. Wird das Fahrzeug erst zum Zyklus in Betrieb genommen und ist davor einige Zeit gestanden, am besten über Nacht, handelt es sich um einen Zyklus „cold“. Da der CADC aus 3 einzelnen Teilzyklen besteht, aber dennoch auch als Gesamtzyklus betrachtet wird, werden bei einem Kaltstart des urbanen ersten Teils auch die anderen Teile als kalt bezeichnet, obwohl das Fahrzeug nicht vor jedem Zyklus neu konditioniert wird.

Bei der Ladungsnutzung ist zusätzlich noch der Ladezustand der Batterie (SOC...State of Charge) vor und nach dem Fahrzyklus angegeben.

5.4 Real Driving Emissions

Neben den Messungen auf dem Prüfstand wurden auch Messungen auf der Straße durchgeführt, um die Emissionen unter realen Verkehrs- und Fahrbedingungen zu ermitteln. Dabei werden die Emissionen mit einem portablen Messsystem gemessen und die dazugehörige Geschwindigkeit wird mittels GPS, die Drehzahl mithilfe des Motorsteuergeräts bestimmt.

5.4.1 PEMS Aufbau

Das Messsystem der Firma AVL („M.O.V.E.“) wird im Kofferraum des Fahrzeugs montiert und die Abgasentnahme erfolgt bei (1), wie in Abbildung 5-8 dargestellt. Über eine beheizte Leitung gelangt das Abgas in das Gas PEMS (2) und das PN PEMS (3). Die Daten werden dann in der System Control (4) erfasst. Die Massenstromerfassung erfolgt durch das EFM (5). Für die Stromversorgung sind ein Spannungswandler (6) sowie zwei Akkupacks (7) im Fußraum verantwortlich.

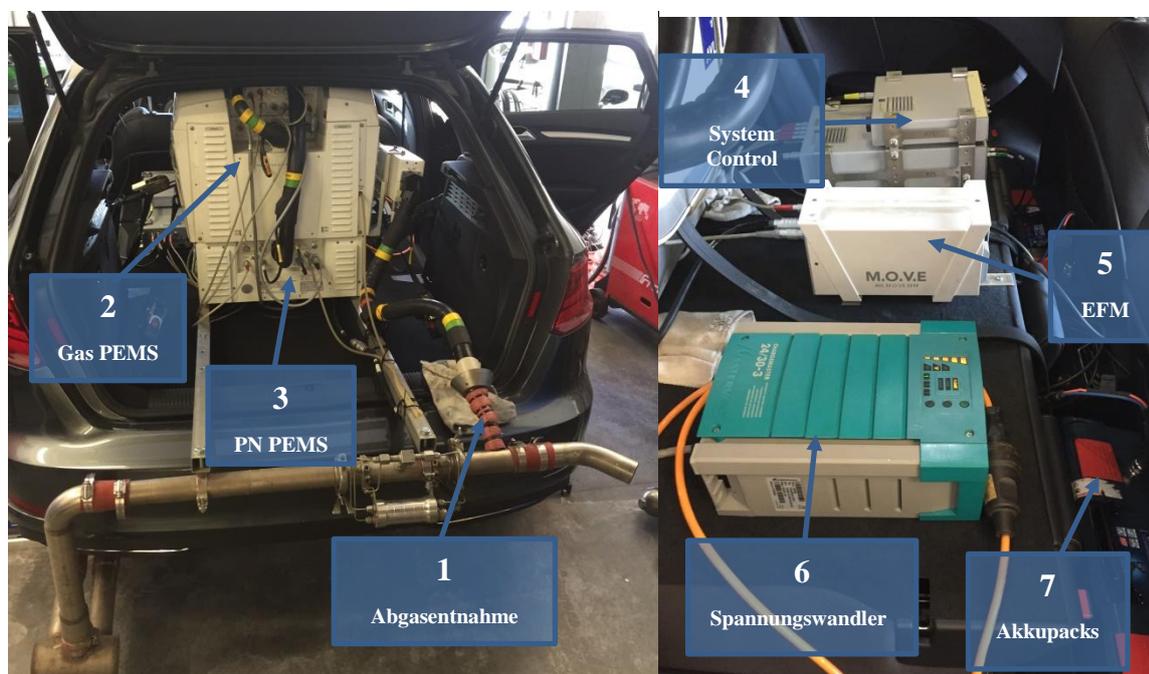


Abbildung 5-8: Aufbau des AVL MOVE PEMS im Testfahrzeug

5.4.2 Messprogramm

Bei den RDE Fahrten wurde die von der TU Graz regelmäßig verwendete Riesroute gefahren. Verwertbare Messungen konnten nur drei gesammelt werden, bei allen anderen Versuchen war der Laptop oder das PEMS nicht ausreichend geladen um die Messung vollständig zu Ende zu fahren.

Zur Ermittlung der elektrischen Reichweite wurde ein beliebiger Stadtkurs durch Graz gewählt.

Messnummer	Zyklus	Anmerkung
Ries01	Ries	(Ladungserhaltung), Lüftung , Radio
Ries02	Ries	(Ladungserhaltung), Lüftung , Radio
Ries03	Ries	(Ladungserhaltung), Lüftung , Radio, Licht
Elektrische Reichweite Stadt 02	Stadtkurs Graz	(EV), Lüftung , Radio, Licht

Tabelle 5-3: Messprogramm RDE

5.5 Auswertung der Messergebnisse

Im Folgenden wurden die am Prüfstand und auf der Straße gesammelten Daten ausgewertet.

5.5.1 Auswertung mit dem ERMES (European Research on Mobile Emission Sources) Tool

Das ERMES Tool dient zur einheitlichen Auswertung und Datenspeicherung von Emissionsmessungen von Motorprüfständen, Rollenprüfständen und PEMS. Die einheitlichen Berechnungsmethoden und Datenformate verbessern so die Qualität und Vergleichbarkeit der Messungen.

Prinzipiell werden die Messdaten der verschiedenen Messgeräte separat ins ERMES Tool eingelesen und dann zusammengeführt und abgeglichen.

Umrechnung auf Rohabgaszusammensetzung:

Ursprünglich kommen die Emissionswerte von den Messgeräten als Spannungssignale, die direkt proportional zu einer Emissionskonzentration sind. Diese Konzentration muss nun zu einem verwendbaren modalen Emissionswert umgerechnet werden.

In Formel (5-5) wird das am Beispiel der Partikelemissionen gezeigt.

$$PN = \left(\frac{PNC * DF_{VPR} - PNC_{Hintergrund}}{DF} \right) * \text{Volumenstrom}_{CVS} \quad (5-5)[38]$$

Mit: PN...Partikelanzahl [-]

PNC...Partikelkonzentration [1/m³]

DF_{VPR}...Verdünnungsfaktor (Korrekturfaktor des VPR, einem Gerät zur Entfernung von leichtflüchtigen Partikeln, die nicht mitgemessen werden sollen) [-]

DF...Verdünnungsfaktor der CVS Anlage [-]

Volumenstrom_{CVS}...Normvolumenstrom der CVS Anlage [m³/h]

Jede Abgaskomponente muss von ihren Hintergrundemissionen getrennt werden, da diese nicht als Schadstoffe mitgemessen werden sollen. Dazu werden Referenzmessungen durchgeführt. Zusätzlich muss noch die Verdünnung des Abgasmassenstroms beachtet

werden, da die Messgeräte das verdünnte Abgas messen und sich mit dem Verdünnungsfaktor dann auf die Konzentration im Rohabgas schließen lässt. Über den modalen Volumenstrom ermittelt man schließlich die modale Emission im gewünschten Format ([l/h] für Partikel).

Für andere Emissionskomponenten, die in [ppm] bzw. [Vol%] gemessen werden, fließt die Dichte der Abgaskomponente ebenfalls in die Umrechnung ein, da die Emissionen als Massenemissionen ausgegeben werden ([g/h]).

Weitere Korrekturfaktoren für verschiedene Schadstoffe (z.B. NO_x) und eine detaillierte Vorgehensweise des ERMES Tools sind im Handbuch des ERMES Tools beschrieben [38].

Zeitverschiebung:

Da das Abgas vom Motor bis zum Messgerät eine gewisse Strecke zurücklegt und dafür Zeit braucht, muss das Emissionssignal zum Drehzahl- bzw. Leistungssignal richtig zeitverschoben werden. Dies funktioniert einerseits durch eine konstante Zeitverschiebung, d.h. die Emissionsmessdaten werden einfach um eine gewisse Zeit verschoben bis der Drehzahlverlauf des Motors mit dem CO_2 -Verlauf der CVS Anlage zusammenpasst. Das ist vor allem bei starker Beschleunigung (Drehzahl steigt stark an \rightarrow CO_2 muss stark steigen) gut zu bewerkstelligen.

Bei der variablen Zeitverschiebung wird der Volumenstrom des Abgases mit einbezogen. Der unterschiedliche Volumenstrom führt zu variablen Durchflusszeiten, die nicht durch eine konstante Zeitverschiebung korrigiert werden können. Hierfür wird eine Funktion in Abhängigkeit des Volumenstroms benötigt [39]. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in der ERMES Tool Beschreibung und wird hier nicht weiter ausgeführt [38].

Bei der Zusammenführung der Messdaten der verschiedenen Messgeräte müssen die Daten wiederum zeitlich verschoben werden, da sie beim Start der Messung nicht gemeinsam getriggert werden. Bei den On Board Daten wird das über das Angleichen des Geschwindigkeitsverlaufs an die CVS Daten gemacht, bei den MOVE und FTIR Daten über den CO_2 Verlauf.

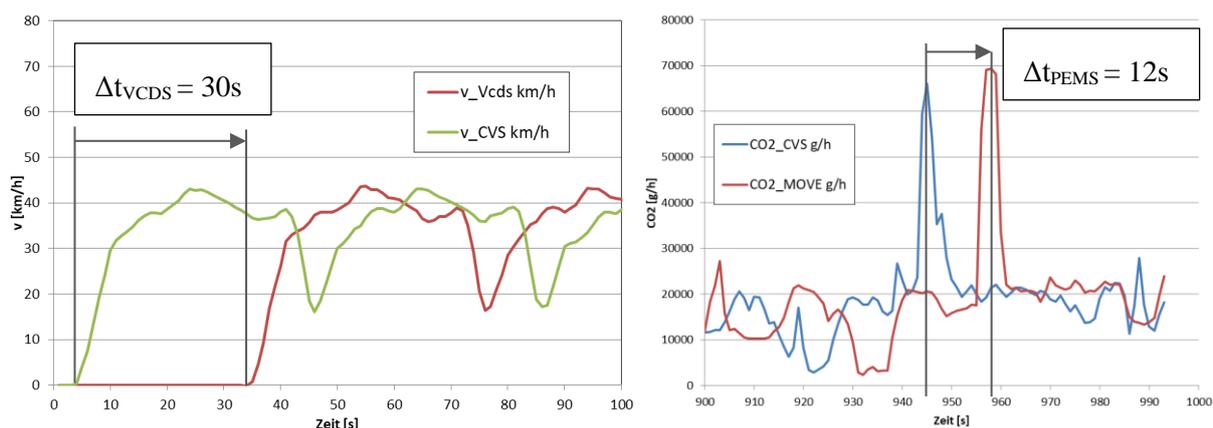


Abbildung 5-9: Zeitverschiebung der Emissionsmesswerte

5.5.2 Vergleich der Emissionsmessung von CVS und PEMS auf dem Rollenprüfstand

Die ab September in Kraft tretende Euro 6d Norm sieht neben der Emissionsmessung am Rollenprüfstand auch die Messung auf der Straße vor. Da dies nicht mehr mit stationären Messgeräten gemessen werden kann, kommen PEMS Geräte zum Einsatz. Um deren Genauigkeit zu überprüfen, müssen sie vor einem gültigen Test validiert werden. Dies passiert auf dem Rollenprüfstand bei einem WLTP Zyklus. Die Emissionen werden gleichermaßen

von der CVS- Anlage und dem im Fahrzeug montierten PEMS erfasst und verglichen. Dabei dürfen gewisse Abweichungen nicht überschritten werden.[16]

Parameter	Einheit	Zulässige Toleranz
Strecke	km	± 250 m des Labor-Bezugswertes
THC	mg/km	± 15 mg/km oder 15% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist
CH ₄	mg/km	± 15 mg/km oder 15% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist
NMHC	mg/km	± 20 mg/km oder 20% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist
PN	#/km	1*10 ¹¹ p/km oder 50% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist
CO	mg/km	± 150 mg/km oder 15% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist
CO ₂	g/km	± 10 g/km oder 10% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist
NO _x	mg/km	± 15 mg/km oder 15% des Labor-Bezugswertes, je nachdem welcher Wert höher ist

Tabelle 5-4: Zulässige Toleranzen der Abweichung zwischen PEMS und CVS[16]

Für den am Prüfstand mit der Messnummer 7492 durchgeführten WLTC werden die erforderlichen Testbedingungen erfüllt und die Emissionen in Tabelle 5-5 verglichen. Teilweise sind die prozentuellen Abweichungen sehr groß, z.B. bei den CO Emissionen, da die Absolutwerte aber weit unter dem Grenzwert liegen, ist diese Abweichung zulässig. Demnach ist die Validierung aufgrund der gesetzlichen Vorgabe gültig.

	CVS	MOVE	(CVS-MOVE)/CVS		
CO ₂ [g/km]	125.14	131.68	-5.22%	< 10%	✓
CO [mg/km]	8.31	52.47	-532%	< +-150 mg/km	✓
NO _x [mg/km]	7.94	12.54	-58%	< +-15mg/km	✓
PN [#/km]	8.33E+11	1.12E+12	-35%	< 50%	✓

Tabelle 5-5: Emissionsvergleich MOVE- CVS beim WLTC

Der kritischste Wert ist bei den Partikeln zu finden, da er zwar noch im Rahmen der Validierung liegt, die Abweichung aber doch relativ groß ist. In den modalen Daten in Abbildung 5-10 ist ersichtlich, dass das PEMS System höhere Partikelemissionen misst, insbesondere im „high“ und „extra high“ Teil des WLTC bei höheren Geschwindigkeiten und höherer Last, wo generell die Partikelemissionen höher sind. Dies könnte an der längeren Leitungslänge bis zum CPC der CVS Anlage liegen, das Phänomen der Verluste im Leitungssystem wird in Kapitel 5.6.2 näher erklärt.

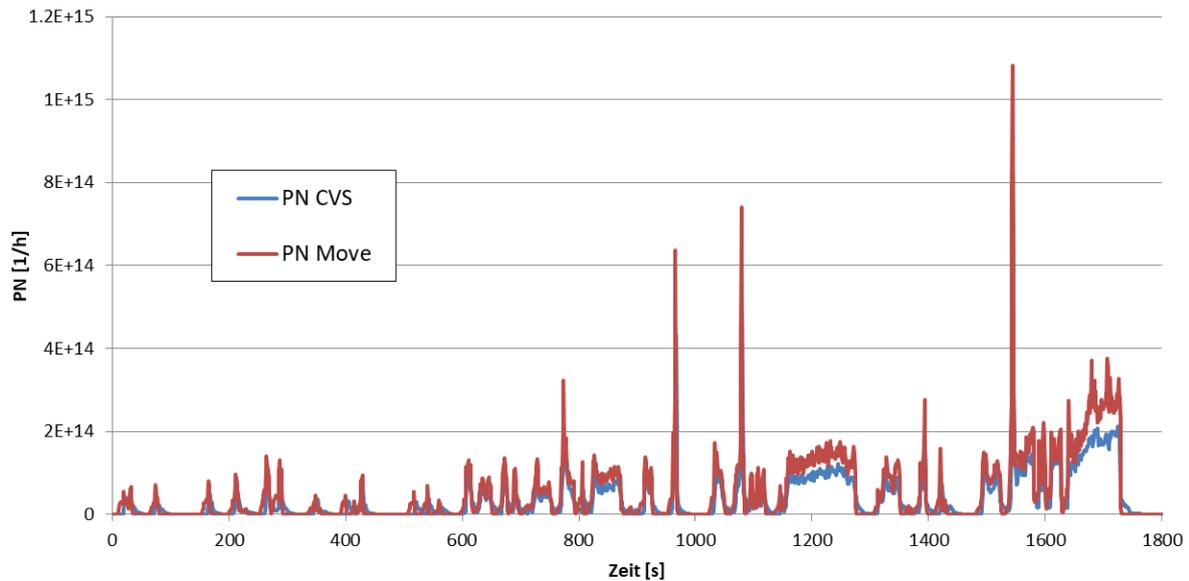


Abbildung 5-10: Modale Partikeldata von CVS und PEMS

5.5.3 Auswertung von RDE Fahrten

Mit einem validierten PEMS System können nun Emissionswerte auf der Straße mit Emissionswerten vom Prüfstand verglichen werden. Die Euro 6 Norm sieht dabei noch gewisse Toleranzfaktoren vor, die sukzessive reduziert werden sollen. Prinzipiell sind diese aber notwendig, da die Messbedingungen stark schwanken können (besonders Temperatur und Höhenmeter, siehe Tabelle 5-6) und die Fahrweise des Fahrers einen Einfluss hat.

Ambient condition	Moderate	Extended
Emissions corrective factor	1	1/1.6
Temperature	$0 \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$	$-7 \leq T < 0^{\circ}\text{C}; 30 < T \leq 35^{\circ}\text{C}$
Derogation till Sep 2019	$3 \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$	$-2 \leq T < 3^{\circ}\text{C}; 30 < T \leq 35^{\circ}\text{C}$
Altitude	$\leq 700\text{m}$	$700 < \text{Alt} \leq 1300\text{m}$

Tabelle 5-6: Grenzen zwischen Moderate und Extended Bereich für Höhe und Temperatur bei RDE[11]

Werden die Randbedingungen erfüllt, ergeben sich die zulässigen Emissionswerte für den RDE Versuch laut Formel (5-6):

$$NTE_{\text{pollutant}} = CF_{\text{pollutant}} * TF * EURO 6 \quad (5-6)[11]$$

Mit $NTE_{\text{pollutant}}$...Not to exceed emission, Grenzwert der RDE Emission [g/km], [1/km]

$CF_{\text{pollutant}}$...Conformity Factors, Toleranzfaktoren [-]

TF...Transfer Functions [-]

EURO 6...Grenzwert der Euro 6 Norm für den WLTC [g/km], [#km]

Die Toleranzfaktoren sind für jeden Schadstoff zu berechnen, laut momentanem Stand sind sie Tabelle 5-7 zu entnehmen, „margin“ bedeutet dabei Toleranz und berücksichtigt die Messunsicherheit, die durch das PEMS System entsteht. Dieser Wert ist in die Gleichung

implementiert um in Zukunft bei besser werden Messsystemen die Faktoren zu reduzieren.

Conformity Factors for Euro 6d RDE			
CF _{pollutant}	NO _x	PN ²⁾	CO ¹⁾
Temporary (Euro 6d-Temp)	2.1	1 + margin PN with margin PN = 0.5	-
Final (Euro 6d)	1 + margin with margin = 0.5	1 + margin PN with margin PN = 0.5	-

Tabelle 5-7: Toleranzfaktoren für EURO 6d RDE [11]

Daraus ergeben sich folgende Grenzwerte für Euro 6d-Temp und der Euro 6d. Der Grenzwert für die Partikelemissionen wird mit der Grundlage $6 \cdot 10^{11}$ berechnet. Für CO₂ gibt es in der EU Verordnung keine Grenzwerte, hier wird das aktuelle Flottenziel von 130 g/km als Richtwert verwendet.

	CO ₂ [g/km]	CO [mg/km]	NO _x [mg/km]	PN [# /km]
Euro 6d-Temp	-	1000	126	9E+11
Final Euro 6d	-	1000	90	9E+11

Tabelle 5-8: Grenzwerte für RDE

Die gezeigte Auswertung erfolgt für die Messfahrt „Ries01“, da bei dieser Messfahrt die größte Durchschnittsgeschwindigkeit und die höchsten Emissionen gemessen wurden. Da alle 3 Messfahrten nach [11] gültig laut RDE Gesetzesvorgabe sind, wird der „worst case“ mit den meisten Emissionen für die Auswertung verwendet. Zusätzlich zum Vergleich mit den in Tabelle 5-8 ermittelten Grenzwerten für die RDE Fahrt wird das Ergebnis noch mit den Messungen am Rollenprüfstand für den ERMES V8 Zyklus 7500 verglichen, da dieser von der Dynamik und den Geschwindigkeiten am ehesten einer Fahrsituation auf der Straße entspricht. Zusätzlich werden die Emissionen mit dem vorgeschriebenen WLTC Zyklus verglichen.

	Ries01	Grenzwert RDE	Ermes V8	WLTC
v _{mean} [km/h]	58		66.23	46.50
CO ₂ [g/km]	136.74	130	161.46	125.14
CO [mg/km]	173.56	1000	1793.51	8.31
NO _x [mg/km]	10.27	90	18.00	7.94
PN [# /km]	1.88E+12	9.00E+11	1.69E+12	8.33E+11

Tabelle 5-9: Vergleich der Emissionen der verschiedenen Zyklen

Besonders auffällig sind die hohen Partikelemissionen, die bei der RDE Fahrt weit über dem Grenzwert liegen (109 % über dem Grenzwert). Die Partikelüberschreitung ist auch beim Ermes V8 Zyklus und dem WLTC zu sehen, hier ist der Grenzwert bei $6 \cdot 10^{11}$ Partikeln pro km sogar noch niedriger. Alle anderen Grenzwerte werden gut eingehalten. Eine weitere Überschreitung ist bei den CO Emissionen des Ermes V8 Zyklus zu beobachten, diese traten am Ende des Zyklus bei hoher Geschwindigkeit auf.

Die Partikelgrenzwerte können bis 2020 allerdings auf Anfrage des Herstellers auf $6 \cdot 10^{12}$ hinaufgesetzt werden, wodurch der Zyklus mit diesem Grenzwert gültig wäre. Zum Vergleich der Emissionsentstehung lassen sich auch die Kennfelder von RDE Fahrt und WLTC vergleichen.

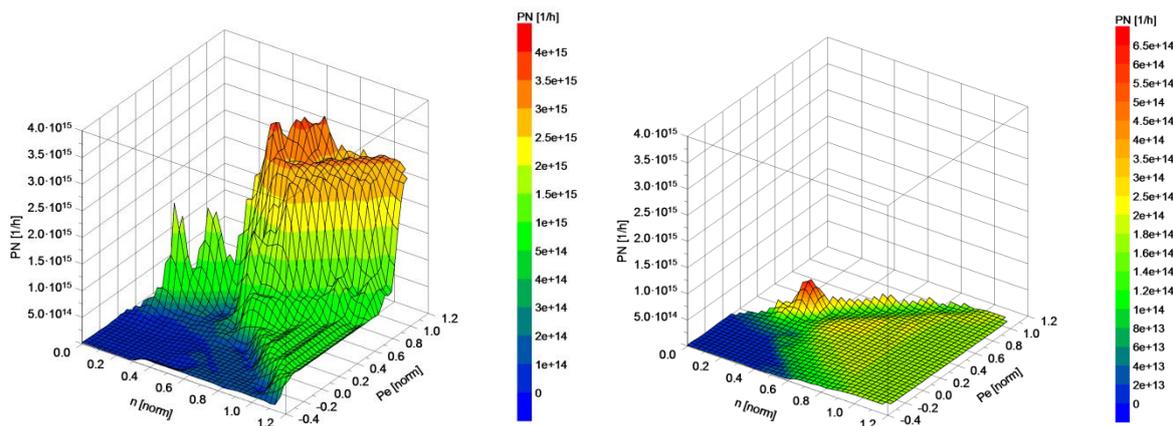


Abbildung 5-11: Vergleich Partikelentstehung bei RDE links und im WLTC rechts

Der Partikel Kennfeld Vergleich zeigt deutlich die Defizite des WLTC Zyklus. Im gesamten Kennfeldbereich sind die Emissionen der RDE Messung deutlich höher, was auf die die größere Lastbereich Abdeckung der RDE Fahrt im Vergleich zum WLTC zurückzuführen ist. Die Emissionen höherer Last sind im WLTC Kennfeld lediglich extrapoliert. In Abbildung 5-12 wird zusätzlich noch der Einfluss der Dynamik auf die Partikelemissionen überprüft. Dazu wird aus der 30 Sekunden Mittelung die Differenz der simulierten und gemessenen Partikelanzahl über dem normierten Leistungsgradienten aufgetragen. Sollte der steigende Leistungsgradient zu steigenden Partikelemissionen führen, wäre ein Trend von steigender Differenz bei hohen Leistungsgradienten erkennbar, da die Simulation diesen Einfluss nicht abbilden kann. Ein solcher Trend kann bei den hier abgebildeten Zyklen nicht nachgewiesen werden. Interessant ist bei der RDE Ries Fahrt trotzdem eine hohe Streuung der Differenz zwischen Messung und Simulation, was auf einen dynamischen Effekt bei der Partikelentstehung schließen lässt. Die Dynamik ist beim mittleren positiven Leistungsgradienten in Tabelle 5-10 schon erkennbar, der ca. doppelt so groß wie die der des WLTC's. Eine Simulation der Partikelemissionen wird so bei dynamischeren Zyklen schwieriger.

	WLTC	Ermes V8	Ries
Mittlerer Leistungsgradient [kW]	1.18	1.64	2.33

Tabelle 5-10: Mittlerer positiver Leistungsgradient verschiedener Zyklen

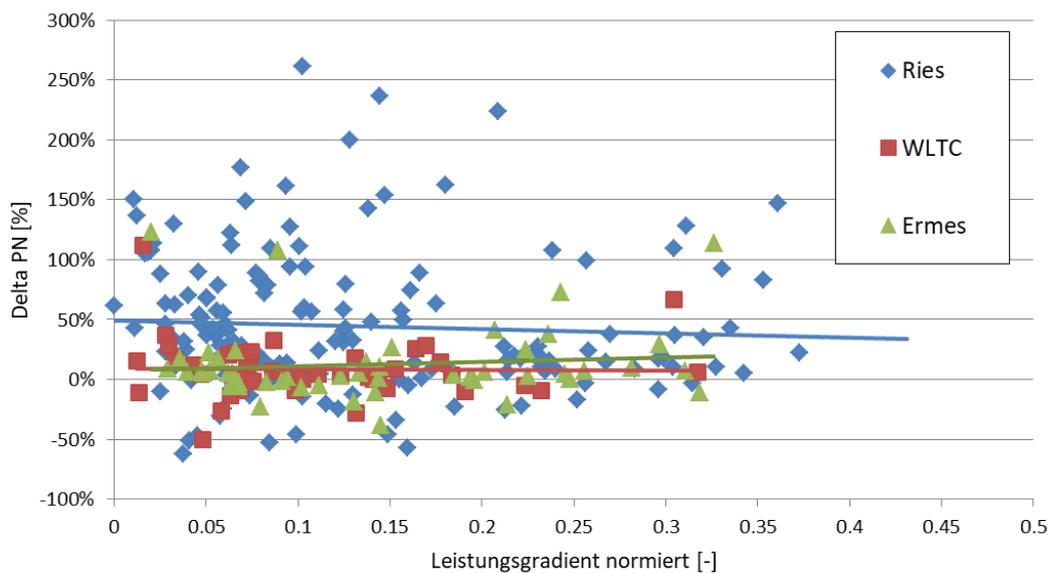


Abbildung 5-12: Einfluss des Leistungsgradienten auf das Verhältnis von simulierten zu gemessenen Partikelanzahlemissionen

5.5.4 Auswertung FTIR

Die zusätzlichen Messdaten des FTIR konnten wie eingangs erwähnt nur bei wenigen Messungen erfasst werden. Das FTIR ist in der Lage eine breite Palette an Schadstoffen zu ermitteln, die in Tabelle 0-1 im Anhang aufgelistet sind.

Für den Ermes V8 Zyklus 7500 wurden alle Schadstoffe ausgewertet und Schadstoffe mit nennenswerter Konzentration näher betrachtet. In der folgenden Tabelle 5-11 sind die Schadstoffe aufgelistet, sowie ihr Gesamtanteil an den Kohlenwasserstoffemissionen sofern sie zu diesen gehören und ihr CO₂-Äquivalent falls es Treibhausgase sind. Treibhausgase werden über einen Faktor, dem GWP (Global Warming Potential) äquivalent zu ihrer mittleren Erwärmungswirkung der Erdatmosphäre umgerechnet. CO₂ hat ein GWP von 1. [40]

Die jeweilige Wirkung der einzelnen Schadstoffe und deren mögliche Entstehungsbereiche werden in der Auswertung der modalen Daten analysiert.

	mg/km	% Gesamt HC	CO ₂ -äquivalent [g/km]	%CO ₂
Methan	1.409	18.52 %	0.029590 (Faktor 21)	0.02 %
1,3 Butadien	2.339	30.73 %		
N ₂ O	1.778		0.551154 (Faktor 310)	0.34 %
NH ₃	26.600			

Tabelle 5-11: FTIR Schadstoffe und deren Einfluss

Methan CH₄:

Methan ist ein farb- und geruchloses brennbares Gas und ist Hauptbestandteil von Erd- und Biogas.[41] Das Gas ist nicht giftig, allerdings ist es ein bedeutendes Treibhausgas, das laut IPCC 21 mal so stark wirkt wie CO₂, d.h. 1 g CH₄ Emission entsprechen 21 g CO₂. [40] Die absolute Emission über den Zyklus ist allerdings gering, beträgt nur 0.02 % der CO₂ Emissionen.

Die Methanemissionen machen etwa ein Fünftel der gesamten HC Emissionen aus, als Vergleichswert dient der HC Messwert der CVS Anlage.

Am Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 5-13 kann man die Phasen der Entstehung von CH₄ feststellen, es entsteht demnach zu einem Teil beim Start, zum anderen Teil bei starker Beschleunigung, die Peaks des CH₄ Messsignals decken sich mit starken Anstiegen der Fahrzeuggeschwindigkeit.

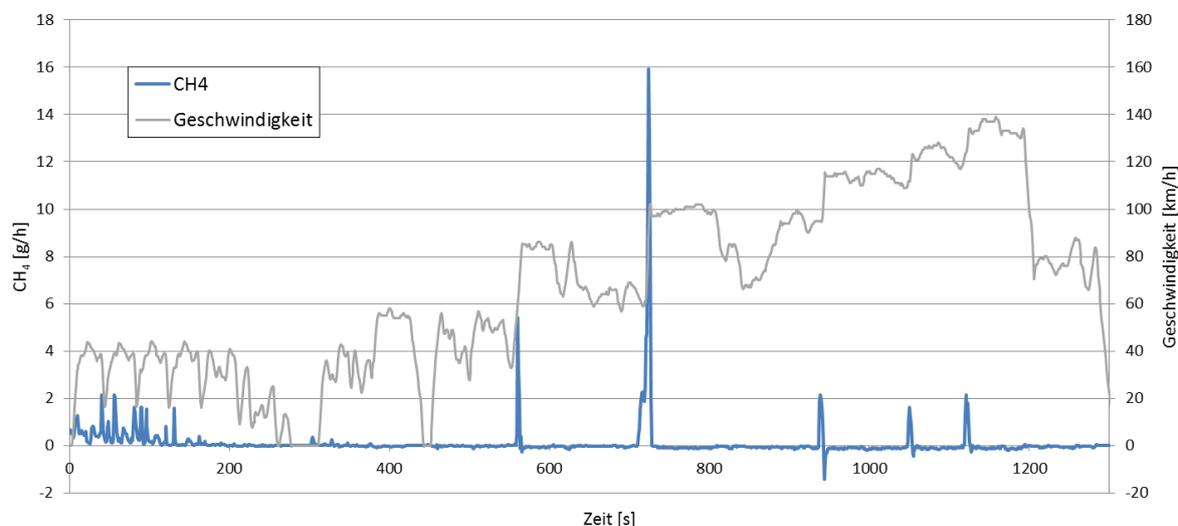
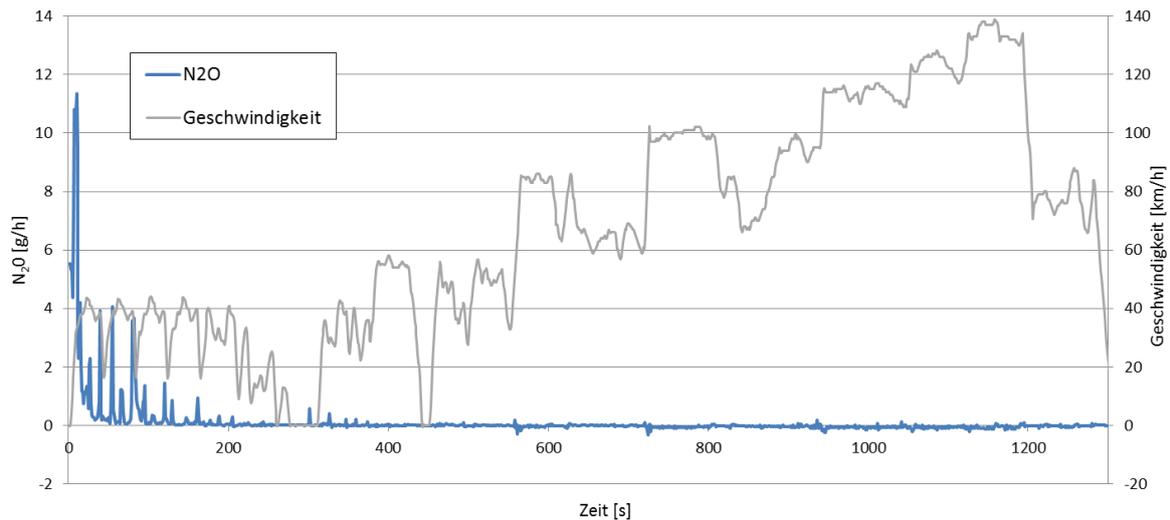


Abbildung 5-13: Sekündliche CH₄ Emission im Ermes V8 Zyklus

Lachgas N₂O:

N₂O ist ein ungiftiges, in der Medizin verwendetes, farbloses Gas. Als Emission ist es äußerst unerwünscht, da es sowohl als starkes Treibhausgas mit einer langen Verweilzeit wirkt [42], aber auch als Ozonvorläufersubstanz zum Ozonabbau in der Atmosphäre beiträgt, da Ozon mit N₂O zu Stickstoffoxid umgesetzt wird [43]. Aufgrund dieser Wirkungen wird N₂O mit einem GWP von 310 auf CO₂ Äquivalenz umgerechnet.[40]

Das gesamte N₂O entsteht am Zyklusbeginn, die CO₂ äquivalente Emission von 0.34 % der gesamten CO₂ Emissionen ist aber ebenfalls gering

Abbildung 5-14: Sekundliches N₂O im Ermes V8 Zyklus

1,3 Butadien:

1,3 Butadien ist ein ungesättigter Kohlenstoff und tritt ebenfalls als farbloses Gas auf. Es hat keinen Einfluss auf den Treibhauseffekt, wirkt aber gesundheitsschädlich. Laut mehrerer Studien wirkt Butadien bei Mensch und Tier bei langfristigem Kontakt karzinogen.[44]

Butadien macht mit einer Gesamtemission von ca. 2.4 mg/km etwa 30 % der im Zyklus emittierten HC's aus. Wie auch Methan entsteht es hauptsächlich beim starken Beschleunigen des Fahrzeugs, was wahrscheinlich am Anfetten des Gemischs in diesen Lastpunkten liegt.

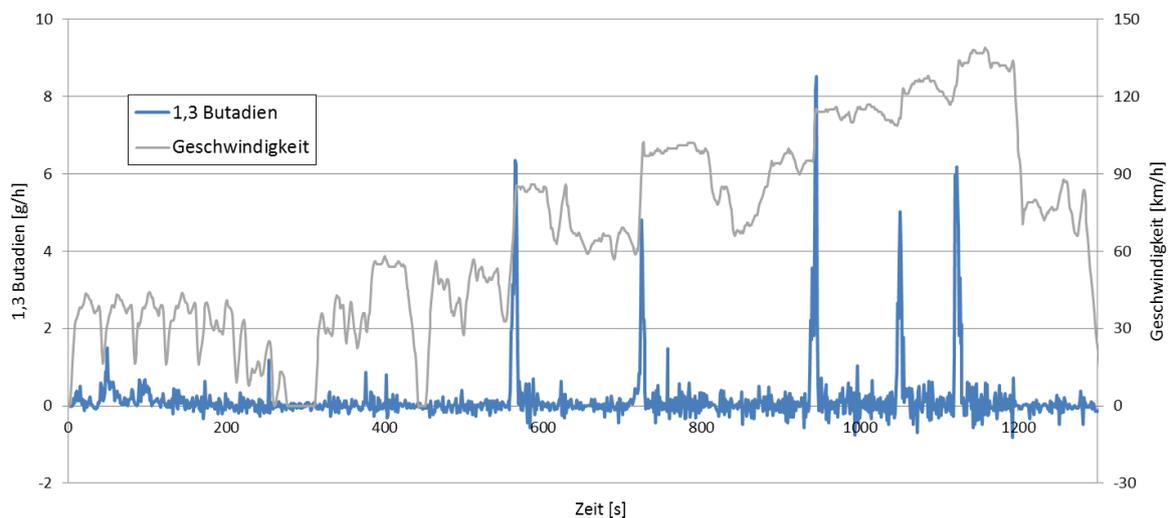


Abbildung 5-15: Sekundlicher Verlauf von 1,3 Butadien im Ermes V8 Zyklus

Ammoniak NH₃:

Ammoniak entsteht hauptsächlich durch stickstoffhaltige Düngemittel und Massentierhaltung, aber eben auch im Verkehr. NH₃ trägt einerseits zur Versauerung der Böden bei und durch die gebildeten Salze, die sich in der Luft als Aerosole verteilen, zur sekundären Partikelbelastung. Die gebildeten Partikel sind zudem sehr klein und deshalb langlebig, was die Belastung zusätzlich verstärkt. Außerdem kann Ammoniak gesundheitsschädlich wirken, da es die

Schleimhäute verätzt. Allerdings ist die Verdünnung so groß, dass dies im Verkehr keine Rolle spielt. [45]

Die Ammoniakemissionen entstehen ähnlich wie Methan ausschließlich beim Zyklusstart und starken Beschleunigungen.

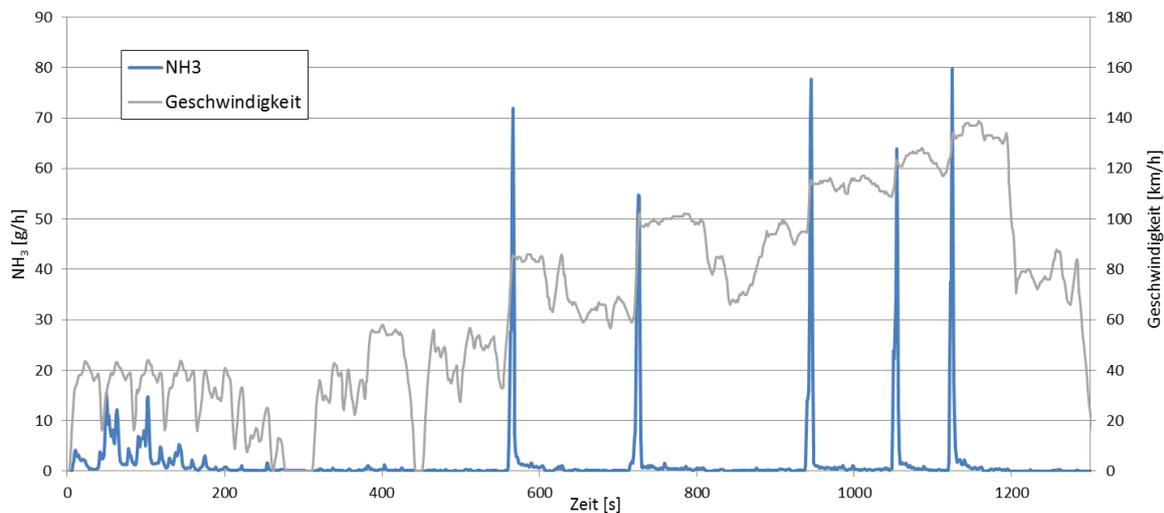


Abbildung 5-16: Sekündliches NH₃ im Ermes V8 Zyklus

5.6 Partikelmessungen

Um die Entstehung von Partikeln und auch Kleinstpartikeln, die unter dem Messbereich von den gesetzlich vorgeschriebenen 23 nm liegen, genauer zu verstehen, wurden weitere Messgeräte installiert und Messungen für diesen Messbereich durchgeführt. Ziel der Messungen war es Situation zu finden, in denen die gesetzlich vorgeschrieben zu messenden Partikel (>23 nm) zwar unterhalb des Grenzwert liegen, aber Partikel die kleiner sind deutlich höhere Konzentrationen aufweisen.

5.6.1 Prüfstandsaufbau Partikelmessungen

Die CVS Anlage misst standardmäßig über einen CPC 3790 (3) die Partikelanzahl von Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser größer als 23 nm. Bei dieser Größe wird eine Erfassungsquote von 50 % gefordert, bei 41 nm schon 90 Prozent. [15] Um Kleinstpartikel ebenfalls zu erfassen, wurde ein zweites Messgerät CPC 3775 (4) an derselben Entnahmeleitung (2) am CVS Tunnel (1) angeschlossen. Dieses Messgerät hat bei einer Partikelgröße von 4 nm bereits eine Erfassungsrate von 50 % und erfasst Partikel von 23 nm bereits zu fast 100 Prozent. Zusätzlich wurde ein dritter CPC (5) mit einem Messbereich von 10 nm (50 % Erfassungsrate) bis 400 nm verbaut. Dieser fungiert in Kombination mit einem vorgeschalteten DMA (Differentiellen Mobilitätsanalysator) (6) als SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). Dabei lässt der DMA durch Anlegen einer bestimmten Spannung nur Partikel einer der Spannung entsprechenden Größe in die Entnahmeleitung zum CPC durch, alle anderen Partikel verbleiben im Hauptstrom. Variiert man nun die Spannung über das gesamte zu messende Partikelgrößenspektrum und misst im nachgeschalteten CPC die Partikelanzahl, so erhält man eine Partikelgrößenverteilung im Abgas.[46]

Der CPC 3790 ist in die Auswertung der CVS-Anlage integriert, die Daten sind in der Prüfstandsoftware Tornado auslesbar, wohingegen der zusätzlich adaptierte CPC 3775 über eine Verkabelung durch die gesamte Haustechnik am U4 Anschluss als Spannungssignal angezeigt wird und noch umgerechnet werden muss. Die Auswertung der

Partikelgrößenverteilung ist in keiner Weise an die Auswertung des Rollenprüfstandes angeschlossen und erfolgt lokal über einen PC. Eine Synchronisation mit den Rollendaten ist aufgrund konstanter Lastpunkte auch nicht notwendig, da keine modale Auswertung erfolgt.

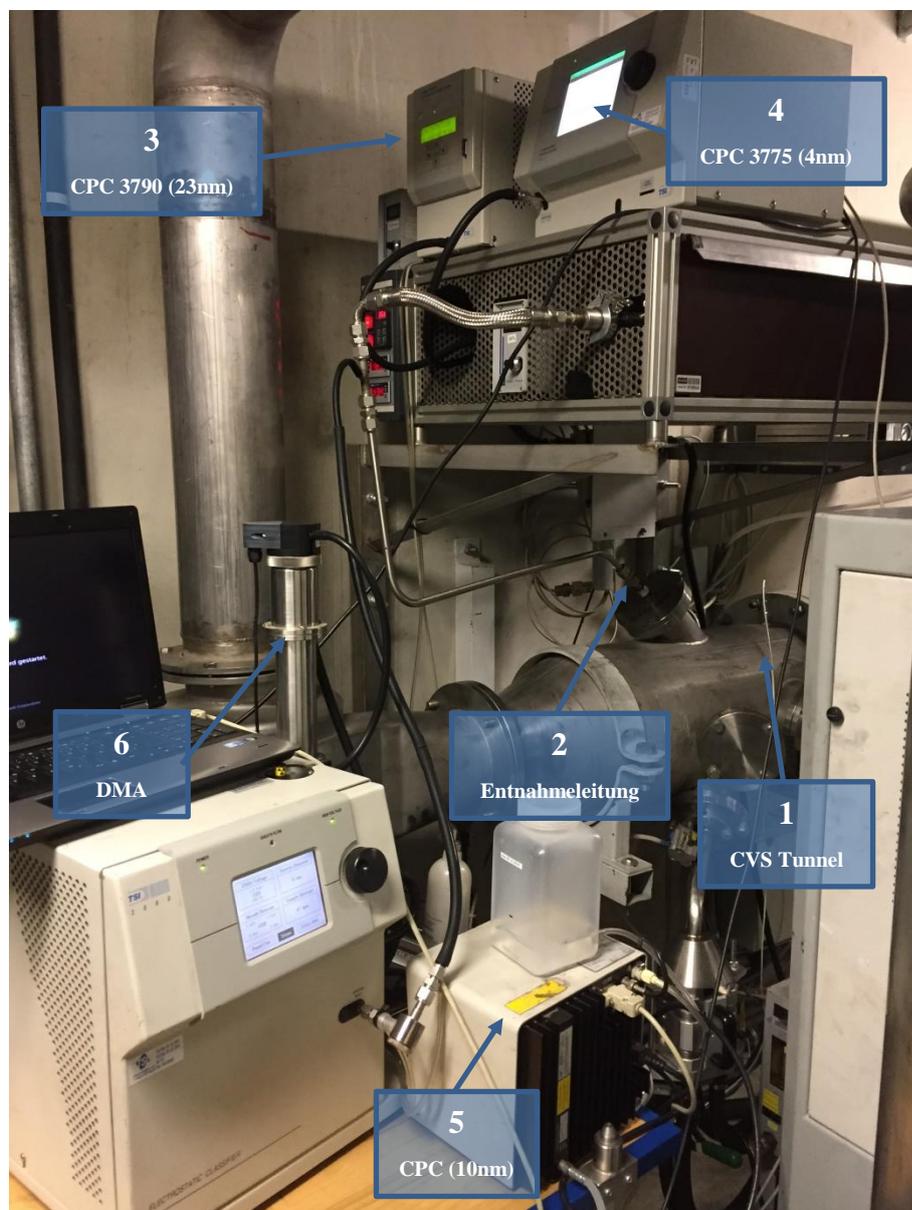


Abbildung 5-17: Aufbau der Partikelmessung

5.6.2 Verluste im Leitungssystem

Aufgrund der langen Leitungslänge vom Endrohr des Messfahrzeugs bis zur Messeinrichtung in der Haustechnik im ersten Obergeschoss legt das Abgas einen weiten Weg zurück. Dabei können verschiedene Verluste auftreten, die hauptsächlich von der Partikelgröße abhängig sind.

Gravitationsverluste:

Abbildung 5-18 zeigt einen Versuch in einem geraden horizontalen Rohr. Wird dieses mit Abgas durchströmt, scheiden sich aufgrund der Masse der Partikel die größeren Partikel früher unten an der Rohrwand ab als die kleineren. Das liegt daran, dass die Erdanziehung auf

Partikel mit höherer Masse im Verhältnis zur treibenden Kraft in Strömungsrichtung stärker wirkt. Es ist zu erkennen, dass auf einem Meter Länge bereits alle Partikel einer Größe von 100 μm abgeschieden werden. Da sich der interessante Messbereich bei Partikeln im Abgas bei unter 100 nm bewegt, ist dieses Phänomen als unkritisch anzusehen. Im Bereich unter 100 nm gehen nur 0.04 % der Partikel durch Abscheidung verloren. Zusätzlich dazu fließen durch eine CVS-Anlage deutlich höhere Massenströme ($>20 \text{ kg/h}$), was ein Ablagern von Partikeln zusätzlich erschwert.

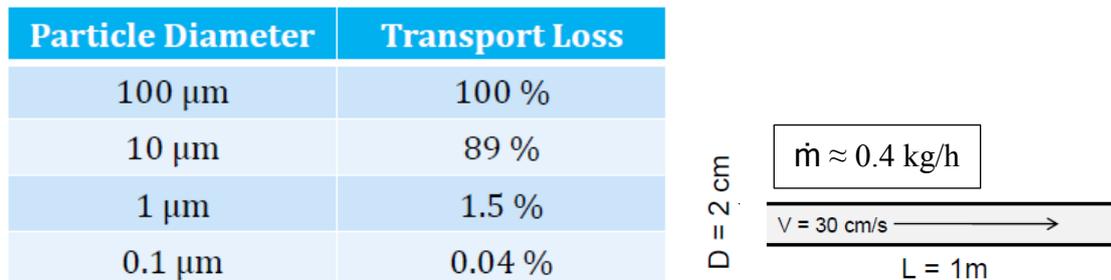


Abbildung 5-18: Gravitationsverluste in einem horizontalen geraden Rohr [47]

Ist das Rohr vertikal angeordnet, scheiden sich keine Partikel ab, es kommt allerdings zu Zeitverschiebungen, da größere Partikel durch die Erdanziehung zusätzlich beschleunigt bzw. gebremst werden, was die Zusammensetzung am Messgerät im Gegensatz zum Rohabgas verfälschen könnte. Da die Massenströme höher und die gemessenen Partikelgrößenbereiche sehr klein sind, hat dieser Effekt ebenfalls einen sehr geringen Einfluss.

Ein ähnlicher Einfluss ist bei gebogenen Rohren zu beobachten. Diese sind notwendig um das Abgas platzsparend vom Endrohr zum PEMS System zu leiten und weiter in die Haustechnik. Trotzdem wird beim Montieren der Rohrleitungen und Silikonschläuche darauf geachtet, möglichst wenig gebogene Stücke zu verwenden.



Abbildung 5-19: Gravitationsverluste in einem gebogenen Rohr[47]

Auch hier ist zu erkennen, dass der Einfluss bei den interessanten Partikelgrößen äußerst überschaubar ist. Zwar steigt der Einfluss mit der Geschwindigkeit, da mehr Partikel dem Luftmassenstrom in der Biegung nicht folgen können und an die Wand prallen, im Bereich von unter 100 nm sind die Verluste aber vernachlässigbar gering.

Diffusionsverluste:

Die sogenannte „Brownsche Bewegung“ ist ein schon lang bekanntes Phänomen, das von Einstein [48] und von Smoluchowski [49] genauer analysiert und erklärt wurde. Teilchen, die sich in Flüssigkeiten oder Gasen befinden, bewegen sich aufgrund eines Energieaustauschs in Form von Kollision mit umliegenden Gasparkeln. Je kleiner dabei die Partikel sind, desto

größer sind die Diffusionsgeschwindigkeit und die Verschiebung der Partikel. Generell ist die Richtung der Stoßbewegung komplett zufällig, dadurch stellt sich statistisch ein globaler Diffusionsstrom von hoher Partikelkonzentration zu niedriger Partikelkonzentration, d.h. Richtung Rohrwand, ein. Der Rohrdurchmesser ist dabei nicht entscheidend, die Diffusionsverluste nehmen über die Rohrlänge zu.[47]

Particle Diameter	Transport Loss
100 μm	0 %
10 μm	0 %
1 μm	0.025 %
100 nm	0.2 %
10 nm	3.5 %
1 nm	56 %

Laminar flow ($Re < 2000$)

$V = 30 \text{ cm/s}$ \longrightarrow

$L = 1\text{m}$

Abbildung 5-20: Diffusionsverluste für verschiedene Partikelgrößen [47]

Die großen Diffusionsverluste von Kleinstpartikeln unter 10 nm sind äußerst schwer zu verhindern. Im Bereich der normalen Partikelgrößenmessung größer als 23 nm sind die Verluste wiederum gering und verkräftbar. Für zukünftige Analysen von Kleinstpartikeln ist eine veränderte Messanordnung mit einer Messentnahme näher zur Emissionsquelle zu empfehlen.

Zusätzliche Verluste, wie elektrostatische oder thermische Verluste, können bei sorgfältigem Messaufbau weitestgehend vermieden werden und werden deswegen nicht näher behandelt.

5.6.3 Partikelgrößenverteilung bei Stationärmessungen

Um die Partikelgrößenverteilung im Abgasmassenstrom zu messen braucht das SMPS Zeit. Diese Zeit wird benötigt, um die Spannung über das Spektrum der zu analysierenden Partikel zu variieren und anschließend wieder zu reduzieren. Da dieser Vorgang ca. 5 Minuten in Anspruch nimmt, ist eine Messung an einem dynamischen Zyklus leider nicht möglich, da sich die Abgaszusammensetzung zu schnell ändert. Um eine annähernd konstante Abgaszusammensetzung zu erhalten, wurden auf dem Rollenprüfstand Stationärpunkte gefahren, das heißt für jeweils ca. 10 Minuten wurde eine konstante Geschwindigkeit gehalten. Während dieser Stationärfahrt wurden so viele Messungen wie möglich gemacht (3-5) und anschließend ein Mittelwert der Partikelgrößenverteilung gebildet. Die Ergebnisse für die Stationärfahrten bei 50 km/h, 70 km/h und 100 km/h werden in den folgenden Abbildungen analysiert.

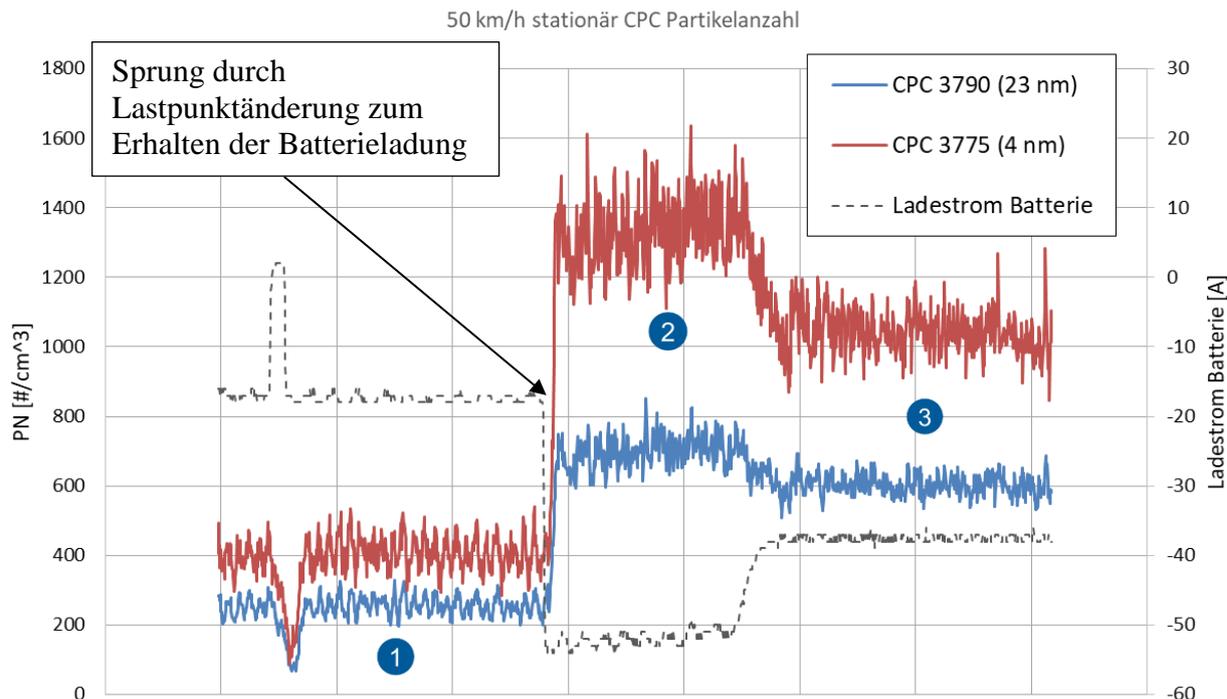


Abbildung 5-21: Partikelanzahlmessung bei 50 km/h stationär

Den ersten analysierten Stationärpunkt bei 50 km/h zeigt Abbildung 5-21. Eine Besonderheit die hier auffällt sind zwei Sprünge im Emissionssignal. Da das Fahrzeug während der Fahrt selbstständig die Hybridregelstrategie ändert, kommt es zu einem Sprung im Ladestrom, die Motorlast wird angehoben und der Ladestrom erhöht, um die Batterie zu laden. In diesem Testzyklus kommt es somit zu drei Phasen, die getrennt betrachtet werden müssen.

In Phase 2 des Zyklus ist die größte Differenz zwischen den beiden Messgeräten zu beobachten, deswegen wird diese Phase näher betrachtet und hier die Partikelverteilung analysiert. In Abbildung 5-22 ist die Partikelgrößenverteilung mit einem Peak bei etwa 70 nm abgebildet. In Richtung größerer Partikel flacht die Kurve schnell ab, in Richtung kleinerer Partikel etwas langsamer.

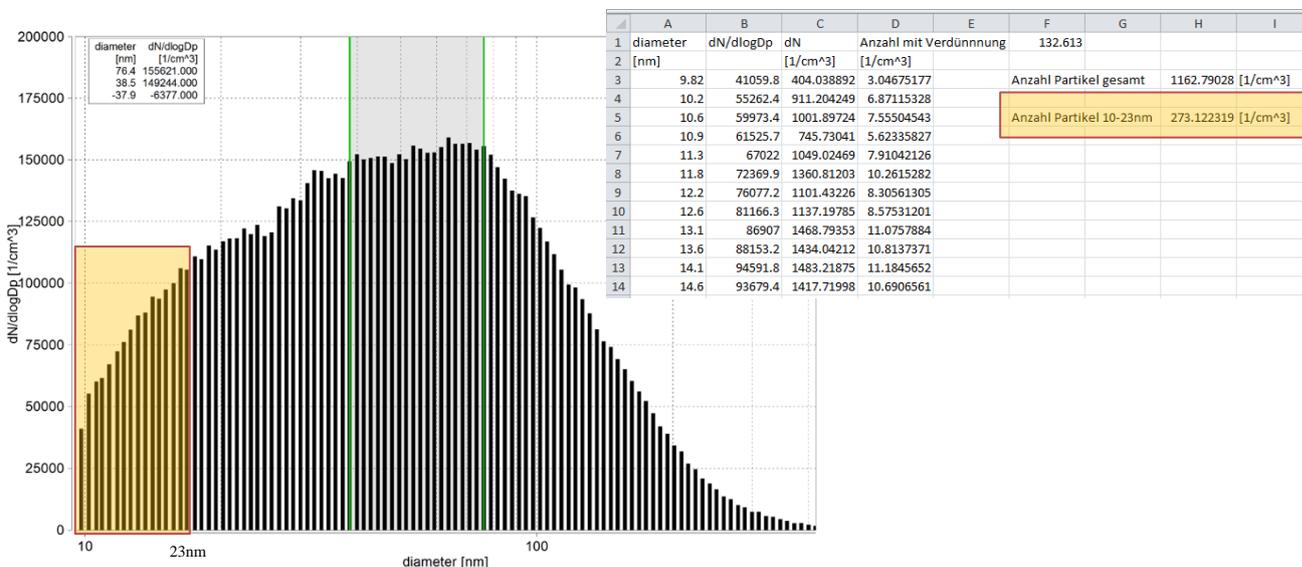


Abbildung 5-22: Partikelgrößenverteilung Phase 2, 50 km/h stationär

Um nun zu untersuchen, ob im nicht mehr dargestellten Bereich unter 10 nm Durchmesser die Verteilungskurve weiter abflacht oder ob ein erneuter Peak auftritt, wird der orange markierte Bereich von 10 bis 23 nm aufintegriert, um die gesamte Partikelmenge in diesem Bereich zu erhalten. Vorher muss hierzu der Wert der Verteilung von einer normalisierten Konzentration ($dN/d\log D_p$) auf eine absolute Konzentration umgerechnet werden.

$$dN/d\log D_p = \frac{dN}{d\log D_p} = \frac{dN}{\log D_{p,u} - \log D_{p,l}} \quad (5-7)[50]$$

Mit dN ...Partikelkonzentration [$1/\text{cm}^3$]

D_p ...mittlerer Partikeldurchmesser [nm]

$D_{p,u}$...Partikeldurchmesser am oberen Rand des Messintervalls [nm]

$D_{p,l}$...Partikeldurchmesser am unteren Rand des Messintervalls [nm]

Da die Partikelverteilung in logarithmische Messintervalle aufgeteilt ist und diese Messintervalle absolut betrachtet aber unterschiedlich groß sind, verbessert die Normalisierung der Partikelkonzentration die Darstellbarkeit, da Spitzen bei großen Messintervallen so besser ausgeglichen werden.

Ist die Partikelkonzentration nun im Bereich 10 bis 23 nm bestimmt, kann dieser konstante Wert vom Messsignal des CPC 3775, das Partikel von 4 bis 400 nm misst, abgezogen werden. Übrig bleibt somit die Partikelkonzentration für Partikel von 4 bis 10 nm und von 23 bis 400 nm. Den Bereich von 23 bis 400 nm deckt das CPC 3790 ab. Zieht man dann dieses Messsignal auch noch ab, bleibt am Ende nur mehr die Partikelkonzentration für Partikel von 4 bis 10 nm übrig.

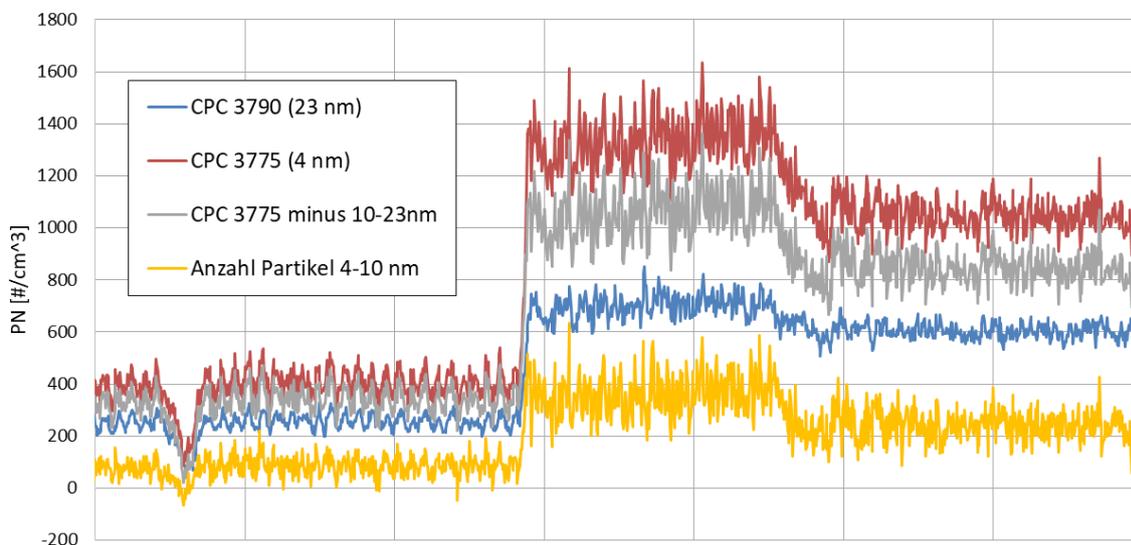


Abbildung 5-23: Vergleich der Partikelkonzentrationen verschiedener CPC's bei 50 km/h

Die resultierende Partikelkonzentration ist in Abbildung 5-23 gelb dargestellt, sie ist im Vergleich zur gesamten Konzentration relativ gering, was nicht auf einen erneuten Peak der Partikelverteilung unter 10 nm hindeutet. Da es sich um eine grobe Analyse handelt, wurden Erfassungsraten der unterschiedlichen CPC's nicht berücksichtigt, diese würden das Ergebnis geringfügig beeinflussen.

Um die Aussage bei anderen Lastpunkten zu überprüfen werden die Partikelgrößenverteilungen und Partikelkonzentrationen der CPCs für die Stationärpunkte bei 70 km/h und 100 km/h ebenfalls analysiert. Der Peak der Partikelgrößenverteilung verschiebt sich von Lastpunkt zu Lastpunkt etwas, liegt aber zwischen 60 und 80 nm. Die Differenz der Konzentrationen der beiden CPC's ist konstant und deutet ebenso wie bei der Stationärfahrt bei 50 km/h auf keinen weiteren Anstieg der Feinpartikel hin. Zu beachten ist wieder die Regelstrategie bei 100 km/h Stationärfahrt, hier boostet der Elektromotor zweimal kurz, ersichtlich am Ladestrom der Batterie. Größenverteilungsmessungen, die in diesem Bereich erfolgten wurden nicht in die Mittelung mit einbezogen.

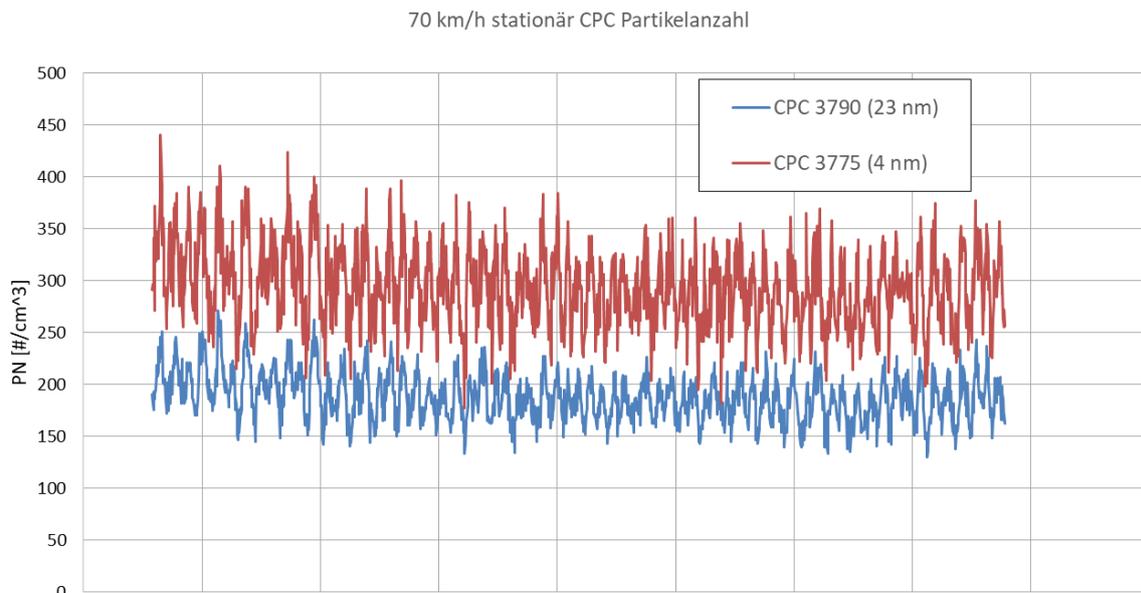


Abbildung 5-24: Partikelanzahlmessung bei 70 km/h stationär

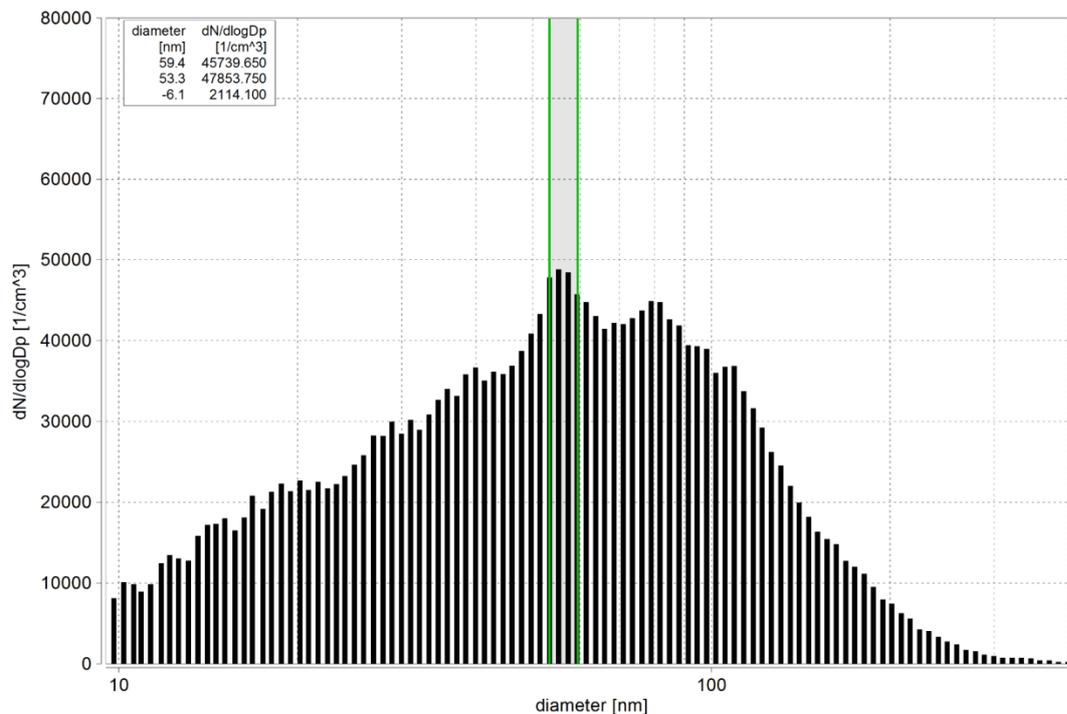


Abbildung 5-25: Partikelgrößenverteilung bei 70 km/h stationär

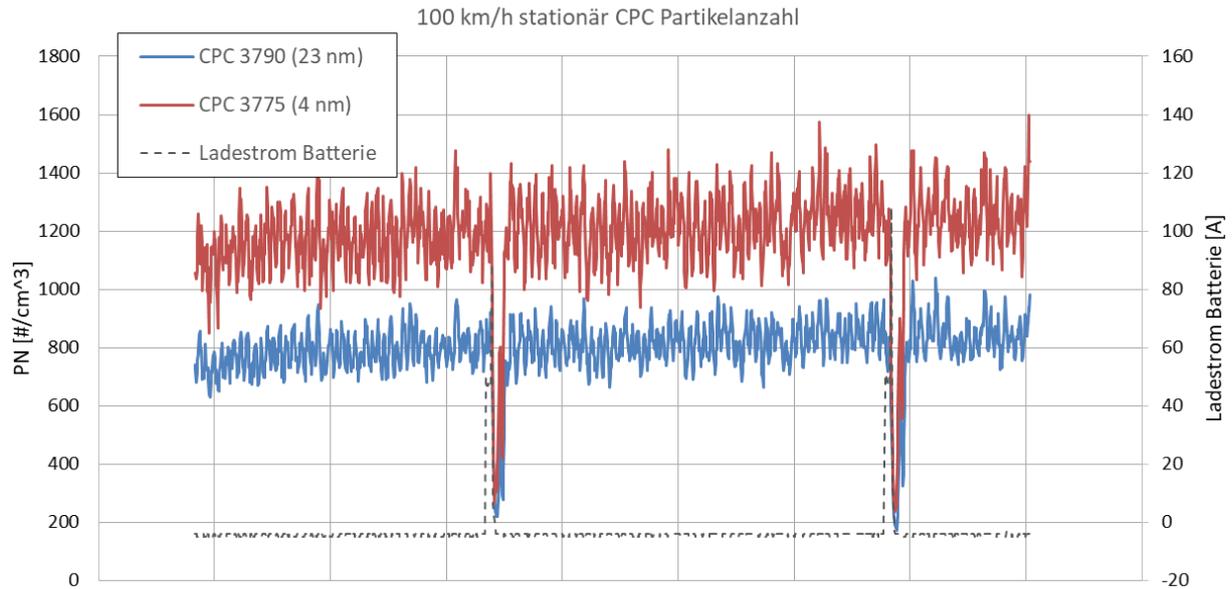


Abbildung 5-26: Partikelanzahlmessung bei 100 km/h stationär

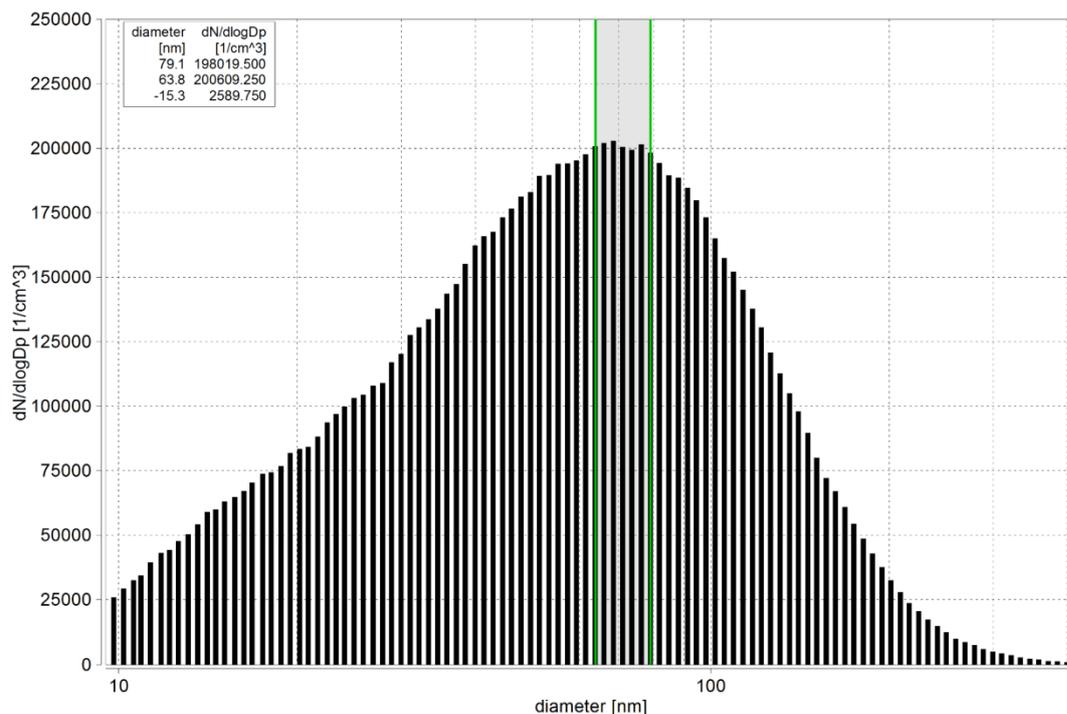


Abbildung 5-27: Partikelgrößenverteilung bei 100 km/h stationär

5.6.4 Kleinstpartikelemissionen im RWC Zyklus

Da die Stationärmessungen keinen signifikanten Hinweis auf Kleinstpartikel geben, werden weitere Zyklen untersucht, um festzustellen in welchen Fahrsituationen Partikel entstehen und wo eventuell zusätzlich Kleinstpartikel unter 23 nm Durchmesser auftreten. Um einen breiten Lastbereich abzudecken wird der Ermes V8 Zyklus 7500 für die Analyse verwendet.

In Abbildung 5-28 ist der sekundliche Verlauf der Partikel beider CPC's über den gesamten Zyklus aufgetragen. Neben konstant etwas höherem Niveau der Partikelanzahl des CPC 3775 aufgrund des höheren Messbereichs bis 4 nm fällt im hohen Geschwindigkeitsbereich des

Zyklus ab 1100 Sekunden ein starker Anstieg der Feinpartikelemissionen auf, während die Partikelanzahl des CPC 3790 konstant niedrig bleibt.

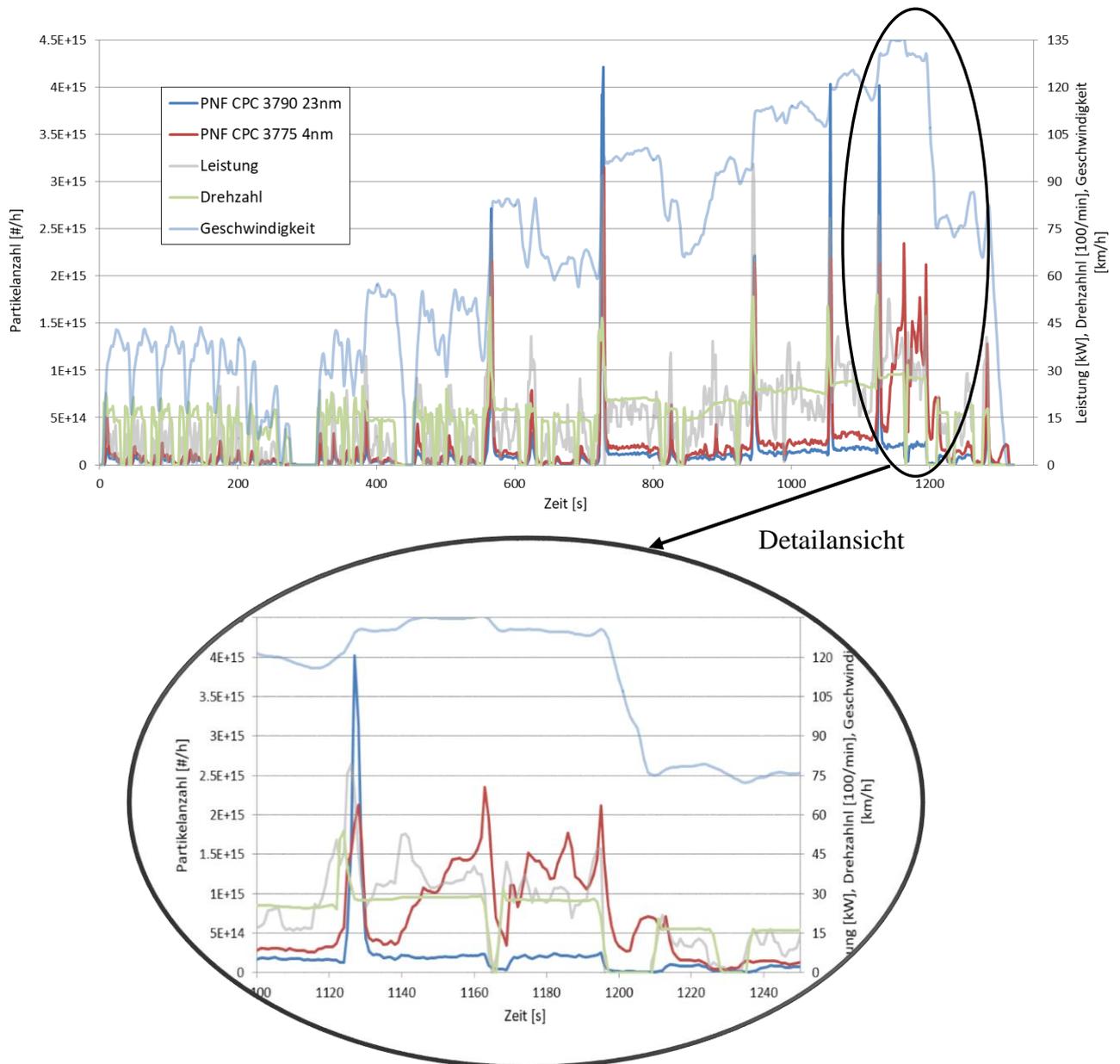


Abbildung 5-28: Ermes V8 modale Partikelanzahl verschiedener CPCs

Dieser Bereich deutet also stark auf einen erneuten Peak der Emissionen unter 23 nm hin, da die Differenz der beiden CPC's bei einem Vielfachen der CPC 3790 Emissionen liegt. Eine genaue Verteilung der Partikelgrößen und Lage des Peaks ist mit dieser Messeinrichtung nicht möglich, hierzu müssten dynamischere SMPS verwendet werden. Die Ursache der hohen Feinpartikelemissionen ist nicht eindeutig zu erklären. Die Motordrehzahl und Last sind zwar der Geschwindigkeit entsprechend höher als im Rest des Zyklus um die vorgegebene Geschwindigkeit zu fahren, wurden aber bei einigen Lastanstiegen ohne Beobachtung eines ähnlichen Phänomens bereits überstiegen (z.B. bei ca. 950 s).

Da das CPC 3775 (rot) mit dem größeren Messbereich bei diesen Lastanstiegen, die als Peaks im Diagramm sichtbar sind, eigentlich einen größeren Wert als das CPC 3790 (blau) anzeigen müsste, werden zusätzlich noch die Rohdaten der Messgeräte angeschaut. Im CPC 3775 wird

ein sogenannter Verstärkungsfaktor eingestellt (in dieser Messreihe: $1 \text{ mV} \cong 1 \text{ Partikel/cm}^2$). Da das Messgerät eine maximale Spannung von 10 V ausgibt, muss der Faktor an die zu messenden Emissionen angepasst werden [51]. Da dies im WLTC gemacht wurde, wo die Partikelemissionen geringer sind, stößt das Signal beim Ermes V8 Zyklus an die Grenze von 10 V, weswegen die Peaks auch nicht korrekt abgebildet werden. Auch interessant ist der zuvor analysierte Bereich zwischen 1100 und 1250 Sekunden. Hier ist das Messsignal fast ständig an der Grenze der 10 V, was darauf hinweist, dass die tatsächlichen Partikelemissionen also noch höher als in Abbildung 5-28 dargestellt wären.

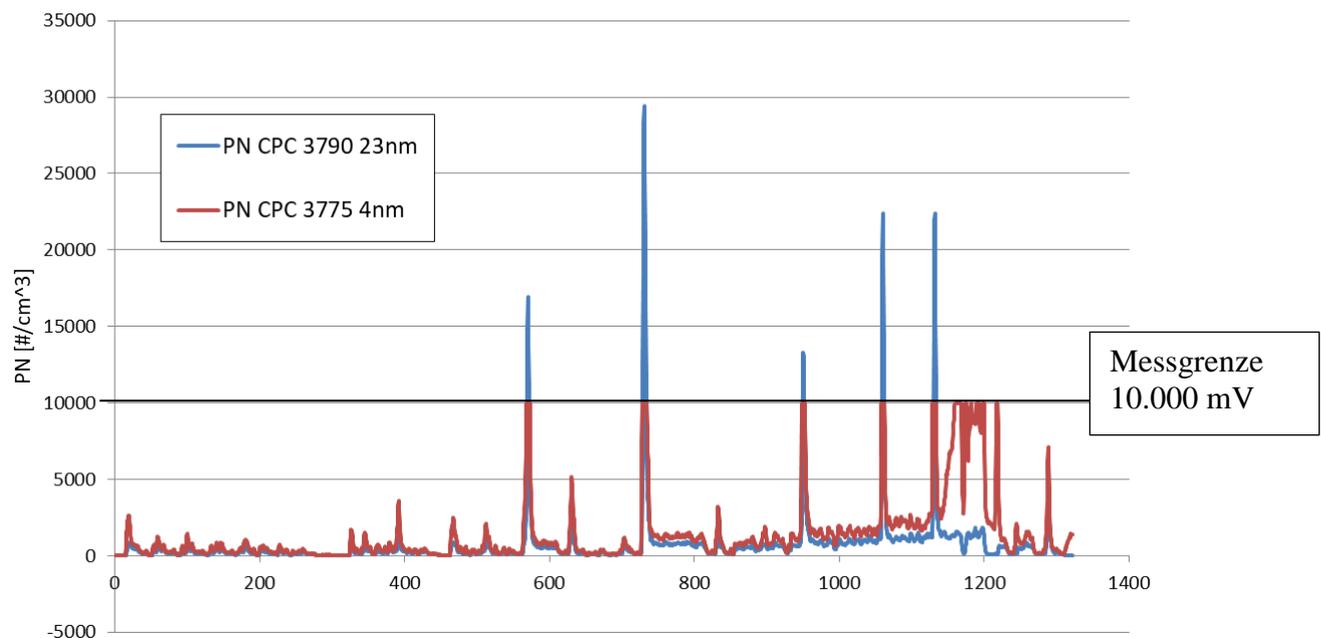


Abbildung 5-29: Messfehler des CPC 3775 im Rohsignal

5.6.5 Kaltstarteinfluss Partikel

Ergänzend wird noch die Möglichkeit des Kaltstarteinflusses auf die Entstehung von Kleinstpartikeln geprüft. Dazu wird das Testfahrzeug über Nacht nicht bewegt, Kühlwasser, Öl etc. sind alle etwa auf Raumtemperatur. Auf ein Einfahren wird verzichtet, der Zyklus wird sofort gestartet. Ein Mehrverbrauch zum Aufheizen des Motors ist somit mit dem Kaltstart verbunden, dieser Mehrverbrauch kann auch zum Ausstoß von mehr Partikeln beitragen. Da aber nicht die Mehremissionen aufgrund des Mehrverbrauchs analysiert werden sollen, sondern aufgrund des Kaltstarts, werden die Partikelemissionen über dem kumulierten Verbrauch bzw. dem kumulierten CO_2 Ausstoß aufgetragen.

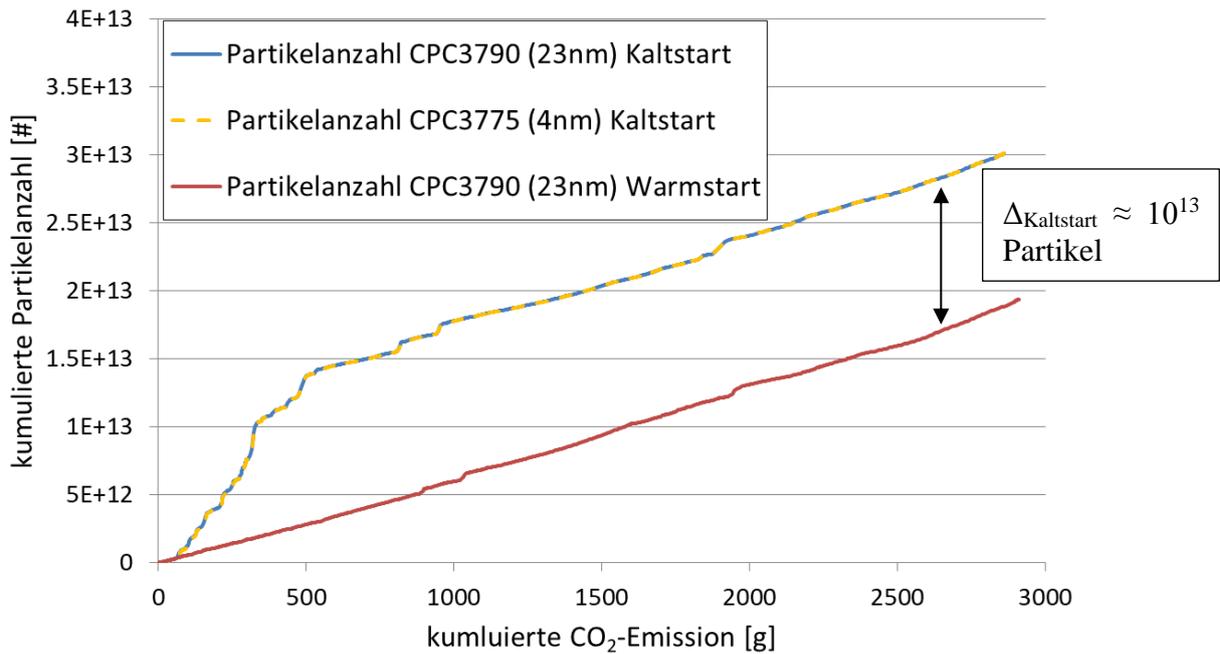


Abbildung 5-30: Partikelemissionen beim Kaltstart eines WLTC

Die beiden Kurven der beiden CPC's beim Kaltstart sind sehr ähnlich, was bedeutet dass beim Kaltstart nahezu keine Feinpartikel unter 23 nm gemessen werden kann. Die Verfälschung dieses Messergebnisses durch die vorher erwähnte Messgrenze des CPC 3775 ist hierbei ebenso wie Leitungsverluste von Kleinstpartikeln zu beachten. Eine erheblich erhöhte Konzentration an Kleinstpartikeln kann aber auch dann nicht erwartet werden.

Der Kaltstart hat demnach einen Einfluss auf die Partikelemission, der nicht unerheblich bei ca. 50 % liegt, die Bildung von Feinpartikeln begünstigt er aber nicht.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Simulation und die Erstellung eines Benzin Durchschnittsfahrzeugs konnte die Abweichung zu dem im PHEM hinterlegten Euro 6 Benzin Kennfeld gezeigt werden. Eine Erweiterung dieses Kennfelds um das in dieser Arbeit erstellte Durchschnittskennfeld würde das PHEM Kennfeld repräsentativer machen und ist für die nächste Version des HBEFA geplant. Die Fahrzeugwerte stimmen in etwa mit dem EU Durchschnitt überein und hier gibt es wenig Verbesserungsbedarf. Der Einfluss des Getriebes muss bei Verwendung weiterer Fahrzeuge erneut überprüft werden. Auch die Qualität des generischen Kennfelds ist zur weiteren Anwendung der Leistungsbestimmung ausreichend gut.

Die Emissionsmessungen zeigen eine gute Korrelation zwischen den verwendeten Messgeräten. Die Abweichung des PEMS zur CVS Anlage liegt im gesetzlich vorgeschriebenen Rahmen, somit sind die RDE Messungen zulässig. Die konstant etwas höheren Partikelanzahl Messwerte des PEMS, im Vergleich zur CVS Anlage, können entweder aus dem unterschiedlichen Messprinzip oder der langen Wegstrecke bis zu den CPC's der CVS Anlage resultieren. Bei Letzterem wären eventuell Korrekturfaktoren zum Leitungsverlust angebracht.

Das gemessene Hybridfahrzeug liegt im Typprüfzyklus und der RDE Fahrt im Rahmen der in der Euro 6d Norm vorgegebenen Grenzwerte, einzig die Partikelemissionen überschreiten den ab 2021 gültigen Wert von $6 \cdot 10^{11}$ Partikel/km, liegen aber noch in der vorübergehend gültigen Toleranz. Die Entstehung der Partikel konnte dabei auf Lastanstiege im hohen Lastbereich zurückgeführt werden. Ein Einfluss des erhöhten Leistungsgradienten bei RDE Fahrten und RWC Zyklen konnte nicht festgestellt werden.

Zur Untersuchung der Kleinstpartikel unter 23 nm waren Stationärpunkte auf dem Rollenprüfstand wegen der eher niederen Lasten ungeeignet, eine dynamische Messeinrichtung zur Partikelgrößenverteilung wäre sinnvoll. Kleinstpartikel entstehen demnach in sehr hohen Lastbereichen in vermehrter Konzentration, was auf einen erneuten Peak in der Partikelgrößenverteilung bei unter 23 nm schließen lässt. Ein Kaltstarteinfluss auf die Partikelentstehung ist zwar deutlich erkennbar, vermehrte Kleinstpartikel sind aber nicht zu verzeichnen. Zur weiteren Untersuchung der Partikelemissionen beim Ottomotor ist aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung eine Differenzierung von Hybridfahrzeugen und reinen Verbrennungsmotoren ratsam, weiterführende Literatur deutet bereits auf ein Partikelproblem des Hybriden hin.[52]

Literatur

- [1] H. Eichlseder, M. Klütting, und W. Piock, *Grundlagen und Technologien des Ottomotors*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] M. Klell, *Höhere Thermodynamik*. Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Graz.
- [3] G. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, und F. Otto, *Verbrennungsmotoren, Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*, 3. Auflage. Teubner Verlag, 2006.
- [4] T. Sams, *Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ, Teil I*. Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Graz, 2016.
- [5] S. Hausberger, *Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I*. Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Graz, 2015.
- [6] G. Merker und R. Teichmann, *Grundlagen Verbrennungsmotoren*, 7. Auflage. Springer Vieweg.
- [7] P. Sturm, *Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil II*. Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Graz, 2016.
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V., Hrsg., „DIN ISO 7708: Luftbeschaffenheit - Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme“. Jän-1996.
- [9] T. C. Bond und andere, „Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment“, Volume 118, issue 11, Juni 2013.
- [10] K. Engeljehring, „Abgasgesetzgebung RDE/WLTP/EVAP Neuigkeiten&Herausforderungen“, 26-Apr-2017.
- [11] Delphi, „Worldwide Emission Standards Passenger Cars and Light Duty Vehicles“. 2018-2017.
- [12] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, Verordnung zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. 2009.
- [13] „CO₂MPAS: Vehicle simulator predicting NEDC CO₂ emissions from WLTP — CO₂MPAS 1.7.3 documentation“. [Online]. Verfügbar unter: <https://co2mpas.io/>. [Zugegriffen: 04-Sep-2017].
- [13] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, Council Directive of 20 March 1970 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles. .
- [14] OICA und IWG, „GRPE-72-10-Rev.2“. UNECE, 11-Jän-2016.
- [15] S. Lipp, „Gesetzliche Randbedingungen für RDE (Real Driving Emissions)“, gehalten auf der Haus der Technik, München, 15-Feb-2017.
- [16] „Gasanalyse | Sensorik Wissen von InfraTec“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.infratec.at/sensorik/sensorik-wissen/sensorik-keywords/gasanalyse.html>. [Zugegriffen: 16-Aug-2017].
- [17] K. Borgeest und G. Wegener, „Messtechnik“, in *Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, S. 123–246.
- [18] J. Andersson, B. Giechaskiel, R. Muñoz-Bueno, E. Sandbach, und P. Dilara, „Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE_LD) Final Report“, United Kingdom, GRPE-54-08 Rev.1, 2007.
- [19] K. Oberguggenberger, V. Pointner, und W. Schindler, „AVL M.O.V.E Integrative Mobile Vehicle Evaluation PEMS – Portable Emissions Measurement Systems“, gehalten auf der AVL Tech Days, 21-März-2012.
- [20] „NDUV-Verfahren | Wi.Tec-Sensorik GmbH“.
- [21] AVL List GmbH, „AVL M.O.V.E PN PEMS iS Product Guide“, AVL List GmbH, Graz, Product Guide AT6405E Rev. 01, Dez. 2015.

- [22] „FTIR Basics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thermofisher.com/uk/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>. [Zugegriffen: 18-Aug-2017].
- [23] J. Woisetschlager, „Interferenz und Kohärenz“, gehalten auf der VO Laser in der Schwingungs- und Strömungsmeßtechnik, Graz, 2017.
- [24] H. Günzler und H.-U. Gremlich, „Das Spektrometer“, in IR-Spektroskopie, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003, S. 39–71.
- [25] IAG- Industrie Automatisierungsgesellschaft mbH, „Versa 06 FTIR Datenblatt“. IAG.
- [26] S. Hausberger, M. Rexeis, und R. Luz, „PHEM User Guide“. Institut für Verbrennungskraftmaschinen, TU Graz.
- [27] S. Hausberger, M. Rexeis, C. Matzer, und C. Weller, „PHEM Training“, 23-Feb-2016.
- [28] K. Mario und de H. Peter, Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Bern/Heidelberg/Graz/Essen: infras, 2004.
- [29] S. Barbara, „CO₂-Monitoring PKW 2016: Bericht über die CO₂-Emissionen neu zugelassener PKW in Österreich“, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Dezember 2016.
- [30] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, (EG) No 443/2009. 2009, S. 15.
- [31] „Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars – Regulation 443/2009“, European Environment Agency. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-12>. [Zugegriffen: 26-Juli-2017].
- [32] P. Möck, J. Kühlwein, U. Tietge, V. Franco, A. Bandivadeker, und J. German, „The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU“. ICCT The International Council on clean Transportation, Oktober-2014.
- [33] International Council on Clean Transportation Europe, Hrsg., European Vehicle Market Statistics, Bd. Pocketbook 2016/17. Berlin: International Council on Clean Transportation Europe, 2016.
- [34] S. Hausberger, M. Rexeis, und R. Luz, „PHEM - Das Modell der TU Graz zur Berechnung von KfzEmissionen und seine Datenbasis bei Euro 5 und Euro 6“, Stuttgart, 21-Juli-2011.
- [35] TU Graz, „Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3, Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679“. TU Graz, 12-Juli-2009.
- [36] „Audi A3 Sportback e-tron | Audi MediaCenter“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/fotos/album/audi-a3-sportback-e-tron-601>. [Zugegriffen: 31-Juli-2017].
- [37] Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics, „ERMES-Tool Documentation of evaluation algorithms V32“. März-2016.
- [38] T. Le Anh, „Korrektur von sekundlichen Emissionsmessungen für zuverlässige Emissionsmodelle.“, Technische Universität Graz, Graz, 2012.
- [39] S. Solomon u. a., Climate Change 2007- The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [40] GisChem, „Methan“, Gefahrenstoffinformationssystem Chemikalien, Datenblatt CAS-Nr: 74-82-8, Juni 2017.
- [41] U. B. A. Redaktionsassistentin 1, „Die Treibhausgase“, Umweltbundesamt, 07-Sep-2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>. [Zugegriffen: 10-Aug-2017].
- [42] R. W. Portmann, J. S. Daniel, und A. R. Ravishankara, „Stratospheric ozone depletion due to nitrous oxide: influences of other gases“, Phil Trans R Soc B, Bd. 367, Nr. 1593, S. 1256–1264, Mai 2012.

- [43]European Chemicals Bureau, „European Union Risk Assessment Report 1,3-butadiene“, European Chemicals Agency, United Kingdom, CAS No: 406-99-0, 2002.
- [44]K. Stroh, J. Köhler, und G. Winkler, „Ammoniak und Ammonium“, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Oktober 2004.
- [45]TSI, „Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer Model 3938“. .
- [46]C. Kykal, H. G. Horn, T. Tritscher, F. Dahlköttchen, und J. Farnsworth, „Aerosolprobenahme und deren Optimierung“, gehalten auf der Die Wleten der Nanopartikelanalyse, Technische Universität Graz, Mai-2017.
- [47]A. Einstein, „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“, in Annalen der Physik, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1905.
- [48]M. von Smoluchowski, „Zur Kinetischen Theorie der Brwonschen Molekularbewegung und der Suspension“, in Annalen der Physik, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1906.
- [49]TSI Incorporated, „Aerosol Statistics Lognormal Distributions and $dN/d\log D_p$ “, Application Note Pr-001.
- [50]TSI Incorporated, „Condensation Particle Counter Model 3775“, TSI, Bedienungsanleitung.
- [51]S. Porter, „Partikelanzahl- Emissionen bei Hybridfahrzeugen mit Ottomotor“, Nr. Volume 73, Apr. 2012.

Formelverzeichnis

(2-1).....	2
(2-2).....	3
(3-1).....	15
(3-2).....	15
(3-3).....	15
(3-4).....	15
(3-5).....	15
(3-6).....	16
(3-7).....	16
(3-8).....	16
(4-1).....	25
(4-2).....	25
(4-3) [27]	27
(4-4) [27]	27
(4-5)[33]	31
(4-6).....	32
(5-1).....	38
(5-2)[5]	39
(5-3)[5]	39
(5-4)[5]	42
(5-5)[38]	47
(5-6)[11]	50
(5-7)[50]	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Abgaszusammensetzung eines Ottomotors [3].....	2
Abbildung 2-2: Abscheidecharakteristik von Partikeln in der menschlichen Lunge [8]	4
Abbildung 2-3: Zeitplan der Euro Abgasgesetzgebung [10]	5
Abbildung 2-4: Vergleich von WLTC und NEDC	7
Abbildung 2-5: Funktionsweise eines Flammenionisationsdetektors [18]	10
Abbildung 2-6: Schema eines Chemoluminiszenzdetektors [6]	10
Abbildung 2-7: Aufbau eines Kondensationspartikelzählers (CPC) [18]	11
Abbildung 2-8: Aufbau eines Rollenprüfstandes mit CVS Anlage[5].....	12
Abbildung 2-9: Funktionsprinzip der Partikelzählung im PN PEMS[22]	13
Abbildung 3-1: PHEM Berechnungsprinzip [27]	14
Abbildung 3-2: Längsdynamik Modell [28]	15
Abbildung 3-3: Vehicle File PHEM.....	16
Abbildung 3-4: Leistungsinterpolation mit generischem Kennfeld	17
Abbildung 3-5: Interpolation aus Emissionskennfeld	18
Abbildung 3-6: Ermittlung der Kalibrierfunktion am Beispiel einer WLTC Messung an einem Euro 6 Benzin PKW	19
Abbildung 3-7: Lastpunkte von WLTC und RWC Zyklen	22
Abbildung 3-8: Partikelanzahlverlauf beim CADC des Toyota Yaris.....	22
Abbildung 4-1: Prinzip der Emissionsabschätzung mit HBEFA[29]	24
Abbildung 4-2: CO ₂ - Durchschnittskennfeld	25
Abbildung 4-3: Partikelanzahl – Durchschnittskennfeld	26
Abbildung 4-4: Vergleich gemessener und simulierter Drehzahl mit dem PHEM Schaltmodell beim WLTC eines Seat Leon	28
Abbildung 4-5: Partikelanzahl WLTC Verlauf	29
Abbildung 4-6: PHEM Euro 6 Passenger Car Benziner	32
Abbildung 4-7: Vergleich CO ₂ Kennfeld Durchschnittsfahrzeug (links) und PHEM Euro 6 Benziner (rechts)	33
Abbildung 4-8: Vergleich Partikelanzahl Kennfeld Durchschnittsfahrzeug (links) und PHEM Euro 6 PKW (rechts)	33
Abbildung 4-9: Emissionsfaktoren HBEFA bei 0 % Steigung	34
Abbildung 4-10: Kennfeld zur Abweichung der CO ₂ Emissionen des kalibrierten Durchschnittsfahrzeuges vom generischen Kennfeld.....	36
Abbildung 4-11: 3D Kennfeld zur Abweichung der CO ₂ Emissionen des kalibrierten Durchschnittsfahrzeuges vom generischen Kennfeld.....	36
Abbildung 5-1: Audi A3 Sportback e-tron Aufbau [37]	37
Abbildung 5-2: Typenschein des Audi A3 e-tron	38
Abbildung 5-3: Ergebnisse Ausrollversuche am Audi A3 e-tron	39

Abbildung 5-4: Audi A3 e-tron auf dem Rollenprüfstand der TU Graz	41
Abbildung 5-5: Messaufbau am Elektromotor	42
Abbildung 5-6: Widerstandspolynome für den WLTC.....	43
Abbildung 5-7: Abgasentnahme beim Audi A3 e-tron	44
Abbildung 5-8: Aufbau des AVL MOVE PEMS im Testfahrzeug	46
Abbildung 5-9: Zeitverschiebung der Emissionsmesswerte	48
Abbildung 5-10: Modale Partikeldata von CVS und PEMS	50
Abbildung 5-11: Vergleich Partikelentstehung bei RDE links und im WLTC rechts	52
Abbildung 5-12: Einfluss des Leistungsgradienten auf das Verhältnis von simulierten zu gemessenen Partikelanzahlmissionen.....	53
Abbildung 5-13: Sekündliche CH ₄ Emission im Ermes V8 Zyklus.....	54
Abbildung 5-14: Sekündliches N ₂ O im Ermes V8 Zyklus	55
Abbildung 5-15: Sekündlicher Verlauf von 1,3 Butadien im Ermes V8 Zyklus	55
Abbildung 5-16: Sekündliches NH ₃ im Ermes V8 Zyklus	56
Abbildung 5-17: Aufbau der Partikelmessung.....	57
Abbildung 5-18: Gravitationsverluste in einem horizontalen geraden Rohr [47].....	58
Abbildung 5-19: Gravitationsverluste in einem gebogenen Rohr[47]	58
Abbildung 5-20: Diffusionsverluste für verschiedene Partikelgrößen [47]	59
Abbildung 5-21: Partikelanzahlmessung bei 50 km/h stationär.....	60
Abbildung 5-22: Partikelgrößenverteilung Phase 2, 50 km/h stationär	60
Abbildung 5-23: Vergleich der Partikelkonzentrationen verschiedener CPC's bei 50 km/h ..	61
Abbildung 5-24: Partikelanzahlmessung bei 70 km/h stationär.....	62
Abbildung 5-25: Partikelgrößenverteilung bei 70 km/h stationär.....	62
Abbildung 5-26: Partikelanzahlmessung bei 100 km/h stationär.....	63
Abbildung 5-27: Partikelgrößenverteilung bei 100 km/h stationär.....	63
Abbildung 5-28: Ermes V8 modale Partikelanzahl verschiedener CPCs	64
Abbildung 5-29: Messfehler des CPC 3775 im Rohsignal	65
Abbildung 5-30: Partikelemissionen beim Kaltstart eines WLTC.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Entwicklung der Abgasgesetzgebung Euro 1-4 für PKW [11].....	5
Tabelle 2-2: Abgasgesetzgebung Euro 5 und 6 für PKW mit Ottomotor[11]	6
Tabelle 2-3: RDE Test Anforderungen[11]	8
Tabelle 2-4: Dynamikparameter RDE Test[11]	8
Tabelle 3-1: Verbesserung der Emissionswerte durch ein kalibriertes Kennfeld	20
Tabelle 3-2: Vergleich der Zyklen für die Kennfelderstellung	21
Tabelle 3-3: Benzinfahrzeuge der Rollenprüfstandsmessungen (MT...Manual Transmission/Schaltgetriebe, DSG...Doppelkupplungsgetriebe).....	23
Tabelle 4-1: Durchschnittswerte aller Fahrzeugdaten.....	24
Tabelle 4-2: Varianten des Durchschnittsgetriebes.....	27
Tabelle 4-3: Schalparameter PHEM [27].....	27
Tabelle 4-4: Vergleich Messung und Simulation mit PHEM Schaltmodell beim Seat Leon im WLTC.....	28
Tabelle 4-5: Vergleich Simulationsergebnis der Getriebevarianten	28
Tabelle 4-6: Emissionswerte des Durchschnittsfahrzeugs im WLTC nach Phasen.....	29
Tabelle 4-7: EU Durchschnitt Neuzulassungen [32].....	30
Tabelle 4-8: Vergleich Durchschnittsfahrzeug Euro 6 zum EU- Durchschnitt	31
Tabelle 4-9: Verfügbare Messungen zur Kennfelderstellung von PHEM Durchschnittsfahrzeugen für HBEFA 3.2	34
Tabelle 4-10: Emissionsfaktoren nach Gewichtung der HBEFA Zyklen	35
Tabelle 5-1: Widerstandsbeiwerte für den WLTC	43
Tabelle 5-2: Messprogramm Audi A3 e-tron.....	45
Tabelle 5-3: Messprogramm RDE	47
Tabelle 5-4: Zulässige Toleranzen der Abweichung zwischen PEMS und CVS[16].....	49
Tabelle 5-5: Emissionsvergleich MOVE- CVS beim WLTC.....	49
Tabelle 5-6: Grenzen zwischen Moderate und Extended Bereich für Höhe und Temperatur bei RDE[11]	50
Tabelle 5-7: Toleranzfaktoren für EURO 6d RDE [11].....	51
Tabelle 5-8: Grenzwerte für RDE	51
Tabelle 5-9: Vergleich der Emissionen der verschiedenen Zyklen.....	51
Tabelle 5-10: Mittlerer positiver Leistungsgradient verschiedener Zyklen	52
Tabelle 5-11: FTIR Schadstoffe und deren Einfluss	53
Tabelle 0-1: Gaskomponenten FTIR.....	75

Anhang

Tabelle 0-1: Gaskomponenten FTIR

Gaskomponente	Einheit
NO (350,3000) 191C	[ppm]
NO ₂ (150) 191C (1of2)	[ppm]
NO ₂ (2000) 191C (2of2)	[ppm]
N ₂ O (100,200,300) 191C (1of2)	[ppm]
NH ₃ (300) 191C (1of2)	[ppm]
NH ₃ (3000) 191C (2of2)	[ppm]
HNCO (400) 191C	[ppm]
H ₂ O% (25) 191C	[%]
Formaldehyde (70,500) 191C	[ppm]
CO ₂ low% (4) 191C (2of2)	[%]
CO ₂ % (20) 191C (1of2) R4	[%]
CO (500) 191C (1of3) span	[ppm]
CO% (1) 191C (2of3) span	[%]
Propylene (200,1000) 191C	[ppm]
Benzene (1000) 191C	[ppm]
Ethylene (100,3000) 191C	[ppm]
CH ₄ (250) 191C (1of2)	[ppm]
CH ₄ (3000) 191C (2of2)	[ppm]
Ethane (1000) 191C	[ppm]
Acetylene (1000) 191C	[ppm]
HNO ₂ (20) 191C	[ppm]
N ₂ O (1040) 191C (2of2)	[ppm]
CO% (10) 191C (3of3)	[%]
MeOH (1000) 191C	[ppm]

Formic Acid (100) 191C	[ppm]
SO ₂ (300) 191C	[ppm]
1,3 Butadien (80) 191C	[ppm]
Acetaldehyde (1000) 191C	[ppm]
COS (100) 150C	[°C]
H ₂ SO ₄ (50) 150C	[ppm]
SO ₂ (1000) 191C	[ppm]
NO ₂ autorange	[ppm]
CO autorange	[ppm]
CH ₄ autorange	[ppm]
NH ₃ autorange	[ppm]
NO _x autorange	[ppm]