



Dominik Sieghartsleitner, BSc

## **Analyse der SCR-Konvertierungsraten eines modernen Diesel-PKW**

### **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplomingenieur  
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

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

Zweitbetreuer

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

Graz, März 2021



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



## **Vorwort**

In der Zeit an der HLT-Steyr entdeckte ich mein Interesse an der Fahrzeug- und Motorentechnik. Dies veranlasste mich mein technisches Wissen im Rahmen eines Maschinenbaustudiums an der Technischen Universität Graz zu vertiefen. Nach meiner Bachelorarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) war für mich klar, dass ich meine Masterarbeit auch im Bereich der Motorentechnik verfassen möchte.

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger bedanken, der diese Arbeit ermöglicht hat und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer für die ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung während meiner Masterarbeit bedanken.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik bedanken, die die Umsetzung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank gilt außerdem meiner Familie, die mir diesen Weg erst ermöglicht und mich dabei in jeder erdenklichen Form unterstützt hat, sowie meinen Freunden und Studienkollegen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>I</b>
<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>IV</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>VII</b>
<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>2</b>
2.1 EMISSIONEN VON DIESELMOTOREN .....	2
2.1.1 Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff .....	2
2.1.2 Kohlenmonoxid (CO) .....	2
2.1.3 Kohlenwasserstoffe (HC) .....	3
2.1.4 Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) .....	3
2.1.5 Feststoffe (Partikel) .....	3
2.1.6 Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) .....	3
2.1.7 Distickstoffmonoxid (N <sub>2</sub> O, Lachgas) .....	3
2.2 MAßNAHMEN ZUR EMISSIONSMINIMIERUNG .....	4
2.2.1 Innermotorische Maßnahmen .....	4
2.2.2 Abgasnachbehandlung .....	4
2.3 ABGASGESETZGEBUNG .....	7
2.3.1 On-Board-Diagnose .....	8
2.4 EMISSIONSMESSUNG .....	8
2.4.1 Messsysteme .....	8
2.4.2 Rollenprüfstandzyklen .....	12
2.4.3 RDE-Messungen .....	13
<b>3 VERMESSUNG DES VERSUCHSFAHRZEUGS</b> .....	<b>16</b>
3.1 VERSUCHSFAHRZEUG .....	16
3.2 MESSAUFBAU .....	18
3.2.1 Messaufbau am Rollenprüfstand .....	18
3.2.2 Messaufbau für RDE-Messungen .....	19
3.3 MESSPROGRAMM .....	20
<b>4 MESSDATENAUSWERTUNG UND MESSERGEBNISSE</b> .....	<b>22</b>
4.1 AUFBEREITUNG DER MESSDATEN .....	22
4.1.1 Berechnung des Abgasmassenstroms .....	22
4.1.2 Umrechnung Emissionskonzentrationen in Emissionsmassen .....	23
4.1.3 Zeitsynchronisation .....	23
4.2 MESSDATENAUSWERTUNG .....	28
4.3 MESSERGEBNISSE .....	29
4.3.1 Vergleich der Messgeräte und Validierung des Messaufbaus .....	29
4.3.2 Vergleich mit Grenzwerten und Zulassungsdaten .....	31
4.3.3 Einfluss der DPF-Regeneration .....	32
4.3.4 Einfluss der Start-Stopp-Automatik .....	34
4.3.5 Verhalten im Leerlauf .....	35
4.3.6 Ermittlung der NH <sub>3</sub> -Speicherfähigkeit .....	36
4.3.7 SCR-Konvertierungsraten .....	37
4.3.8 Zeitliche Verläufe bei RDE-Messungen .....	38
<b>5 SIMULATION MITTELS PHEM</b> .....	<b>40</b>
5.1 FUNKTIONSWEISE PHEM .....	40
5.2 DATENEINGABE IM PHEM .....	42
5.3 JUSTIERUNG DES GENERISCHEN CO <sub>2</sub> -KENNFELDS .....	43
5.4 ERSTELLUNG DER MOTOR- BZW. EMISSIONSKENNFELDER .....	44
5.5 SIMULATION DER ABGASNACHBEHANDLUNG .....	46
5.5.1 SCR-Konvertierungskennfeld .....	48
5.5.2 Justierung Abgastemperaturkennfelds .....	50

---

5.6	VALIDIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS .....	52
5.6.1	<i>Validierung mit abhängigen Zyklen</i> .....	52
5.6.2	<i>Validierung mit unabhängigen Zyklen</i> .....	57
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>60</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>61</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>64</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>67</b>
	<b>FORMELVERZEICHNIS .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>70</b>
7.1	ZEITSYNCHRONISATION.....	70
7.2	MESSERGEBNISSE.....	71
7.3	UMRECHNUNG DER PRÜFSTANDEINSTELLUNGEN FÜR DIE EINGABE IN PHEM.....	72
7.4	SIMULATIONSERGEBNISSE .....	73

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$A$	$m^2$	Fläche
$C$	$\text{mol}/m^3$	Stoffmengenkonzentration
$c_w$	–	Luftwiderstandsbeiwert
$f_{r0}$	–	statischer Rollwiderstandsbeiwert
$f_{r1}$	$s/m$	linearer Rollwiderstandsbeiwert
$i$	–	Laufvariable/Index
$k$	–	Laufvariable/Index
$kkf$	–	Kreuzkorrelationsfaktor
$K$	–	Konvertierungsrate
$L_{st}$	–	stöchiometrischer Luftbedarf
$m$	$\text{kg}$ oder $\text{mol}$	Masse
$\dot{m}$	$\text{kg}/h$	Massenstrom
$M$	$\text{g}/\text{mol}$	molare Masse
$n$	$(k)\text{mol}$	Stoffmenge, Molzahl
$n_{idle}$	$1/\text{min}$	Motorleerlaufdrehzahl
$n_{norm}$	–	normierte Motordrehzahl
$n_{rated}$	$1/\text{min}$	Motornennndrehzahl
$P_e$	$\text{kW}$	Motorleistung
$P_{norm}$	–	normierte Motorleistung
$P_{rated}$	$\text{kW}$	Motornennleistung
$P_{Rolle}$	$\text{kW}$	Rollenleistung
$\dot{Q}_{ht}$	$\text{W}$	Wärmestrom vom Abgas ans Modul
$\dot{Q}_{ht TC}$	$\text{W}$	Wärmestrom vom Abgas ans Thermoelement
$\dot{Q}_{loss}$	$\text{W}$	Wärmestrom vom Modul an die Umgebung
$R_0$	$\text{N}$	statischer Rollwiderstand
$R_1$	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	linearer Rollwiderstand
$R_2$	$\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$	Luftwiderstand
$RG$	$1/\text{s}$	Raumgeschwindigkeit
$Stg$	$\%$	Fahrbahnsteigung
$t$	$\text{s}$	Zeit
$t_{gas}$	$^\circ\text{C}$	Gastemperatur
$t_m$	$^\circ\text{C}$	Temperatur des Moduls
$t_{tc}$	$^\circ\text{C}$	Temperatur des Thermoelements
$t_{quasi stat.}$	$^\circ\text{C}$	quasi stationäre Abgastemperatur am
$t_{qa41}$	–	Motorauslass
$u_{Gas}$	–	U-Wert
$v$	$\text{m}/\text{s}$	Geschwindigkeit
$V$	$\text{m}^3$	Volumen
$\dot{V}$	$\text{m}^3/\text{s}$	Volumenstrom

## Konstanten

$g = 9.81$	m/s <sup>2</sup>	Normfallbeschleunigung
$M_{NH_3} = 17.031$	g/mol	molare Masse Ammoniak
$M_{NO} = 30.01$	g/mol	molare Masse Stickstoffmonoxid
$M_{NO_2} = 46.006$	g/mol	molare Masse Stickstoffdioxid
$p_n = 1.013$	bar	Druck bei Normbedingungen
$R_L = 278.058$	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante Luft
$\rho_L = 1.2$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Luft (bei 20 °C)
$T_n = 273.15$	K	Temperatur bei Normbedingungen

## Griechische Formelzeichen

$\lambda$	–	Luftverhältnis
$\nu$	–	Molanteil
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\tau$	s	Zeit(versatz)

## Operatoren und Bezeichnungen

$\sum$	Summe
$\Delta$	Differenz zweier Größen

## Weitere Indices und Abkürzungen

Abgastemp.	Abgastemperatur
AGR	Abgasrückführung
AGT	Abgastemperatur
AMF	Air Mass Flow (Luftmassenstrom)
Bem.	Bemerkung
BMW	Bayerische Motoren Werke
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAN	Controller Area Network
CF	Conformity Factor (Konformitätsfaktor)
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CSV	Comma-Separated Values
CVS	Constant-Volume-Sampling
DIN	Deutschen Instituts für Normung
DPF	Dieselpartikelfilter
EAS	Exhaust Aftertreatment Simulation (Simulation der Abgasnachbehandlung)
EFM	Exhaust Flow Meter (Abgasmassenstrom-Messgerät)
EG	Europäische Gemeinschaft
EMF	Exhaust Mass Flow (Abgasmassenstrom)
EO	Engine-Out (Motorauslass)
ERMES	European Research on Mobile Emission Sources
EU	Europäische Union
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GPS	Global Positioning System
H <sub>2</sub> O	Wasser
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren

HC	Hydrocarbon (Kohlenwasserstoff)
HD	Hochdruck
HWL	Harnstoffwasserlösung
INRETS	nationalen französischen Forschungsinstitut für Verkehr und Sicherheit
IUFC	INRETS Urbain Fluide Courte
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Kat.	Katalysator
KF	Kennfeld
KKF	Kreuzkorrelationsfaktoren bzw. Kreuzkorrelationskoeffizienten
max.	maximal
Mes	Messung
MS	Microsoft
N <sub>2</sub>	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
ND	Niederdruck
NDIR	Non-Dispersive Infrared Spectroscopy (nichtdispersive IR-Spektroskopie)
NDUV	Non-Dispersive Ultraviolet Spectroscopy (nichtdispersive UV-Spektroskopie)
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
norm	normiert
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
nSCR	nach SCR-Katalysator
NSK	NO <sub>x</sub> -Speicher-katalysator
OBD	On-Board-Diagnose
PEMS	Portable Emission Measurement System
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PID	Parameter Identifier
PKW	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter (Partikelmasse)
PN	Particulate Number (Partikelanzahl)
pos	positive
RDE	Real Driving Emissions
Reg.	Regeneration
RWC	Real World Cycle
SCR	Selective Catalytic Reduction
Sim	Simulation
tat.	tatsächlich
TL	Turbolader
Tol.	Toleranz
TP	Tailpipe (Auspuffendrohr)
u.	und
u.U.	unter Umständen
usw.	und so weiter
VBA	Visual Basic for Applications
vSCR	vor SCR-Katalysator
WLTC	Worldwide harmonized Light duty Test Cycle
z.B.	zum Beispiel
zw.	zwischen

## **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.

Dominik Sieghartsleitner

Graz, März 2021



## Kurzfassung

Strengere Abgasgrenzwerte bei gleichzeitiger Forderung nach reduziertem Kraftstoffverbrauch stellen hohe Ansprüche an die Abgasnachbehandlung. Vor allem die Einhaltung der Stickoxidgrenzwerte im realen Betrieb stellt dabei eine Herausforderung dar. Bei Dieselfahrzeugen sind SCR-Systeme der Stand der Technik zur Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die Emissionen eines modernen Diesel-PKW am Rollenprüfstand sowie im realen Straßenverkehr (RDE) gemessen, um das Verhalten des SCR-Systems in verschiedenen Betriebsphasen zu analysieren sowie Einflussparameter auf die NO<sub>x</sub>-Konvertierung untersuchen zu können. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen in die nächste Aktualisierung des Handbuches für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) einfließen. Dieses Handbuch enthält Emissionsfaktoren in g/km bzw. #/km für Zweiräder, PKW sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge und spiegelt das durchschnittliche Emissionsniveau von Kraftfahrzeugen in Europa wider.

Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, zeigten, dass das SCR-System des untersuchten Dieselfahrzeugs in allen Betriebszuständen durchwegs hohe NO<sub>x</sub>-Konvertierungsraten erzielt. Des Weiteren zeigten die Messungen, dass die NO<sub>x</sub>-Konvertierung in sehr niederlastigen Betriebsphasen (z.B. Stausituationen) maßgeblich vom NH<sub>3</sub>-Speicherstand im SCR-Katalysator abhängig ist.

Mithilfe der gewonnenen Messdaten wurden verschiedene Simulationsvarianten verglichen, um zu untersuchen, wie die Messergebnisse am besten reproduziert werden können. Damit soll in Zukunft das Emissionsniveau moderner Diesel-PKW auch in unabhängigen Zyklen gut vorausgesagt werden können. Die Simulationen wurden mithilfe des Simulationsprogramms PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) durchgeführt. Der Vergleich der Varianten zeigt, dass durch die detaillierte Berücksichtigung des Verhaltens des SCR-Systems eine deutlich genauere Simulation der NO<sub>x</sub>-Emissionen erreicht wird.

## Abstract

Stricter emission limits in combination with the requirement of high fuel efficiency are very demanding in terms of exhaust gas after-treatment. Especially the compliance with the emission limits for nitrous oxides in real driving conditions constitutes a challenge. SCR-systems are the state of the art in terms of reducing the NO<sub>x</sub> emissions in diesel vehicles.

As part of this work the emissions of a modern diesel passenger car were measured on a chassis dynamometer and under real driving situations in road traffic. The goal was to analyse the behaviour of the SCR-system in various scenarios and to determine parameters influencing the performance of the NO<sub>x</sub>-conversion. The gathered insights will be incorporated into the next update of the handbook of emission factors for road transport (HBEFA). This handbook contains emission factors in g/km or #/km for motorcycles, passenger cars as well as light- and heavy-duty vehicles reflecting the average emission level of motor vehicles in Europe.

The conducted measurements show that the SCR-systems of the modern diesel vehicle reach high NO<sub>x</sub>-conversion rates in all driving scenarios. Furthermore, the NH<sub>3</sub> loading of the SCR-catalyst was determined as the main influencing factor for the NO<sub>x</sub>-conversion during phases of low engine load (e.g. stop and go traffic).

Based on the measurement data different simulation variants were compared in order to determine how to reproduce the measurement results most accurately. This should provide the possibility to predict the emission level of modern diesel vehicles in representative driving cycles. The simulations were conducted with the simulation program PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model). The comparison of the variants shows that the explicit consideration of the SCR-system behaviour provides a higher accuracy in simulation of NO<sub>x</sub> emissions.

# 1 Einleitung

Aufgrund der stetigen globalen Verschärfungen der Abgasgrenzwerte werden immer komplexere Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffe bei gleichzeitiger Senkung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nötig. Motorische Maßnahmen allein reichen hierzu schon lange nicht mehr aus, weshalb aufwendige Abgasnachbehandlungssysteme zum Einsatz kommen. Bei Fahrzeugen mit Dieselmotor werden Dieselpartikelfilter, NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysatoren und SCR-Systeme verwendet, um auch im realen Fahrbetrieb niedrige Schadstoffemissionen zu erreichen. SCR-Systeme stellen dabei den Stand der Technik zur Minimierung der Stickoxid-Emissionen dar.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Messung und Simulation der Abgasemissionen eines modernen Dieselfahrzeugs. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Analyse des Verhaltens von SCR-Systemen sowie der von ihnen erreichten NO<sub>x</sub>-Konvertierungsraten. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen in die nächste Aktualisierung des Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEFA) einfließen. Das HBEFA enthält Emissionsfaktoren in g/km bzw. #/km für 2-Räder, PKW sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge und soll das durchschnittliche Emissionsniveau von Kraftfahrzeugen in Europa widerspiegeln.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Emissionsmessungen am Rollenprüfstand und im realen Straßenverkehr durchgeführt. Die gewonnenen Messdaten stellen die Basis für die durchgeführten Analysen des Verhaltens des SCR-Systems in den unterschiedlichsten Betriebszuständen bzw. Fahrsituationen dar.

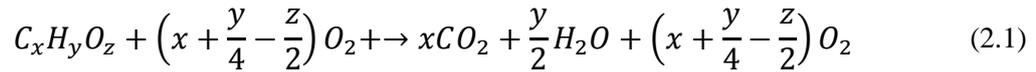
Weiters erfolgten Emissionssimulationen mit und ohne detaillierter Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung. Die in den Emissionsmessungen erhobenen Daten fließen auch in dem Aufbau des Simulationsmodells ein. Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgte durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den am Rollenprüfstand und im Straßenverkehr erhobenen Messdaten.

Zunächst wird auf die wichtigsten theoretischen Grundlagen bezüglich der Emissionen und Maßnahmen zu deren Minderung bei Dieselfahrzeugen eingegangen. Zudem werden die Abgasgesetzgebung sowie die verwendeten Messverfahren und -geräte näher beschrieben. Danach werden die Methodik sowie die Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Emissionen von Dieselmotoren

Der Kraftstoff Diesel besteht größtenteils aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffverbindungen. Die vollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen führt neben dem Freiwerden von Wärmeenergie zur Bildung von Wasserdampf ( $H_2O$ ) und Kohlendioxid ( $CO_2$ ). Die Reaktionsgleichung für die vollständige Verbrennung eines allgemeinen Kohlenwasserstoffs mit der Summenformel  $C_xH_yO_z$  lautet: [8]



In Realität läuft die Verbrennung im Motor jedoch nie vollständig ab und es entstehen neben  $H_2O$  und  $CO_2$  unerwünschte Abgaskomponenten, die als Schadstoffe bezeichnet werden. Abbildung 2.1 zeigt die Zusammensetzung des Rohabgases eines Dieselmotors bei Teillast (Angaben in Gewichtsprozent). [20]

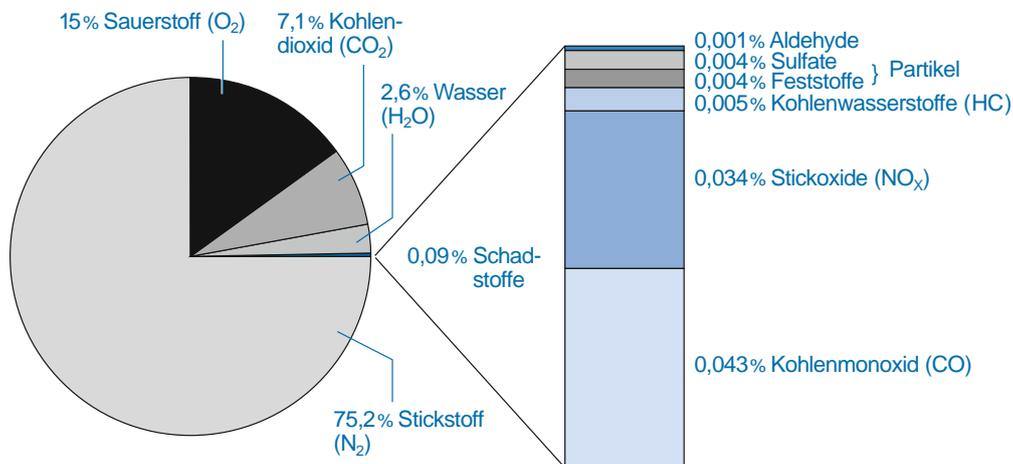


Abbildung 2.1: Rohabgaszusammensetzung beim Diesel-Motor im Teillastbereich [20]

#### 2.1.1 Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff

Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff sind Produkte der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Luft. Kohlendioxid ( $CO_2$ ) ist ein Treibhausgas und somit mitverantwortlich für den Klimawandel. Das  $CO_2$  im Abgas stammt aus dem chemisch im Kraftstoff gebundenen Kohlenstoff, weshalb die Menge des freigesetzten Kohlendioxids direkt proportional dem Kraftstoffverbrauch ist. Das Wasser ( $H_2O$ ) im Abgas stammt aus dem chemisch im Kraftstoff gebundenen Wasserstoff. Stickstoff ( $N_2$ ) stellt den größten Anteil im Abgas dar und nimmt als Inertgas nicht an der Verbrennung teil. Er stammt praktisch vollständig aus der vom Motor angesaugten Luft. [8] [20]

#### 2.1.2 Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid (CO) ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas. CO ist ein Atemgift, da es sich stärker an das Bluthämoglobin bindet als Sauerstoff. Es entsteht vor allem bei Verbrennung unter Luftmangel durch die unvollständige Oxidation des Kohlenstoffs im Kraftstoff. [8]

### 2.1.3 Kohlenwasserstoffe (HC)

Durch mangelhafte Verbrennung des Kraftstoffs gelangen nicht oder nur teilweise oxidierte Kohlenwasserstoffverbindungen (engl. Hydro Carbons, HC) in das Abgas. Ihre gesundheitliche Wirkung ist sehr unterschiedlich und reicht von relativ unbedenklich bis hin von kanzerogen. [7]

### 2.1.4 Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Stickoxide ist der Sammelbegriff für die Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). Stickstoffmonoxid ist farb- und geruchlos und oxidiert in der Atmosphäre weiter zu Stickstoffdioxid. Stickstoffdioxid ist ein rotbraunes, stechend riechendes, giftiges Gas. Stickoxide entstehen in Anwesenheit von genügend Sauerstoff vor allem bei hohen Verbrennungstemperaturen. Bedingt dadurch, dass die Verbrennung bei Dieselmotoren immer bei Luftüberschuss stattfindet, kommt es dabei zur vermehrten Stickoxidbildung. [7] [20]

### 2.1.5 Feststoffe (Partikel)

Partikel (engl.: Particulate Matter, PM), auch bekannt als Ruß, bestehen vorwiegend aus reinem Kohlenstoff, an den sich teilweise Kohlenwasserstoffe anlagern. Starker örtlicher Luftmangel führt bei hohen lokalen Temperaturen im Dieselmotor zur Bildung von Rußpartikeln, die im Verdacht stehen, krebserregend zu sein. Im Gegensatz zu den anderen limitierten Schadstoffen ist bei den Partikeln nicht nur die Massensemission (in g/km), sondern auch die Anzahl (engl. Particulate Number, PN) (in #/km) durch die Abgasgesetzgebung begrenzt. [7]

### 2.1.6 Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

Ammoniak ist ein giftiges, farbloses und stechend riechendes Gas. Es stammt nicht aus der Verbrennung selbst, sondern wird dem Abgas bei Fahrzeugen mit SCR-System als Reduktionsmittel zur Reduktion der Stickoxide zugeführt. Für PKW sind die Ammoniak-Emissionen gesetzlich nicht limitiert. Die Geruchsschwelle ist sehr subjektiv und liegt in der Luft im Durchschnitt bei etwa 15ppm [21]. [27]

### 2.1.7 Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O, Lachgas)

Distickstoffmonoxid kann bei der Umwandlung von Stickoxiden in Katalysatoren entstehen (unvollständige Reduktion von NO und NO<sub>2</sub>). Lachgas ist ein Treibhausgas, dessen Treibhauspotential etwa 290-mal so hoch ist wie das von CO<sub>2</sub>. [9]

## 2.2 Maßnahmen zur Emissionsminimierung

Hinsichtlich der Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen werden innermotorische Maßnahmen und außermotorische Maßnahmen, die auch als Abgasnachbehandlung bezeichnet werden, unterschieden. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Maßnahmen kurz erklärt.

### 2.2.1 Innermotorische Maßnahmen

Zu den wichtigsten innermotorischen Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemission zählt die Abgasrückführung (AGR). Sie ermöglicht die Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Rohemission beim Dieselmotor. Bei der Abgasrückführung wird ein Teil des verbrannten Abgases dem Brennraum wieder zugeführt. Dies bewirkt eine Absenkung der Verbrennungstemperatur, der Verbrennungsgeschwindigkeit sowie des lokalen Luftverhältnisses und damit eine reduzierte  $\text{NO}_x$ -Bildung. Je nachdem wo das Abgas entnommen wird, unterscheidet man Hochdruck- (HD) und Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR) (siehe Abbildung 2.2). Bei der HD-AGR erfolgt die Abgasentnahme vor der Turboladerturbine, bei der ND-AGR hingegen nach der Turbine. Eine weitere Möglichkeit stellt die interne Abgasrückführung dar, bei der durch variable Ventilsteuerzeiten der Restgasgehalt im Brennraum erhöht wird. [20] [27]

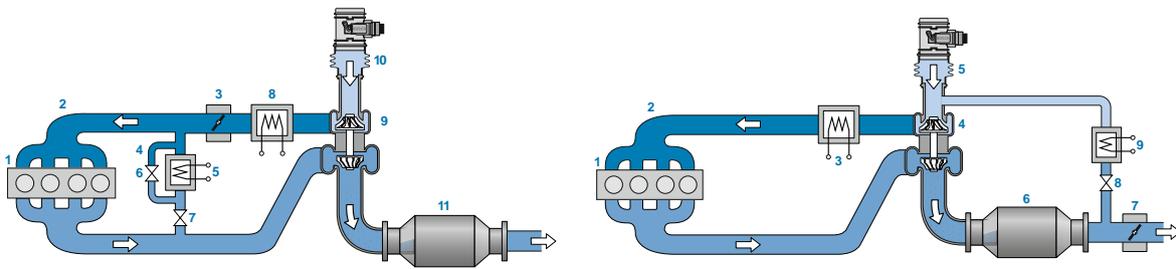


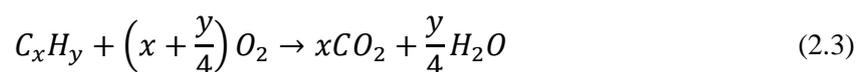
Abbildung 2.2: HD-AGR (links) und ND-AGR (rechts) [21]

### 2.2.2 Abgasnachbehandlung

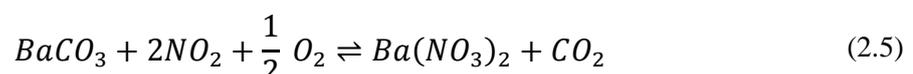
#### 2.2.2.1 $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysator

$\text{NO}_x$ -Speicherkatalysatoren (NSK) ermöglichen die Reduktion von  $\text{NO}_x$ -Emissionen ohne einen zusätzlichen Betriebsstoff. Neben einer Edelmetallbeladung (Platin oder Rhodium) besitzen diese Katalysatoren noch eine Beschichtung zur  $\text{NO}_x$ -Speicherung. Als  $\text{NO}_x$ -Speicherkomponenten dienen die Oxide und Karbonate der Alkali- und Erdalkalimetalle, wobei insbesondere Bariumverbindungen Verwendung finden. [21]

Bei Luftüberschuss (mageres Abgas) ermöglicht die Edelmetallbeladung die Oxidation der CO- und HC-Emissionen entsprechend den Gleichungen (2.2) und (2.3).



Die Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Emissionen erfolgt in einem zweistufigen Prozess. Bei magerem Abgas wird NO zunächst zu  $\text{NO}_2$  oxidiert, das dann mit der Speicherkomponente ein Nitrat bildet.



Die Speicherung der  $\text{NO}_x$ -Emission nach Gleichung (2.5) ist bei Abgastemperaturen von 250 bis 450 °C optimal. Bei höheren Temperaturen sind die gebildeten Nitrats instabil und zerfallen. Mit zunehmender Menge an eingespeicherten  $\text{NO}_x$  nimmt die Speicherfähigkeit des NSK ab und ein Teil der in den Katalysator strömenden  $\text{NO}_x$  wird nicht mehr gespeichert. Der NSK muss daher regeneriert werden. Dazu wird der Motor kurzzeitig fett betrieben, wodurch ein Sauerstoffmangel im Abgas herrscht. Die Nitrats zerfallen dadurch wieder zu Stickoxiden (Gleichung (2.6)), die an der Edelmetallbeschichtung mit den im fetten Abgas enthaltenen CO- und HC-Emissionen zu  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  reagieren (Gleichung (2.7)). Der zweistufige Prozess der Stickoxidreduktion in einem NSK ist in Abbildung 2.3 nochmals veranschaulicht. [21]

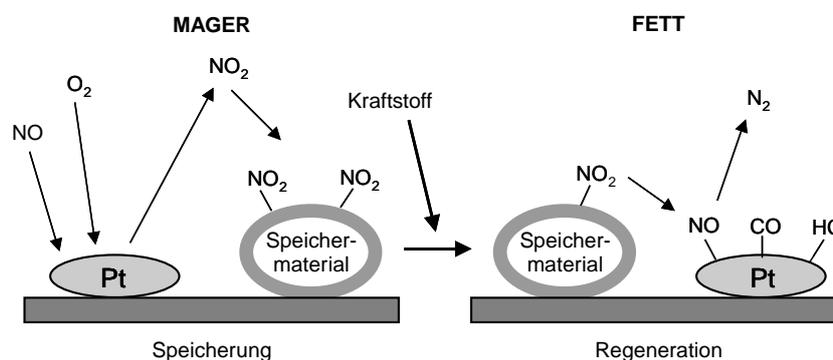
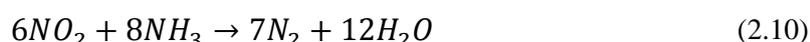
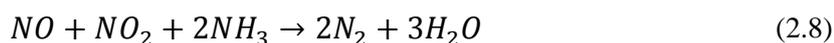


Abbildung 2.3: Prinzip der  $\text{NO}_x$ -Speicherung und Regeneration im NSK [27]

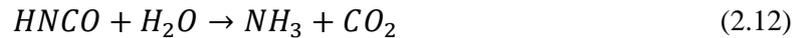
Abhängig vom Betriebspunkt ist eine Regeneration alle 30 bis 300 Sekunden nötig. Die Regeneration selbst dauert etwa 2 bis 10 Sekunden. Die Speicherbeschichtung des NSK hat eine hohe Affinität zu Schwefel. Der im Kraftstoff und vor allem der im Schmieröl enthaltene Schwefel bindet sich stärker an die Speicherplätze als die Stickoxide und wird bei einer normalen Regeneration nicht entfernt. Um ihn zu entfernen, ist eine Desulfatierung notwendig. Der Katalysator wird dazu für etwa 5 Minuten auf über 650 °C aufgeheizt und mit fettem Abgas beaufschlagt. Eine Desulfatierung ist etwa alle 500 bis 2500 km nötig. [21]

### 2.2.2.2 Selektive katalytische Reduktion

Im SCR-Prozess (Selective Catalytic Reduction) werden die Stickoxide im Abgas an einem geeigneten Katalysator mit einem Reduktionsmittel zu Stickstoff reduziert. Als Reduktionsmittel dient dabei typischerweise Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Die Reduktion mit  $\text{NH}_3$  läuft gemäß den Gleichungen (2.8) bis (2.10) ab. [21]



Aus Sicherheitsgründen wird Ammoniak nicht in reiner Form im Fahrzeug mitgeführt. Stattdessen wird eine Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL), die etwa 32 % Harnstoff enthält, als Trägersubstanz verwendet. Die HWL wird vor dem Katalysator von einem Dosiermodul ins Abgas eingespritzt. Bei Temperaturen ab 180 °C (Dosiertemperatur) wird durch Thermolyse (2.11) und anschließende Hydrolyse (2.12)  $\text{NH}_3$  freigesetzt. Bei Temperaturen darunter findet üblicherweise keine Dosierung statt, um Ablagerungen zu vermeiden. [21]



Das freigesetzte  $NH_3$  wird vom SCR-Katalysator absorbiert und steht dort für die SCR-Reaktionen zur Verfügung. Bei Abgastemperaturen von unter  $250\text{ °C}$  dominiert die sog. Fast-SCR-Reaktion nach Gleichung (2.8). Die  $NO_x$ -Konvertierungsrate eines SCR-Systems, im Folgenden auch SCR-Konvertierungsrate genannt, ist nach Gleichung (2.13) definiert. Sie ist von der Temperatur und dem Verhältnis  $NO_2:NO$  abhängig (siehe Abbildung 2.4). Im Temperaturbereich von  $180$  bis  $450\text{ °C}$  lassen sich hohe  $NO_x$ -Konvertierungsraten erreichen. [21] [26]

$$K_{SCR} = K_{NO_x} = \frac{NO_x \text{ vor SCR} - NO_x \text{ nach SCR}}{NO_x \text{ vor SCR}} \quad (2.13)$$

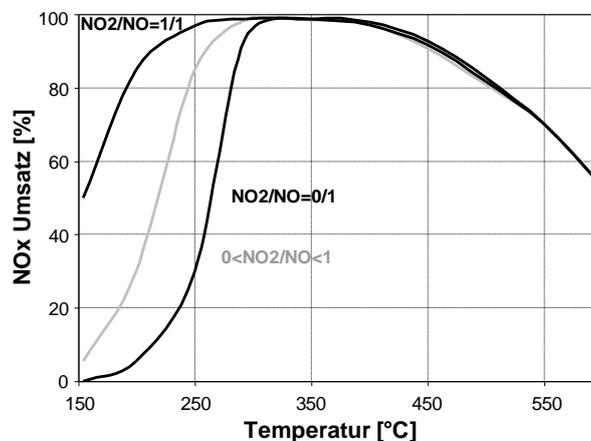


Abbildung 2.4:  $NO_x$ -Konvertierungsrate eines SCR-Systems [26]

Wie bereits erwähnt, ist der SCR-Katalysator in der Lage,  $NH_3$  zu absorbieren (Speichervermögen). Ein typischer SCR-Kat. kann etwa  $1\text{ g }NH_3/L\text{ Kat.-Volumen}$  speichern. Wie in Abbildung 2.5 ersichtlich, nimmt die  $NH_3$ -Speicherfähigkeit jedoch mit steigender Temperatur stark ab. Infolge eines starken Anstiegs der Abgastemperatur kann es daher zur Desorption von gespeichertem  $NH_3$  und somit zu  $NH_3$ -Emissionen kommen. [21] [26]

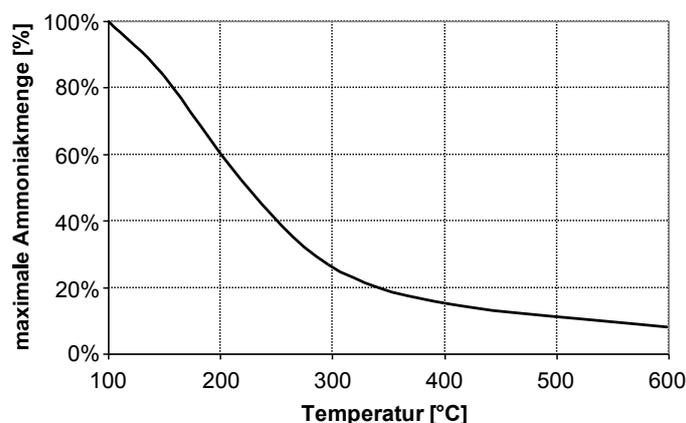


Abbildung 2.5:  $NH_3$ -Speicherfähigkeit eines SCR-Katalysators [26]

Unterhalb der Dosiertemperatur bewirkt der  $NH_3$ -Bedarf der SCR-Reaktion einen Verbrauch der im SCR-Katalysator eingelagerten  $NH_3$ -Menge. Mit Abnahme der gespeicherten  $NH_3$ -Beladung kommt es zu einer Abnahme der SCR-Konvertierungsrate.

### 2.2.2.3 Dieselpartikelfilter

Dieselpartikelfilter (DPF) bestehen aus einem porösem Siliziumkarbid- oder Cordieritmaterial, das von einer Vielzahl paralleler Kanäle durchsetzt ist. Diese Kanäle sind wechselseitig verschlossen, wodurch das Abgas durch die porösen Wände strömen muss (siehe Abbildung 2.6). Dabei werden Partikel aus dem Abgas abgeschieden. Es werden Filterwirkungsgrade von über 95 % erreicht. Mit zunehmender Beladung wird der freie Strömungsquerschnitt für das Abgas geringer und der Abgasgedruck steigt, was sich negativ auf den Kraftstoffverbrauch des Motors auswirkt. Der DPF muss bei entsprechender Beladung regeneriert werden. Dies geschieht durch Anheben der Abgastemperatur auf über 600 °C, wodurch die Partikel abbrennen. [20]

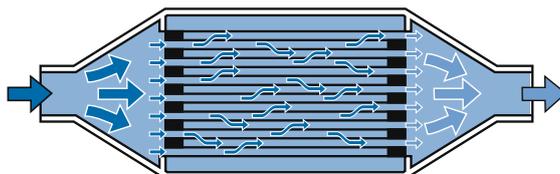


Abbildung 2.6: Aufbau eines Dieselpartikelfilters [20]

## 2.3 Abgasgesetzgebung

Um eine Zulassung für den Straßenverkehr zu erhalten, muss jeder PKW gewisse Normen erfüllen. Dazu zählen auch die Abgasnormen. Diese, in der Abgasgesetzgebung festgelegten Abgasnormen, limitieren die Emission der Schadstoffe Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), sowie Partikelmasse (PM) und -anzahl (PN). Jede Abgasnorm beinhaltet dabei Grenzwerte für die limitierten Emissionen, wobei sich diese Grenzwerte für Otto- und Dieselmotor unterscheiden. Die Abgasgesetzgebung ist global verschieden. Überall erfolgt jedoch durch die Reduktion der Grenzwerte eine zunehmende Verschärfung. Tabelle 2.1 zeigt die Grenzwerte der aktuellen, europäischen Abgasnorm Euro 6.

Tabelle 2.1: Grenzwerte im Typprüfzyklus für Euro 6b, 6c, 6d-Temp und 6d [28] [29]

	CO in mg/km	HC in mg/km	NO <sub>x</sub> in mg/km	HC + NO <sub>x</sub> in mg/km	PM in mg/km	PN in #/km
Ottomotor	1000	100	60	-	4.5	6E+11
Dieselmotor	500	-	80	170	4.5	6E+11

Diese Grenzwerte müssen bei der Emissionsmessung auf einem Rollenprüfstand in einem genormten Typprüfzyklus eingehalten werden. Als Typprüfzyklus gilt seit September 2017 für alle neu typisierten bzw. seit September 2018 für alle neu zugelassenen PKW der WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle).

Zeitgleich mit der Einführung des WLTC wurden Emissionsmessungen im realen Fahrbetrieb (Real Driving Emissions, RDE) als verpflichtender Bestandteil der Typprüfung eingeführt. Für diese Messungen gelten eine Vielzahl vorgeschriebener Randbedingungen, die eingehalten werden müssen. Die Emissionsgrenzwerte für RDE-Messungen sind dabei um einen sogenannten Konformitätsfaktor (CF) höher als jene im Typprüfzyklus (siehe Tabelle 2.2). Bei RDE-Messungen sind nur die NO<sub>x</sub>- und PN-Emissionen limitiert. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind wie im WLTC nicht limitiert, müssen jedoch trotzdem gemessen werden. Die CO-Emissionen müssen ebenfalls gemessen werden. [6]

Tabelle 2.2: Konformitätsfaktoren Faktoren für RDE-Messungen [31]

Abgasnorm	NO <sub>x</sub>	PN
Euro 6d-Temp	2.1	1.5
Euro 6d	1.43	1.5

### 2.3.1 On-Board-Diagnose

Unter On-Board-Diagnose (OBD) versteht man ein vom Gesetzgeber vorgeschriebenes Diagnosesystem zur Überwachung aller emissionsrelevanter Bauteile, Systeme und Prozesse um Fehler, die zu einer Emissionsverschlechterung führen, zu erkennen, zu speichern und auszugeben [11]. Etwaige Fehler werden im Kombiinstrument angezeigt und detailliertere Fehlerinformationen müssen zusätzlich über eine genormte Kommunikationsschnittstelle (Stecker und Protokoll) abrufbar sein (siehe z.B. Norm [24]). Dadurch wird ein Auslesen des Fehlerspeichers mittels am freien Markt erhältlichen Testern, sogenannten Scan-Tools, ermöglicht. Neben dem Auslesen von Fehlern muss die OBD noch weitere Betriebsarten, welche als Services bzw. Modes bezeichnet werden, unterstützen. Dazu zählt unter anderem auch das Auslesen von aktuellen Messwerten der überwachten Systeme (z.B. Motordrehzahl und Fahrgeschwindigkeit) im Mode 1. [21]

Hintergrund der Einführung der OBD war es geringe Abgasemissionen auch im Alltag durch ständige Überwachung der zunehmend komplexer werdenden elektronischen Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung sicher zu stellen. Die Überwachungsfunktionen dürfen unter bestimmten Bedingungen abgeschaltet werden, um Fehldiagnosen zu Vermeiden. Mit den strenger werdenden Abgasgrenzwerten werden auch die gesetzlichen Anforderungen an die OBD immer umfangreicher. So erfordern die aktuellen OBD-Normen (OBD II bzw. EOBD) in allen PKW die Überwachung von Einspritzsystem, Katalysatoren, Partikelfiltern und NO<sub>x</sub>-Abgasnachbehandlungssystemen. [21] Aus der großen Anzahl überwachter Komponenten resultiert eine Vielzahl, über den OBD-Mode 1, abfragbarer Messwerte bzw. Parameter. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde von der Möglichkeit, Parameter der Motorsteuerung per OBD in Echtzeit abfragen zu können, Gebrauch gemacht. Als Beispiele für solche Parameter seien an dieser Stelle die Stickoxidkonzentrationen und Abgastemperaturen an verschiedenen Positionen im Abgasstrang genannt, deren messtechnische Erfassung sonst nur mit größerem Aufwand möglich gewesen wäre (siehe Kap. 2.4.1 und 3.1).

## 2.4 Emissionsmessung

Emissionsmessungen können sowohl auf Rollenprüfständen als auch während der Fahrten im Straßenverkehr durchgeführt werden. Die dazu im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messgeräte, Rollenprüfstandzyklen und RDE-Routen werden im Folgenden kurz beschrieben.

### 2.4.1 Messsysteme

#### 2.4.1.1 PKW-Rollenprüfstand mit CVS-Anlage

Rollenprüfstände ermöglichen die Messung von Abgasemissionen unter reproduzierbaren Bedingungen. Die Emissionsmessungen im Rahmen der Typgenehmigung von PKW werden u.a. auch auf Rollenprüfständen durchgeführt. Das Fahrzeug wird dazu mit seinen Antriebsrädern auf Rollen gestellt. Über einen Bildschirm wird dem Prüfstandsfahrer ein Soll-Geschwindigkeitsverlauf vorgegeben. Die Fahrwiderstände sowie Massenträgheiten des Fahrzeugs werden über elektrische Maschinen, die mit den Rollen verbunden sind und diese bremsen bzw. antreiben, simuliert. [9]



### 2.4.1.3 PEMS

Unter PEMS (portable emission measurement system) versteht man ein mobiles Messsystem zur Messung der Abgasemissionen – vorwiegend im realen Fahrbetrieb auf der Straße. Aufgrund des geringen Platzbedarfs können diese Messgeräte im Kofferraum untergebracht, oder auf der Anhängerkupplung montiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein *AVL M.O.V.E iS* PEMS verwendet. Dieses Messsystem umfasst Messgeräte für Abgasemissionen (Gas-PEMS, PN-PEMS), ein Exhaust Flow Meter (EFM), einen GPS-Empfänger sowie eine Wetterstation, die alle mit der Rechereinheit (System Control) verbunden sind. In der nachstehenden Tabelle 2.3 sind die Messgeräte des eingesetzten PEMS mit den von ihnen erfassten Größen aufgelistet. Gleich wie beim FTIR erfolgt auch hier eine unverdünnte Entnahme aus dem Abgasstrom. [2]

Tabelle 2.3: Messgeräte des *AVL M.O.V.E iS* PEMS [2]

Messgerät	Erfasste Messgrößen ( <i>Messprinzip</i> )
Gas-PEMS	Konzentrationen CO/CO <sub>2</sub> ( <i>NDIR</i> <sup>1</sup> ) und NO/NO <sub>2</sub> ( <i>NDUV</i> <sup>2</sup> )
PN-PEMS	Partikelanzahl ( <i>Diffusionsaufladung</i> )
Exhaust Flow Meter	Abgasmassenstrom ( <i>Differenzdruckmessung</i> )
GPS-Empfänger	Geschwindigkeit, Position, Richtung
Wetterstation	Luftdruck, Umgebungstemperatur u. Luftfeuchtigkeit

### 2.4.1.4 OBD Scan-Tool

Für diese Arbeit wurde das Scan-Tool *OBD-Link SX* der Firma *OBD Solutions LLC* verwendet. Dieses kann per USB mit einem Laptop oder Smartphone verbunden werden. In Kombination mit der zugehörigen Software (*OBDWiz*) bzw. App (*OBDLink*) können damit über die OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs nicht nur Fehlercodes ausgelesen, sondern auch OBD-Messwerte in Echtzeit abgefragt und aufgezeichnet werden. Mit dem verwendeten Scan-Tool können bis zu 200 Parameter pro Sekunde abgerufen werden [25]. Sowohl die Prüfstandsteuerung als auch das PEMS ermöglichen zwar eine Aufzeichnung von OBD-Messwerten, unterstützen jedoch im Vergleich zum genannten Scan-Tool nur einen kleinen Teil der in den OBD-Normen definierten Parametern.

### 2.4.1.5 NO<sub>x</sub>-Sensoren

NO<sub>x</sub>-Sensoren werden im Abgasstrang von Dieselfahrzeugen eingesetzt, um die Stickoxidkonzentrationen an unterschiedlichen Stellen zu messen. Sie ermöglichen einerseits einen geschlossenen Regelkreis für die Motorsteuerung und andererseits eine ständige Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion der NO<sub>x</sub>-Abgasnachbehandlungssysteme. [21]

Da im Rahmen dieser Arbeit während der Messungen die Messsignale der NO<sub>x</sub>-Sensoren aufgezeichnet werden konnten, wird an dieser Stelle deren Messprinzip kurz erläutert.

<sup>1</sup> NDIR: Non-Dispersive Infrared Spectroscopy (nichtdispersive IR-Spektroskopie)

<sup>2</sup> NDUV: Non-Dispersive Ultraviolet Spectroscopy (nichtdispersive UV-Spektroskopie)

### Aufbau und Funktionsweise

Ein Stickoxidsensor setzt sich aus einer Messsonde und der zugehörigen Auswerteelektronik zusammen, die untrennbar miteinander verbunden sind. Die Auswerteelektronik regelt die Messsonde und die Kommunikation des Sensors mit dem CAN-Bus (Controller Area Network) des Fahrzeugs. Die Messsonde besteht aus zwei nacheinander angeordneten Kammern, welche in einem Feststoffelektrolyten auf Basis von Zirkondioxid-Keramik eingelassen sind. Diese Keramik wird ab etwa 300 °C für Sauerstoffionen leitend. Für ein rasches Erreichen der Betriebstemperatur sorgen in der Keramik eingelassene Heizelemente. Durch Anlegen einer Spannung an, auf der Innen- und Außenseite der Sondenkeramik angebrachten, Elektroden können Sauerstoffmoleküle in Ionen zerlegt und durch den Festelektrolyten ausgeleitet werden (Sauerstoff-Pumpzelle). [18]

Mittels einer oder zweier solcher Sauerstoff-Pumpzellen wird dem in die Messsonde strömenden Abgas zunächst der gesamte Restsauerstoff entzogen, bevor es die NO<sub>x</sub>-Zelle in der zweiten Kammer erreicht. Diese NO<sub>x</sub>-Zelle besteht aus einer katalytischen Schicht, welche die Stickoxide im verbleibenden Gasgemisch in O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> aufspaltet. Mit einer weiteren Sauerstoff-Pumpzelle wird der dabei entstehende Sauerstoff aus der Kammer entfernt. Der Pumpstrom, um den Sauerstoff aus der Kammer auszuleiten, ist dabei der Sauerstoffkonzentration und somit auch der Stickoxidkonzentration proportional. In Abbildung 2.8 ist eine NO<sub>x</sub>-Messsonde sowie deren Funktion schematisch dargestellt. [18] [23]

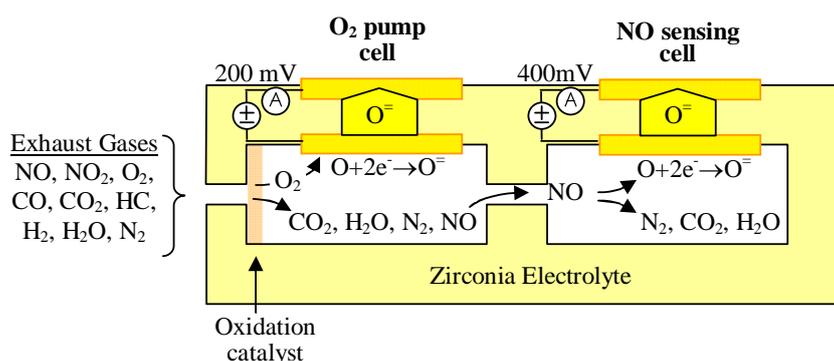


Abbildung 2.8: Aufbau und Funktion der Messsonde eines NO<sub>x</sub>-Sensors [23]

Da die im Abgas enthaltenen CO und HC die Genauigkeit der NO<sub>x</sub>-Messung negativ beeinflussen können, werden diese vor Eintritt in die erste Kammer meist zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O oxidiert [23]. In Betriebszuständen bei denen hohe CO- und HC-Konzentrationen im Abgas auftreten (z.B. NSK-Regeneration) werden die NO<sub>x</sub>-Sensoren abgeschaltet, da diese sonst falsche Messdaten liefern würden. Weiters kann es nach längeren Standzeiten (z.B. Kaltstart) vorkommen, dass die NO<sub>x</sub>-Sensoren erst nach 15-20 Minuten Fahrt aktiviert werden. Grund hierfür ist die hohe Betriebstemperatur von 600 bis 800 °C, die in der zweiten Kammer erreicht werden muss, um die Stickoxide aufzuspalten. Dabei ist zu beachten, dass Ammoniak bei Anwesenheit von Sauerstoff und Temperaturen von 650 °C zu NO und H<sub>2</sub>O reagiert. Daher besitzen NO<sub>x</sub>-Sensoren eine Querempfindlichkeit zu Ammoniak. [21]

## 2.4.2 Rollenprüfstandzyklen

Bei Emissionsmessungen am Rollenprüfstand wird eine Soll-Geschwindigkeit, ein Soll-Gang und ein Steigungsvlauf in Abhängigkeit der Zeit vorgegeben. Die Kombination dieser Vorgaben wird als Fahrzyklus bezeichnet. Bei Fahrzeugen mit Automatikgetrieben entfällt die Gangvorgabe. Weiters wird für die meisten Zyklen keine Steigung eingestellt. Hinsichtlich der Startbedingung bzw. Konditionierung, die sich auf die Temperatur des Motorkühlwassers bei Messstart bezieht, wird zwischen Zyklen mit Kalt- und Warmstart unterschieden. Von einem Kaltstart spricht man, wenn das Kühlwasser etwa Umgebungstemperatur hat. Bei einem Warmstart liegt die Kühlwassertemperatur über 70°C. Nachfolgend sind die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Zyklen kurz beschrieben.

### 2.4.2.1 WLTC

Der Worldwide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) stellt seit September 2017 die Basis für die Emissionsmessung im Rahmen der EG-Typgenehmigung dar. Bei diesem Zyklus erfolgt immer ein Kaltstart und die Phasenanzahl ist abhängig vom Leistungsgewicht des Fahrzeugs. Für das im Rahmen dieser Arbeit vermessene Versuchsfahrzeug, sowie für die meisten PKW, hat der Zyklus vier Phasen. Abbildung 2.9 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf sowie die Zyklusphasen des WLTC. [30]

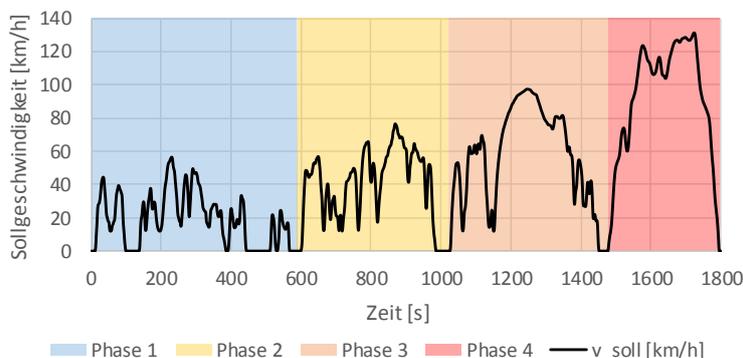


Abbildung 2.9: Geschwindigkeitsverlauf und Phasen des WLTC

### 2.4.2.2 ERMES V9-Zyklus

Der ERMES-Zyklus wurde von der ERMES Group (European Research on Mobile Emission Sources) entwickelt, um reale Straßenfahrten zu repräsentieren. Beim ERMES V9 handelt es sich um die neunte Version dieses Zyklus. Er umfasst drei Phasen und kann als Warm- oder Kaltstart gefahren werden. Charakteristisch für den ERMES-Zyklus sind die hohen Geschwindigkeiten und steilen Geschwindigkeitsrampen. Dieser Zyklus weist daher eine höhere Last und Dynamik als der WLTC auf. In Abbildung 2.10 sind der Verlauf der Soll-Geschwindigkeit und die drei Phasen dargestellt.

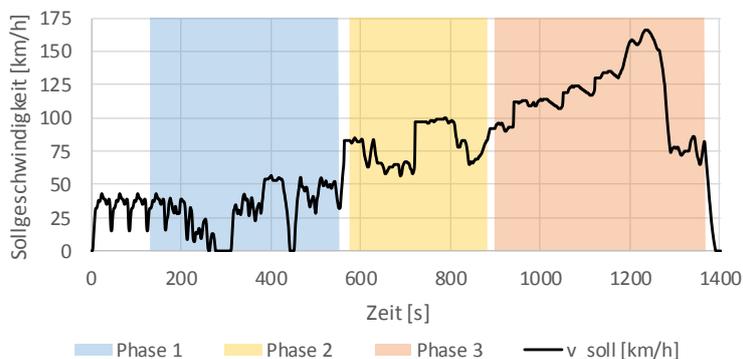


Abbildung 2.10: Geschwindigkeitsverlauf und Phasen des ERMES V9-Zyklus

### 2.4.2.3 IUFC

Der vom nationalen französischen Forschungsinstitut für Verkehr und Sicherheit (INRETS) entwickelte IUFC (INRETS Urbain Fluide Courte) dient primär der Ermittlung der Kaltstartzusatzemissionen bei Kaltstart und Warmlauf. Er besteht aus zwei gleichen Phasen, welche sich jeweils aus fünf gleichen sogenannten Mikrozyklen von je 189 Sekunden Länge zusammensetzen. Dieser Fahrzyklus weist zwar eine relativ hohe Dynamik auf, die Motorlast ist jedoch aufgrund der geringen Geschwindigkeit (< 50 km/h) gering. Abbildung 2.11 zeigt die ersten fünf Subzyklen.

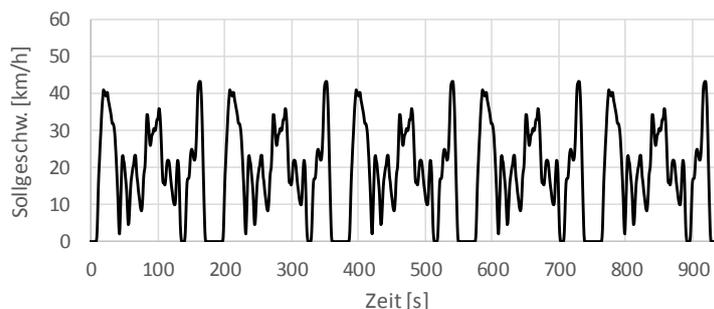


Abbildung 2.11: Geschwindigkeitsverlauf einer Phase des IUFC-Zyklus

### 2.4.2.4 HBEFA Stop & Go Zyklus

Der im Rahmen der Forschungsarbeiten (HBEFA) erarbeitete Stop & Go Zyklus dient der Emissionsmessung im simulierten Stauverkehr. Dieser Zyklus unterteilt sich in zwei gleiche Phasen von je 1200 Sekunden Länge. Die Geschwindigkeit ist sehr gering (< 30 km/h), um Stausituationen abbilden zu können. Der Geschwindigkeitsverlauf einer Phase ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

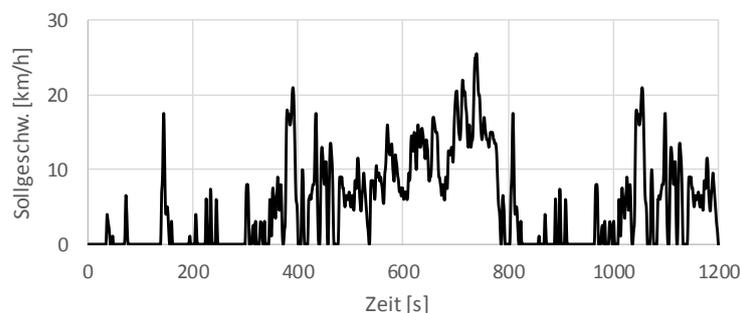


Abbildung 2.12: Geschwindigkeitsverlauf einer Phase des HBEFA Stop & Go Zyklus

## 2.4.3 RDE-Messungen

Um im Rahmen einer Typisierung gültig zu sein und die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müssen RDE-Messungen eine Vielzahl vorgeschriebener Kriterien erfüllen. Die entsprechende Gesetzgebung schreibt vor, dass Emissionsmessungen im realen Fahrbetrieb zwischen 90 und 120 Minuten dauern und einen Stadt-, Überland- und Autobahnteil umfassen müssen. Die Unterscheidung der jeweils mindestens 16 Kilometer langen Fahrtanteile erfolgt entsprechend der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Streckenanteile müssen jeweils etwa einem Drittel der Gesamtstrecke entsprechen. Weiters gelten z.B. Einschränkungen hinsichtlich der Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur u. Seehöhe) sowie der Fahrweise (z.B. Beschleunigung u. Stillstandszeiten). Bezüglich der genauen gesetzlichen Vorschriften für RDE-Messungen wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Verordnungen<sup>3</sup> verwiesen. [6]

<sup>3</sup> Verordnungen (EU) 2017/1151, 2017/1152, 2017/1153, 2017/1154 und 2018/1832



### 2.4.3.2 RDE-Route Arzberg

Die Arzberg-Route ist mit etwa 109 Kilometern deutlich länger als die Ries-Route, weist mit 1200 m einen größeren (positiven) Höhenunterschied auf und ist deutlich bergiger.

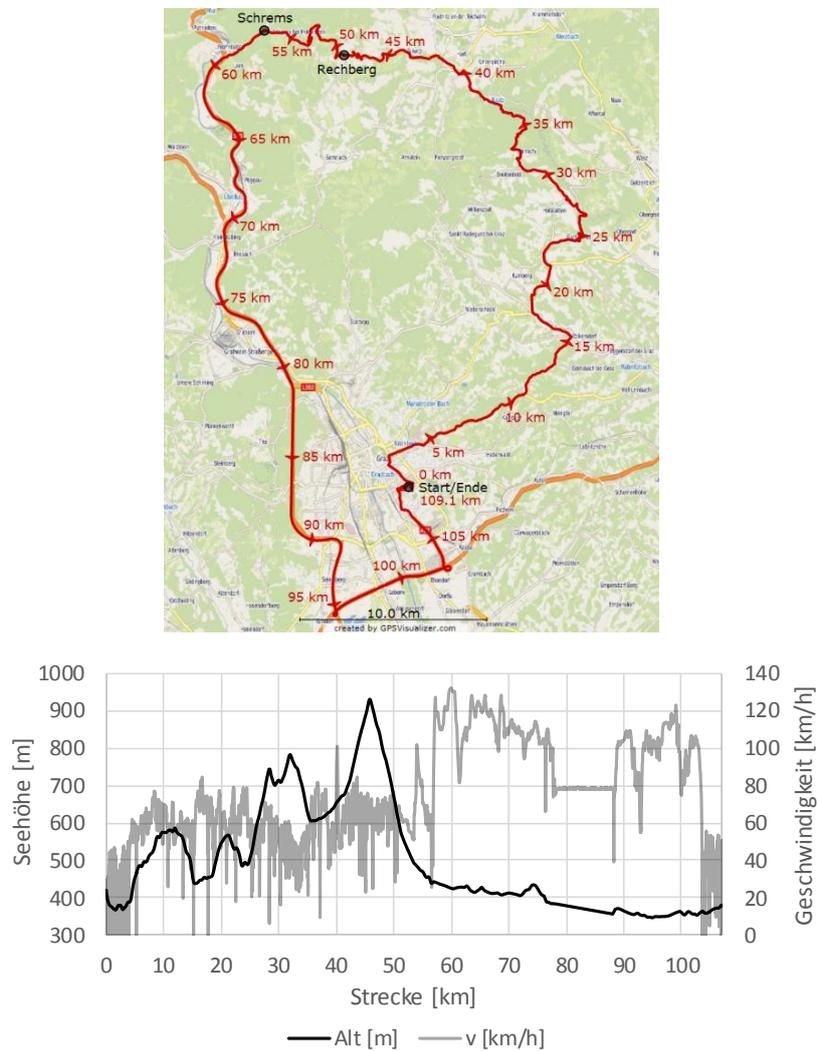


Abbildung 2.14: RDE-Route Arzberg

### 3 Vermessung des Versuchsfahrzeugs

Sowohl Emissionsmessungen auf einem Rollenprüfstand als auch im Straßenverkehr (RDE) waren Teil der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit. In den folgenden Kapiteln werden das Versuchsfahrzeug, sowie der Messaufbau und das Messprogramm vorgestellt.

#### 3.1 Versuchsfahrzeug

Für sämtliche Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, diente ein *BMW 218d Gran Tourer* als Versuchsfahrzeug. Es handelt sich dabei um einen modernen Diesel-PKW der vom IVT als Dienst- und Versuchswagen eingesetzt wird. Die wichtigsten Daten des Fahrzeuges sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Fahrzeugdaten [3]

Motor	
Motorbauart	Dieselmotor mit zweistufiger Aufladung, Reihenkonfiguration, vorne quer verbaut
Zylinderanzahl	4
Hubraum	1.995 cm <sup>3</sup>
Nennleistung	110 kW bei 4000 U/min
max. Drehmoment	350 Nm bei 1750-2500 U/min
Leerlaufdrehzahl	830 U/min
Emissionsklasse	Euro 6d-Temp
Abgasnachbehandlung	NSK, DPF und SCR
Getriebe und Kraftübertragung	
Getriebeart	6-Gang manuelles Schaltgetriebe
Gangübersetzungen	I: 3.923; II: 2.136; III: 1.276; IV: 0.919; V: 0.725; VI: 0.605; R: 3.538
Achsübersetzung	3.389
Bereifung	205/55 R17 XL 95 H M+S
Chassis/Karosserie und weitere Fahrzeugdaten	
DIN-Leermasse	1520 kg
Stirnfläche ( $A$ )	2.45 m <sup>2</sup>
Luftwiderstandsbeiwert ( $c_w$ )	0.28
Erstzulassung \ EG-Genehmigung	04.09.2018 \ 07.06.2018
Tachostand bei Testbeginn	21000 km

Zur Minimierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen verfügt das Fahrzeug über ein Hochdruck-Abgasrückführungssystem, einen NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator und ein SCR-System. Der NSK ist motornahe nach dem Turbolader verbaut und befindet sich in einem Canning mit dem Dieselpartikelfilter. Das gesamte SCR-System, bestehend aus Mischer, Dosiermodul und SCR-Katalysator, ist dem DPF nachgeschaltet und im Fahrzeugunterboden verbaut. Die Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigen die Abgasanlage des Fahrzeuges sowie die darin verbauten Sensoren (Positionsnummern siehe Tabelle 3.2). Laut Fahrzeughersteller findet ab etwa 200 °C Abgastemperatur vor SCR eine HWL-Dosierung statt (Dosiertemperatur) [17].

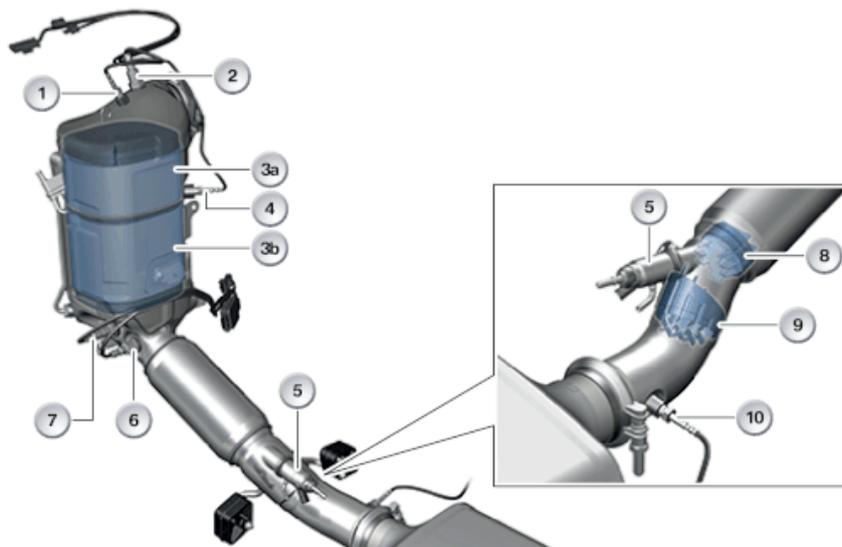


Abbildung 3.1: Abgasanlage ab Turbolader bis SCR-Katalysator [16]



Abbildung 3.2: SCR-Katalysator im Fahrzeugunterboden

Tabelle 3.2: Komponenten der Abgasnachbehandlung [16]

Index	Komponente	Index	Komponente
1	Abgastempersensor nach Turbolader (TL) bzw. vor NSK	2	Breitband-Lambdasonde vor NSK
3a	NSK	4	Abgastempersensor nach NSK bzw. vor DPF
3b	DPF		
5	SCR-Dosiermodul	6	Breitband-Lambdasonde nach DPF
7	Stickoxidsensor vor SCR-Kat.	8	Mischer
9	Mischer 2	10	Abgastempersensor vor SCR
11	Dieselpartikelsensor	12	Stickoxidsensor nach SCR-Kat.

Mittels On-Board-Diagnose können die Messwerte der verbauten Lambdasonden, sowie Abgastemperatur- und NO<sub>x</sub>-Sensoren abgerufen werden. Im Zuge der Messungen konnten auf diese Weise viele die Abgasnachbehandlung betreffende Größen erfasst werden, ohne zusätzliche Sensoren in die Abgasanlage einzubauen (siehe 2.4.1.4 OBD Scan-Tool). Die gelb hinterlegten Indizes in Tabelle 3.2 kennzeichnen jene Sensoren im Abgasstrang, deren Messdaten per OBD aufgezeichnet wurden.

In der nachstehenden Tabelle 3.3 sind die bei allen Messungen aufgezeichneten OBD-Parameter inklusive ihrer ID (PID) aufgelistet. Einige der liefern dabei mehrere Messwerte gleichzeitig (siehe Fußnoten 4 bis 7). Bezüglich der Positionen der Sensoren in der Abgasanlage sei auf die Abbildungen 3.1 und 3.2 verwiesen. Die wichtigsten Kenndaten der verbauten Bosch NO<sub>x</sub>-Sensoren, die für diese Arbeit relevant sind, sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Tabelle 3.3: Aufgezeichnete OBD-Parameter mit PID und Name nach [24]

PID (hex)	Parametername	PID (hex)	Parametername
05	Kühlwassertemperatur	0C	Drehzahl
0D	Geschwindigkeit	10	Luftmassenstrom
46	Umgebungstemperatur	78	Abgastemperaturen Bank 1 <sup>4</sup>
83	NO <sub>x</sub> -Sensordaten <sup>5</sup>	8B	Status Diesel Abgasnachbeh. <sup>6</sup>
8C	Breitband-Lambdasonden <sup>7</sup>		

Tabelle 3.4: Kenndaten der Bosch NO<sub>x</sub>-Sensoren [4]

Messbereich	0 - 3000 ppm
NO <sub>x</sub> -Genauigkeit bei 90 ppm	±10 ppm
Ansprechzeit	1800 ms

## 3.2 Messaufbau

### 3.2.1 Messaufbau am Rollenprüfstand

Während der Messungen am Rollenprüfstand wurden die Abgasemissionen des Versuchsfahrzeugs mit der CVS-Anlage, dem FTIR und in einigen Zyklen auch mit dem PEMS gemessen. Zusätzlich wurden für alle Messungen die in Tabelle 3.3 genannten ODB-Parameter mithilfe des Scan-Tools aufgezeichnet.

Der Messaufbau am Prüfstand ist in Abbildung 3.3 dargestellt. In einer speziellen, am Fahrzeugheck angebauten, Verrohrung wird das Abgas aus den beiden Auspuffendrohren zunächst zusammengeführt und dann durch das EFM der PEMS zur PEMS-Entnahmestelle geleitet. Ein an diese PEMS-Verrohrung angeschlossenes Flexrohr leitet das Abgas weiter zur Entnahmestelle des FTIR, bevor es letztlich über eine Steigleitung in die CVS-Anlage im Obergeschoss gelangt. An den Entnahmestellen von PEMS und FTIR wird dem Abgas jeweils

<sup>4</sup> Abgastemperaturen vor NSK, nach NSK und vor SCR (in °C)

<sup>5</sup> NO<sub>x</sub>-Konzentration vor und nach SCR-Katalysator (in ppm)

<sup>6</sup> DPF-, NSK-Regeneration und NSK-Desulfatierung (als Bit)

<sup>7</sup> Luftverhältnis (Lambda) vor und nach NSK

ein unverdünnter Teilvolumenstrom zur Analyse entnommen. Das EFM, welches vor den Entnahmestellen angeordnet ist, dient dabei der Messung des Abgasmassenstroms und ermöglicht somit eine Umrechnung der gemessenen Emissionskonzentrationen in Emissionsmassenströme. Zu Beginn jedes Messtages wurden die Gasanalytoren aller Messgeräte kalibriert.

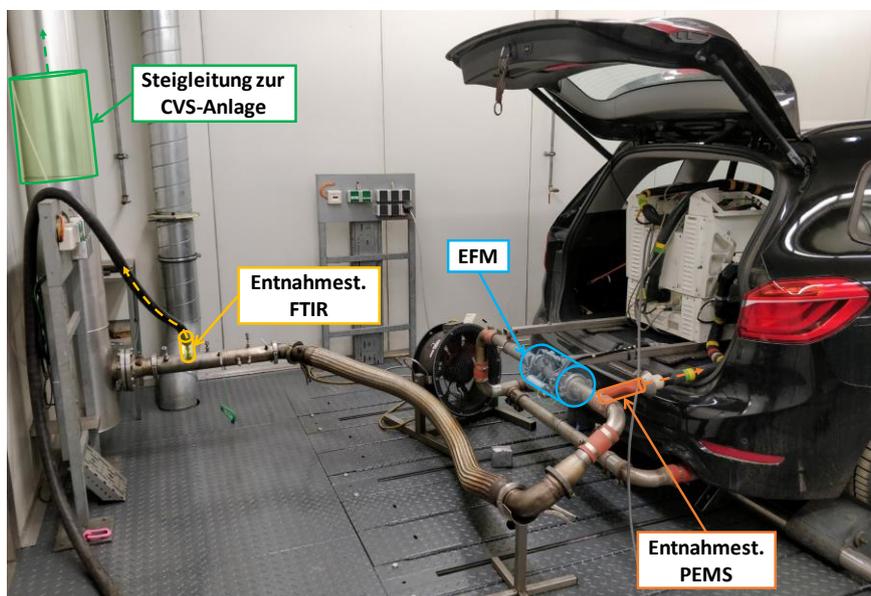


Abbildung 3.3: Messaufbau am Rollenprüfstand

### 3.2.2 Messaufbau für RDE-Messungen

Der Messaufbau für die RDE-Messungen entspricht – abgesehen vom Entfall der stationären Messtechnik (FTIR und CVS) – weitgehend jenem der Messungen am Rollenprüfstand. Das PEMS befand sich sowohl am Prüfstand als auch bei den RDE-Fahrten im Kofferraum des Fahrzeugs (siehe Abbildung 3.4). Die Stromversorgung erfolgt im mobilen Betrieb durch Akkupakete. Durch Lösen der Verbindung zwischen der PEMS-Verrohrung und dem zur Steigleitung führenden Flexrohr kann das Versuchsfahrzeug einfach von den Prüfstandsrollen gefahren werden, um RDE-Messungen durchzuführen.

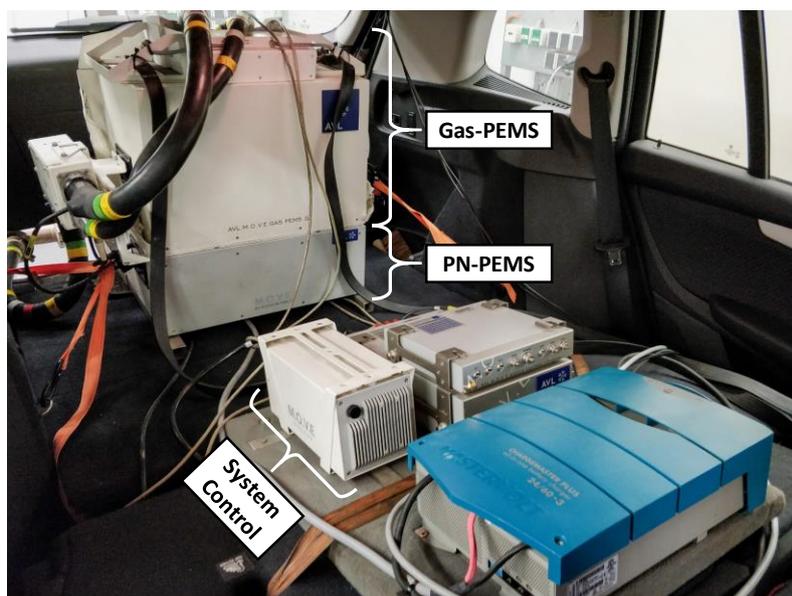


Abbildung 3.4: PEMS im Kofferraum bzw. auf der Rückbank des Fahrzeugs

### 3.3 Messprogramm

Wie bereits erwähnt, umfasste das Messprogramm Messungen am PKW-Rollenprüfstand und im realen Fahrbetrieb auf der Straße. Ziel des umfangreichen Testprogramms war es einerseits, das Verhalten des SCR-Systems in den unterschiedlichsten Szenarien zu untersuchen und andererseits, Messdaten für den Aufbau des Simulationsmodells zu erhalten. Die Erkenntnisse der Messungen und der Simulationen sollen in das nächste HBEFA-Update einfließen. Einen Überblick über die durchgeführten Messungen geben die nachfolgenden Tabellen 3.5 und 3.6.

Tabelle 3.5: Messprogramm am PKW-Rollenprüfstand

Nr.	Zyklus	Konditionierung	Start-Stopp	Messgeräte <sup>8</sup>	Bemerkung
8180	WLTC	Kalt	Ja	O, E, F, C, P	-
8181	ERMES v9	Warm	Nein	O, E, F, C, P	DPF-Reg.
-	Leerlauf + $v_{konst}$	Warm	Nein	O, E, F	-
8182	IUFC + Stop&Go	Kalt	Ja	O, E, F, C	-
-	Leerlauf (15 min)	Warm	Nein	O	-
8183	ERMES v9	Warm	Nein	O, E, F, C	-
8184	Stop&Go	Warm	Nein	O, E, F, C	-
8185	IUFC + Stop&Go	Kalt	Nein	O, E, F, C	-
8186	$v_{konst}$	Warm	Nein	O, E, F, C	-

An dieser Stelle sei angemerkt, dass in Anbetracht der hohen Betriebskosten der Gas- und PN-PEMS bei einem Großteil der Prüfstandsmessungen auf deren Verwendung verzichtet wurde (siehe Spalte Messgeräte in Tabelle 3.5). Mit der System Control der PEMS kann das EFM allerdings als eigenständiges Messgerät kostengünstig betrieben werden. Daher wurde das EFM praktisch bei allen Messungen eingesetzt, um den Abgasmassenstrom für die Emissionsmassenberechnungen zu erfassen.

Tabelle 3.6: Messprogramm für RDE-Fahrten

Route	Konditionierung	Start-Stopp	Nebenverbraucher	Fahrstil	Datum	Bem.
Ries 01	Kalt	Ja	Klima 22°C (Auto), Licht Auto, Radio an	Normal	17.02.2020	-
Arzberg 01	Warm	Ja		Normal	17.02.2020	-
Arzberg modifiziert	Kalt	Ja		Sportlich	18.02.2020	DPF-Reg.

Für Rollenprüfstandsmessungen müssen Testmasse und Fahrwiderstände eingestellt werden. Dafür wurde das Fahrzeug mittels Wiegezellen gewogen. Die ermittelte Leermasse des Fahrzeugs kann der Tabelle 3.7 entnommen werden.

<sup>8</sup> O = OBD, E = EFM, F = FTIR, C = CVS-Anlage und P = PEMS

Tabelle 3.7: Daten aus der Fahrzeugwiegung

	Links	Rechts
Vorne	451 kg	435 kg
Hinten	317 kg	382 kg
Gesamtmasse Fahrzeug	1585 kg	

Unter Berücksichtigung einer repräsentativen Beladung wurde aus der Leermasse die Testmasse, die dann am Prüfstand eingestellt wurde, berechnet. Die am Rollenprüfstand eingestellten Fahrwiderstände wurden mithilfe von Roll- und Luftwiderstandsbeiwerten von vorangegangenen Projekten ermittelt. Tabelle 3.8 zeigt die Einstellungen des Rollenprüfstands.

Tabelle 3.8: Prüfstandeinstellungen

Testmasse [kg]	1739
$R_0$ [N]	177.1
$R_1$ [Ns/m]	0.060
$R_2$ [Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	0.436

Mittels der Leermasse des Fahrzeugs sowie der Berücksichtigung der Masse der Insassen und Messtechnik (siehe Tabelle 3.9), konnte auch die Testmasse der RDE-Fahrten ermittelt werden. Diese beträgt 1860 kg.

Tabelle 3.9: Masse der Beladung bei RDE-Messungen

Besatzung	155 kg
Messtechnik	120 kg
Gesamtmasse Beladung	275 kg

## 4 Messdatenauswertung und Messergebnisse

Im folgenden Kapitel wird zunächst auf die Aufbereitung und Auswertung der Messdaten näher eingegangen, bevor die Messergebnisse präsentiert und interpretiert werden.

### 4.1 Aufbereitung der Messdaten

#### 4.1.1 Berechnung des Abgasmassenstroms

Für Zyklen, in denen kein gemessener Massenstrom verfügbar ist, kann der Abgasmassenstrom auch aus den OBD-Daten berechnet werden. Weiters kann der aus den OBD-Daten berechnete Massenstrom auch für die Synchronisation von Messdaten verwendet werden.

Das Luftverhältnis  $\lambda$  ist eine wichtige Kenngröße für die motorische Verbrennung. Es ist definiert als das Verhältnis zwischen der dem Motor zugeführten Luftmenge  $\dot{m}_L$  und der für eine stöchiometrische Verbrennung nötigen Luftmenge  $\dot{m}_{L\,st}$ . Letztere hängt von der dem Motor zugeführten Kraftstoffmenge  $\dot{m}_B$  und von dem stöchiometrischen Luftbedarf  $L_{st}$  ab. Der stöchiometrische Luftbedarf wird von der chemischen Zusammensetzung des Kraftstoffs bestimmt und beträgt für Diesel etwa 14.4 bis 14.5 kg Luft pro kg Kraftstoff [33].

$$\lambda = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{L\,st}} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_B \cdot L_{st}} \quad (4.1)$$

Entsprechend der Massenerhaltung gilt für den Abgasmassenstrom:

$$\dot{m}_{Abg} = \dot{m}_L + \dot{m}_B \quad (4.2)$$

Durch Umformen und Einsetzen erhält man schließlich:

$$\dot{m}_{Abg\,ber} = \dot{m}_L \left( 1 + \frac{1}{\lambda \cdot L_{st}} \right) \quad (4.3)$$

Mit Gleichung (4.3) kann bei bekanntem Luftmassenstrom und Luftverhältnis der Abgasmassenstrom berechnet werden. Abbildung 4.1 zeigt einen Vergleich des aus OBD-Daten berechneten Abgasmassenstroms mit dem von der PEMS gemessenen Abgasmassenstrom. Die Verläufe stimmen gut überein. Der Abgasmassenstrom kann also gut aus den OBD-Daten abgeschätzt werden. Wenn nicht anders angemerkt, wird im Folgenden unter Abgasmassenstrom immer der gemessene verstanden.

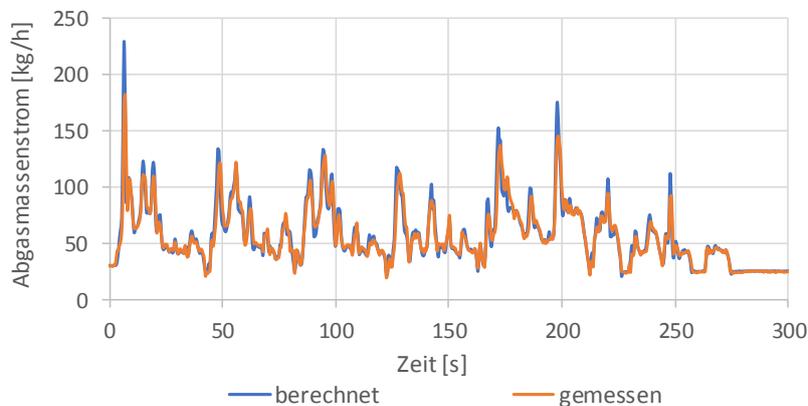


Abbildung 4.1: Vergleich gemessener Abgasmassenstrom mit berechnetem Massenstrom aus OBD-Daten

### 4.1.2 Umrechnung Emissionskonzentrationen in Emissionsmassen

Die Emissionsgrenzwerte für PKW beziehen sich auf die ausgestoßene Emissionsmasse je Wegstrecke. Bedingt durch das Messprinzip werden die Emissionen als Volumenanteile (Konzentrationen) im Abgas gemessen und müssen anschließend mittels des Abgasmassenstroms umgerechnet werden. Die Berechnung dieser Emissionsmassen erfolgt durch das *ERMES-Auswertetool* des IVT. Allerdings ist in dieser Auswertesoftware noch keine Auswertung der fahrzeugseitig verbauten NO<sub>x</sub>-Sensoren vorgesehen, weshalb für diese die Auswertung manuell in Excel durchgeführt wurde. Entsprechend der in der RDE-Verordnung [30] definierten Vorgehensweise erfolgte die Umrechnung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen  $C_{NO_x}$  anhand des gemessenen Abgasmassenstroms  $\dot{m}_{Abg}$  mit Gleichung (4.4). Die u-Werte (Tabelle 4.1) berechnen sich aus dem Dichteverhältnis der Abgaskomponente zum Abgas und berücksichtigen Einheitenumrechnungen.

$$\dot{m}_i = C_i \cdot u_{Gas\ i} \cdot \dot{m}_{Abg} \quad (4.4)$$

Tabelle 4.1: u-Werte zur Umrechnung von Emissionskonzentrationen (in ppm) in Massenemissionen (in g/s bzw. g/h) anhand des Abgasmassenstroms (in kg/s bzw. kg/h) [30]

Kraftstoff	$\rho_{Abg}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Abgaskomponente i	
		NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
		$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
		2.053	1.9636
		$u_{Gas\ i}$ [-]	
Diesel (B7)	1.2943	1.586 E-3	1.517 E-3

### 4.1.3 Zeitsynchronisation

Werden bei einer Messung Größen mit mehreren Messgeräten gleichzeitig erfasst, so ist eine zeitliche Synchronisierung der Messgeräte erforderlich. Diese Synchronisierung kann beispielsweise durch Kommunikation der Messgeräte miteinander (z.B. durch ein Triggersignal) oder durch Synchronisation der Systemzeiten erfolgen. Oftmals bestehen diese Möglichkeiten jedoch nicht, wodurch sich ein Zeitversatz zwischen den aufgezeichneten Daten ergibt, der vor der Messdatenauswertung ermittelt und korrigiert werden muss. Bisher erfolgte die Ermittlung und Korrektur des Zeitversatzes zwischen zwei Messdatensätzen am Institut durch manuelles zeitliches verschieben eines Datensatzes und qualitative grafische Kontrolle der zeitlichen Verläufe zweier korrelierender Messgrößen in den beiden Datensätzen. Diese Vorgehensweise ist jedoch zeitaufwendig und fehleranfällig. Eine Möglichkeit den Zeitversatz quantitativ zu ermitteln, um diesen in weiterer Folge zu korrigieren, wird im Folgenden beschrieben und als Zeitsynchronisation bezeichnet. Die vorgestellte Vorgehensweise basiert auf der normierten Kreuzkorrelation zweier ähnlicher Signale unterschiedlicher Messgeräte zur Ermittlung des Zeitversatzes. Die Kreuzkorrelation ist nachfolgend kurz beschrieben.

### 4.1.3.1 Kreuzkorrelation

Die Methode der Kreuzkorrelation wird in der Signalverarbeitung verwendet, um zwei zeitlich verschobene Signale einander zeitlich richtig zuzuordnen. Betrachtet man zwei zeitliche Signale  $x(t)$  und  $y(t)$ , so ist die Kreuzkorrelation durch Gleichung (4.5) definiert.

$$kkf(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (4.5)$$

Die Kreuzkorrelationsfunktion  $kkf(\tau)$  ist das Integral des Produktes der beiden Signale, wobei eines der Signale um die Zeit  $\tau$  verschoben wird. Sind die Signale ähnlich, jedoch um die Zeit  $\tau_1$  zueinander versetzt, so weist die Kreuzkorrelationsfunktion für  $\tau = \tau_1$  ein Maximum auf. Durch Detektion dieses Maximums kann der vorliegende zeitliche Versatz zwischen den beiden Signalen ermittelt werden. Die Kreuzkorrelation liefert also ein Maß für die Ähnlichkeit der Signale in Abhängigkeit der Zeitverschiebung. [5]

In der Praxis liegen die Signale meist nicht als mathematische Funktionen vor, sondern typischerweise als diskrete Zeitsignale ( $x[i]$  und  $y[i]$ ). Durch das Überführen des Integrals in eine Summe, ist die Kreuzkorrelationsfunktion auch für diskrete Zeitsignale definiert (siehe Gleichung (4.6)) [5]. Dabei steht  $i$  für die Nummer des Samples bzw. dessen Index ( $i = 1 \dots N$ ) und  $k$  für den Versatz in Samples wobei für die Zeit  $t = t[i]$  gilt. Die diskreten Werte  $kff(k)$  für verschiedene  $k \in \mathbb{N}$  werden oftmals als Kreuzkorrelationsfaktoren oder -koeffizienten (KKF) bezeichnet.

$$kff(k) = \sum_{i=1}^N x[i] \cdot y[i + k] \quad (4.6)$$

Dividiert man die rechte Seite der Gleichung (4.7) durch den Effektivwert der Signale, erhält man die sog. normierte Kreuzkorrelation bzw. normierten Kreuzkorrelationsfaktor: [5]

$$kkf_{norm}(k) = \frac{\sum_{i=1}^N x[i] \cdot y[i + k]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x[i])^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y[i + k])^2}} \quad (4.7)$$

Die normierte Kreuzkorrelation liefert Werte zwischen -1 und 1. Je näher der Wert bei eins liegt, desto ähnlicher sind die Signale [5]. Analog dem oben gezeigten Fall weisen  $kff(k)$  bzw.  $kkf_{norm}(k)$  an der Stelle  $k = k_1$  dann ein Maximum auf, wenn die Signale ( $x[i]$  und  $y[i]$ ) ähnlich und um  $k_1$  Einträge versetzt sind. Aus der Lage des maximalen (normierten) Kreuzkorrelationsfaktors kann also der Zeitversatz zwischen den Signalen abgelesen werden. Dieser Zusammenhang wird für die Zeitsynchronisation genutzt. Abbildung 4.2 zeigt den Verlauf zweier zeitversetzter Signale (rechts) sowie des zugehörigen normierten KKF's (links) mit Maximum bei 5.5 Sekunden.

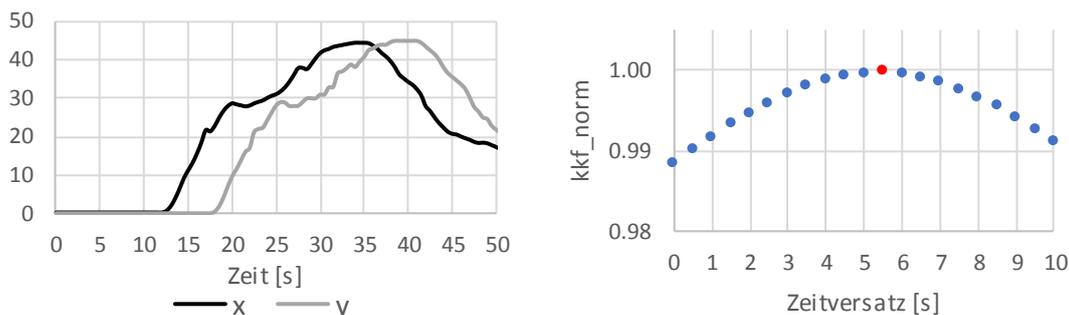


Abbildung 4.2: Normierte Kreuzkorrelation zweier um 5.5s zeitversetzter Signale

### 4.1.3.2 Vorgehensweise bei Rollenprüfstandsmessungen

Am Rollenprüfstand werden Größen mit bis zu vier separaten Messgeräten gleichzeitig erfasst (siehe Kapitel 3.2.1), deren zeitlich korrekte Zugordnung sichergestellt werden muss. Dazu wird zuerst ein Messgerät als Referenz gewählt, zu dem dann die Daten aller anderen Messgeräte synchronisiert werden. Für Messungen am Rollenprüfstand empfiehlt es sich, die Daten des Prüfstands als Referenz zu verwenden.

Zunächst erfolgt die zeitlich korrekte Zuordnung der OBD-Daten zu den Prüfstandsdaten unter Verwendung einer Kreuzkorrelation zwischen der vom Rollenprüfstand gemessenen ( $v_{Rolle}$ ) und der über OBD aufgezeichneten Geschwindigkeit ( $v_{OBD}$ ).

Im nächsten Schritt erfolgt die Synchronisierung der PEMS-Daten. Wie Abbildung 4.3 zeigt, bestehen diesbezüglich zwei Möglichkeiten. Enthalten die aufgezeichneten OBD-Daten sowohl ein Lambda- ( $\lambda_{OBD}$ ) als auch ein Luftmassenstrom-Signal ( $\dot{m}_{L\ OBD}$  bzw.  $AMF_{OBD}$ ), kann daraus der Abgasmassenstrom ( $\dot{m}_{Abg\ OBD}$  bzw.  $EMF_{OBD}$ ) berechnet werden (siehe Gleichung (4.3)). Die Zeitsynchronisation erfolgt dann mittels Kreuzkorrelation zwischen dem von der PEMS gemessenen Abgasmassenstrom ( $\dot{m}_{Abg\ PEMS}$  bzw.  $EMF_{PEMS}$ ) und dem aus OBD-Daten berechneten Abgasmassenstrom. Die korrekte zeitliche Zuordnung der PEMS-Daten zum Prüfstand erfolgt dabei implizit durch deren Synchronisation mit den OBD-Daten. Kann aus den OBD-Daten kein Abgasmassenstrom berechnet werden, so erfolgt die Synchronisation mittels Kreuzkorrelation zwischen dem von der PEMS gemessenen Abgasmassenstrom und der positiven Rollenleistung des Prüfstandes ( $P_{pos}$ ).

$$P_{pos} = \begin{cases} P_{Rolle}, & P_{Rolle} \geq 0 \\ 0, & P_{Rolle} < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Eine Kreuzkorrelation zwischen  $P_{pos}$  und  $EMF_{PEMS}$  ist möglich, da beide Größen mit der Motorleistung in Zusammenhang stehen und damit trotz ihrer unterschiedlichen physikalischen Natur korrelieren. Statt der positiven Rollenleistung  $P_{pos}$  kann alternativ auch die sogenannte masselose positive Beschleunigungsleistung ( $v_{Rolle} \cdot a_{pos}$ ) verwendet werden.

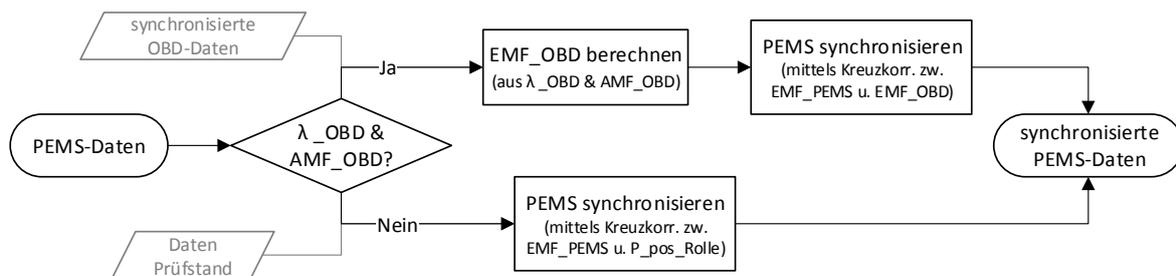


Abbildung 4.3: Flussdiagramm Zeitsynchronisation der PEMS-Daten bei Prüfstandsmessungen

Den letzten Schritt stellt, falls nötig, die Synchronisation der FTIR-Daten dar. Dieser Schritt entfällt, wenn das verwendete FTIR-Messgerät in die Prüfstandsteuerung eingebunden werden kann und dessen Messdaten damit zeitgleich mit denen des Prüfstandes erfasst werden. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete FTIR konnte nicht eingebunden werden, weshalb für dessen Synchronisation wie nachfolgend beschrieben und in Abbildung 4.4 dargestellt, vorgegangen wurde. Zunächst ist es nötig, die vom FTIR gemessenen  $\text{CO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen um deren Gaslaufzeit Richtung Entnahmestelle zu verschieben. Wurden bei der Messung Emissionskonzentrationen mittels eines PEMS erfasst (GasPEMS-Daten), so sind diese ebenfalls um deren Laufzeit zur entsprechenden Entnahmestelle zu verschieben. Die dafür nötigen Gaslaufzeiten sind aus regelmäßig durchgeführten Laufzeitmessungen bekannt. Per Kreuzkorrelation der laufzeitkorrigierten FTIR- und PEMS-Konzentrationen wird der

Zeitversatz zwischen den beiden Messgeräten ermittelt und durch Zeitverschieben der FTIR-Daten korrigiert. Stehen keine GasPEMS-Messdaten zur Verfügung, so sind OBD-NO<sub>x</sub>-Konzentrationen für die Zeitsynchronisierung der FTIR-Messdaten erforderlich. Diese per OBD aufgezeichneten Konzentrationen werden ebenfalls zur Entnahmestelle verschoben. Die Zeitsynchronisation des FTIRs erfolgt dann mittels einer Kreuzkorrelation zwischen den laufzeitkorrigierten FTIR- und OBD-NO<sub>x</sub>-Konzentrationen.

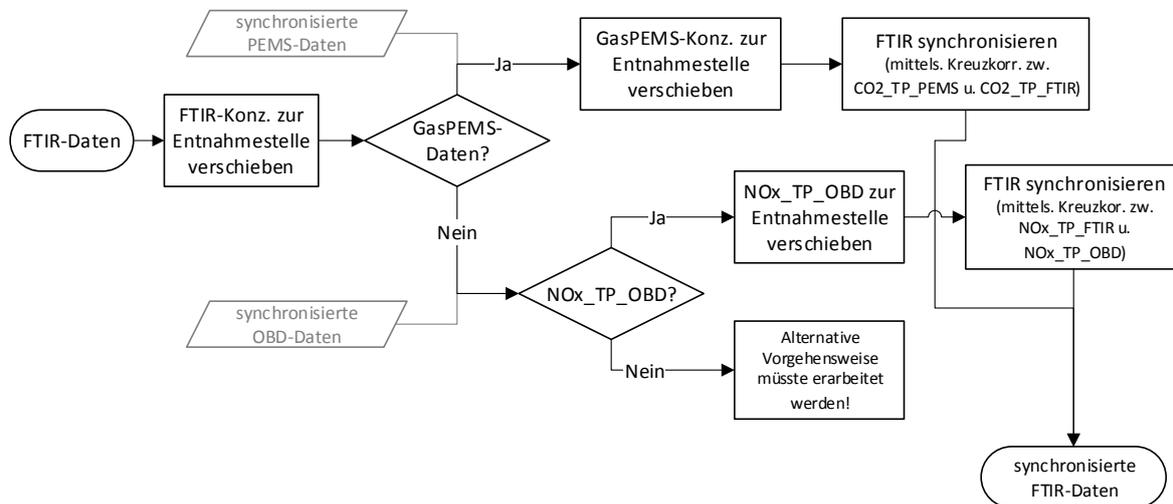


Abbildung 4.4: Flussdiagramm Zeitsynchronisation der FTIR-Daten bei Prüfstandsmessungen

Die gesamte Vorgehensweise zur Zeitsynchronisation von Messdaten aus Rollenprüfstandsmessungen ist im Anhang (Abbildung 7.1) nochmals übersichtlich in einem Flussdiagramm dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass durch die Zeitsynchronisation nur jener Zeitversatz korrigiert wird, der sich aus dem nicht gleichzeitigen Starten der Messung an zwei Messgeräten ergibt. Die Gaslaufzeiten und Analysatoransprechzeiten sind also anderwärtig - z.B. mithilfe des ERMES-Tools - zu korrigieren.

#### 4.1.3.3 Vorgehensweise bei RDE-Messungen

Bei RDE-Messungen sind meist nur Messdaten zweier Messgeräte (PEMS und OBD) (siehe Kapitel 3.2.2) zu synchronisieren. Als Referenzmessgerät wird dabei das PEMS gewählt. Für die Zeitsynchronisation wird eine Kreuzkorrelation zwischen der vom PEMS per GPS gemessenen Geschwindigkeit und der über OBD aufgezeichneten Geschwindigkeit durchgeführt. Etwaige Ausfälle des GPS-Signals, wie sie beim Durchfahren von Tunneln oder beim Fahren zwischen hohen Gebäuden auftreten können, haben dabei keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Kreuzkorrelation und damit die Synchronisierung.

#### 4.1.3.4 Umsetzung in Excel mittels VBA

Die Umsetzung der Zeitsynchronisation für Rollenprüfstands- und RDE-Messungen erfolgte jeweils in einer Microsoft (MS) Excel-Datei mithilfe von VBA (Visual Basic for Applications). Bei VBA handelt es sich um eine Skriptsprache, die es ermöglicht, MS Office-Anwendungen um benutzerdefinierte Funktionen und Routinen zu erweitern. Solche Erweiterungen werden oftmals als Makros bezeichnet. Die Kombination Excel und VBA wurde gewählt, da praktisch alle IVT-Mitarbeiter über Excel verfügen und somit die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Vorlage zur Synchronisation von Messdaten in Zukunft nutzen können. Weiters kann der VBA-Programmcode von jedem Benutzer eingesehen werden, wodurch sich eine gute Nachvollziehbarkeit ergibt und ggf. nötige Anpassungen möglich sind.

Die Funktionsweise der erstellten Excel-Vorlagen ist folgende: Zu Beginn werden die unsynchronisierten Rohdaten der Messgeräte in einzelne Tabellenblätter eingelesen und der Zeitversatz für jedes Messgerät in Bezug auf eine gemeinsame Referenz ermittelt (siehe Kapitel 4.1.3.2 und 4.1.3.3). Der ermittelte Versatz wird dann durch Zeitverschiebung korrigiert und die synchronisierten Messdaten in einem Format gespeichert, welches direkt im ERMES-Auswertetool für die weitere Messdatenverarbeitung eingelesen werden kann. Vor der Ausgabe der Messdaten hat der Benutzer die Möglichkeit, durch Kontrolle der zeitverschobenen Verläufe der korrelierenden Größen die Richtigkeit der Synchronisierung zu überprüfen, um möglicherweise aufgetretene Fehler zu erkennen.

Abbildung 4.5 zeigt exemplarisch die Verläufe vor und nach der Synchronisation der OBD-Daten einer RDE-Messung wie sie auch dem Benutzer der Vorlage zur Kontrolle dienen.

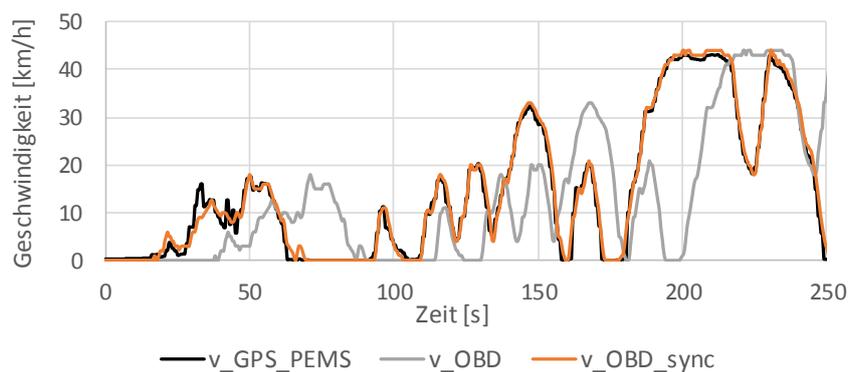


Abbildung 4.5: Verläufe der OBD-Daten vor (grau) und nach (orange) der Synchronisation mit GPS-Daten (RDE)

Zusätzlich zu den Excel-Vorlagen für die Zeitsynchronisation wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Interpolationsmakro für Excel in VBA programmiert. Dieser ermöglicht die lineare Interpolation sehr großer Datenmengen in Excel. Es wurde ausführlich getestet und wird in den Excel-Vorlagen zur Zeitverschiebung sowie zum Resampling von Messdaten (z.B. 5Hz auf 2Hz) genutzt.

## 4.2 Messdatenauswertung

Der Großteil der Messdaten wurde mithilfe des sogenannten *ERMES-Auswertetools* ausgewertet. Dieses Programm führt die zeitsynchronisierten Messdaten der Messgeräte zusammen. Es errechnet aus den Gaskonzentrationen (ppm) sowohl die zeitaufgelösten als auch die gemittelten Emissionsmassen (g/h bzw. g/km) und ordnet diese durch eine konstante oder sogenannte variable Zeitverschiebung (nach [32]) korrekt dem Lastpunkt zu. Für alle Messungen wurde die variable Zeitverschiebung gewählt, bei der die Gaslaufzeit vom Motorauslass zur Entnahmestelle lastpunktabhängig berücksichtigt bzw. korrigiert wird. Um diese anwenden zu können, muss der Abgasmassenstrom (gemessene oder berechnet) sowie das Volumen der abgasführenden Leitungen bekannt sein. Der Abgasmassenstrom wurde bei allen Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, messtechnisch erfasst (EFM der PEMS). Die unbekanntes Volumina der Rohrleitungen wurden aus deren Abmessungen berechnet und sind in Tabelle 4.2 eingetragen. Die Volumina der Steigleitung und des CVS-Tunnels sind bekannt und per Defaulteinstellung im *ERMES-Tool* hinterlegt.

Tabelle 4.2: Volumina der abgasführenden Leitungen

Gesamtvolumen bis PEMS- bzw. FTIR-Entnahmestelle <sup>9</sup>	30.2 L
Volumen Flexrohr bis Steigleitung	16.4 L

Bei den OBD-Daten wurden die Ansprechzeit der NO<sub>x</sub>-Sensoren (siehe Tabelle 3.4) manuell korrigiert und die gemessenen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen ebenfalls manuell mit Gleichung (4.4) in Massenemissionen umgerechnet. Die NO<sub>x</sub>-Sensoren sind nicht immer aktiv, da sie eine gewisse Betriebstemperatur benötigen bzw. in manchen Betriebspunkten zum Bauteilschutz von der Motorsteuerung deaktiviert werden (siehe Kapitel 2.4.1.5). Wenn die NO<sub>x</sub>-Sensoren nicht aktiv sind, liefern sie den in der OBD2-Norm ([24]) definierten Maximalwert von 65535 ppm. Diese Werte wurden bei der Messdatenauswertung durch „#NV“ (not valid) ersetzt, da es sich dabei um keinen realen Messwert handelt.

---

<sup>9</sup> ergibt sich aus dem Volumen der Abgasanlage (25.4 L) und der PEMS-Verrohrung (4.8 L)

## 4.3 Messergebnisse

### 4.3.1 Vergleich der Messgeräte und Validierung des Messaufbaus

Um sicher zu stellen, dass alle Messgeräte, insbesondere die OBD-NO<sub>x</sub>-Sensoren, belastbare Messdaten liefern, wurden die Messdaten miteinander verglichen. Als Vergleichsbasis wurde die CVS-Anlage gewählt. Abbildung 4.6 zeigt die Abweichungen der mittleren gemessenen NO<sub>x</sub>-Emission der einzelnen Messgeräte im Vergleich zur CVS-Anlage.

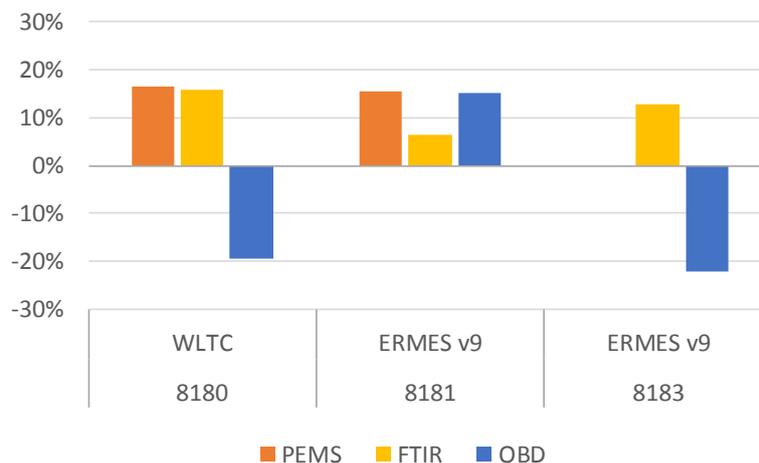


Abbildung 4.6: Abweichung der gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen im Vergleich zur CVS-Anlage

Das niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau des Versuchsfahrzeug hat zur Folge, dass bereits kleine (absolute) Abweichungen zwischen den Messgeräten zu großen relativen Abweichungen führen. Die große positive Abweichung der OBD-Messwerte im Zyklus mit der Nummer 8181 ist der DPF-Regeneration geschuldet, die dort stattgefunden hat. Während dieser werden die NO<sub>x</sub>-Sensoren eigentlich zeitweise deaktiviert. Durch einen Messfehler kam es im Bereich der Regeneration jedoch zu einer NO<sub>x</sub>-Spitze in den OBD-Messdaten, die zur großen positiven Abweichung führte. Die Abweichungen der anderen Messgeräte liegen im erwarteten Bereich.

Ein Vergleich der zeitlichen Verläufe der von den verschiedenen Messgeräten gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen ist in Abbildung 4.7 exemplarisch für den ERMES V9 ersichtlich. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe.

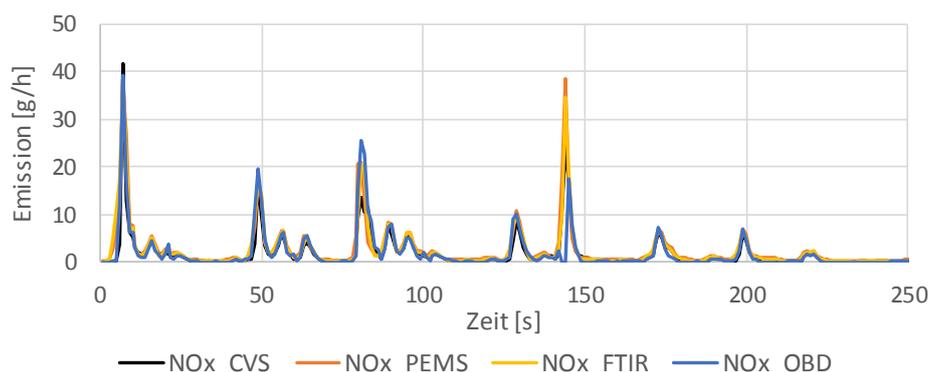


Abbildung 4.7: Vergleich der zeitlichen Verläufe der gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen im ERMES V9-Zyklus

Aufgrund der Einbauposition kann die Verifikation des NO<sub>x</sub>-Sensors vor SCR-Katalysator nicht durch den Vergleich mit den Emissionsmessgeräten erfolgen. Der NO<sub>x</sub>-Sensor vor SCR wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem NO<sub>x</sub>-Sensor nach SCR (der ja bereits validiert wurde) abgeglichen und so verifiziert. Hierbei ist zu beachten, dass die NO<sub>x</sub>-Sensoren vor und nach SCR nur dann gleiche Konzentrationen messen können, wenn das SCR-System nicht aktiv ist,

also keine  $\text{NO}_x$ -Konvertierung stattfindet. Um dies zu erreichen, wurde das Versuchsfahrzeug so lange (20 Minuten) bei geringer Geschwindigkeit gefahren, bis beide  $\text{NO}_x$ -Sensoren von der Motorsteuerung freigegeben wurden. Durch die bei niedrigen Geschwindigkeiten geringe Motorlast erreicht das SCR-System nie Betriebstemperatur und es findet kein  $\text{NO}_x$ -Umsatz statt was den Abgleich der  $\text{NO}_x$ -Sensoren erlaubt. Aus Abbildung 4.8 ist ersichtlich, dass die  $\text{NO}_x$ -Sensoren nahezu die gleichen Konzentrationen messen, wenn keine Konvertierung durch das SCR-System erfolgt. Die Abweichungen liegen im Bereich der zulässigen Toleranz.

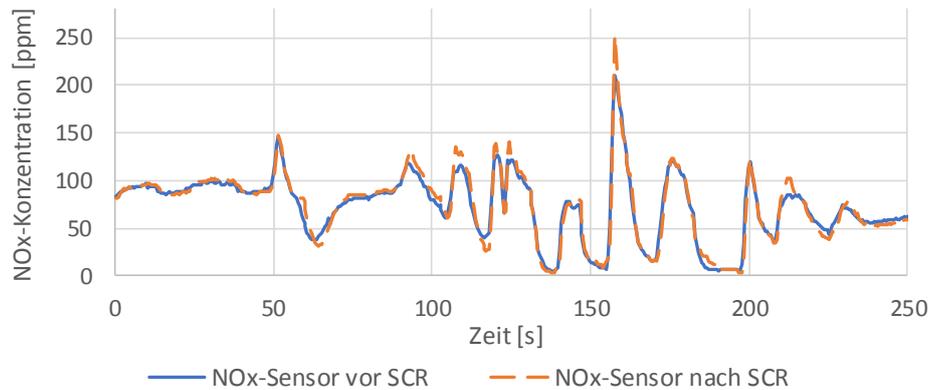


Abbildung 4.8: Vergleich der zeitlichen Verläufe der von den  $\text{NO}_x$ -Sensoren gemessenen Konzentrationen bei sehr geringer Abgastemperatur

Die Validierung des PEMS-Aufbaus erfolgte entsprechend der Verordnung EU 2017/1154 ([31]). Diese schreibt vor, dass die von der PEMS im WLTC gemessenen, zyklusgemittelten Emissionen von den Beutelwerten (Laborbezugswert) nur um eine gewisse Toleranz abweichen dürfen. Die zulässigen Toleranzen können der Tabelle 7.1 im Anhang entnommen werden. Die Ergebnisse der Auswertung bezüglich der Einhaltung der PEMS-Messtoleranzen im WLTC sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Die grün hinterlegten Werte kennzeichnen die Einhaltung der zulässigen Toleranz. Toleranzüberschreitungen sind rot hervorgehoben. Die zulässige Messtoleranz wurde nur bei der Partikelanzahl überschritten. Da die Partikelmessung kein Schwerpunkt dieser Arbeit war, stellt diese Überschreitung für diese Arbeit jedoch keine Limitierung dar.

Tabelle 4.3: Auswertung bezüglich Messtoleranz der PEMS im WLTC gemäß [31]

Laborbezugswert	gültige zulässige absolute Tol.	Messwert PEMS	tat. absolute Abweichung	Abgas-komponente	Einheit
129.9	13.0	136.8	7.0	$\text{CO}_2$	g/km
65.9	15.0	80.6	14.7	$\text{NO}_x$	mg/km
39.9	15.0	-	-	HC	mg/km
161.6	150.0	174.8	13.2	CO	mg/km
2.25E+11	1.12E+11	2.35E+09	2.22E+11	PN	#/km

### 4.3.2 Vergleich mit Grenzwerten und Zulassungsdaten

Laut Zulassungsschein erfüllt das Versuchsfahrzeug die Abgasnorm EURO 6d-Temp und die Typprüfung des Fahrzeugs fand im Juni 2018 statt. Es musste also die Abgasgrenzwerte sowohl in einer Emissionsmessung im WLTC als auch in einer RDE-Messung erfüllen. Um die Plausibilität der Messergebnisse und die ordnungsgemäße Funktion des Fahrzeugs zu überprüfen, erfolgt im Folgenden eine Gegenüberstellung der gemessenen Emissionen mit den Grenzwerten und Werten aus dem Zulassungsschein. In den abgebildeten Tabellen gilt dabei die folgende Farbkennzeichnung:

- Grün hinterlegt: Messwert unterschreitet sowohl die Zulassungswerte als auch den Emissionsgrenzwert
- Gelb hinterlegt: Messwert überschreitet den Zulassungswert aber nicht den Grenzwert
- Rot hinterlegt: Messwert überschreitet sowohl Zulassungswert als auch den Grenzwert
- Nicht hinterlegt: für diese Abgaskomponente ist kein Grenzwert definiert

Tabelle 4.4: Vergleich der Messergebnisse mit den Abgasgrenzwerten und Zulassungsdaten im WLTC

Abgaskomponente	Einheit	Beutelwert	Grenzwert (EU6d-temp)	Zulassungswert (WLTC)
CO <sub>2</sub>	g/km	129.9	-	120
NO <sub>x</sub>	mg/km	66	80	30.5
HC	mg/km	40	-	-
HC + NO <sub>x</sub>	mg/km	106	170	70.1
CO	mg/km	162	500	179.1
PM	mg/km	0.25	4.5	0.3
PN	#/km	2.25E+11	6.00E+11	-

Aus Tabelle 4.4 ist ersichtlich, dass das Versuchsfahrzeug im WLTC alle Grenzwerte einhalten konnte. Bei einigen Abgaskomponenten kam es jedoch zu einer Überschreitung der im Zulassungsschein angegebenen Werte. Die Abweichung von den Zulassungsdaten ist in Abbildung 4.9 als Prozentsatz angegeben. Ein möglicher Grund für die Abweichung von den Zulassungsdaten sind unterschiedliche Prüfstandeinstellungen im Vergleich zur Zulassungsmessung. Eine mögliche Erklärung für die große Abweichung bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen wäre auch eine höhere NO<sub>x</sub>-Beladung des NSK im Vergleich zur Zulassungsmessung.

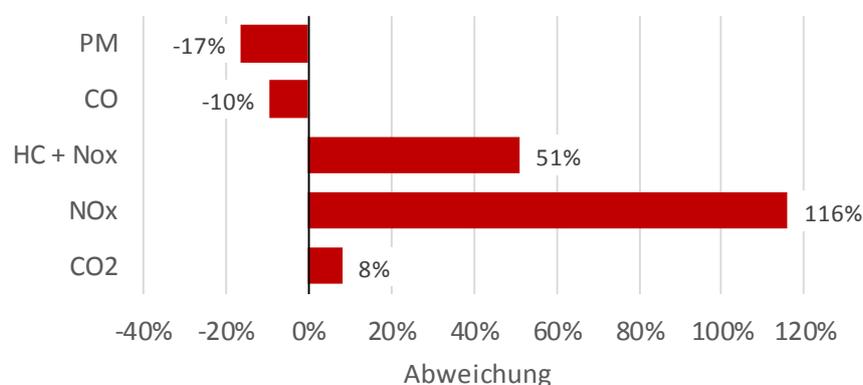


Abbildung 4.9: Abweichung von den Zulassungsdaten

Wie bereits erwähnt, war die Einhaltung der gesetzlichen Randbedingungen für die RDE-Fahrten nicht zwingend erforderlich. Es erfolgte jedoch trotzdem ein Vergleich der RDE-Messergebnisse mit den Grenzwerten. Die für RDE-Messungen des Versuchsfahrzeugs gültigen Not-To-Exceed-Limits (= Grenzwert im WLTC x CF) sind in Tabelle 4.5 angegeben. Aus Tabelle 4.6 ist ersichtlich, dass die Not-To-Exceed-Limits vom Versuchsfahrzeug bei allen RDE-Messungen eingehalten wurden (grün hinterlegt). Da es bei der Messung „Arzberg modifiziert“ zu einer DPF-Regeneration kam, wäre diese nach RDE-Gesetz ungültig. Daher wurde auch kein Vergleich durchgeführt.

Tabelle 4.5: Abgasgrenzwerte für das Versuchsfahrzeug bei RDE-Messungen

Abgaskomponente	Einheit	Grenzwert (EU6d-temp)	CF-RDE	Grenzwert RDE
NO <sub>x</sub>	mg/km	80	2.1	168.0
CO	mg/km	500	-	-
PN	#/km	6.00E+11	1.5	9.00E+11

Tabelle 4.6: Messergebnisse der RDE-Messungen

Abgaskomponente	Einheit	Ries 01	Arzberg 01
CO <sub>2</sub>	g/km	136.3	151.1
NO <sub>x</sub>	mg/km	62.2	55.0
CO	mg/km	98.4	18.2
PN	#/km	1.59E+09	2.26E+09

### 4.3.3 Einfluss der DPF-Regeneration

Im Rahmen der Messungen für diese Arbeit wurden zwei ERMES V9-Zyklen unter identischen Randbedingungen gefahren (siehe Kapitel 0.0). Bei einem dieser Zyklen kam es in der dritten Zyklusphase zu einer DPF-Regeneration. Da es sich um reproduzierbare Prüfstandsmessungen handelt, ist ein Vergleich der beiden Zyklen möglich, der Rückschlüsse auf die Auswirkungen von DPF-Regenerationen erlaubt. In Abbildung 4.10 sind dazu die absoluten phasenweisen Abweichungen zwischen dem Zyklus mit und ohne Regeneration dargestellt. Der Zyklus ohne Regeneration dient als Vergleichsbasis.

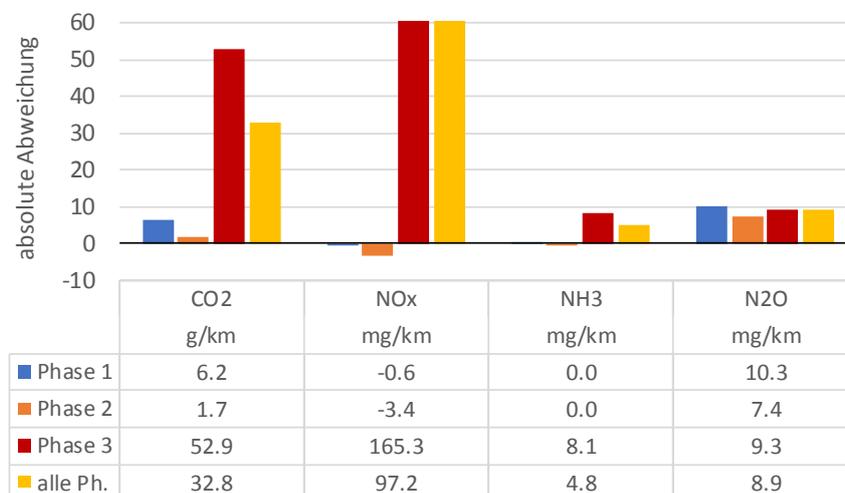


Abbildung 4.10: Vergleich der gemittelten Emissionen im ERMES-Zyklus mit und ohne Regeneration

In den ersten beiden Zyklusphasen sind die Emission nahezu identisch. Im Zyklus mit Partikelfilterregeneration kam es nach derselbigen zusätzlich zu einer NSK-Desulfatierung. Die Kombination der beiden führte in der dritten Zyklusphase zu deutlich höheren  $\text{CO}_2$ -,  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionen (siehe Abbildung 4.10 u. 4.11). Die höhere  $\text{CO}_2$ -Emission resultiert zum einen aus den Heizmaßnahmen, die zur Auslösung der Regeneration nötig sind und zum anderen aus dem Rußabbrand. In Abbildung 4.12 ist der Verlauf der Abgastemperatur (AGT) vor SCR (vSCR) für den Zyklus mit (rot) und ohne (blau) Regeneration dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Regeneration zu Abgastemperaturen von über  $500^\circ\text{C}$  vor SCR führt. Bei derart hohen Abgastemperaturen fällt die SCR-Konvertierungsrate ab, was zu höheren  $\text{NO}_x$ -Emissionen führt. In Folge der mit zunehmender Temperatur abnehmenden  $\text{NH}_3$ -Speicherfähigkeit, kommt es zur Desorption von  $\text{NH}_3$  aus dem SCR-Katalysator und damit zu einer  $\text{NH}_3$ -Emission. Die hohen Abgastemperaturen während der DPF-Regeneration können bei Fahrzeugen mit SCR also zu  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionen führen.

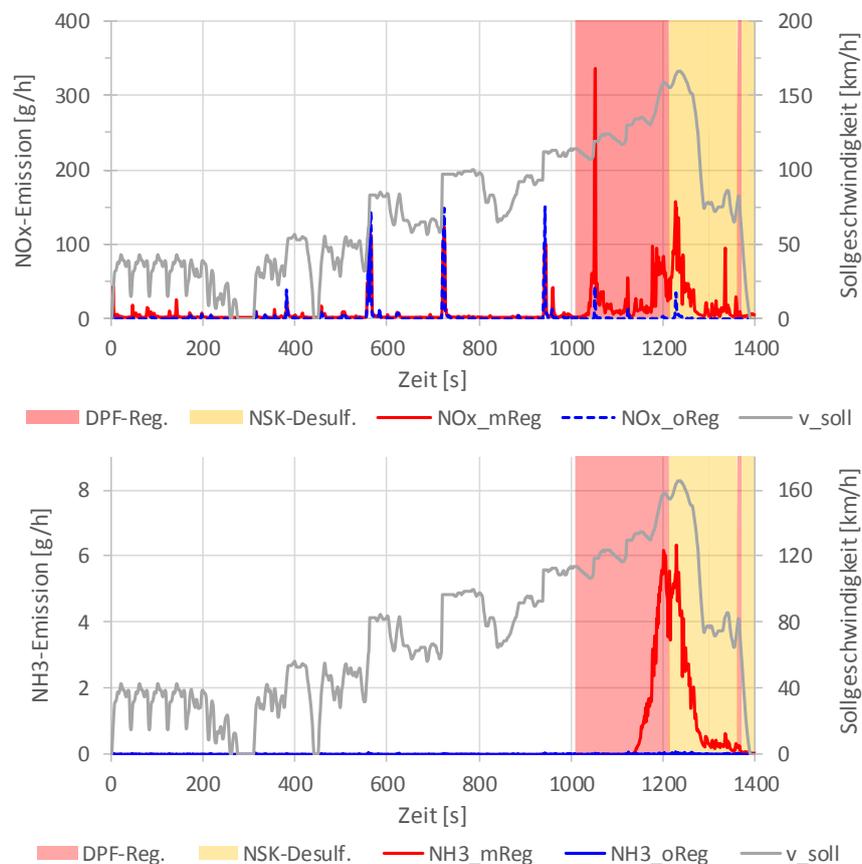


Abbildung 4.11:  $\text{NO}_x$ - u.  $\text{NH}_3$ -Emission im ERMES-Zyklus mit und ohne Regeneration

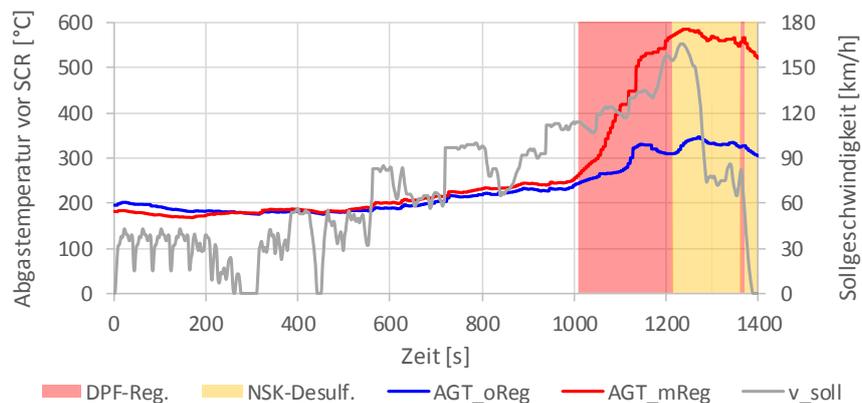


Abbildung 4.12: Abgastemperatur vor SCR im ERMES-Zyklus mit und ohne Regeneration

Bei Fahrzeugen mit SCR-Systemen kann es, wie gezeigt, zum Auftreten von Ammoniak Emissionen kommen, die auch als  $\text{NH}_3$ -Schlupf bezeichnet werden. Derzeit gibt es bei PKW für diese Emission keinen Grenzwert. Dennoch wurde die mittlere  $\text{NH}_3$ -Konzentration im Abgas für einige Zyklen berechnet (siehe Tabelle 4.7). Der  $\text{NH}_3$ -Schlupf liegt, abgesehen von der Messung in der eine DPF-Regeneration auftrat (8181), im Bereich der Messgenauigkeit des FTIRs. Mit etwa 2.5 ppm für den Zyklusmittel beim Zyklus mit DPF-Regeneration liegt der  $\text{NH}_3$ -Schlupf unterhalb der Geruchsschwelle (15 ppm in Luft) [21].

Tabelle 4.7: Mittlere  $\text{NH}_3$ -Konzentration im Abgas

Nr.	Zyklus	$\text{NH}_3$ -Emission Zyklus gemittelt
8180	WTLC	0.1 ppm
8181	ERMES v9	2.5 ppm
8183	ERMES v9	0 ppm

#### 4.3.4 Einfluss der Start-Stopp-Automatik

Die Start-Stopp-Automatik stellt den Motor bei Fahrzeugstillstand automatisch ab, um Kraftstoff zu sparen und startet diesen wieder, sobald der Fahrer wieder anfahren will. Um den Einfluss der Start-Stopp-Automatik auf das Emissionsverhalten im Stauverkehr zu ermitteln, wurde der „IUFC+Stop&Go“-Zyklus einmal mit und einmal ohne Start-Stopp-Funktion gefahren. In Abbildung 4.13 sind die phasenweisen Abweichungen zwischen den beiden Messungen dargestellt. Die Messung mit aktivierter Start-Stopp-Automatik stellt die Bezugsbasis dar. Wie zu erwarten, führt die Deaktivierung der Start-Stopp-Automatik zu höheren  $\text{CO}_2$ -Emissionen, ergo erhöhtem Kraftstoffverbrauch. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen waren bei deaktivierter Start-Stopp-Automatik vor allem im IUFC-Zyklusteil geringer.

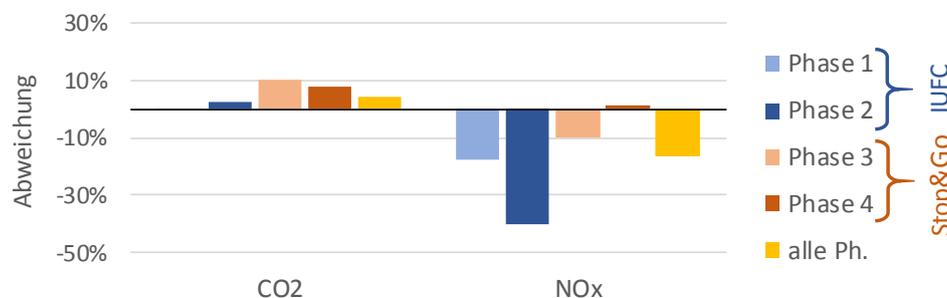


Abbildung 4.13: Abweichung zw. „IUFC+Stop&Go“-Zyklus mit und ohne Start-Stopp-Automatik

Um den Einfluss der Start-Stopp-Funktion auf die  $\text{NO}_x$ -Emission genauer zu untersuchen, wurden für beide Messungen die mittleren  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsraten und Abgastemperaturen vor SCR für die einzelnen des IUFC berechnet und verglichen (siehe Abbildung 4.14). Der Vergleich kann erst ab dem fünften Mikrozyklus erfolgen, da davor die  $\text{NO}_x$ -Sensoren nicht aktiv waren und daher die Konvertierungsrate nicht berechnet werden konnte. Die Mittelwerte der Abgastemperaturen unterscheiden sich für die beiden Messungen praktisch nicht. Die mittleren  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsraten hingegen unterscheiden sich deutlich. Während beider Messungen wird die HWL-Dosierungstemperatur (etwa  $200^\circ\text{C}$  AGT vor SCR) nicht erreicht. Die für den  $\text{NO}_x$ -Umsatz im SCR-Katalysator notwendige  $\text{NH}_3$ -Menge stammt daher aus dessen  $\text{NH}_3$ -Speichervermögen. Je geringer seine  $\text{NH}_3$ -Beladung ist, desto niedriger fällt auch die erreichbare Konvertierungsrate aus (siehe Kapitel 2.2.2.2). Den verglichenen Zyklen gingen nicht die gleichen Messungen voraus, was verschiedene  $\text{NH}_3$ -Beladungen bei Zyklusbeginn zur Folge hat, die den Grund für die unterschiedlichen  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsraten darstellt.

Abschließend kann festgehalten werden, dass unterhalb der Dosierungstemperatur die  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators entscheidend für die bei vergleichbaren Abgastemperaturen vor SCR erreichbare Konvertierungsrate in Niederlastzyklen ist.

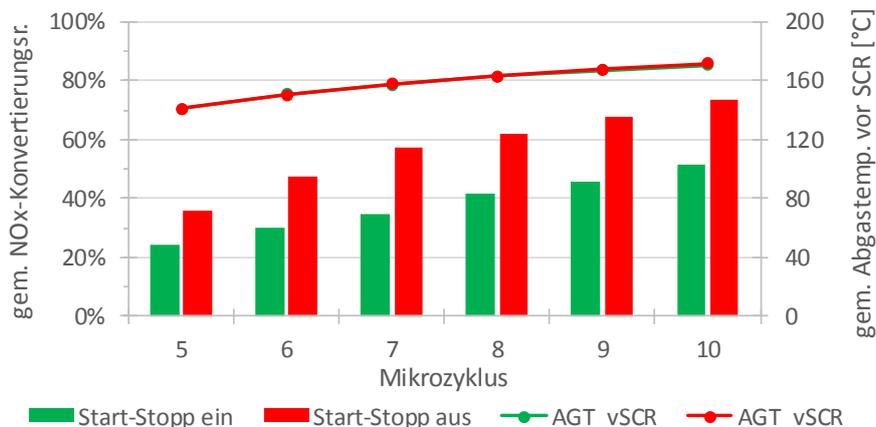


Abbildung 4.14: Vergleich der gemittelten  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsrate und AGT vor SCR über die Mikrozyklen des IUFC mit und ohne Start-Stopp-Automatik

#### 4.3.5 Verhalten im Leerlauf

Zur Untersuchung des Verhaltens im Leerlauf wurde das Fahrzeug zwischen zwei Emissionsmessungen im Leerlauf betrieben und Messdaten über die OBD-Schnittstelle aufgezeichnet. Die erfassten Messdaten sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Sekunde 0 kennzeichnet das Ende des ERMES V9-Zyklus und den Beginn des 16-minütigen Abkühlversuchs im Leerlauf bis zum Start des nächsten Zyklus (Sekunde 960).

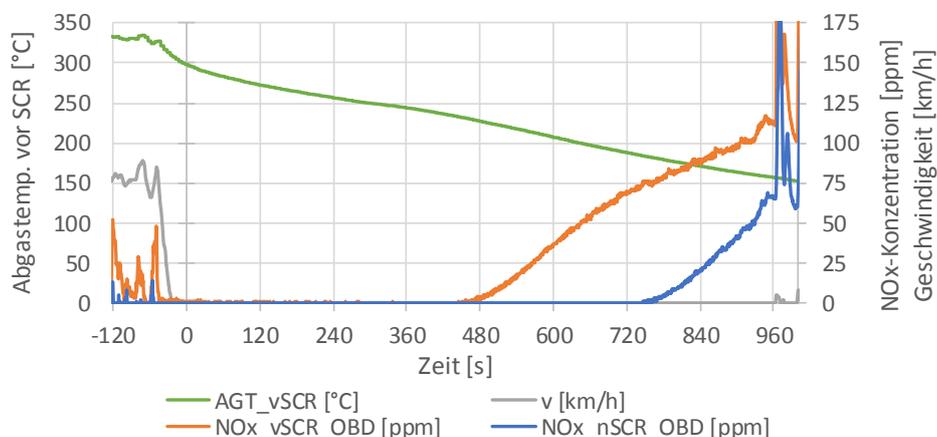


Abbildung 4.15: Verlauf der AGT sowie  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Leerlauf

Das Verhalten kann in drei Phasen unterteilt werden:

- I. Die Speicherfähigkeit des NSK verhindert zunächst  $\text{NO}_x$ -Emissionen vollständig.
- II. Wegen der zunehmenden  $\text{NO}_x$ -Beladung und der mit abnehmender Abgastemperatur reduzierten Speicherfähigkeit des NSK kommt es zum Durchschlagen von  $\text{NO}_x$ -Emissionen bis vor SCR. Das SCR-System ist jedoch zunächst noch in der Lage, die gesamten  $\text{NO}_x$  zu konvertieren.
- III. Mit abnehmender Abgastemperatur vor SCR und abnehmendem  $\text{NH}_3$ -Speicherstand sinkt die SCR-Konvertierungsrate und es kommt zum Durchschlagen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen durch das SCR-System. Die abnehmende SCR-Konvertierungsrate ist gut an der stärkeren Zunahme der  $\text{NO}_x$ -Konzentration nach SCR (nSCR) als vor SCR (vSCR) zu erkennen.

Es zeigt sich, dass der NSK und das SCR-System in der Lage sind,  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Leerlauf für einige Zeit vollständig zu verhindern. Entscheidend für die Emissionen im Leerlauf und in Stausituationen ist also die Abgastemperatur, der  $\text{NO}_x$ -Speicherstand des NSK und die  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators vor Beginn der Phase mit geringer Motorlast.

#### 4.3.6 Ermittlung der $\text{NH}_3$ -Speicherfähigkeit

Um das  $\text{NH}_3$ -Speichervermögen des SCR-Katalysators abzuschätzen, wurde versucht, das Fahrzeug so lange bei geringer Last unter der Dosiertemperatur zu betreiben, bis vom SCR-System keine  $\text{NO}_x$ -Konvertierung mehr erreicht wird, weil das gesamte im Katalysator gespeicherte  $\text{NH}_3$  verbraucht ist („Leerfahren“). Aus der in dieser Zeit umgesetzten  $\text{NO}_x$ -Menge kann dann die umgesetzte  $\text{NH}_3$ -Menge, die im Katalysator gespeichert war, berechnet werden. Vor dem Leerfahrversuch wurde das Fahrzeug für einige Zeit über der Dosiertemperatur betrieben, um eine maximale  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators sicherzustellen. Die Abgastemperatur vor SCR und die SCR-Konvertierungsrate für den Leerfahrversuch sind in Abbildung 4.16 dargestellt.

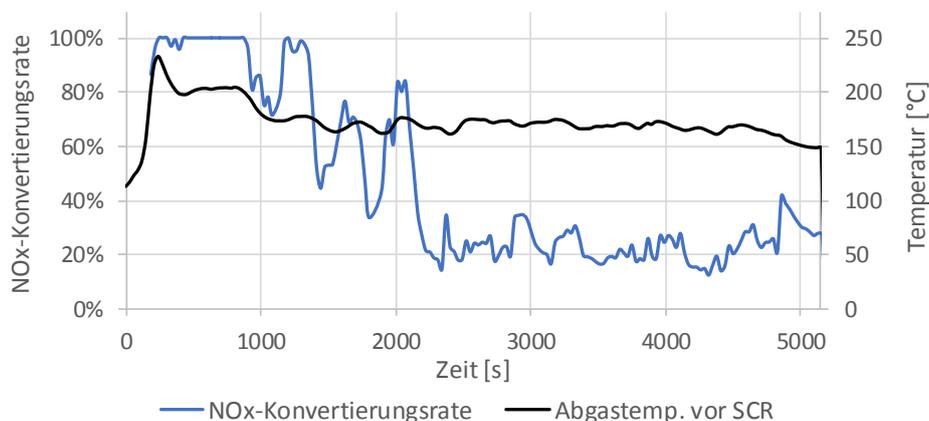


Abbildung 4.16: Abgastemperatur vor SCR und Konvertierungsrate im Leerfahrversuch

Die Durchführung des Versuchs gestaltete sich als schwierig, da das Fahrzeug immer wieder versuchte, eine NSK-Regeneration durchzuführen. Dadurch kommt es zum Ansteigen der Abgastemperatur, dem mit einer Lastreduktion entgegengewirkt werden musste, um das Erreichen der Dosiertemperatur zu verhindern (welliger Temperaturverlauf in Abbildung 4.16). Die Messung wurde nach etwa 5000 Sekunden abgebrochen, da ein vollständiges Leerfahren des  $\text{NH}_3$ -Speichers des SCR-Katalysators nicht möglich war.

Bei niedrigen Abgastemperaturen wie in diesem Fall dominiert die Fast-SCR-Reaktion nach Gleichung (2.8). Pro Mol umgesetzten  $\text{NO}_x$  wird dabei ein Mol  $\text{NH}_3$  verbraucht. Weiters muss für die Fast-SCR-Reaktion das Verhältnis  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  1:1 betragen.

Aus der sekundlich umgesetzten  $\text{NO}_x$ -Menge nach (4.9) kann mit dem Verhältnis  $v_{\text{NO}/\text{NO}_x}$  und den molaren Massen ( $M_{\text{NO}}$ ,  $M_{\text{NO}_2}$  und  $M_{\text{NH}_3}$ ) der sekundliche  $\text{NH}_3$ -Umsatz bzw. Verbrauch nach (4.12) berechnet werden.

$$\Delta \dot{m}_{\text{NO}_x} = \dot{m}_{\text{NO}_x \text{ vor SCR}} - \dot{m}_{\text{NO}_x \text{ nach SCR}} \quad (4.9)$$

$$v_{\text{NO}/\text{NO}_x} = \frac{n_{\text{NO}}}{n_{\text{NO}_x}} = 0.5 \quad (4.10)$$

$$M_{\text{NO}_x} = v_{\text{NO}/\text{NO}_x} \cdot M_{\text{NO}} + (1 - v_{\text{NO}/\text{NO}_x}) \cdot M_{\text{NO}_2} \quad (4.11)$$

$$\dot{m}_{NH_3} = \Delta \dot{m}_{NO_x} \cdot \frac{n_{NH_3}}{n_{NO_x}} \cdot \frac{M_{NH_3}}{M_{NO_x}} \quad (4.12)$$

Durch Integration des NH<sub>3</sub>-Umsatzstroms ( $\dot{m}_{NH_3}$ ) erhält man den kumulierten NH<sub>3</sub>-Umsatz. Dieser ist in Abbildung 4.17 dargestellt und beträgt bei Versuchsende etwa 1.5 g. Bezogen auf das Volumen des SCR-Katalysators (5.78 L) ergibt sich eine NH<sub>3</sub>-Beladung von etwa 0.26 g/L. Dieser Wert ist deutlich geringer als die in der Literatur angegebenen Werte von 0.5 bis 1 g/L. Es ist daher davon auszugehen, dass im durchgeführten Versuch nicht die gesamte NH<sub>3</sub>-Beladung verbraucht wurde.

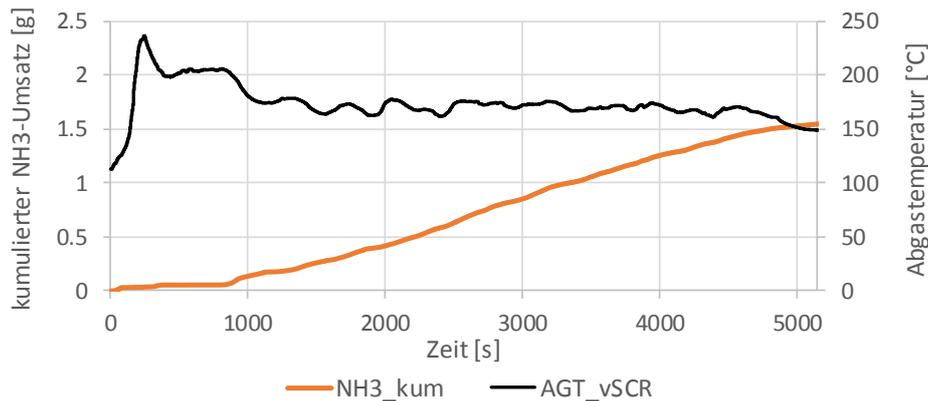


Abbildung 4.17: kumulierter NH<sub>3</sub>-Umsatz und Abgastemperatur vor SCR im Leerfahrversuch

### 4.3.7 SCR-Konvertierungsraten

Die Auswertung in Abbildung 4.18 zeigt die durchschnittlichen SCR-Konvertierungsraten – berechnet aus den NO<sub>x</sub>-Konzentrationen vor und nach SCR – sowie die durchschnittliche Abgastemperatur vor SCR für jede Messung. Es wurden dabei nur jene Zeitpunkte für die Mittelung verwendet, in denen beide NO<sub>x</sub>-Sensoren aktiv waren (mit Stern gekennzeichnete Größen in der Diagrammlegende). Da die NO<sub>x</sub>-Sensoren vor allem bei niedrigen Abgastemperaturen, also bei geringen Konvertierungsraten nicht aktiv sind, sind die angegebenen Konvertierungsraten tendenziell zu hoch. Die grauen Balken geben den Zeitanteil an, in dem die NO<sub>x</sub>-Sensoren aktiv waren und stellen eine Art Gütemaß für die angegebenen Konvertierungsraten dar.

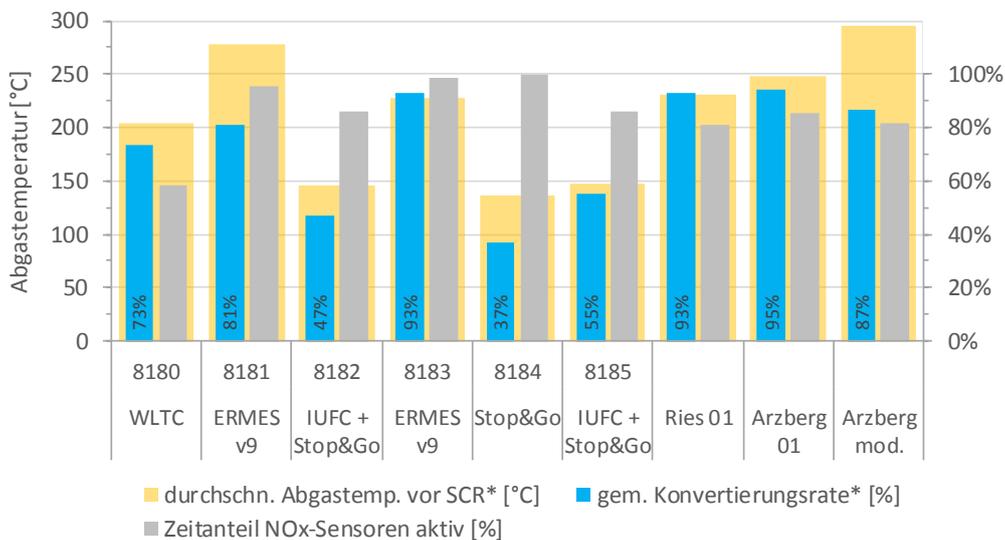


Abbildung 4.18: Gemittelte Daten in den einzelnen Messungen (\*Mittelwert über jene Zeitpunkte in denen beide NO<sub>x</sub>-Sensoren aktiv waren)

Basierend auf diese Daten können nun folgende Aussagen getroffen werden:

- (i) Schließt man die niederlastigen Zyklen (IUFC u. Stop&Go) aus, so beträgt die durchschnittliche SCR-Konvertierungsrate in den Zeitpunkten, in denen die NO<sub>x</sub>-Sensoren aktiv waren, 90 %.
- (ii) Für jene Zeitpunkte, in denen die NO<sub>x</sub>-Sensoren nicht aktiv waren, muss eine Konvertierungsrate angenommen werden. Zu diesen Zeitpunkten beträgt die durchschnittliche Abgastemperatur vor SCR 116 °C und die durchschnittliche Raumgeschwindigkeit im SCR-Katalysator 2.3 l/s. An dieser Stelle beträgt die Konvertierungsrate im SCR-Konvertierungskennfeld 17 % (siehe Kapitel 5.5.1, Kennfeldbereich mit Extrapolation).
- (iii) Durch entsprechende gewichtete Mittelung der beiden Konvertierungsraten ergibt sich für die eingeschlossenen Messungen eine durchschnittliche Konvertierungsrate von 77.6 %.

### 4.3.8 Zeitliche Verläufe bei RDE-Messungen

Abschließend werden die wichtigsten Messgrößen des SCR-Systems während zwei RDE-Messungen betrachtet (siehe Abbildungen 4.19 und 4.20). Die regelmäßigen Regenerationen des NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysators sind durch gelb hinterlegte Bereiche gekennzeichnet. Die angegebenen kumulierten NO<sub>x</sub>-Verläufe aus den OBD-Daten (blau u. orange) wurden erst ab jenem Zeitpunkt berechnet, ab dem beide NO<sub>x</sub>-Sensoren über die OBD Daten lieferten. Die am Auspuffrohr von der PEMS gemessenen Emissionen sind kumuliert in schwarz dargestellt.

Bei beiden Messungen zeigt sich, dass die NSK-Regenerationen zu einem zeitverzögerten Anstieg der Abgastemperatur vor SCR führen und sich wie Heizmaßnahmen positiv auf die Abgastemperatur vor SCR auswirken. Ein Großteil der NO<sub>x</sub>-Emissionen entfällt in beiden Messungen auf die Kaltstartphasen. Diese sind durch geringe Abgastemperaturen vor SCR und die damit einhergehenden niedrigen SCR-Konvertierungsraten gekennzeichnet. Ab dem Erreichen einer Abgastemperatur vor SCR von etwa 180 °C erzielt das SCR-System hohe Konvertierungsraten (schwarze Kurve flacht ab). Während längerer Phasen konstanter Last und Abgastemperatur wird praktisch eine vollständige NO<sub>x</sub>-Konvertierung erreicht.

Fällt die NSK-Regeneration mit einer Phase hoher Motorlast zusammen (z.B. starke Beschleunigung kurz vor und nach Sekunde 3600 in Abbildung 4.19), kommt es des Öfteren zum Durchschlagen von NO<sub>x</sub>-Spitzen bis an die Auspuffblende. Im Verlauf der kumulierten Emissionen nach SCR zeigen sich diese NO<sub>x</sub>-Spitzen als stufenförmige Zunahmen. Der Grund hierfür konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht genau eruiert werden.

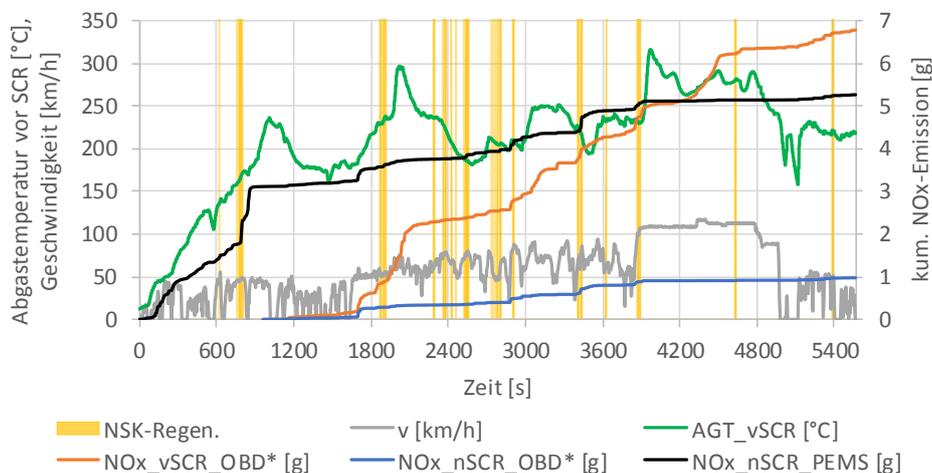


Abbildung 4.19: Zeitliche Verläufe RDE-Messung Ries 01 (\*OBD-Messdaten der NO<sub>x</sub>-Sensoren erst ab Sekunde 960 verfügbar)

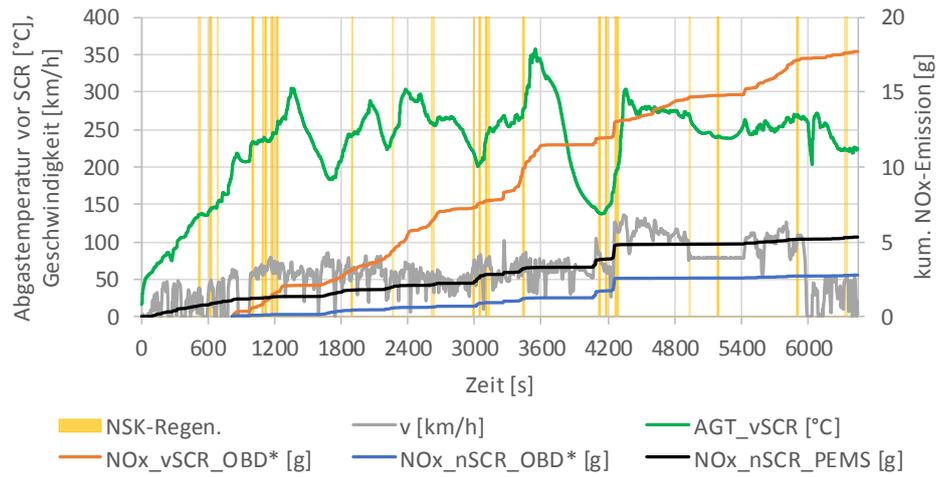


Abbildung 4.20: Zeitliche Verläufe RDE-Messung Arzberg 01 (\*OBD-Messdaten der NO<sub>x</sub>-Sensoren erst ab Sekunde 820 verfügbar)

## 5 Simulation mittels PHEM

Für die im Rahmen dieser Arbeit durgeführten Emissionssimulationen wurde das Simulationsprogramm PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) verwendet. In den folgenden Kapiteln wird zunächst die Funktionsweise dieses Programms erläutert, bevor auf den schrittweisen Aufbau des Simulationsmodells für das für diese Arbeit eingesetzte Versuchsfahrzeug eingegangen wird. Abschließend wird das Simulationsmodell validiert und die Simulationsergebnisse präsentiert.

### 5.1 Funktionsweise PHEM

Bei PHEM handelt es sich um ein kennfeldbasiertes Simulationsprogramm, das seit Ende der 1990er Jahre am IVT der TU Graz eingesetzt und ständig weiterentwickelt wird. Es ermöglicht die Simulation des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen eines Fahrzeuges unter Vorgabe von Fahrzyklus, Fahrzeugdaten und Motorkennfeldern. Das Abgasnachbehandlungssystem kann detailliert in der Simulation berücksichtigt werden. Des Weiteren bietet dieses Programm die Möglichkeit, die für die Simulation nötigen Motorkennfelder aus Messdaten zu erstellen (siehe Kapitel 5.4).

Das Flussdiagramm in Abbildung 5.1 zeigt den Ablauf der Emissionssimulation mittels PHEM. Zentraler Bestandteil des Programms ist ein Längsdynamikmodell, das die erforderliche Motorleistung in jedem Zeitschritt (1 Hz Auflösung) des vorgegebenen Fahrzyklus anhand der eingegeben Fahrzeugdaten (z.B. Masse, Fahrwiderstände, Getriebeübersetzungen, usw.) berechnet. Die Motordrehzahl kann direkt vorgegeben werden. Wird sie nicht direkt vorgegeben, wird die Motordrehzahl aus der Geschwindigkeitsvorgabe und der Getriebeübersetzung des eingelegten Gangs berechnet. Der eingelegte Gang wird mittels eines Schaltmodells berechnet. Kraftstoffverbrauch und Emissionen werden für jeden Zeitpunkt des Fahrzyklus aus den über der normierten Drehzahl und normierten Motorleistung aufgespannten Kennfeldern (KF) berechnet. Die Normierung der KF-Parameter (Drehzahl u. Leistung) erlaubt es, Kennfelder von Motoren bzw. Fahrzeugen unterschiedlicher Leistungsklassen zu vergleichen.

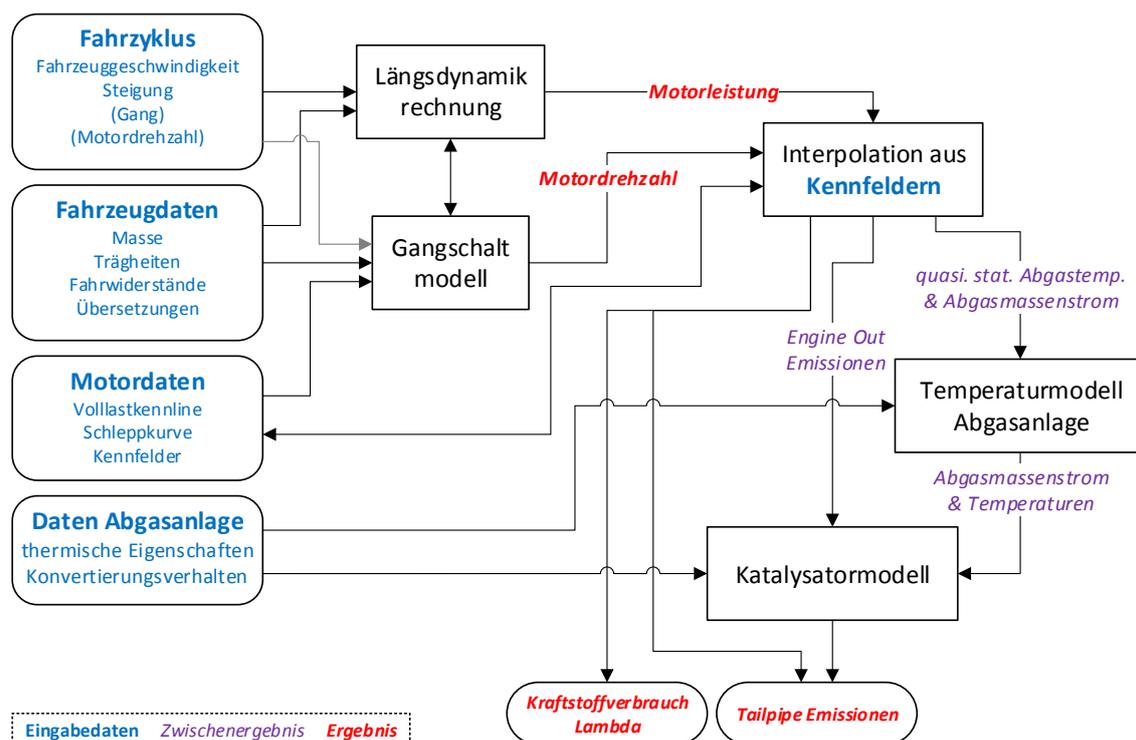


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise von PHEM (angelehnt an [22])

Um das Verhalten und den Einfluss moderner Abgasnachbehandlungssysteme in der Simulation berücksichtigen zu können, verfügt PHEM über ein optionales Temperatur- und Katalysatormodell. Ausgehend von Kennfeldern der (Roh-)Emissionen vor der Abgasnachbehandlung (am Motorauslass; engl. Engine-Out, EO) können mit diesen Modellen die Emissionen am Auspuffendrohr (engl. Tailpipe, TP) unter Berücksichtigung der Konvertierungsraten berechnet werden. Für Abgaskomponenten, für die nur Kennfelder der Emissionen am Auspuffendrohr vorhanden sind (Tailpipe-KF), interpoliert PHEM die Tailpipe-Emissionen direkt aus diesen.

### Temperaturmodell

Das in [22] entwickelte Temperaturmodell dient der Modellierung des thermischen Verhaltens der Abgasnachbehandlung. Dazu werden die einzelnen Komponenten des Abgasnachbehandlungssystems in der Simulation durch sogenannte Module abgebildet. Jedes Modul umfasst eine nulldimensionale Wärmekapazität mit nachgeschaltetem Thermoelement, deren thermisches Verhalten jeweils durch die entsprechenden Eingabeparameter (Masse, Wärmekapazität, usw.) bestimmt ist. In Abbildung 5.2 ist ein solches Modul schematisch dargestellt. Das Temperaturmodell berechnet ausgehend vom Abgasmassenstrom und der Abgastemperatur am Motorauslass für jedes Modul die folgenden vier Temperaturen:

- Gastemperatur am Eingang des Moduls ( $t_{gas\ in}$ )
- Gastemperatur am Ausgang des Moduls ( $t_{gas\ out}$ ) = Gastemperatur am Eingang des nachfolgenden Moduls
- Temperatur des Moduls ( $t_m$ )
- Temperatur des Thermoelements ( $t_{tc}$ )

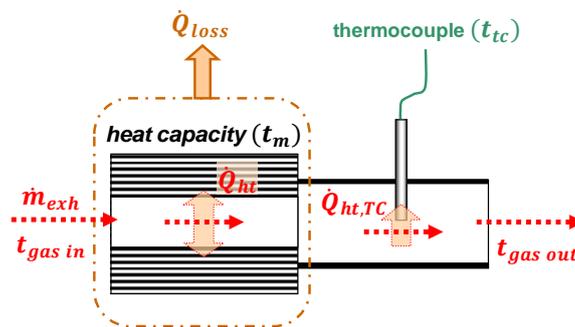


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung eines Moduls (angelehnt an [22])

Es stehen unterschiedliche Modultypen zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Modellierung der Wärmeübergänge und ihres Konvertierungsverhaltens unterscheiden. Ungeachtet des Typs wird für jedes Modul der Wärmeübergang sowohl zwischen Abgas und der thermischen Masse als auch zwischen Abgas und dem Thermoelement modelliert. Einige Modultypen berücksichtigen zusätzlich den Wärmeaustausch mit der Umgebung durch Konvektion und Strahlung. Bezüglich der Beschreibung der Modultypen und mathematischen Modellierung der Wärmeübergänge sei an dieser Stelle auf [22] verwiesen.

### Katalysatormodell

Mithilfe des ebenfalls in [22] entwickelten Katalysatormodells ist es möglich, für jedes Modul dessen Konvertierungsverhalten zu berücksichtigen. Die Basis dafür bildet ein Konvertierungskennfeld, aus dem die Konvertierungsraten als Funktion der Abgastemperatur am Moduleingang und Raumgeschwindigkeit im Modul berechnet werden. Für SCR-Systeme wird die zusätzliche Abhängigkeit der Konvertierungsrate vom  $\text{NH}_3$ -Speicherstand des SCR-Katalysators durch das in [13] beschriebene  $\text{NH}_3$ -Modell berücksichtigt.

## 5.2 Dateneingabe im PHEM

Die Dateneingabe in PHEM erfolgt über Dateien im sogenannten CSV-Format (Comma-Separated Values). Die einzelnen Eingabedateien und ihr Inhalt sind in Abbildung 5.1 durch abgerundete Rechtecke symbolisiert.

Die zur Simulation in PHEM eingegebenen Fahrzeugdaten entsprechen den in Tabelle 3.1 angegebenen Werten. Wie bereits erwähnt, werden in PHEM aus Gründen der Vergleichbarkeit die Emissionen sowie die Volllast- und Schleppkurve über der normierten Drehzahl und normierten Leistung aufgetragen. Die Normierung erfolgt gemäß den Formeln (5.1) und (5.2).

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad (5.1)$$

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

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

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

$n_{rated}$  ..... Motordrehzahl bei Nennleistung [1/min]

$$P_{e\ norm} = \frac{P_e}{P_{rated}} \quad (5.2)$$

$P_{e\ norm}$  ..... Normierte Motorleistung [-]

$P_e$  ..... Motorleistung [kW]

$P_{rated}$  ..... Motornennleistung [kW]

Durch Internetrecherche konnte die Volllastkennlinie des Versuchsfahrzeugs [1] gefunden werden. Sie ist in Abbildung 5.3 sowohl absolut als auch in normierter Form dargestellt. Da für das Versuchsfahrzeug keine Schleppkurven gefunden werden konnten, wurde die Schleppkurve eines ähnlichen Motors verwendet, die am Motorenprüfstand des IVT ermittelt wurde. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass sich Dieselmotoren vergleichbaren Hubraums und Technologie im Schleppbetrieb ähnlich verhalten.

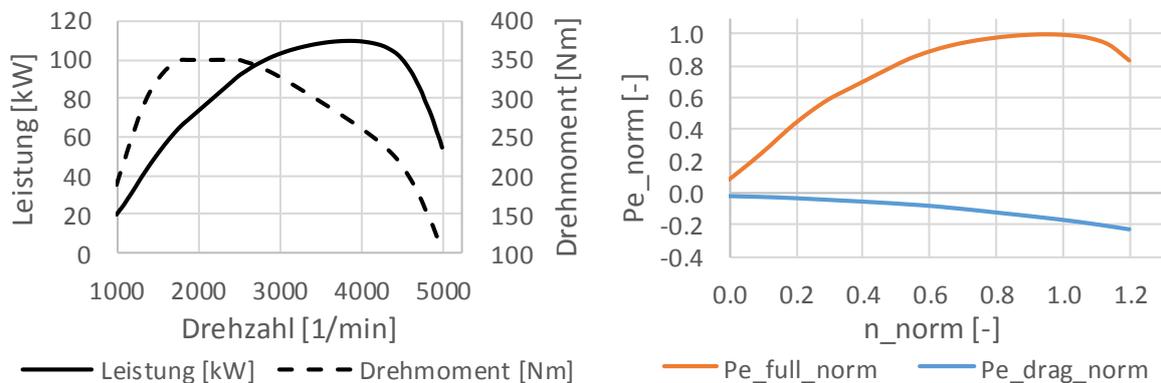


Abbildung 5.3: links: Volllastkennlinien [1]; rechts: normierte Volllast- und Schleppkurve

Um die CO<sub>2</sub>-Emissionskennfelder verschiedener Fahrzeuge besser vergleichen zu können, werden diese entsprechend der Gleichung (5.3) normiert.

$$\dot{m}_{CO_2 \text{ norm}} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{P_{\text{rated}}} \quad (5.3)$$

$\dot{m}_{CO_2 \text{ norm}}$  ..... Normierte CO<sub>2</sub>-Emission [g/kW<sub>rated</sub>h]

$\dot{m}_{CO_2}$  ..... CO<sub>2</sub>-Emission [g/h]

Zur Simulation von Rollenprüfstandsmessungen mit PHEM müssen die Prüfstandseinstellungen (siehe Tabelle 3.8) in Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte umgerechnet werden. Diese Umrechnung erfolgte mit den im Anhang angegebenen Formeln (7.3) bis (7.5). Die Ergebnisse dieser Umrechnung sind gemeinsam mit den Simulationseinstellungen für RDE-Fahrten in Tabelle 5.1 eingetragen. Die Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte für RDE-Fahrten wurden anhand von Ausrollversuchen in [12] ermittelt. Diese gelten für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Fahrzeugkonfiguration (Winterbereifung mit normalem Druck und PEMS im Kofferraum).

Tabelle 5.1: Simulationseinstellungen für PHEM

Parameter	Rollenzyklus	RDE-Fahrt
Fahrzeugmasse [kg]	1739	1585
Beladung [kg]	0	275
$f_{r0}$ [-]	0.01038	0.01064
$f_{r1}$ [-]	3.517 E-6	0
$c_w$ [-]	0.2966	0.37297
$A$ [m <sup>2</sup> ]	2.45	2.45

### 5.3 Justierung des generischen CO<sub>2</sub>-Kennfelds

Um die CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode bei der Kennfelderstellung anwenden zu können, wird ein generisches CO<sub>2</sub>-Emissionskennfeld benötigt. Dieses Kennfeld soll die CO<sub>2</sub>-Emission des Versuchsfahrzeuges als Funktion von Motorleistung und Drehzahl möglichst genau widerspiegeln. Durch die in [13] beschriebene Justierung des generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeldes wird dies sichergestellt.

Für die Justierung wird eine Rollenprüfstandsmessung mit dem zuvor erwähnten generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld nachsimuliert. Aus den sekundlichen Mess- und Simulationsdaten werden jeweils die 20 Sekunden Mittelwerte berechnet und in einem Diagramm über der Motorleistung aufgetragen (siehe Abbildung 5.4). Mittels linearer Regression werden für die gemessenen und simulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen Geradengleichungen aufgestellt. Durch Differenzbildung (Simulation minus Messung) wird aus den beiden Geradengleichungen eine Differenz- bzw. Korrekturfunktion berechnet, die abschließend auf alle Lastpunkte des generischen CO<sub>2</sub>-Kennfelds angewendet wird (für  $P_{e \text{ norm}} > 0$ ). Die Kennfeldjustierung ermöglicht also eine fahrzeugspezifische Anpassung des generischen Kennfelds. [13]

Die Kennfeldjustierung für das Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Im vorliegenden Fall wurde für die Kennfeldjustierung der ERMES v9-Zyklus (8183) herangezogen. Das verwendete generische CO<sub>2</sub>-Kennfeld entspricht dabei dem des durchschnittlichen Euro 6d-Temp Dieselfahrzeugs aus HBEFA 4.1 [14].

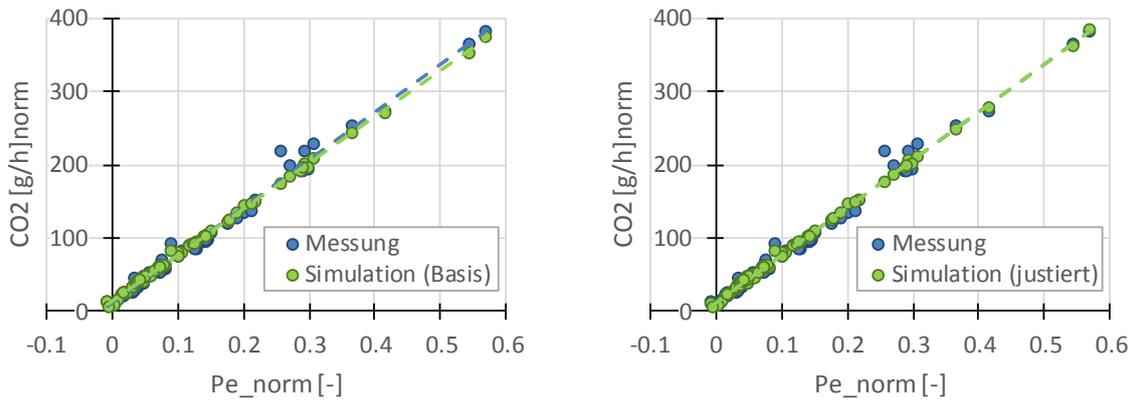


Abbildung 5.4: 20s Mittelwerte der gemessenen und simulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen im ERMES v9 Zyklus vor (links) und nach (rechts) der CO<sub>2</sub>-Kennfeldjustierung

Aus Abbildung 5.4 ist ersichtlich, dass die gemessenen und simulierten CO<sub>2</sub>-Emissionen vor der Justierung bereits sehr gut übereinstimmten. Durch Justierung konnte vor allem im höheren Lastbereich die Übereinstimmung verbessert werden. In Abbildung 5.5 ist das justierte CO<sub>2</sub>-Emissionskennfeld dargestellt.

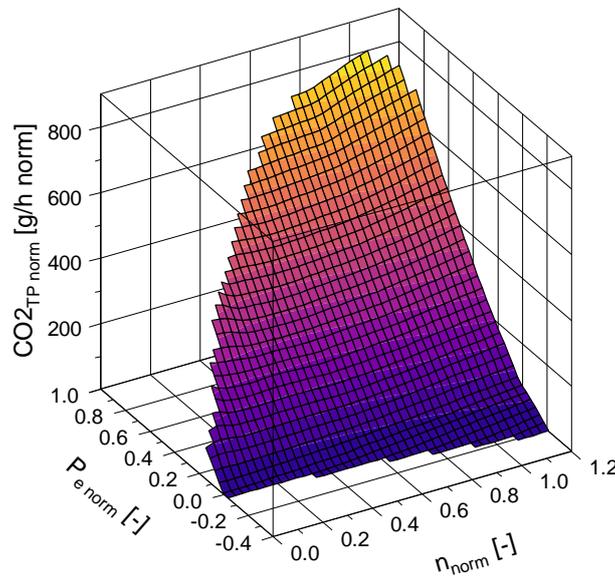


Abbildung 5.5: Justiertes CO<sub>2</sub>-Emissionskennfeld

## 5.4 Erstellung der Motor- bzw. Emissionskennfelder

Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt, können die für die Simulation benötigten Motorkennfelder mit PHEM erstellt werden. Bei der Kennfelderstellung wird die in [13] beschriebene CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode verwendet. Diese Methode ermöglicht es, für die Kennfelderstellung auch Daten aus Messungen heranzuziehen, bei denen die Motorleistung nicht bekannt ist (z.B. RDE-Fahrten). Dazu wird aus dem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld, in dem der Zusammenhang zwischen Motorleistung, Drehzahl und CO<sub>2</sub>-Emissionen hinterlegt ist, für jeden Zeitschritt die Motorleistung anhand der gemessenen Motordrehzahl und CO<sub>2</sub>-Emission interpoliert. Die sekundlich gemessenen Größen werden dann entsprechend der Motorleistung und -drehzahl in Kennfelder eingerastert (siehe Abbildung 5.6).

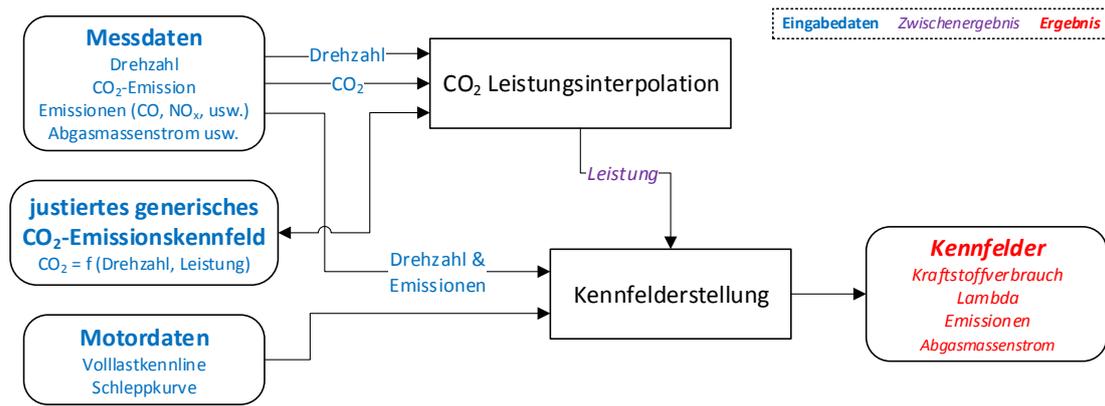


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Kennfelderstellung mit PHEM

Als Datenbasis für die Erstellung der Motorkennfelder dienten die Messdaten der in Tabelle 5.2 und 5.3 angeführten Emissionsmessungen. Diese wurden gewählt, da sie ein großes Drehzahl- und Lastspektrum abdecken. Da es sich beim WLTC um einen Typprüfzyklus handelt, in dem eine zyklusoptimierte Betriebsstrategie nicht ausgeschlossen werden kann, wurde dieser bewusst nicht in die Datenbasis miteinbezogen, um eine Verfälschung der Simulation zu vermeiden. Auf die Verwendung der niederlastigen IUFC und HBEFA Stop&Go Zyklen wurde ebenfalls verzichtet, da dieser Lastbereich erfahrungsgemäß gut durch den ERMES-Zyklus und die RDE-Messungen abgedeckt wird. Um eine Verfälschung der Emissionskennfelder durch die erhöhten Emissionen während der Kaltstartphase<sup>10</sup> und DPF-Regeneration zu vermeiden, wurden Daten aus diesen Phasen nicht für die Kennfelderstellung herangezogen.

Tabelle 5.2: Für die Kennfelderstellung verwendete Prüfstandsmessungen

Nr.	Zyklus	Bemerkung
8181	ERMES v9	DPF-Regeneration in Phase 3 nicht miteinbezogen
8183	ERMES v9	gesamter Messzyklus

Tabelle 5.3: Für die Kennfelderstellung verwendete RDE-Messungen

RDE-Messung	Bemerkung
Ries 01	gesamte Fahrt
Arzberg 01	gesamte Fahrt
Arzberg modifiziert	ab DPF-Regeneration Messdaten nicht mehr miteinbezogen

Wie bereits erwähnt, werden in PHEM zwei Arten von Emissionskennfeldern unterschieden: Sogenannte Tailpipe-Kennfelder, in denen die Emissionen am Auspuffendrohr abgebildet sind, und sogenannte Engine-Out-Kennfelder, die die (Roh)Emissionen am Motorauslass enthalten. Letztere sind u.a. nötig, um das Katalysatormodell von PHEM verwenden zu können. Da die Emissionen am Motorauslass (vor Abgasnachbehandlung) messtechnisch nicht erfasst werden konnten, wurden stattdessen die Emissionen vor SCR verwendet (nächstgelegene Messstelle). Die Position vor SCR wird deshalb im Folgenden als Engine-Out bezeichnet. Es wurden also nicht nur die am Auspuffendrohr (Tailpipe) gemessenen Emissionen, sondern auch jene, die über den NO<sub>x</sub>-Sensor vor SCR erfasst wurden, in Kennfelder eingerastert. Die beiden erstellten NO<sub>x</sub>-KF sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

<sup>10</sup> Zeitspanne von Motorstart bis zum Erreichen einer Motorkühlwassertemperatur von über 70°C

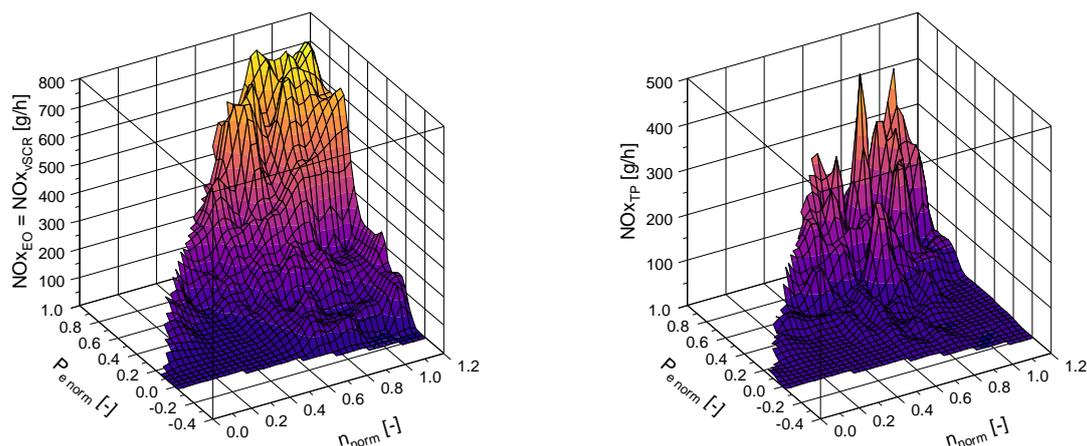


Abbildung 5.7: Kennfelder der  $\text{NO}_x$ -Emissionen (links: vor SCR, rechts: nach SCR)

Mit Ausnahme des  $\text{NO}_x$ -Vor-SCR-Kennfelds handelt es sich bei allen erstellten Emissionskennfeldern um Tailpipe-Kennfelder. Aus den Messdaten des Exhaust Flow Meters wurde ein Abgasmassenstromkennfeld erstellt. Besagtes Kennfeld wird für die Simulation der Abgasmachbehandlung benötigt und ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Erhöhungen im Bereich  $n_{norm} \approx 0.8$  sind auf extrapolierte Kennfeldwerte zurückzuführen.

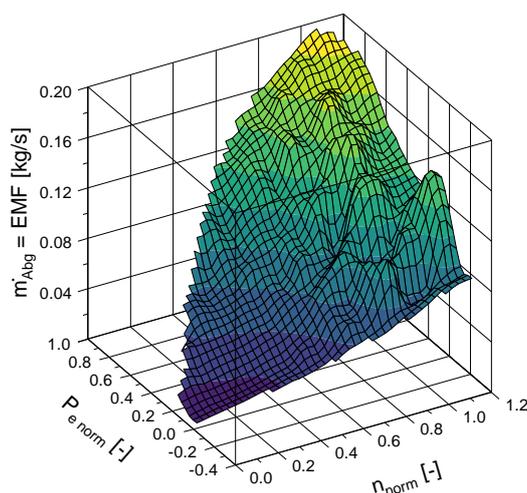


Abbildung 5.8: Abgasmassenstromkennfeld

## 5.5 Simulation der Abgasmachbehandlung

Die Emissionssimulation unter detaillierter Berücksichtigung der Abgasmachbehandlung, insbesondere des SCR-Systems, stellte eine zentrale Aufgabenstellung dieser Arbeit dar. Für jene Abgaskomponenten, für die ein Engine-Out-Kennfeld verfügbar ist, kann der Einfluss der Abgasmachbehandlung auf die Emissionen durch das Temperatur- und Katalysatormodell von PHEM detailliert berücksichtigt werden. Das Zusammenspiel der genannten Modelle wird als Exhaust Aftertreatment Simulation (EAS) bezeichnet. Das Abgasmachbehandlungssystem des Versuchsfahrzeugs wurde in der EAS durch fünf Module modelliert (siehe Abbildung 5.9). Die Module wurden so gewählt, dass jede Komponente der tatsächlichen Abgasanlage (Abbildungen 3.1 und 3.2) – auch die Temperatursensoren – in der Simulation durch ein virtuelles Gegenstück abgebildet wird. Die Abkürzung EO in Abbildung 5.9 steht für Engine-Out und bezeichnet in PHEM für gewöhnlich die Position direkt nach Motorauslass. Wie bereits erwähnt, wird die Bezeichnung EO im Kontext dieser Arbeit jedoch für die Position vor SCR verwendet, da die Emissionen am Motorauslass nicht messtechnisch erfasst wurden. Die Abkürzung TP steht für Tailpipe und kennzeichnet das Auspuffendrohr.

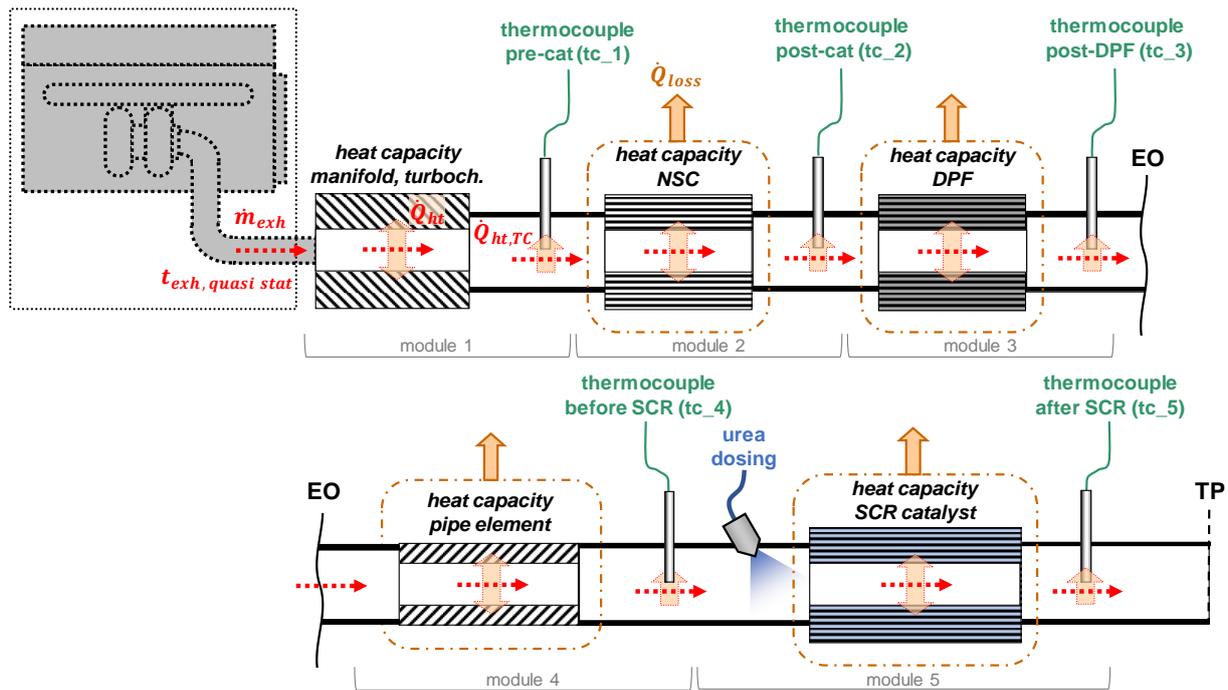


Abbildung 5.9: Modell der Abgasnachbehandlung des Versuchsfahrzeugs in PHEM

Für die Simulation werden Parameter benötigt, welche das thermische Verhalten der Module beschreiben. Die wichtigsten fahrzeugspezifischen Parameter sind in Tabelle 5.4 aufgelistet. Volumen und Oberfläche der Bauteile wurden aus deren Abmessungen berechnet. Die Massen und Wärmekapazitäten wurden auf Basis von empirisch ermittelten Werten aus Vorprojekten übernommen. Die übrigen thermischen Parameter (z.B. Wärmeübergangskoeffizienten) wurden von den HBEFA 4.1 Durchschnittsfahrzeugen [14] übernommen.

Tabelle 5.4: Wichtigste fahrzeugspezifischen thermische Parameter der Module

Modul Nr.	Bauteil(e)	Volumen in L	Oberfläche in m <sup>2</sup>	Masse in kg	Wärmekap. in J/(kg K)
1	Krümmen inkl. Turbolader	- <sup>11</sup>		9	460
2	NSK	2	0.07028	1.5	500
3	DPF	3	0.11228	3.8	750
4	Abgasrohr DPF bis SCR	Ø70 x 430 x 3 mm <sup>12</sup>			477
5	SCR-Katalysator	5.78	0.20331	2.6	500

Eine Berücksichtigung des Konvertierungsverhaltens erfolgte nur für die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch das Modul 5 (SCR-System). Die gewählte Vorgehensweise für die Erstellung des benötigten SCR-Konvertierungskennfelds aus Messdaten wird im nachfolgenden Kapitel erklärt. Das Speicher- bzw. Konvertierungsverhalten des NSK und DPF wurde nicht modelliert.

<sup>11</sup> Wird von PHEM nicht benötigt.

<sup>12</sup> Volumen, Oberfläche und Masse werden hier von PHEM aus den Abmessungen berechnet.

### 5.5.1 SCR-Konvertierungskennfeld

Die vom SCR-System erreichte  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsrate ist von einer Vielzahl an Parametern anhängig. Den größten Einfluss auf die Konvertierungsrate haben die Temperatur des SCR-Katalysators, die Raumgeschwindigkeit im Katalysator, sowie die im Katalysator für die Reaktionen zur Verfügung stehende  $\text{NH}_3$ -Menge [21]. Folglich ergäbe sich ein vierdimensionales Kennfeld. Für eine konstant hohe  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators ist die Konvertierungsrate nur von dessen Temperatur und der Raumgeschwindigkeit abhängig (3D-Kennfeld). Da die Temperatur des SCR-Katalysators messtechnisch nur schwierig erfasst werden kann, wird das Konvertierungskennfeld für die Simulation über der Abgastemperatur unmittelbar vor dem SCR-Katalysator und der Raumgeschwindigkeit aufgespannt [22].

Als Datenbasis für die Erstellung des Konvertierungskennfelds dienten die gleichen Messzyklen wie für die Erstellung der Emissionskennfelder (siehe Tabellen 5.2 und 5.3). In diesen Messzyklen kann von einer konstant hohen  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators ausgegangen werden, was die Annahme eines dreidimensionalen Kennfelds rechtfertigt. Die Messdaten während der DPF-Regenerationen wurden diesmal jedoch bewusst miteinbezogen, um die Auswirkung der in diesen Phasen hohen Abgastemperatur zu untersuchen. Aus den gemessenen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen vor und nach SCR wurde mit Gleichung (5.4) die sekundliche Konvertierungsrate berechnet.

$$K_{SCR} = \frac{C_{NOx \text{ vor SCR}} - C_{NOx \text{ nach SCR}}}{C_{NOx \text{ vor SCR}}} \quad (5.4)$$

Die Raumgeschwindigkeit in einem Katalysator ist definiert als das Verhältnis des Abgasvolumenstroms zum Katalysatorvolumen und entspricht gleichzeitig dem Kehrwert der Verweilzeit des Abgases im Katalysator:

$$RG = \frac{\dot{V}_{Abg}}{V_{SCR \text{ Kat}}} = \frac{1}{\tau_{SCR \text{ Kat}}} \quad (5.5)$$

Der Abgasvolumenstrom wurde mit der von PHEM verwendeten Gleichung (5.6) aus dem sekundlich gemessenen Abgasmassenstrom berechnet. PHEM verwendet für das Abgas die Eigenschaften von Luft  $R_L = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$  bei Normbedingungen ( $p_n, T_n$ ).

$$\dot{V}_{Abg} = \frac{R_L \cdot T_n}{p_n} \cdot \dot{m}_{Abg} \quad (5.6)$$

Um ein repräsentatives Kennfeld zu erhalten, ist es notwendig, die verwendeten Messdaten vor der Kennfelderstellung zu bereinigen. Dazu wurden die folgenden Einschränkungen getroffen:

- Kühlwassertemperatur über  $70^\circ\text{C}$
- Motor nicht abgestellt
- Beide  $\text{NO}_x$ -Sensoren aktiv
- $\text{NO}_x$ -Konzentration vor SCR ist größer Null (Konvertierungsrate sonst nicht definiert)
- $\text{NO}_x$ -Konzentration vor SCR ist größer oder gleich jener nach SCR

In Abbildung 5.10 sind die Datenpunkte der bereinigten Messdaten dargestellt. Im Bereich geringer Abgastemperaturen liegen nur wenige Messdaten vor, da die  $\text{NO}_x$ -Sensoren in diesem Temperaturbereich meist nicht aktiv sind. Die geringe Datenmenge in diesem Bereich wirkt sich u.U. negativ auf die dortige Kennfeldqualität aus. Auffällig ist die Ansammlung von Datenpunkten im Bereich von  $400^\circ\text{C}$ . Dies legt die Vermutung nahe, dass die Motorsteuerung durch gezielte Maßnahmen versucht, die Abgastemperatur vor SCR unter diesem Wert zu

halten. Ein Großteil der Messdaten über 400°C stammen nämlich aus Zeitpunkten, in denen eine DPF- oder NSK-Regenerationen bzw. NSK-Desulfatierung stattfand (rot hervorgehoben).

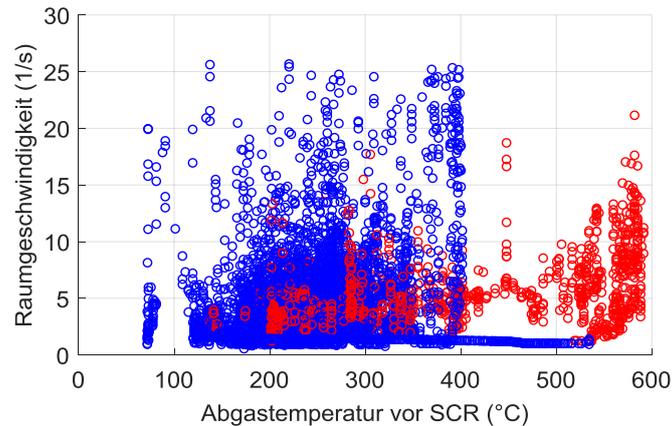


Abbildung 5.10: Scatterplot der Datenpunkte für die Kennfelderstellung

Zur Erstellung des SCR-Konvertierungskennfelds wurde *Matlab* verwendet. Die Vorgehensweise war wie folgt: Zunächst wurde der Kennfeldbereich – 0 bis 600 °C Abgastemperatur und 0 bis 25 1/s Raumgeschwindigkeit – in ein gleichmäßiges Gitter von 41x41 Zellen unterteilt. Der Mittelwert der Datenpunkte, die in einer solchen Gitterzelle liegen, wurde dann auf die Mitte der entsprechenden Gitterzelle geschrieben. Etwaige Lücken im so gebildeten 3D-Kennfeld wurden durch bikubische Interpolation gefüllt. Abschließend wurde das Kennfeld mit der in [19] beschriebenen Medianmethode geglättet. Das geglättete SCR-Konvertierungskennfeld ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

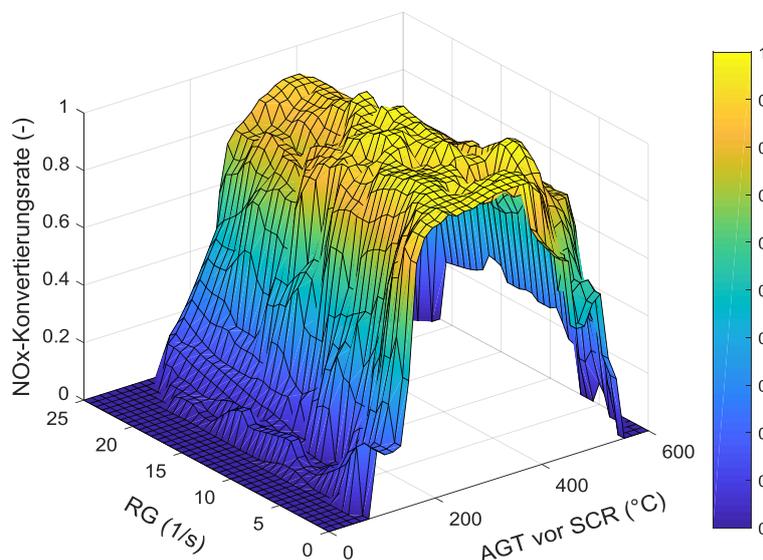


Abbildung 5.11: 3D-Darstellung des geglätteten SCR-Konvertierungskennfelds

Abbildung 5.12 zeigt Schnitte durch das erstellte SCR-Konvertierungskennfeld für fünf verschiedene Raumgeschwindigkeiten. Die Raumgeschwindigkeiten nehmen dabei von RG1 bis RG5 zu. Gut zu erkennen ist, dass mit steigender Raumgeschwindigkeit die gleiche Konvertierungsrate erst bei höheren Abgastemperaturen erreicht wird. Des Weiteren nimmt die maximale Konvertierungsrate mit zunehmender Raumgeschwindigkeit ab. Ab etwa 250 °C Abgastemperatur wird bei praktisch allen Raumgeschwindigkeiten eine sehr gute Konvertierung der Stickoxide durch das SCR-System erreicht. Ungeachtet der Raumgeschwindigkeit fällt ab etwa 400 °C die Konvertierungsrate ab.

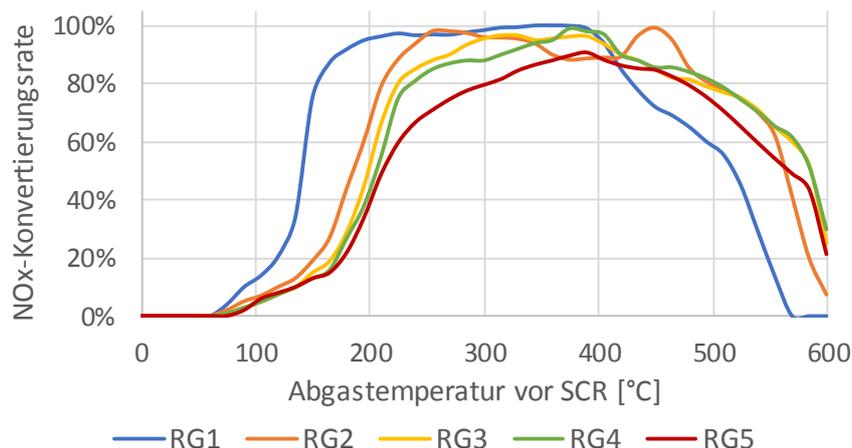


Abbildung 5.12: Schnitte durch das SCR-Konvertierungskennfeld für fünf verschiedene RG

Die eingangs erwähnte Abhängigkeit der  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsrate von der  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators ist vor allem unterhalb der Dosiertemperatur (ca. 200 °C) relevant. Unterhalb dieser Grenztemperatur verbraucht die SCR-Reaktion das im Katalysator gespeicherte  $\text{NH}_3$ . Der mit abnehmender  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators einhergehenden Konvertierungsverschlechterung wird in PHEM durch das in [13] beschriebene  $\text{NH}_3$ -Modell Rechnung getragen, auf das an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

### 5.5.2 Justierung Abgastemperaturkennfelds

Ein Kennfeld der quasi stationären Abgastemperatur am Motorauslass ( $t_{qa41}$  bzw.  $t_{quasi\ stat}$ ) ist für die Verwendung des Temperaturmodells unbedingt notwendig. Die zur Erstellung solcher Kennfelder erforderlichen Messungen sind jedoch sehr aufwendig, weshalb ein derartiges Kennfeld aus einem Vorprojekt übernommen wurde. Dabei handelte es sich um ein modernes Dieselfahrzeug (Peugeot 508 SW), welches ebenfalls mit einem SCR-System im Unterboden ausgestattet war. Das übernommene Kennfeld wurde für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Versuchsfahrzeug justiert. Dafür wurde der ERMES V9-Zyklus (8183) nachsimuliert. Da es sich dabei um einen Zyklus mit Warmstart handelte und die Abgasanlage dementsprechend bei Zyklusbeginn bereits Betriebstemperatur hatte, konnte der gesamte Zyklus zu Justierung herangezogen werden. Für jeden Zeitschritt des Zyklus wurde das Verhältnis zwischen der gemessenen und simulierten Abgastemperatur nach Turbolader ( $t_{tc1}$ ) entsprechend Gleichung (5.7) berechnet. Da für die Abgastemperatur am Motorauslass (vor TL) keine Messdaten vorhanden waren, wurde die Abgastemperatur nach Turbolader, welche die dem Motorauslass nächstgelegene Messstelle darstellt, für die Justierung verwendet.

$$k_{ttc1} = \frac{t_{tc1\ mes}}{t_{tc1\ sim}} \quad (5.7)$$

Die berechneten Faktoren ( $k_{ttc1}$ ) wurden anschließend über der normierten Drehzahl und Motorleistung in ein Kennfeld gerastert. Das erstellte Korrektorkennfeld wurde nach Gleichung (5.8) auf alle Werte des übernommenen Abgastemperaturkennfelds angewendet. Aufgrund der relativ kurzen Schleppphasen des ERMES V9-Zyklus ist davon auszugehen, dass eine Justierung im Schleppbereich nur begrenzt möglich war.

$$t_{qa41\ jus}(n_{norm}, P_{e\ norm}) = k_{ttc1}(n_{norm}, P_{e\ norm}) \cdot t_{qa41}(n_{norm}, P_{e\ norm}) \quad (5.8)$$

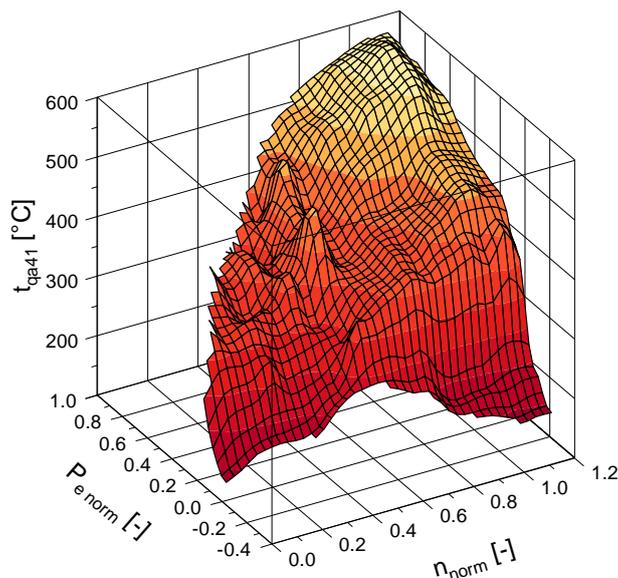


Abbildung 5.13: Justiertes Abgastemperatur-KF (rechts)

In Abbildung 5.14 ist der Verlauf der Abgastemperatur nach Turbolader ( $t_{tc1}$ ) vor und nach der Justierung des Abgastemperaturkennfelds dargestellt. Durch die Justierung konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Abgastemperatur erreicht werden. Die auffällige Abweichung im Bereich von Sekunde 1050 hat ihre Ursache in einer während der Messung aufgetretenen NSK-Regeneration, bei der es durch das kurzzeitige Anfetten zu einem starken Anstieg der Abgastemperatur kam. Solche Regenerationen können bis dato nicht von der Simulation abgebildet werden.

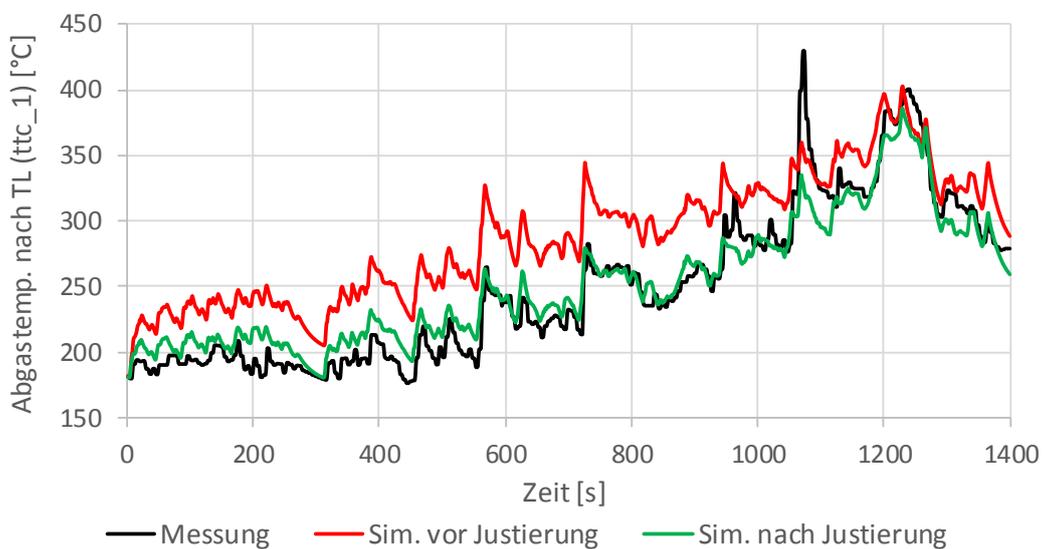


Abbildung 5.14: Verlauf der Abgastemperatur nach TL vor und nach der Justierung

## 5.6 Validierung des Simulationsmodells

Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Emissionssimulationen war die Validierung der Exhaust Aftertreatment Simulation von PHEM für Fahrzeuge mit motornahem NSK und Unterboden-SCR-System. Die Ergebnisse sollen dann in das nächste HBEFA-Update einfließen. Zur Validierung des Simulationsmodells wurden Emissionsmessungen simuliert und die simulierten Temperaturen im Abgasstrang sowie die CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen am Auspuffendrohr (TP) mit den gemessenen verglichen. Zur Simulation der NO<sub>x</sub>-Emissionen wurden jeweils die folgenden drei Varianten untersucht (Variantenbezeichnung in Klammern):

- Simulation mit Tailpipe-Kennfeld ohne EAS (*NO<sub>x</sub>\_TPmap*)
- Simulation unter Verwendung des Engine-Out-Kennfelds und der EAS (Temperatur- und Katalysatormodell) (*NO<sub>x</sub>\_TP*)
- Simulation mit Engine-Out-Kennfeld und EAS, wobei die gemessene Temperatur vor SCR vorgegeben wird – d.h. Temperaturmodell wird nicht verwendet (*NO<sub>x</sub>\_TP\_gttc4*)

Da nur für die Stickoxide ein Engine-Out- und Konvertierungskennfeld vorliegt, kann nur für diese eine Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems (durch die EAS) erfolgen. Die Simulation der anderen Abgaskomponenten, insbesondere der CO<sub>2</sub>-Emission, erfolgte mit Tailpipe-Kennfeldern und dementsprechend ohne Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung (ohne EAS).

Im Folgenden wird zwischen der Simulation von abhängigen und unabhängigen Zyklen unterschieden. Emissionsmessungen deren Messdaten in den Aufbau des Simulationsmodells eingeflossen sind, werden als abhängige Zyklen bezeichnet. Messungen, deren Daten nicht für den Aufbau des Simulationsmodells verwendet wurden, werden als unabhängige Zyklen bezeichnet. In Tabelle 5.5 sind die simulierten Messungen aufgelistet. Wenn im Folgenden Abweichungen angegeben werden, beziehen sich diese immer auf die Messung (Vergleichsbasis). Eine positive Abweichung bedeutet, dass die simulierten Emissionen höher sind als die gemessenen.

Tabelle 5.5: Zur Validierung simulierte Emissionsmessungen

abhängige Zyklen	ERMES V9 (8183)
	Ries 01
	Arzberg 01
unabhängige Zyklen	RWC (8230)
	IUFC + HBEFA Stop & Go (8185)

### 5.6.1 Validierung mit abhängigen Zyklen

Bei Ries 01 und Arzberg 01 handelte es sich um RDE-Messungen mit Kaltstart. Da für den Aufbau des Simulationsmodells nur Messdaten bei betriebswarmem Motor verwendet wurden, wurden die Kaltstartphasen auch für die Simulation nicht berücksichtigt, um einen unverfälschten Vergleich sicherzustellen. Beim ERMES V9 handelte es sich um einen Prüfzyklus mit Warmstart, entsprechend wurde der gesamte Zyklus simuliert. In den folgenden Abbildungen sind die Abweichungen zwischen Messung und Simulation in den simulierten Messungen dargestellt. Aus Abbildung 5.15 ist ersichtlich, dass bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen sehr geringe Abweichungen (unter 2 %) erzielt werden konnten.

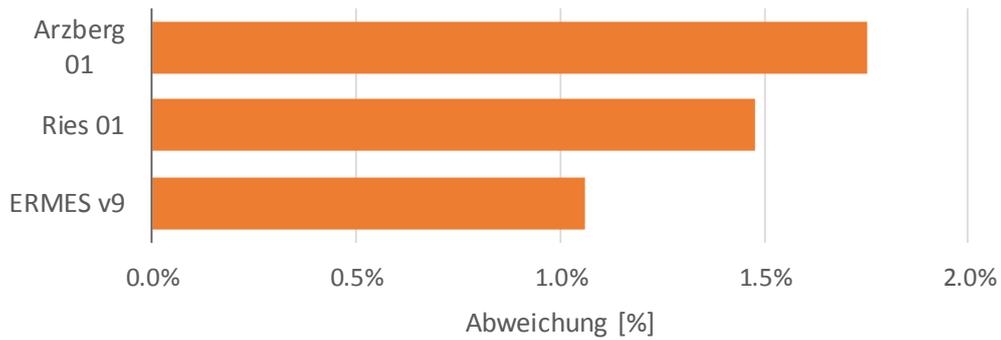


Abbildung 5.15: Abweichung zwischen gemessener und simulierter CO<sub>2</sub>-Emission

In Abbildung 5.16 sind die Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten NO<sub>x</sub>-Emissionen für die drei beschriebenen Simulationsvarianten dargestellt. Die beiden Varianten, bei denen das NO<sub>x</sub>-Engine-Out-Kennfeld und die EAS zur Anwendung kamen (*NO<sub>x</sub>\_TP* bzw. *NO<sub>x</sub>\_TP\_gttc4*), schnitten durchwegs besser ab als die Variante mit dem NO<sub>x</sub>-Tailpipe-Kennfeld ohne EAS (*NO<sub>x</sub>\_TPmap*).

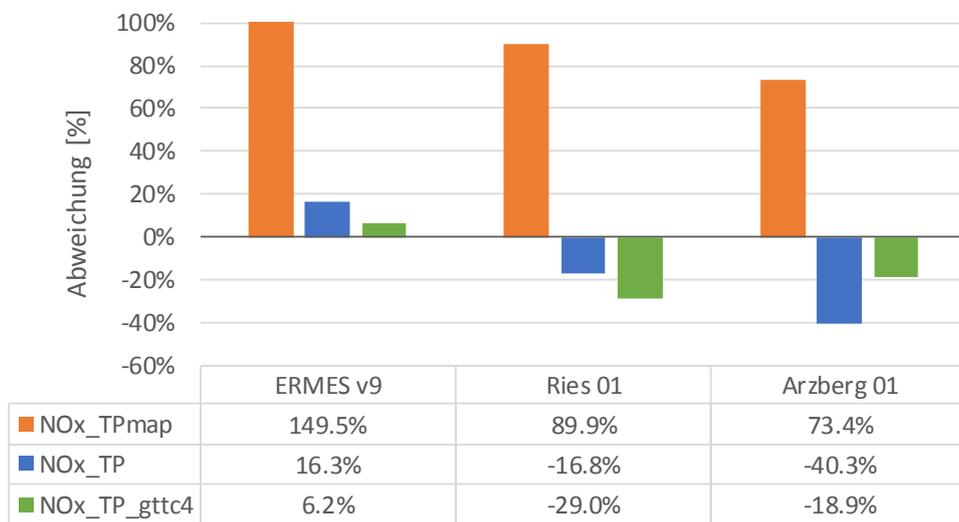


Abbildung 5.16: Abweichung zwischen gemessener und simulierter NO<sub>x</sub>-Emission

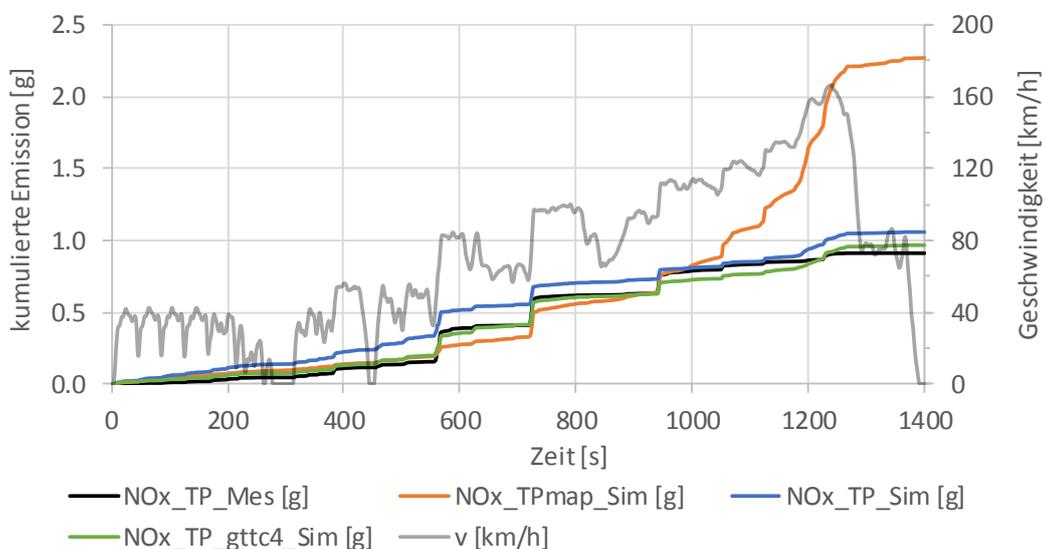


Abbildung 5.17: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen im ERMES V9

In Abbildung 5.17 ist der zeitliche Vergleich der kumulierten  $\text{NO}_x$ -Emission im ERMES V9-Zyklus für Messung und Simulation dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den zeitlichen Verläufen der Simulationsvarianten mit EAS (grün und blau) und der Messung (schwarz). Die EAS bildet das Verhalten der Abgasnachbehandlung also gut ab. Die Simulation ohne EAS (orange) zeigt zu Beginn eine gute Übereinstimmung mit der Messung, auf die jedoch eine sehr große Abweichung folgt. Der Grund dafür ist, dass sich das SCR-System ab ca. Sekunde 950 im optimalen Temperaturbereich befindet. Das Tailpipe-Kennfeld bildet aber das durchschnittliche Verhalten des SCR-Systems ab – umfasst Messdaten im und außerhalb des optimalen Temperaturbereichs – und überschätzt somit die  $\text{NO}_x$ -Emission.

Die Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperaturen ( $t_{tc}$ ) sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Im Folgenden steht  $t_{tc1}$  für die Abgastemperatur nach Turbolader,  $t_{tc2}$  für die AGT nach NSK und  $t_{tc4}$  für jene vor SCR. Die gelb hinterlegten Bereiche kennzeichnen NSK-Regenerationen. Messung und Simulation stimmen abgesehen von den Abweichungen nach den NSK-Regenerationen gut überein. Wie bereits erwähnt, wird der Einfluss der Regeneration auf die Abgastemperatur in den Kennfeldern und von der EAS bisher nicht abgebildet.

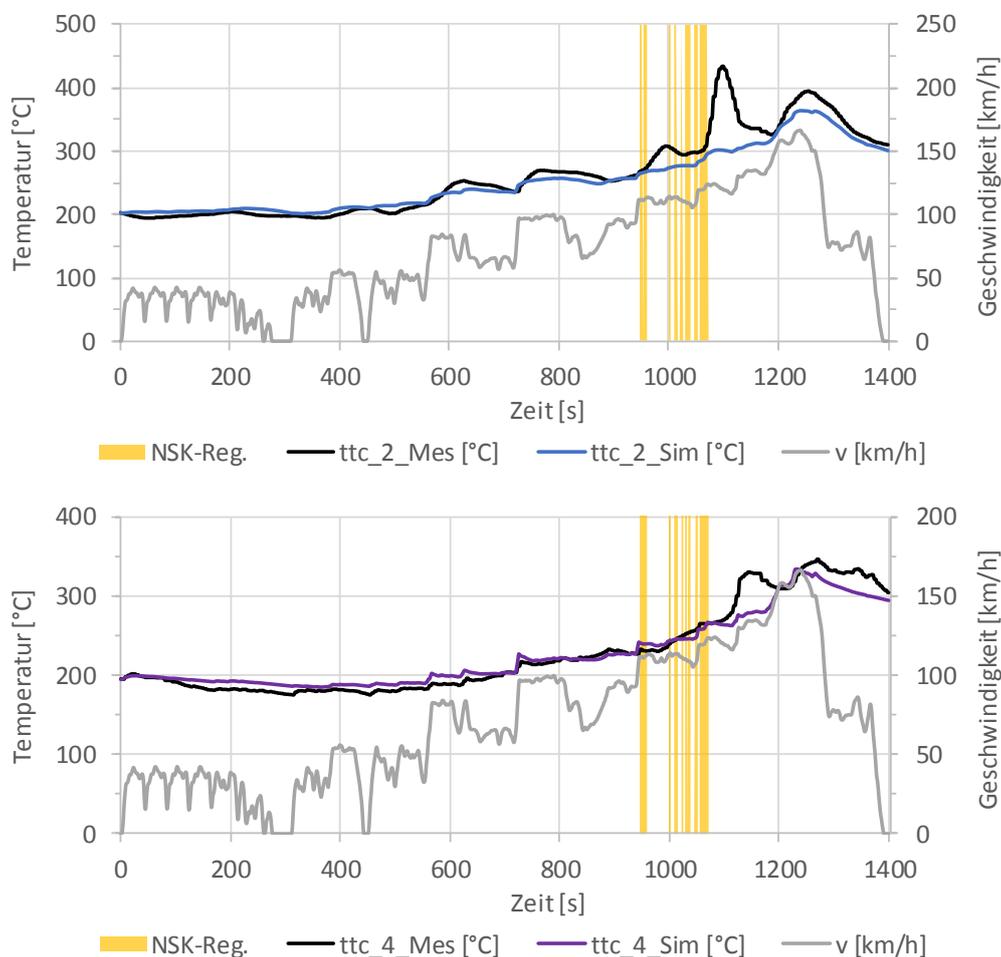


Abbildung 5.18: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemp. im ERMES V9

Bei der Simulation der RDE-Messung „Ries 01“ konnte mit den Simulationsvarianten, die die EAS verwenden, ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der Messung erreicht werden (siehe Abbildung 5.19). Wie in Kapitel 4.3.8 festgestellt, kann es beim gleichzeitigen Auftreten einer NSK-Regeneration und einer Phase mit starker Beschleunigung zum Durchschlagen von  $\text{NO}_x$ -Spitzen bis an die Auspuffblende kommen. Derartige  $\text{NO}_x$ -Spitzen in der Messung sind auch der Grund für die Abweichung der Simulationen mit EAS von der Messung ab Sekunde 2900.

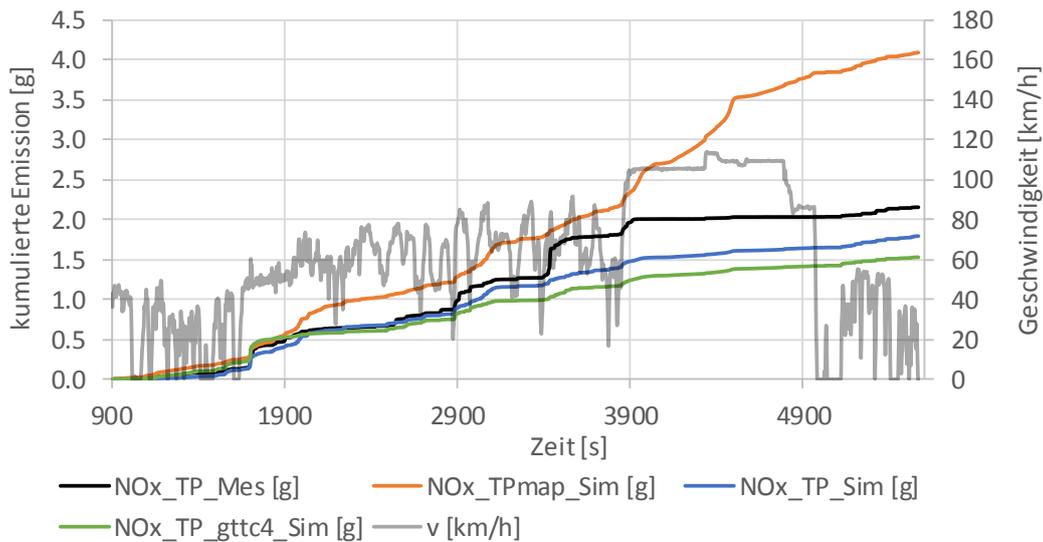


Abbildung 5.19: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen (Ries 01)

Abbildung 5.20 zeigt, dass die simulierte Abgastemperatur vor SCR ( $t_{tc4\ Sim}$ ) wegen der nicht berücksichtigten NSK-Regenerationen tendenziell zu gering ist. Im vorliegenden Temperaturbereich (250 bis 400 °C) bedeutet dies, dass die berechnete SCR-Konvertierungsrate ebenfalls zu gering ist, was wiederum höhere simulierte NO<sub>x</sub>-Emissionen zur Folge hat. Bei der Simulation mit vorgegebener Abgastemperatur vor SCR ist hingegen genau das Gegenteil der Fall (siehe Abbildung 5.19).

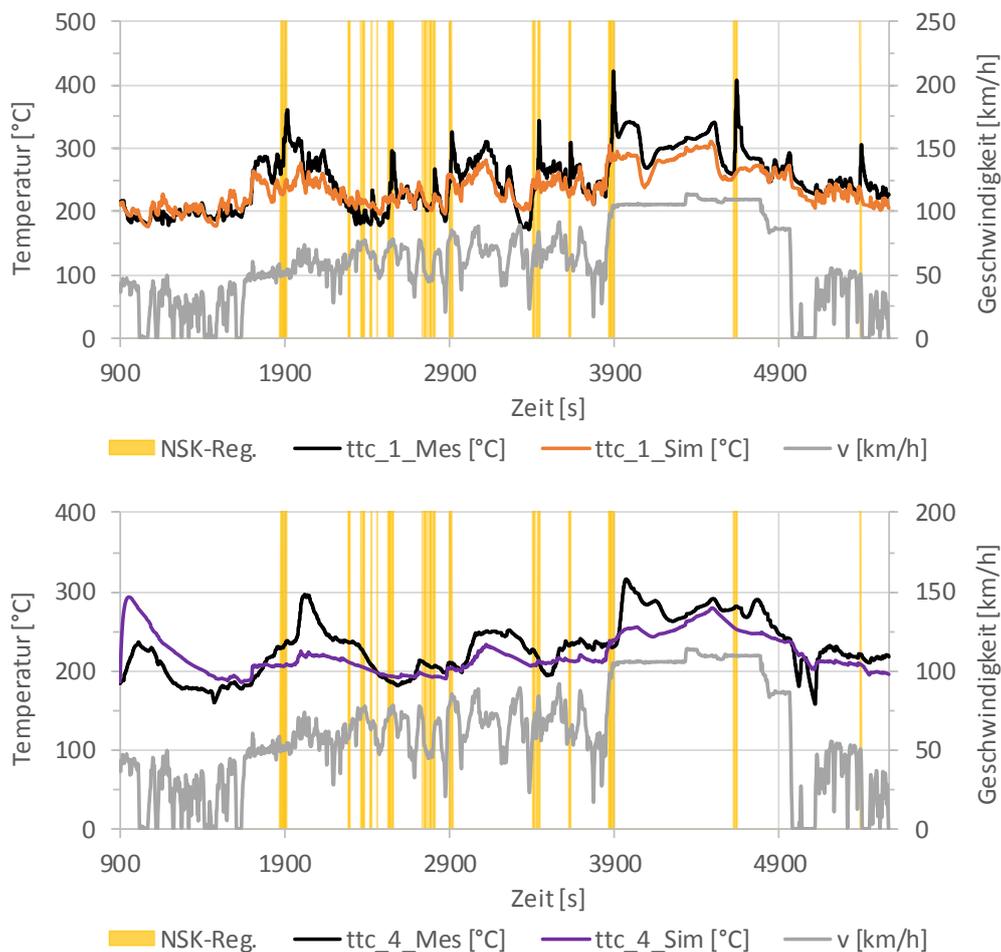


Abbildung 5.20: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperaturen (Ries 01)

Die zeitlichen Verläufe der kumulierten  $\text{NO}_x$ -Emissionen für die Simulation der RDE-Fahrt „Arzberg 01“ sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Eine  $\text{NO}_x$ -Spitze in der Messung, die von der Simulation nicht abgebildet wird, drückt sich in den kumulierten Emissionen als bleibende Abweichung aus. Eine derartige  $\text{NO}_x$ -Spitze – hervorgerufen durch eine NSK-Regeneration – ist auch der Grund für die Abweichung der Simulationsergebnisse der Varianten mit EAS von der Messung ab etwa Sekunde 2200. Die parallelen Verläufe der kumulierten Emissionen in Abbildung 5.21 zeigen jedoch, dass die simulierten zeitlichen Emissionen der Varianten mit EAS dennoch gut mit denen der Messung übereinstimmen.

Der Grund für das schlechtere Abschneiden der Simulationsvariante  $\text{NO}_x_{TP}$  gegenüber  $\text{NO}_x_{TP\_gttc4}$  liegt in den Limitierungen des Temperaturmodells. Aus Abbildung 5.22 ist ersichtlich, dass das Temperaturmodell die Temperaturanstiege durch die NSK-Regenerationen und die starke Abnahme der Abgastemperatur durch eine lange Schleppphase beim Bergabfahren (Sekunde 3400) nicht korrekt simuliert. Dies wirkt sich auch negativ auf die Genauigkeit der simulierten  $\text{NO}_x$ -Emission aus.

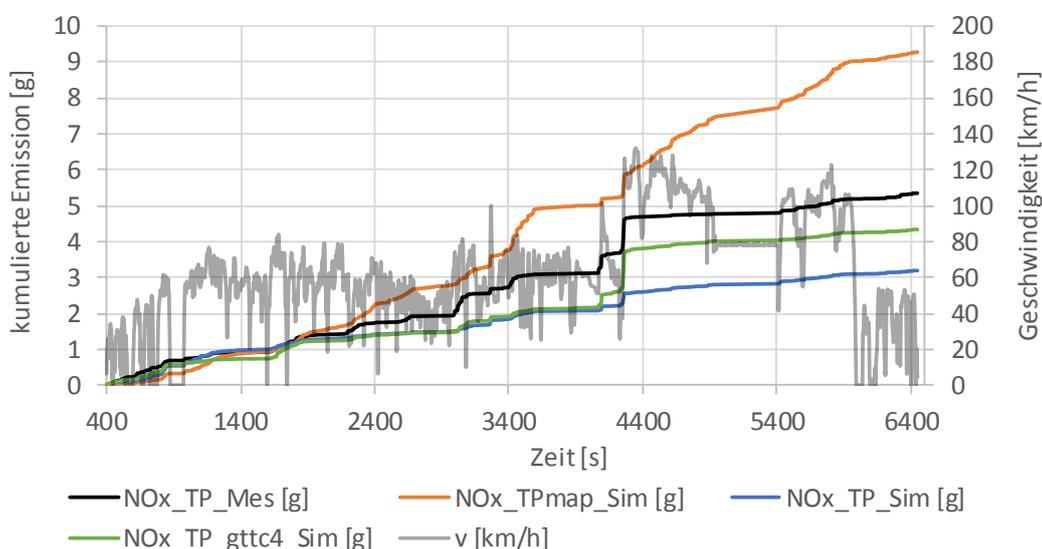


Abbildung 5.21: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen (Arzberg 01)

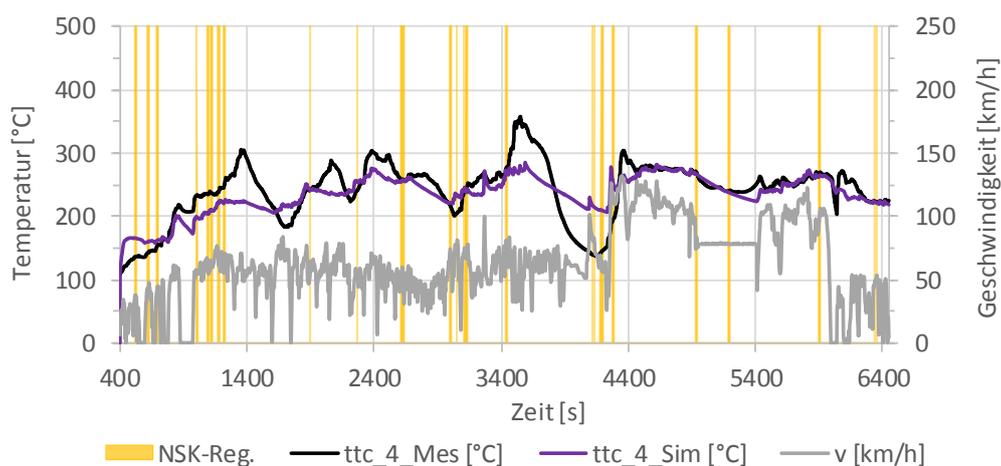


Abbildung 5.22: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperatur vor SCR (Arzberg 01)

### 5.6.2 Validierung mit unabhängigen Zyklen

Beim RWC (Real World Cycle) handelte es sich um einen Prüfzyklus mit Warmstart. Die Messung dieses Zyklus war nicht Bestandteil dieser Arbeit, wurde aber zur Validierung des Simulationsmodells aus einem vorangegangenen Projekt herangezogen. Die entsprechende Messung wurde bei 5 °C Umgebungstemperatur durchgeführt. Der ebenfalls simulierte „IUFC + Stop&Go“-Zyklus ist ein langer Prüfzyklus mit Kaltstart, der eine Stausituation darstellen soll. Die CO<sub>2</sub>-Abweichungen in Abbildung 5.23 lassen Heizstrategien in diesen Zyklen vermuten. Solche Heizstrategien führen zu erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen und werden bis dato von PHEM nicht abgebildet, weshalb auch erhöhte Abweichungen vorliegen können.

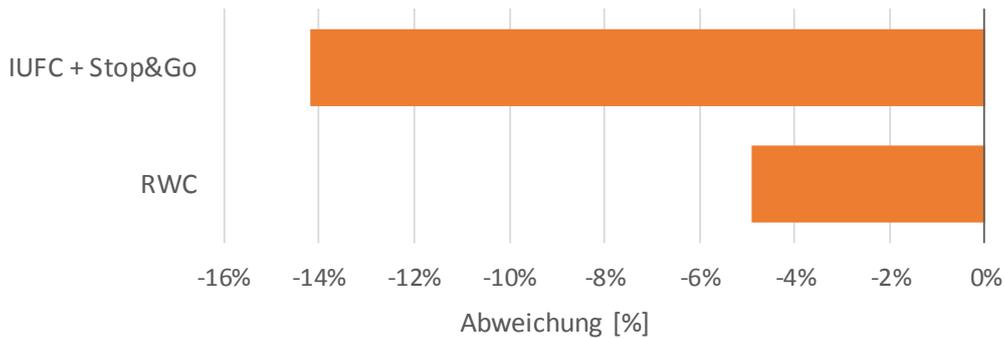


Abbildung 5.23: Abweichung zwischen gemessener und simulierter CO<sub>2</sub>-Emission

In Abbildung 5.24 sind die Abweichung der simulierten NO<sub>x</sub>-Emissionen gegenüber der Messung ersichtlich. Grundsätzlich zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Validierung mit abhängigen Zyklen (siehe Abbildung 5.16), wobei die Unterschiede zwischen den Simulationsvarianten jedoch nicht so deutlich sind.

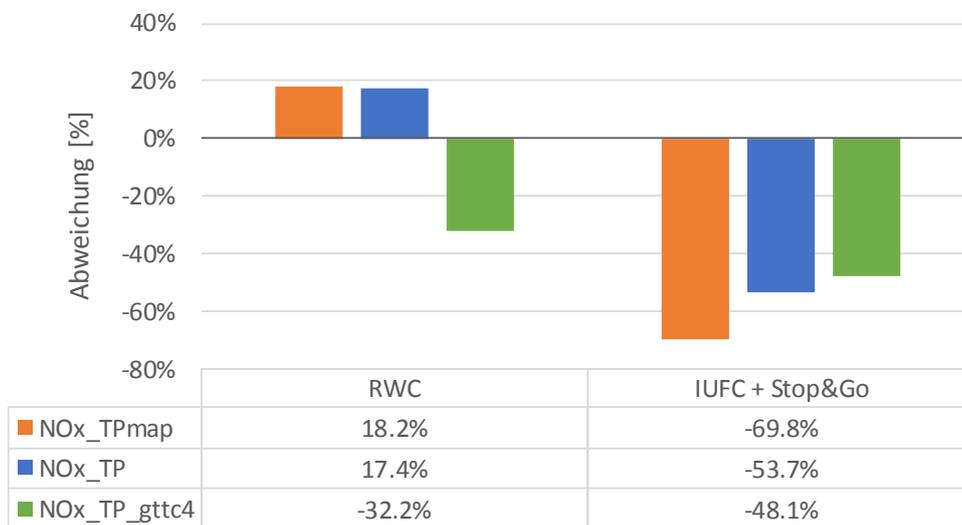


Abbildung 5.24: Abweichung zwischen gemessener und simulierter NO<sub>x</sub>-Emission

In Abbildung 5.25 sind die Verläufe der simulierten und gemessenen Emissionen im RWC kumuliert dargestellt. Der stetige Anstieg der kumulierten gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen in der ersten Zyklusphase bedeutet, dass das NO<sub>x</sub>-Speichervermögen des NSK zu Messbeginn vermutlich bereits ausgeschöpft war. In der Simulation wird das Speicherverhalten des NSK jedoch nicht im Detail berücksichtigt. Weiters spiegelt das verwendete NO<sub>x</sub>-Engine-Out-Kennfeld die Emissionen vor SCR für einen in etwa durchschnittlich beladenem NSK wider, nicht jedoch für einen voll beladenen. Diese Kombination führt bereits zu Zyklusbeginn zur Abweichung der Simulation von der Messung.

Der Verlauf der kumulierten  $\text{NO}_x$  der Simulation mit EAS und Temperaturvorgabe ( $\text{NO}_x_{TP\_gttc4}$ ) ist über weite Bereiche parallel zu dem der Messung, die berechneten zeitlichen  $\text{NO}_x$ -Emissionen stimmen demnach nach der Anfangsphase gut überein.

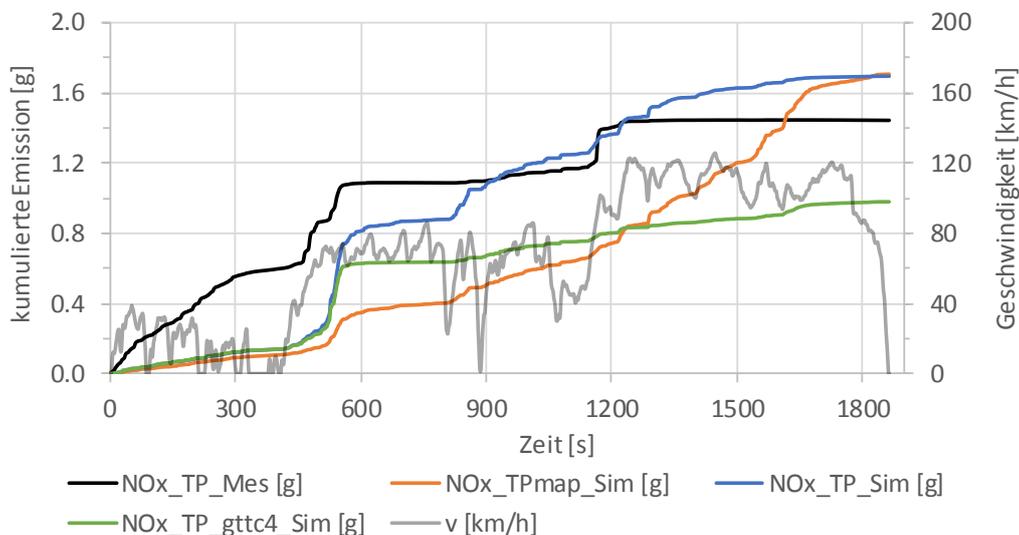


Abbildung 5.25: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen im RWC

Abbildung 5.26 zeigt, dass die simulierten Abgastemperaturen deutlich geringer sind als die gemessenen. Dadurch ist die berechnete Konvertierungsrate zu gering, was gleichzeitig der Auslöser für die Abweichung der mit der Variante  $\text{NO}_x_{TP}$  simulierten Emissionen gegenüber den gemessenen ist.

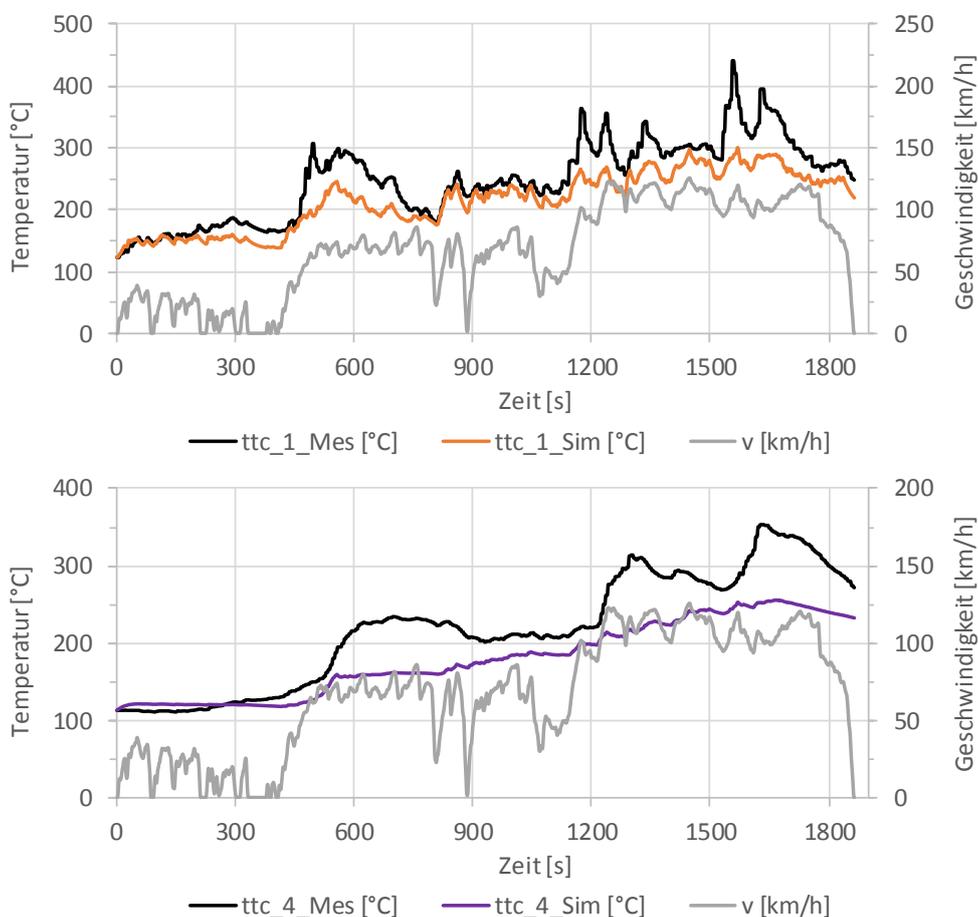


Abbildung 5.26: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperaturen im RWC

Zu guter Letzt wird die Simulation des „IUFC + Stop&Go“-Zyklus betrachtet. Der Grund für die Abweichung zwischen der Simulation mit EAS und der Messung ist, dass die Simulation die Abgastemperaturen und damit die Konvertierungsrate überschätzt (siehe Abbildungen 5.27 u. 5.28). Hinzu kommt, dass die Qualität des Konvertierungskennfeldes bei niedrigen Abgastemperaturen wegen der angesprochenen fehlenden Messdaten (NO<sub>x</sub>-Sensoren nicht aktiv) in diesem Bereich nicht optimal ist. Die zunehmende Abweichung im Stop&Go-Zyklusteil (ab ca. Sekunde 1800) resultiert wiederum aus dem ausgeschöpften Speichervermögens des NSK, welches in der Simulation keine Berücksichtigung findet.

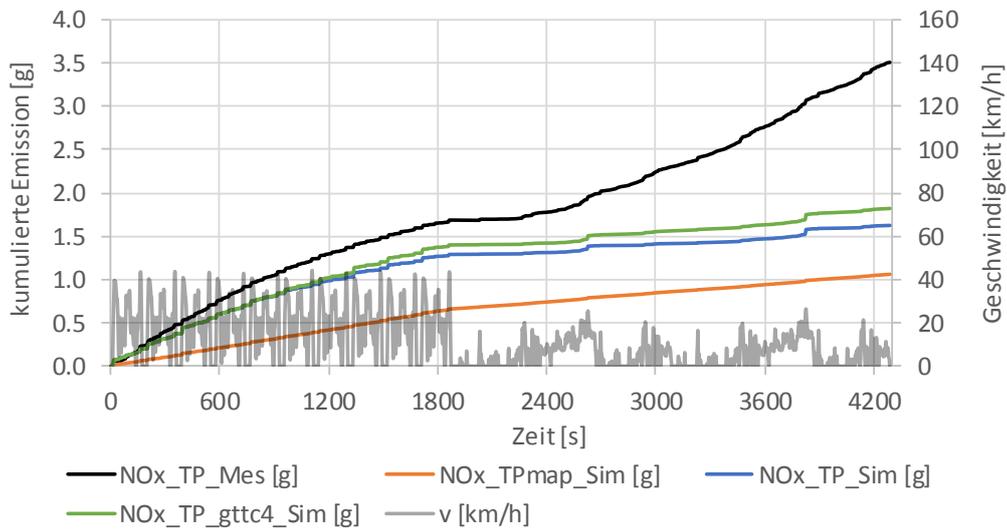


Abbildung 5.27: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen im IUFC + Stop&Go-Zyklus

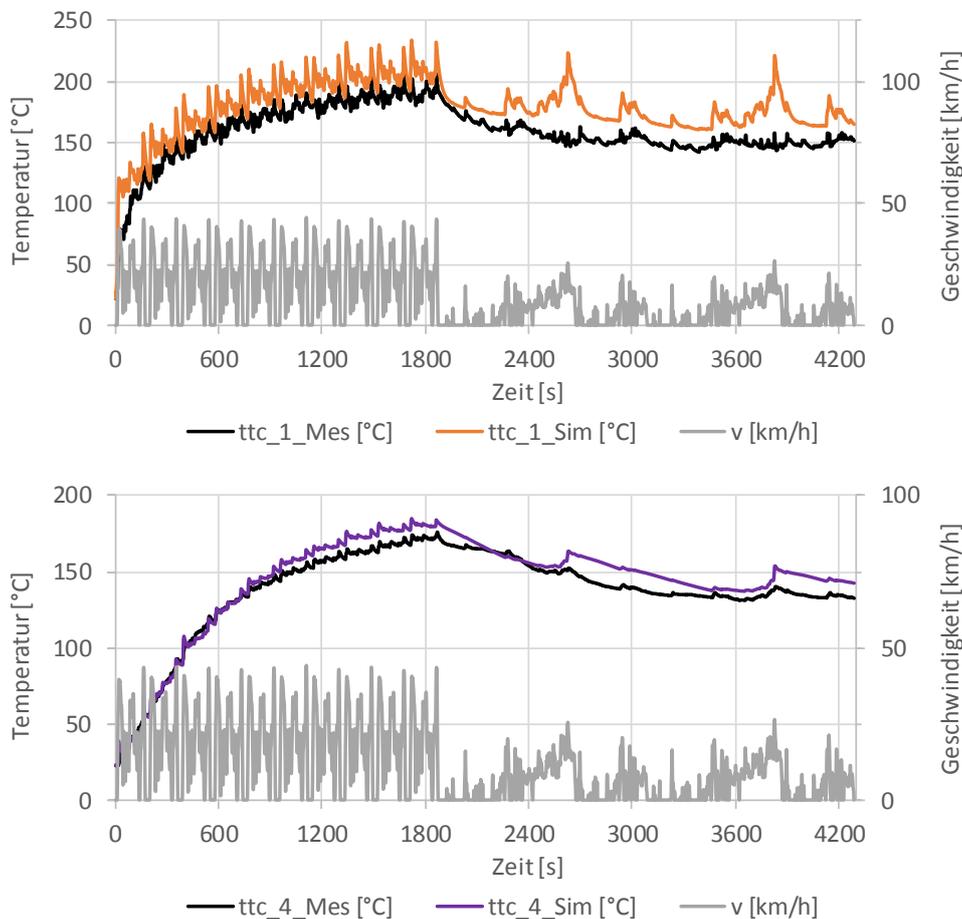


Abbildung 5.28: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemp. (IUFC+Stop&Go)

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

SCR-Systeme stellen bei modernen Fahrzeugen mit Dieselmotor den aktuellen Stand der Technik zur Reduktion der Stickoxidemissionen dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mit einem modernen Diesel-PKW (BMW 218d) Emissionsmessungen am Rollenprüfstand und im Straßenverkehr durchgeführt, um das Konvertierungsverhalten dessen SCR-Systems in unterschiedlichen Betriebsphasen zu untersuchen. Die gewonnenen Messdaten stellten weiters die Basis für die durchgeführten Emissionssimulationen dar.

Es konnte gezeigt werden, dass die Kreuzkorrelation ähnlicher Größen eine praktikable Methode zur automatisierten Ermittlung und Korrektur des Zeitversatzes zwischen Messdatensätzen ist. Die vorgestellte Vorgehensweise sowie die erstellte Excel Vorlage zur Zeitsynchronisation von Prüfstands- und RDE-Messdaten stellen für künftige Projekte am Institut eine Arbeitserleichterung dar. Eine zukünftige Implementierung der beschriebenen Zeitsynchronisation im *ERMES-Auswertetool* ist denkbar.

Anhand der durchgeführten Emissionsmessungen zeigte sich, dass das SCR-System des Testfahrzeuges im realen Betrieb  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsraten von durchschnittlich 78 % erzielen konnte. Im Bereich ausreichend hoher Abgastemperatur (250 °C vor SCR) werden  $\text{NO}_x$ -Emissionen vom SCR-System nahezu vollständig konvertiert. Bei Abgastemperaturen von über 400 °C vor SCR konnte ein Abfallen der SCR-Konvertierungsrate beobachtet werden. Die Desorption von im SCR-Katalysator gespeichertem  $\text{NH}_3$  und die damit einhergehenden  $\text{NH}_3$ -Emissionen wurden nur in Phasen hoher Abgastemperatur (z.B. Regeneration des Partikelfilters) festgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass unterhalb der Dosiertemperatur die  $\text{NH}_3$ -Beladung des SCR-Katalysators entscheidend für die  $\text{NO}_x$ -Konvertierungsraten in Niederlastzyklen ist und bei ausreichender  $\text{NH}_3$ -Beladung in diesem Bereich gute Konvertierungsraten von bis zu 70 % erreicht werden können.

Sowohl für die Analyse des Verhaltens des SCR-Systems als auch für den Aufbau des Simulationsmodells erwiesen sich die erfassten OBD-Messdaten als außerordentlich hilfreich und zuverlässig. Weiters konnte gezeigt werden, dass aus den OBD-Messdaten der  $\text{NO}_x$ -Sensoren ein repräsentatives SCR-Konvertierungskennfeld erstellt werden kann.

Bei der Simulation konnte festgestellt werden, dass durch die detaillierte Berücksichtigung des SCR-Systems mittels Katalysator- und Temperaturmodells deutlich genauere Simulationsergebnisse bei den  $\text{NO}_x$ -Emissionen erreicht werden können. Das Temperaturmodell ermöglicht es bisher allerdings nicht Heizmaßnahmen und Temperaturerhöhungen durch Regenerationen in der Simulation abzubilden. In diesen Betriebsphasen konnten große Abweichungen zwischen der Messung und Simulation festgestellt werden. Eine dahingehende Erweiterung des Simulationsprogramm erscheint sinnvoll, da solche Betriebsbereiche mit strenger werdender Abgasgesetzgebung vermutlich öfter auftreten werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Autoevolution: BMW B37 And B47 Diesel Engines Get TU1 Twin-Turbo Upgrade. <https://www.autoevolution.com/news/bmw-b37-bmw-b47-diesel-engines-get-tu1-twin-turbo-upgrade-121785.html> (Zugriff am 14.02.2020)
- [2] AVL: In-vehicle measurement platform. <https://www.avl.com/web/guest/-/avl-m-ov-e-is> (Zugriff am 10.02.2020)
- [3] BMW Group: Technische Daten BMW 2er Gran Tourer gültig ab 09/2018. <https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/attachment/T0284461DE/413614> (Zugriff am 14.02.2020)
- [4] Bosch Mobility Solutions: NO<sub>x</sub> sensor technical specifications, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/denoxtronic-exhaust-gas-treatment-system/nox-sensor/> (Zugriff am 18.12.2020)
- [5] Chaves, H.: Messtechnik, Die Kreuzkorrelation. TU Bergakademie Freiberg, 2019
- [6] Delphi Technologies: Worldwide emissions standards, Passenger cars and light duty vehicles 2020/2021. <https://www.delphi.com/sites/default/files/2020-04/DELPHI%20booklet%20emission%20passenger%20cars%202020%20online%20complet.pdf> (Zugriff am 18.12.2020)
- [7] Eichlseder, H.: Kolbenmaschinen. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2014
- [8] Eichlseder, H.: Verbrennungskraftmaschinen, Vertiefte Ausbildung. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [9] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs – Teil I. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [10] IAG Prüfstandstechnik: Datenblatt versa06 FTIR Analyzing system. [https://www.iag-ng.at/versa06-FTIR-Analyse-System.html?file=files/iag/iag-ng/2020\\_Datenblaetter/02\\_EN/2020-05\\_IAGng\\_1\\_Versa06.pdf](https://www.iag-ng.at/versa06-FTIR-Analyse-System.html?file=files/iag/iag-ng/2020_Datenblaetter/02_EN/2020-05_IAGng_1_Versa06.pdf) (Zugriff am 18.12.2020)
- [11] Kranawetter, E.; Weizenauer, Ch.: On Board Diagnose (OBD). Skriptum zum Vortrag im Rahmen der Lehrveranstaltung VKM-Funktionsentwicklung, Technische Universität Graz, 2019
- [12] Lohnauer, L.: Einfluss von Anbauteilen und Umgebungsbedingungen auf Real Drive Emission Ergebnisse. Technische Universität Graz, 2019
- [13] Matzer, C.: Bestimmung von Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen von Pkw in realen Betriebszuständen mittels Messung und Simulation. Technische Universität Graz, 2020
- [14] Matzer, C.; Weller, K.; Dippold, M.; Lipp, S.; Röck, M.; Rexeis, M.; Hausberger, S.: Update of emission factors for HBEFA Version 4.1, Final report, I-05/19/CM EM-I-16/26/679 from 09.09.2019. Technische Universität Graz, 2019

- [15] MKS Instruments: Multi Gas Analyser Models 2030, 2031 and 2032 Hardware Manual. MKS Instruments, 2014
- [16] NewTis: BMW F46 218d, 4-Zylinder-Dieselmotor B47TU. <https://www.newtis.info/tisv2/a/de/f46-218d-mpv/wiring-functional-info/power-train/digital-diesel-electronics/1Vnck6LgAp> (Zugriff am 14.02.2020)
- [17] NewTis: BMW F46 218d, SCR-System. <https://www.newtis.info/tisv2/a/de/f46-218d-mpv/wiring-functional-info/power-train/digital-diesel-electronics/exhaust-re-treatment/scr-system/KYINnCKq> (Zugriff am 14.02.2020)
- [18] NewTis: BMW F46 218d, Stickoxidsensor Funktionsbeschreibung. <https://www.newtis.info/tisv2/a/de/f46-218d-mpv/components-connectors/components/components-with-b/b153a-nitrogen-oxide-sensor-before-scr-catalytic-converter/H2VtM1bT> (Zugriff am 14.02.2020)
- [19] Ramsauer, M.; Messung und Simulation des Emissionsverhaltens eines Euro 6 Diesel-PKWs bei RDE-Fahrten und in Stausituationen. Technische Universität Graz, 2017
- [20] Reif, K. (Hrsg.): Dieselmotor-Management, Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung (5. Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-8348-2179-9, 2012
- [21] Reif, K. (Hrsg.): Dieselmotor-Management, Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung (6. Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-25072-0, 2019
- [22] Rexeis, M.: Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles. Technische Universität Graz, 2009
- [23] Rheum, J. M.: Solid State Electrochemical Sensors for Nitrogen Oxide (NO<sub>x</sub>) Detection in Lean Exhaust Gases. University of California Berkeley, 2010
- [24] SAE J1979-DA
- [25] Scantool.net: OBDLink SX Scan Tool specifications. <https://www.scantool.net/obdlink-sx/> (Zugriff am 18.12.2020)
- [26] Thaler, M.; Schüßler, M.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz, NO<sub>x</sub>-Minderung im SCR-Verfahren. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2017
- [27] van Basshuysen, R.; Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven (7. Auflage). Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-04678-1, 2015
- [28] Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission vom 18. Juli 2008
- [29] Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007
- [30] Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017
- [31] Verordnung (EU) 2017/1154 der Kommission vom 7. Juni 2017

- [32] Weller, K.; Rexeis, M.; Hausberger, S.; Zach, B.: A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements. 21st Transport and Air Pollution Conference, Lyon, 2016
- [33] Wimmer, A.: Thermodynamik des Verbrennungsmotors. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Rohabgaszusammensetzung beim Diesel-Motor im Teillastbereich [20] .....	2
Abbildung 2.2: HD-AGR (links) und ND-AGR (rechts) [21] .....	4
Abbildung 2.3: Prinzip der NO <sub>x</sub> -Speicherung und Regeneration im NSK [27] .....	5
Abbildung 2.4: NO <sub>x</sub> -Konvertierungsrate eines SCR-Systems [26] .....	6
Abbildung 2.5: NH <sub>3</sub> -Speicherfähigkeit eines SCR-Katalysators [26].....	6
Abbildung 2.6: Aufbau eines Dieselpartikelfilters [20] .....	7
Abbildung 2.7: Rollenprüfstand mit CVS-Anlage (auf Basis von [9]).....	9
Abbildung 2.8: Aufbaus und Funktion der Messsonde eines NO <sub>x</sub> -Sensors [23] .....	11
Abbildung 2.9: Geschwindigkeitsverlauf und Phasen des WLTC.....	12
Abbildung 2.10: Geschwindigkeitsverlauf und Phasen des ERMES V9-Zyklus .....	12
Abbildung 2.11: Geschwindigkeitsverlauf einer Phase des IUFC-Zyklus .....	13
Abbildung 2.12: Geschwindigkeitsverlauf einer Phase des HBEFA Stop & Go Zyklus .....	13
Abbildung 2.13: RDE-Route Ries.....	14
Abbildung 2.14: RDE-Route Arzberg.....	15
Abbildung 3.1: Abgasanlage ab Turbolader bis SCR-Katalysator [16].....	17
Abbildung 3.2: SCR-Katalysator im Fahrzeugunterboden .....	17
Abbildung 3.3: Messaufbau am Rollenprüfstand.....	19
Abbildung 3.4: PEMS im Kofferraum bzw. auf der Rückbank des Fahrzeugs .....	19
Abbildung 4.1: Vergleich gemessener Abgasmassenstrom mit berechnetem Massenstrom aus OBD-Daten.....	22
Abbildung 4.2: Normierte Kreuzkorrelation zweier um 5.5s zeitversetzter Signale .....	24
Abbildung 4.3: Flussdiagramm Zeitsynchronisation der PEMS-Daten bei Prüfstandsmessungen .....	25
Abbildung 4.4: Flussdiagramm Zeitsynchronisation der FITR-Daten bei Prüfstandsmessungen .....	26
Abbildung 4.5: Verläufe der OBD-Daten vor (grau) und nach (orange) der Synchronisation mit GPS-Daten (RDE) .....	27
Abbildung 4.6: Abweichung der gemessenen NO <sub>x</sub> -Emissionen im Vergleich zur CVS-Anlage .....	29
Abbildung 4.7: Vergleich der zeitlichen Verläufe der gemessenen NO <sub>x</sub> -Emissionen im ERMES V9-Zyklus.....	29
Abbildung 4.8: Vergleich der zeitlichen Verläufe der von den NO <sub>x</sub> -Sensoren gemessenen Konzentrationen bei sehr geringer Abgastemperatur.....	30
Abbildung 4.9: Abweichung von den Zulassungsdaten.....	31
Abbildung 4.10: Vergleich der gemittelten Emissionen im ERMES-Zyklus mit und ohne Regeneration.....	32
Abbildung 4.11: NO <sub>x</sub> - u. NH <sub>3</sub> -Emission im ERMES-Zyklus mit und ohne Regeneration .....	33

Abbildung 4.12: Abgastemperatur vor SCR im ERMES-Zyklus mit und ohne Regeneration	33
Abbildung 4.13: Abweichung zw. „IUFC+Stop&Go“-Zyklus mit und ohne Start-Stopp-Automatik.....	34
Abbildung 4.14: Vergleich der gemittelten NO <sub>x</sub> -Konvertierungsrate und AGT vor SCR über die Mikrozyklen des IUFC mit und ohne Start-Stopp-Automatik .....	35
Abbildung 4.15: Verlauf der AGT sowie NO <sub>x</sub> -Konzentrationen im Leerlauf.....	35
Abbildung 4.16: Abgastemperatur vor SCR und Konvertierungsrate im Leerfahrversuch.....	36
Abbildung 4.17: kumulierter NH <sub>3</sub> -Umsatz und Abgastemperatur vor SCR im Leerfahrversuch .....	37
Abbildung 4.18: Gemittelte Daten in den einzelnen Messungen (*Mittelwert über jene Zeitpunkte in denen beide NO <sub>x</sub> -Sensoren aktiv waren).....	37
Abbildung 4.19: Zeitliche Verläufe RDE-Messung Ries 01 (*OBD-Messdaten der NO <sub>x</sub> -Sensoren erst ab Sekunde 960 verfügbar) .....	38
Abbildung 4.20: Zeitliche Verläufe RDE-Messung Arzberg 01 (*OBD-Messdaten der NO <sub>x</sub> -Sensoren erst ab Sekunde 820 verfügbar) .....	39
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise von PHEM (angelehnt an [22]) .....	40
Abbildung 5.2: Schematische Darstellung eines Moduls (angelehnt an [22]).....	41
Abbildung 5.3: links: Volllastkennlinien [1]; rechts: normierte Volllast- und Schleppkurve .	42
Abbildung 5.4: 20s Mittelwerte der gemessenen und simulierten CO <sub>2</sub> -Emissionen im ERMES v9 Zyklus vor (links) und nach (rechts) der CO <sub>2</sub> -Kennfeldjustierung .....	44
Abbildung 5.5: Justiertes CO <sub>2</sub> -Emissionskennfeld .....	44
Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Kennfelderstellung mit PHEM.....	45
Abbildung 5.7: Kennfelder der NO <sub>x</sub> -Emissionen (links: vor SCR, rechts: nach SCR) .....	46
Abbildung 5.8: Abgasmassenstromkennfeld.....	46
Abbildung 5.9: Modell der Abgasmachbehandlung des Versuchsfahrzeugs in PHEM.....	47
Abbildung 5.10: Scatterplot der Datenpunkte für die Kennfelderstellung.....	49
Abbildung 5.11: 3D-Darstellung des geglätteten SCR-Konvertierungskennfelds.....	49
Abbildung 5.12: Schnitte durch das SCR-Konvertierungskennfeld für fünf verschiedene RG .....	50
Abbildung 5.13: Justiertes Abgastemperatur-KF (rechts).....	51
Abbildung 5.14: Verlauf der Abgastemperatur nach TL vor und nach der Justierung.....	51
Abbildung 5.15: Abweichung zwischen gemessener und simulierter CO <sub>2</sub> -Emission .....	53
Abbildung 5.16: Abweichung zwischen gemessener und simulierter NO <sub>x</sub> -Emission.....	53
Abbildung 5.17: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen im ERMES V9 .....	53
Abbildung 5.18: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemp. im ERMES V9 .....	54
Abbildung 5.19: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen (Ries 01).....	55
Abbildung 5.20: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperaturen (Ries 01).....	55

Abbildung 5.21: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen (Arzberg 01).....	56
Abbildung 5.22: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperatur vor SCR (Arzberg 01) .....	56
Abbildung 5.23: Abweichung zwischen gemessener und simulierter CO <sub>2</sub> -Emission .....	57
Abbildung 5.24: Abweichung zwischen gemessener und simulierter NO <sub>x</sub> -Emission .....	57
Abbildung 5.25: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen im RWC .....	58
Abbildung 5.26: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemperaturen im RWC.....	58
Abbildung 5.27: Zeitliche Verläufe der simulierten Größen im IUFC + Stop&Go-Zyklus ....	59
Abbildung 5.28: Zeitliche Verläufe der simulierten und gemessenen Abgastemp. (IUFC+Stop&Go).....	59
Abbildung 7.1: Flussdiagramm der Vorgehensweise zur Zeitsynchronisation bei Prüfstandsmessungen .....	70

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Grenzwerte im Typprüfzyklus für Euro 6b, 6c, 6d-Temp und 6d [28] [29] .....	7
Tabelle 2.2: Konformitätsfaktoren Faktoren für RDE-Messungen [31] .....	8
Tabelle 2.3: Messgeräte des <i>AVL M.O.V.E iS</i> PEMS [2] .....	10
Tabelle 3.1: Fahrzeugdaten [3] .....	16
Tabelle 3.2: Komponenten der Abgasnachbehandlung [16] .....	17
Tabelle 3.3: Aufgezeichnete OBD-Parameter mit PID und Name nach [24] .....	18
Tabelle 3.4: Kenndaten der Bosch NO <sub>x</sub> -Sensoren [4] .....	18
Tabelle 3.5: Messprogramm am PKW-Rollenprüfstand .....	20
Tabelle 3.6: Messprogramm für RDE-Fahrten .....	20
Tabelle 3.7: Daten aus der Fahrzeugwiegung .....	21
Tabelle 3.8: Prüfstandeinstellungen .....	21
Tabelle 3.9: Masse der Beladung bei RDE-Messungen .....	21
Tabelle 4.1: u-Werte zur Umrechnung von Emissionskonzentrationen (in ppm) in Massenemissionen (in g/s bzw. g/h) anhand des Abgasmassenstroms (in kg/s bzw. kg/h) [30] .....	23
Tabelle 4.2: Volumina der abgasführenden Leitungen .....	28
Tabelle 4.3: Auswertung bezüglich Messtoleranz der PEMS im WLTC gemäß [31] .....	30
Tabelle 4.4: Vergleich der Messergebnisse mit den Abgasgrenzwerten und Zulassungsdaten im WLTC .....	31
Tabelle 4.5: Abgasgrenzwerte für das Versuchsfahrzeug bei RDE-Messungen .....	32
Tabelle 4.6: Messergebnisse der RDE-Messungen .....	32
Tabelle 4.7: Mittlere NH <sub>3</sub> -Konzentration im Abgas .....	34
Tabelle 5.1: Simulationseinstellungen für PHEM .....	43
Tabelle 5.2: Für die Kennfelderstellung verwendete Prüfstandsmessungen .....	45
Tabelle 5.3: Für die Kennfelderstellung verwendete RDE-Messungen .....	45
Tabelle 5.4: Wichtigste fahrzeugspezifischen thermische Parameter der Module .....	47
Tabelle 5.5: Zur Validierung simulierte Emissionsmessungen .....	52
Tabelle 7.1: Zulässige Messtoleranzen für PEMS-Messungen gemäß [31] .....	71
Tabelle 7.2: Messergebnisse Rollenprüfstandsmessungen .....	71
Tabelle 7.3: Messergebnisse RDE-Messungen .....	71
Tabelle 7.4: Simulationsergebnisse Validierung mit abhängigen Zyklen .....	73
Tabelle 7.5: Simulationsergebnisse Validierung mit unabhängigen Zyklen .....	73

## Formelverzeichnis

(2.1) .....	2
(2.2) .....	4
(2.3) .....	4
(2.4) .....	4
(2.5) .....	4
(2.6) .....	5
(2.7) .....	5
(2.8) .....	5
(2.9) .....	5
(2.10) .....	5
(2.11) .....	6
(2.12) .....	6
(2.13) .....	6
(4.1) .....	22
(4.2) .....	22
(4.3) .....	22
(4.4) .....	23
(4.5) .....	24
(4.6) .....	24
(4.7) .....	24
(4.8) .....	25
(4.9) .....	36
(4.10) .....	36
(4.11) .....	36
(4.12) .....	37
(5.1) .....	42
(5.2) .....	42
(5.3) .....	43
(5.4) .....	48
(5.5) .....	48
(5.6) .....	48
(5.7) .....	50
(5.8) .....	50
(7.1) .....	72
(7.2) .....	72

---

(7.3) .....	72
(7.4) .....	72
(7.5) .....	72

## 7 Anhang

### 7.1 Zeitsynchronisation

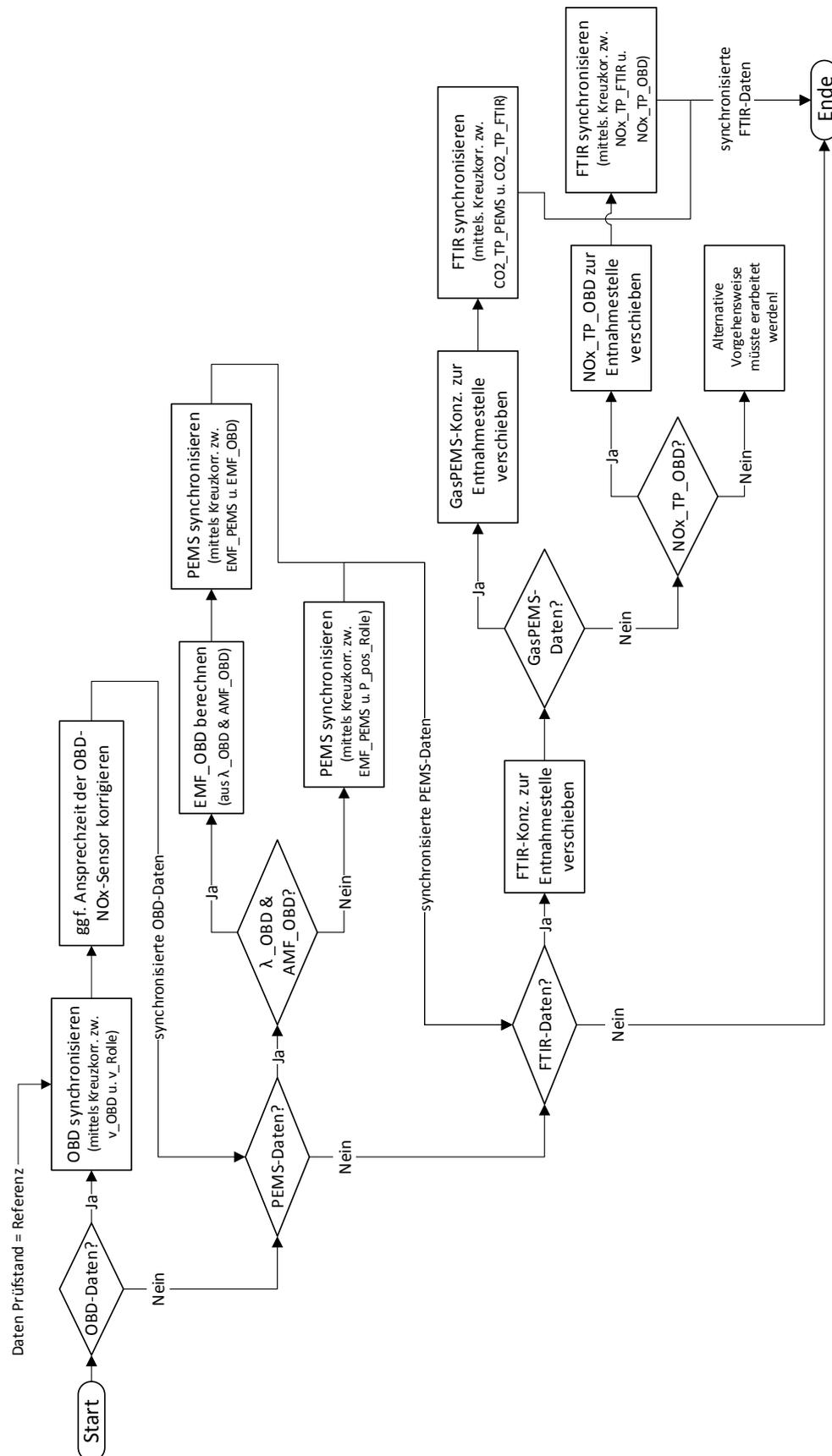


Abbildung 7.1: Flussdiagramm der Vorgehensweise zur Zeitsynchronisation bei Prüfstandsmessungen

## 7.2 Messergebnisse

Tabelle 7.1: Zulässige Messtoleranzen für PEMS-Messungen gemäß [31]

Abgaskomponente	absolute Toleranz	Toleranz in % des Laborbezugswerts
CO <sub>2</sub>	10 g/km	10%
NO <sub>x</sub>	15 mg/km	15%
HC	15 mg/km	15%
CO	150 mg/km	15%
PN	1.00E+11 #/km	50%

*höherer Wert der beiden Toleranzen gilt*

Tabelle 7.2: Messergebnisse Rollenprüfstandsmessungen

Messungsnr.		8180	8181	8183	8182	8185	8184
Zyklus		WLTC	ERMES v9	ERMES v9	IUFC + Stop&Go	IUFC + Stop&Go	Stop&Go
CO <sub>2</sub>	g/km	129.9	167.8	137.9	212.1	220.5	310.8
NO <sub>x</sub>	mg/km	66	120	27	324	266	608
HC	mg/km	40	38	25	22	31	49
CO	mg/km	162	50	48	148	133	5
PM	mg/km	0.25	1.52	0.83	1.31	2.18	1.81
PN	#/km	2.25E+11	4.45E+11	2.63E+10	1.59E+11	6.30E+11	3.08E+11
NH <sub>3</sub>	mg/km	0	5	0	0	0	0
N <sub>2</sub> O	mg/km	28	30	21	25	20	33

Tabelle 7.3: Messergebnisse RDE-Messungen

RDE-Messung		Ries 01	Arzberg 01
CO <sub>2</sub>	g/km	136.3	151.1
NO <sub>x</sub>	mg/km	62.2	55.0
CO	mg/km	98.4	18.2
PN	#/km	1.59E+09	2.26E+09

### 7.3 Umrechnung der Prüfstandeinstellungen für die Eingabe in PHEM

Von der Prüfstandsteuerung und vom Simulationsprogramm werden unterschiedliche Formeln zur Berechnung der Fahrwiderstandskraft  $F_w$  in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  verwendet. Die Daten können jedoch ineinander übergeführt werden.

Der Prüfstand verwendet zur Berechnung der Fahrwiderstandskraft aus den Einstellungen ein sogenanntes Fahrwiderstandspolynom der Form:

$$F_{w \text{ Prüfstand}} = R_0 + R_1 \cdot v + R_2 \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \frac{Stg}{100} \quad (7.1)$$

$R_0$ .....	Statischer Rollwiderstand [N]
$R_1$ .....	Linearer Rollwiderstand [N·s/m]
$R_2$ .....	Luftwiderstand [ $N \cdot s^2/m^2$ ]
$m$ .....	Masse Fahrzeug inkl. Beladung [kg]
$v$ .....	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
$g$ .....	Normalfallbeschleunigung [ $m/s^2$ ]
$Stg$ .....	Fahrbahnsteigung [%]

Vom Simulationsprogramm PHEM hingegen wird zur Berechnung der Fahrwiderstandskraft folgende Gleichung verwendet:

$$F_{w \text{ PHEM}} = m \cdot g \cdot (f_{r0} + f_{r1} \cdot v) + \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \frac{Stg}{100} \quad (7.2)$$

$f_{r0}$ .....	Statischer Rollwiderstandsbeiwert [-]
$f_{r1}$ .....	Linearer Rollwiderstandsbeiwert [s/m]
$\rho_L$ .....	Dichte der Luft [ $kg/m^3$ ]
$c_w$ .....	Luftwiderstandsbeiwert [-]
$A$ .....	Stirnfläche [ $m^2$ ]

Durch Koeffizientenvergleich erhält man die Gleichungen zur Berechnung der PHEM-Einstellungen aus den Prüfstandeinstellungen:

$$f_{r0} = \frac{R_0}{m \cdot g} \quad (7.3)$$

$$f_{r1} = \frac{R_1}{m \cdot g} \quad (7.4)$$

$$c_w = \frac{2 \cdot R_2}{\rho_L \cdot A} \quad (7.5)$$

## 7.4 Simulationsergebnisse

Tabelle 7.4: Simulationsergebnisse Validierung mit abhängigen Zyklen

		<b>ERMES v9 8183</b>	<b>Ries 01<sup>13</sup></b>	<b>Arzberg 01<sup>13</sup></b>
<b>Messung</b>	CO2 [g]	3852	10242	15800
	NOx [g]	0.910	2.157	5.349
<b>Simulation</b>	CO2 [g]	3891	10391	16075
	NOx_TPmap [g]	2.270	4.095	9.274
	NOx_TP [g]	1.058	1.796	3.192
	NOx_TP_gttc4 [g]	0.966	1.531	4.336

Tabelle 7.5: Simulationsergebnisse Validierung mit unabhängigen Zyklen

		<b>RWC 8230</b>	<b>IUFC + Stop&amp;Go 8185</b>
<b>Messung</b>	CO2 [g]	4473	3008
	NOx [g]	1.444	3.508
<b>Simulation</b>	CO2 [g]	4252	2580
	NOx_TPmap [g]	1.707	1.061
	NOx_TP [g]	1.695	1.625
	NOx_TP_gttc4 [g]	0.979	1.821

<sup>13</sup> Zyklus mit Kaltstart - Ergebnisse ab Zeitpunkt an dem die Kühlwassertemperatur über 70 °C betrug