



Martin Johannes Röck, BSc

Messung und Simulation der Emissionsfaktoren von EURO VI Nutzfahrzeugen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Vorstand

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

Betreuer

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

Dipl.-Ing. Dr.techn Martin Rexeis

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, März 2017



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

Vorwort

Seit Beginn meines Masterstudiums war für mich klar, dass ich meine Abschlussarbeit im Bereich Motor- und Antriebstechnik absolvieren möchte. Als ich mich am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik umsah, stieß ich im Forschungsbereich Emissionen auf die Arbeit " Messung und Simulation der Emissionsfaktoren von EURO VI Nutzfahrzeugen".

Somit gilt mein außerordentlicher Dank Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger, der diese Arbeit ermöglicht hat und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein großer Dank, für die perfekte Betreuung und Unterstützung im Laufe dieser Masterarbeit gilt Herrn Dipl.-Ing. Konstantin Weller, sowie Herrn Dipl.- Ing. Dr. techn. Martin Rexeis.

Weiters möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken.

Schließlich möchte ich mich noch rechtherzlich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Ich danke euch für die Unterstützung während meines gesamten Studiums.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	IX
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	XI
FAHRZEUGVERZEICHNIS	XIV
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	XX
ZUSAMMENFASSUNG	XXI
ABSTRACT	XXII
1 EINLEITUNG	1
2 AUFGABENSTELLUNG	2
3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
3.1 ABGASGESETZGEBUNG FÜR SCHWERE NUTZFAHRZEUGE	3
3.2 ABGASNACHBEHANDLUNG VON EURO VI DIESELMOTOREN	6
3.2.1 <i>Diesel – Oxidationskatalysator (DOC)</i>	6
3.2.2 <i>Dieselpartikelfilter (DPF)</i>	6
3.2.3 <i>Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden (SCR)</i>	8
3.2.4 <i>Abgasschalldämpfer</i>	13
3.3 ROLLENPRÜFSTAND	14
3.4 EMISSIONSMESSTECHNIK	15
3.4.1 <i>CVS- Constant Volume Sampler</i>	15
3.4.2 <i>PEMS – Portable Emission Measurement System</i>	16
3.4.3 <i>Methode zur variablen Zeitverschiebung zeitdiskreter Emissionsmassen</i>	18
3.4.4 <i>Abgasmesssysteme</i>	18
3.5 ABGASRÜCKFÜHRUNG (AGR)	24
4 VERSUCHSFAHRZEUGE	25
4.1 FAHRZEUG 1	25
4.2 FAHRZEUG 2	26
4.3 FAHRZEUG 3	27
5 MESSUNG	28
5.1 RDE - MESSUNGEN	28
5.1.1 <i>RDE-Messstrecken</i>	28
5.1.2 <i>Eingesetzte Messtechnik</i>	31
5.1.3 <i>Messprogramm</i>	35
5.1.4 <i>Auswertung der Messdaten</i>	35
5.1.5 <i>Fahrzeug 1</i>	42
5.1.6 <i>Fahrzeug 2</i>	46
5.1.7 <i>Fahrzeug 3</i>	49
5.1.8 <i>Einfluss der Umgebungstemperatur</i>	53
5.2 MESSUNGEN AM ROLLENPRÜFSTAND	54
5.2.1 <i>Eingesetzte Messtechnik</i>	54
5.2.2 <i>Messprogramm</i>	55
5.2.3 <i>Prüfaufbau</i>	57
5.2.4 <i>Ermittlung der Fahrwiderstände</i>	58
5.2.5 <i>Ergebnisse der CVS-Messung</i>	62
5.2.6 <i>Ergebnisse PEMS und FTIR sowie Vergleich mit CVS</i>	64
6 SIMULATION	68
6.1 SIMULATIONSPROGRAMM PHEM	68
6.1.1 <i>Kennfelderstellung</i>	69
6.1.2 <i>Kennfeldbasierte Simulation</i>	69
6.1.3 <i>Abgasnachbehandlungssystem</i>	70

6.2	KENNFELDRASTERUNG.....	73
6.3	EMISSIONSKENNFELDER.....	77
6.4	ERSTELLUNG DES TEMPERATURKENNFELDES.....	78
6.5	ABGLEICH UND ANPASSUNG DES TEMPERATURMODELLES.....	80
6.6	ERSTELLUNG DER SCR-KONVERTIERUNGSKENNFELDER.....	83
6.6.1	<i>SCR-Kennfeld von Fahrzeug 1 und 2</i>	83
6.6.2	<i>SCR-Kennfeld von Fahrzeug 3</i>	87
6.7	SIMULATIONSERGEBNISSE.....	90
6.7.1	<i>Fahrzeug 1</i>	90
6.7.2	<i>Fahrzeug 2</i>	94
6.7.3	<i>Fahrzeug 3</i>	98
6.8	ZUSAMMENFASSUNG DER SIMULATION.....	102
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	104
	LITERATUR.....	105
	ANHANG.....	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fahrzeug 1	XIV
Abbildung 2: Volllast und Schleppkurve Fahrzeug 1	XV
Abbildung 3: Fahrzeug 2	XVI
Abbildung 4: Volllast und Schleppkurve Fahrzeug 2	XVII
Abbildung 5: Fahrzeug 3	XVIII
Abbildung 6: Volllast und Schleppkurve Fahrzeug 3	XIX
Abbildung 7: Motormoment (oben) und Motordrehzahl (unten) für eine Phase des WHTC [17]	4
Abbildung 8: Aufbau eines Partikelfilter [3]	7
Abbildung 9: Ablagerungen in einem DPF [4]	7
Abbildung 10: NO _x - Umsatz mit SCR – Katalysator	9
Abbildung 11: Verfahrensschritte der NH ₃ Erzeugung [7]	9
Abbildung 12: Denoxtronic System [9]	10
Abbildung 13: Benötigte Strecke zur Verdampfung des Wassers eines Harnstoff-Wasser Tropfens [7]	11
Abbildung 14: Blockschaltbild einer SCR-Dosierstrategie [1]	12
Abbildung 15: Aufbau Abgasschalldämpfer [11]	13
Abbildung 16: Rollenprüfstand mit CVS - Anlage [12]	14
Abbildung 17: Prinzip Vollstromverdünnung [13]	15
Abbildung 18: PEMS - Aufbau LKW	16
Abbildung 19: Entnahme eines Abgasteilstroms zur Rußmessung	17
Abbildung 20: Entnahme eines Abgasteilstroms zur Messung der gasförmigen Komponenten.	17
Abbildung 21: Prinzip eines Optopneumatischen NDIR – Analysator [15]	18
Abbildung 22: Prinzipieller Aufbau eines CLD-Messgerätes zum Nachweis von Stickoxiden (NO _x) [15]	20
Abbildung 23: Prinzip eines Flammenionisationsdetektors [22]	20
Abbildung 24: Prinzip eines elektrochemischen Sensors	21
Abbildung 25: Funktionsschema CPC [34]	22
Abbildung 26: Funktionsprinzip der photoakustischen Spektroskopie [24]	22
Abbildung 27: Prinzip einer Fourier Transform Infrarot Spektroskopie [25]	23
Abbildung 28: Einfluss der AGR auf die Ruß/NO _x -Emissionen [26]	24
Abbildung 29: Einfluss der AGR auf die HC-Emissionen [26]	24
Abbildung 30: Streckenführung der Route Köflach N2 [21]	28
Abbildung 31: Streckenführung der Route Köflach N3 [21]	29
Abbildung 32: Streckenführung der Route Ries N2 [21]	29

Abbildung 33: Streckenführung der Route Ries N3 [21].....	30
Abbildung 34: Streckenführung der Stadtroute [21].....	30
Abbildung 35: Messsystem Semtech DS (links) [12] sowie Gasfluss und elektrische Anschlüsse (rechts) [28].....	31
Abbildung 36: EFM mit Auswerteeinheit [29]	32
Abbildung 37: Anordnung der Thermoelemente bei Fahrzeug 1	33
Abbildung 38: Position des NOx-Roh Sensors (Fahrzeug 1)	34
Abbildung 39: Zeitverschiebung.....	36
Abbildung 40: Exemplarischer Verlauf von NOx-Roh, NOx-Tailpipe und der Leistung über der Zeit (Fahrzeug 3).....	38
Abbildung 41: Schema zur CO ₂ Leistungsermittlung [30]	39
Abbildung 42 Geschwindigkeitsverläufe (VBOX, Semtech, CAN) über der Zeit	40
Abbildung 43: Verlauf der Drehzahlen (CAN, Drehzahlsensor) und der Geschwindigkeit über der Zeit	40
Abbildung 44: Verlauf der CAN-Drehzahl und des Massentromes über der Zeit.....	41
Abbildung 45: Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf einer Köflach-Route (Fahrzeug 2)	44
Abbildung 46: Abgedriftete NOx-Konzentrationen von Fahrzeug 1	45
Abbildung 47: Zeigt die Temperaturverläufe vor und nach Schalldämpfer für die erste Messfahrt mit Fahrzeug 2.....	48
Abbildung 48: Aufbau Semtech Fahrzeug 3	52
Abbildung 49: Einfluss der Umgebungstemperatur (Fahrzeug 1)	53
Abbildung 50: Einfluss der Umgebungstemperatur (Fahrzeug 2)	53
Abbildung 51: Einfluss der Umgebungstemperatur (Fahrzeug 3)	53
Abbildung 52: Schaltbild CVS-Anlage [31]	54
Abbildung 53: Geschwindigkeitsverlauf des HBEFA Stop & Go Zyklus.....	56
Abbildung 54: Prüfaufbau am Rollenprüfstand	57
Abbildung 55: Vergleich der Leistungen von Fahrzeug 2 einer Köflach-Route	59
Abbildung 56: Vergleich der Leistungen von Fahrzeug 3 einer Ries-Route	60
Abbildung 57: Leistungsvergleich mit anderen Höhendaten.....	61
Abbildung 58: NOx-Roh und NOx-Tailpipe von Test Nr.: 2331	63
Abbildung 59: CO-Verlauf von Messung 2310	66
Abbildung 60: CO-Verlauf von Messung 2340	66
Abbildung 61: NOx- und Temperaturverläufe von Test Nr.:2310 (Fahrzeug 2).....	67
Abbildung 62: Funktionsschema von PHEM [19].....	68
Abbildung 63: Schema Kennfelderstellung [30].....	69
Abbildung 64: Modell Abgasstrang	70
Abbildung 65: LKW-Grid.....	73

Abbildung 66: PKW-Grid	73
Abbildung 67: Verlauf der CO ₂ -Leistung und der Geschwindigkeit über der Zeit	75
Abbildung 68: Neue Rasterung (rechts).....	76
Abbildung 69: CO ₂ -Leistungs- und Geschwindigkeitsverlauf berechnet mit optimierten Kennfeld	76
Abbildung 70: Anordnung der Thermoelemente	78
Abbildung 71: Temperatur- und Massenstromverlauf bei der Temperaturinvertierung.....	78
Abbildung 72: Invertierte Temperaturen von Fahrzeug 1.....	79
Abbildung 73: Extrapoliertes Temperaturkennfeld (Fahrzeug 1).....	79
Abbildung 74: Temperaturvergleich Simulation (blau) zu Messung (rot) mit extrapoliertem Kennfeld, sowie P_norm-Verlauf (orange) und n_norm-Verlauf (gelb)	80
Abbildung 75: Angepasstes Temperaturkennfeld (Fahrzeug 1)	81
Abbildung 76: Temperaturvergleich vor Schalldämpfer von Simulation (blau) zu Messung (rot) mit angepasstem Kennfeld, für eine Köflach-Route von Fahrzeug 1	81
Abbildung 77: Ergebnis der Temperatursimulation (rot bzw. gelb) von Fahrzeug 2 im Vergleich zur Messung (blau bzw. grün) für ein Köflach-Fahrt (oben) und eine Ries-Fahrt (unten).....	82
Abbildung 78: Temperaturvergleich Simulation (blau) zu Messung (rot) von Fahrzeug 3, sowie P_norm-Verlauf (orange) und n_norm-Verlauf (gelb)	82
Abbildung 79: SCR-Kennfeld aus Messdaten von Fahrzeug 1.....	83
Abbildung 80: Anzahl der hinterlegten Messwerte.....	84
Abbildung 81: Angepasstes SCR-Kennfeld von Fahrzeug 1	85
Abbildung 82: Angepasstes SCR-Kennfeld von Fahrzeug 2.....	86
Abbildung 83: Gemessene Temperatur vor Schalldämpfer (rot), simulierte Temperatur vor Schalldämpfer (blau), gemessene Temperatur nach Schalldämpfer (violett), simulierte Temperatur vor SCR (grün)	87
Abbildung 84: SCR-KF mit sekundlichen Werten und simulierter Temp. vor SCR.....	88
Abbildung 85: SCR-KF mit sekundlichen Werten und gemessener Temp. vor Schalldämpfer	88
Abbildung 86: SCR-KF mit 20s-Mittelwerte und simulierter Temp. vor SCR	89
Abbildung 87: SCR-KF mit 20s-Mittelwerte und gemessener Temp. vor Schalldämpfer	89
Abbildung 88: Vergleich der simulierten zu den gemessenen CO-Emissionen	91
Abbildung 89: NO _x -Vergleich Messung zu Simulation für den Köflach VM Zyklus	93
Abbildung 90: NO _x -Vergleich Messung zu Simulation für den Ries NM Zyklus.....	93
Abbildung 91: Vergleich der gemessenen und simulierten Temperatur für den Zyklus Ries NM von Fahrzeug 1.....	94
Abbildung 92: Vergleich von NO _x -gemessen und NO _x aus dem KF interpoliert	95
Abbildung 93: Vergleich von NO _x -gemessen und NO _x simuliert	97

Abbildung 94: Vergleich der gemessenen und simulierten Temperatur für den Zyklus Ries NM von Fahrzeug 2.....	97
Abbildung 95: NOx-Vergleich Köflach NM (Fahrzeug 3).....	101
Abbildung 96: NOx-Vergleich Stadt_2 (Fahrzeug3).....	101
Abbildung 97: Prozentuelle Abweichung der Kennfelder.....	102
Abbildung 98: Konvertierungskennfeld ohne Driftkorrektur (Fahrzeug 1).....	109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrzeugliste	XIV
Tabelle 2: Technische Daten von Fahrzeug 1	XIV
Tabelle 3: Volumen des Abgasstranges von Fahrzeug 1	XV
Tabelle 4: Getriebeübersetzungen von Fahrzeug 1	XV
Tabelle 5: Technische Daten von Fahrzeug 2	XVI
Tabelle 6: Volumen des Abgasstranges von Fahrzeug 2	XVII
Tabelle 7: Getriebeübersetzungen von Fahrzeug 2	XVII
Tabelle 8: Technische Daten von Fahrzeug 3	XVIII
Tabelle 9: Volumen des Abgasstranges von Fahrzeug 3	XIX
Tabelle 10: Getriebeübersetzungen von Fahrzeug 3	XIX
Tabelle 11: Emissionsgrenzwerte für Euro VI LKW.....	3
Tabelle 12: Zeitanteile für eine gesetzeskonforme Messung.....	5
Tabelle 13: Grenzwerte bei einem ISC-konformen Test	5
Tabelle 14: Messprogramm RDE.....	35
Tabelle 15: Laufzeiten von Motor bis zum NOx-Sensor	37
Tabelle 16: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 1	42
Tabelle 17: Streckeneigenschaften Fahrzeug 1	42
Tabelle 18: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 1	43
Tabelle 19: 90% Perzentil EMROAD Ergebnisse Fahrzeug 1	44
Tabelle 20: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 2	46
Tabelle 21: Streckeneigenschaften Fahrzeug 2	46
Tabelle 22: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 2	47
Tabelle 23: 90% Perzentil EMROAD Ergebnisse Fahrzeug 2	47
Tabelle 24: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 3	49
Tabelle 25: Streckeneigenschaften Fahrzeug 3	50
Tabelle 26: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 3	51
Tabelle 27: 90% Perzentil EMROAD Ergebnisse Fahrzeug 3	51
Tabelle 28: Messprogramm am Rollenprüfstand von Fahrzeug 2	55

Tabelle 29: Messprogramm am Rollenprüfstand von Fahrzeug 3	56
Tabelle 30: Fahrwiderstandskonstanten	60
Tabelle 31: CVS-Beutelwerte von Fahrzeug 2	62
Tabelle 32: CVS-Beutelwerte von Fahrzeug 3	62
Tabelle 33: Vergleich Semtech mit CVS Fahrzeug 2	64
Tabelle 34: Vergleich Semtech mit CVS Fahrzeug 3	65
Tabelle 35: Eingabedaten Temperatursimulation	70
Tabelle 36: Modellierung des Abgasstranges	72
Tabelle 37: Ergebnis der Interpolation mit unterschiedlichen Kennfeldrasterungen (CO ₂ ,NO _x)	74
Tabelle 38: Vergleich Simulation zu Messung von CO ₂ , CO, HC, ExMF	90
Tabelle 39: Durchschnittliche simuliert Partikelemissionen von Fahrzeug 1	91
Tabelle 40: Vergleich Simulation zu Messung von NO _x (Fahrzeug 1)	92
Tabelle 41: Vergleich Simulation zu Messung von Fahrzeug 2	94
Tabelle 42: Durchschnittliche simulierte Partikelemissionen von Fahrzeug 2	95
Tabelle 43: Vergleich Simulation zu Messung von NO _x (Fahrzeug 2)	96
Tabelle 44: Vergleich Simulation zu Messung von Fahrzeug 3	98
Tabelle 45: Durchschnittliche simulierte Partikelemissionen von Fahrzeug 3	99
Tabelle 46: NO _x -Simulationsergebnisse von Fahrzeug 3	99
Tabelle 47: Bedeutung der Abkürzungen aus Tabelle 46	100
Tabelle 48: Eigenschaften des Abgasstranges von Fahrzeug 1	108
Tabelle 49: Eigenschaften des Abgasstranges von Fahrzeug 2	108
Tabelle 50: Eigenschaften des Abgasstranges von Fahrzeug 3	108

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
CO	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Kohlenmonoxid
CO ₂	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Kohlendioxid
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
d	m	Durchmesser
FC	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Kraftstoffverbrauch
fr ₀	-	Konstanter Rollwiderstandskoeffizient
fr ₁	s/m	Linearer Rollwiderstandskoeffizient
HC	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Kohlenwasserstoff
I	kgm^2	Trägheitsmoment
<i>i</i>	-	Übersetzung
m	kg	Masse
M	Nm	Drehmoment
M	g/mol	molare Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n	U/min, norm	Drehzahl
n	(k)mol	Stoffmenge, Molzahl
n_{Leer}	U/min	Leerlaufdrehzahl
n_{Nenn}	U/min	Nenndrehzahl
n_{norm}	-	Normierte Drehzahl
NH ₃	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Ammoniak
NO	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Stickstoffmonoxid
NO _x	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Sickoxide
NO ₂	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Stickstoffdioxid
N ₂ O	$g/kWh, g/h, g/km, ppm$	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
P	(k)W	Motorleistung
p	bar, Pascal	Druck
P_e	(k)W	Effektive Motorleistung
P_{Nenn}	(k)W	Nennleistung
P_{norm}	-	Normierte Leistung
PM	$g/kWh, g/h, g/km,$	Partikelmasse
PN	Stk/kWh, Stk/h	Partikelanzahl
R ₀	N	Konstanter Rollwiderstandsfaktor
R ₁	Ns/m	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsfaktor
R ₂	Ns^2/m^2	Faktor für Luftwiderstand
T,Temp	°C	Temperatur
T_U	°C	Umgebungstemperatur
U_{Gas}	-	Verhältnis der molaren Massen
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom

Konstanten

$g = 9,8067$	m/s^2	Normfallbeschleunigung
$R_m = N_A \cdot k_B = 8,3145$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	allgemeine (molare) Gaskonstante

Griechische Formelzeichen

α	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
α	-	Molares Verhältnis von NH_3 zu NO_x
β	-	Selektivitätsverhältnis
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit

Weitere Indices und Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
Bel.	Beladung
Beschl.	Beschleunigung
CLD	Chemilumineszenz Detektor
CVS	Constant Volume Sampler
DOC	Diesel – Oxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EFM	Exhaust Flow Meter
ExMF	Exhaust Mass Flow
F	Faktor zwischen Rolle und Straße
FID	Flammenionisationsdetektor
FTG	Feste Turbinengeometrie
FTIR	Fourier Transform Infrarot Spektroskopie
Fzg.	Fahrzeug
H ₂ O	Wasser
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
K	Konzentration
KF	Kennfeld
Leer	Leerlauf
M	Masse
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot-Analysator
NDUV	Nichtdispersiver Ultraviolett-Analysator
NM	Nachmittag
O ₂	Sauerstoff
PEMS	Portable Emission Measurement System
RDE	Real Drive Emission
ROH	Engine Out
Roh	Rohemissionen bzw. Emissionen vor der Abgasnachbehandlung
Rot	Rotatorisch
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
Stg	Steigung
TL	Turbolader
Tnach	Temperatur nach DPF
TP	Tailpipe

Tvor	Temperatur vor Abgasschalldämpfer
VM	Vormittag
VTG	Variable Turbinengeometrie
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
1s	sekündliche Werte
20s	20 Sekunden Mittelwerte

Fahrzeugverzeichnis

In diesem Abschnitt sind die Bezeichnungen und technischen Daten der vermessenen Fahrzeuge aufgelistet.

Fahrzeug 1:

Tabelle 1: Fahrzeugliste

Fahrzeug Nr.:	Hersteller	Modell
1	MAN	TGL 12.220 4x2 BL
2	DAF	LF 250 FA
3	SCANIA	R450



Abbildung 1: Fahrzeug 1

Tabelle 2: Technische Daten von Fahrzeug 1

Motor:	D0834LFL68
Hubraum:	4580 ccm ³
Nennleistung:	162 kW
AGR	Ja
Abgasnorm	Euro VI
Nenndrehzahl:	2300 U/min
Leerlaufdrehzahl:	700 U/min
Gesamtmasse:	11990 kg
Leermasse:	5990 kg
Beladung:	4090 kg (68,17%)
Getriebe:	ZF AS Tronic lite (6 AS 800 TO)
Reifen Antriebsräder:	245/70 R17.5
Fahrzeugklasse:	N2
Aufladung:	Zweistufig

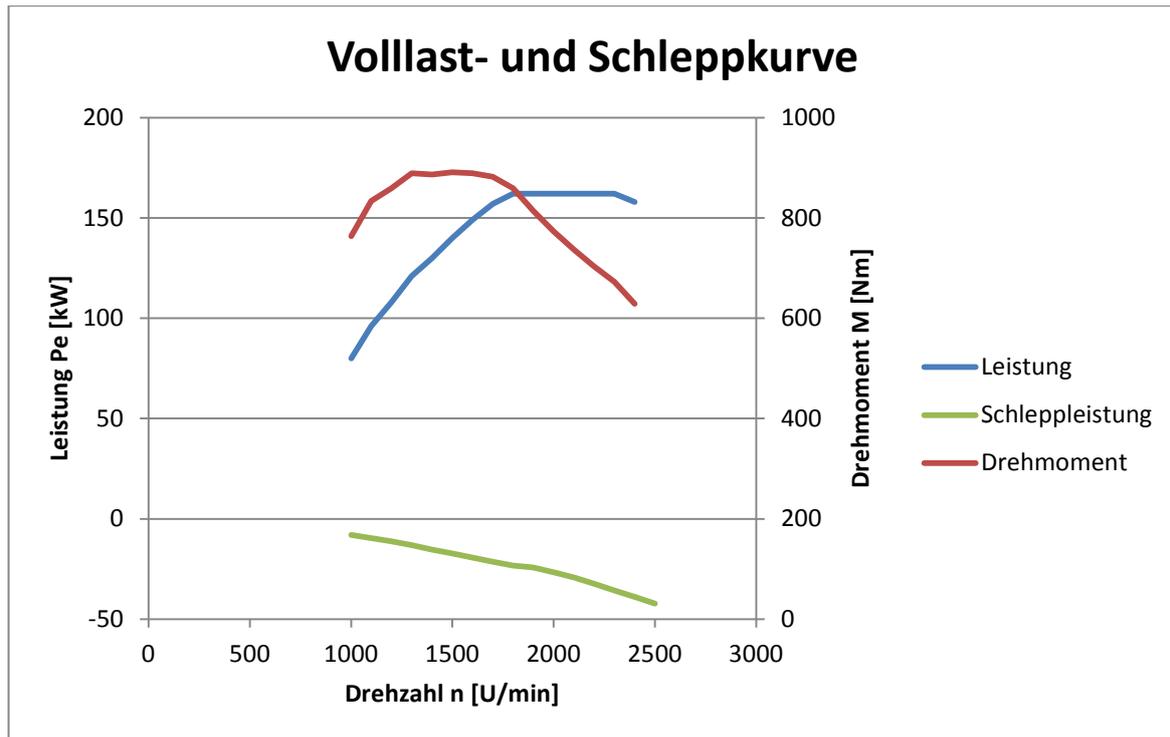


Abbildung 2: Volllast und Schleppkurve Fahrzeug 1

Tabelle 3: Volumen des Abgasstranges von Fahrzeug 1

Modul	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Volumen [l]
DPF:	300	250	14,63
Dosierstrecke:	800	80	4,02
SCR (erster Katalysator):	800	250	39,27
SCR: (zweiter Katalysator):	800	250	39,28
Summe aller Verrohrungen:			32,9
Gesamtvolumen:			130,1

Tabelle 4: Getriebeübersetzungen von Fahrzeug 1

Getriebe:	ZF 6 AS 800 TO					
	Gang					
	1	2	3	4	5	6
Übersetzungsverhältnis :	6,58	3,6	2,13	1,39	1,00	0,78
Hinterachsübersetzung:	3,17					

Fahrzeug 2:

Abbildung 3: Fahrzeug 2

Tabelle 5: Technische Daten von Fahrzeug 2

Motor:	PACCAR PX-7
Hubraum:	6700 ccm ³
Nennleistung:	180 kW
AGR	Ja
Abgasnorm	Euro VI
Nenndrehzahl:	2250 U/min
Leerlaufdrehzahl:	700 U/min
Gesamtmasse:	16000 kg
Leermasse:	7050 kg
Beladung:	4730 kg (52,85%)
Getriebe:	ZF AS Tronic lite (ZF 6 AS 1000 TO)
Reifen Antriebsräder:	285/70 R19.5
Fahrzeugklasse:	N3
Aufladung	TL mit VTG

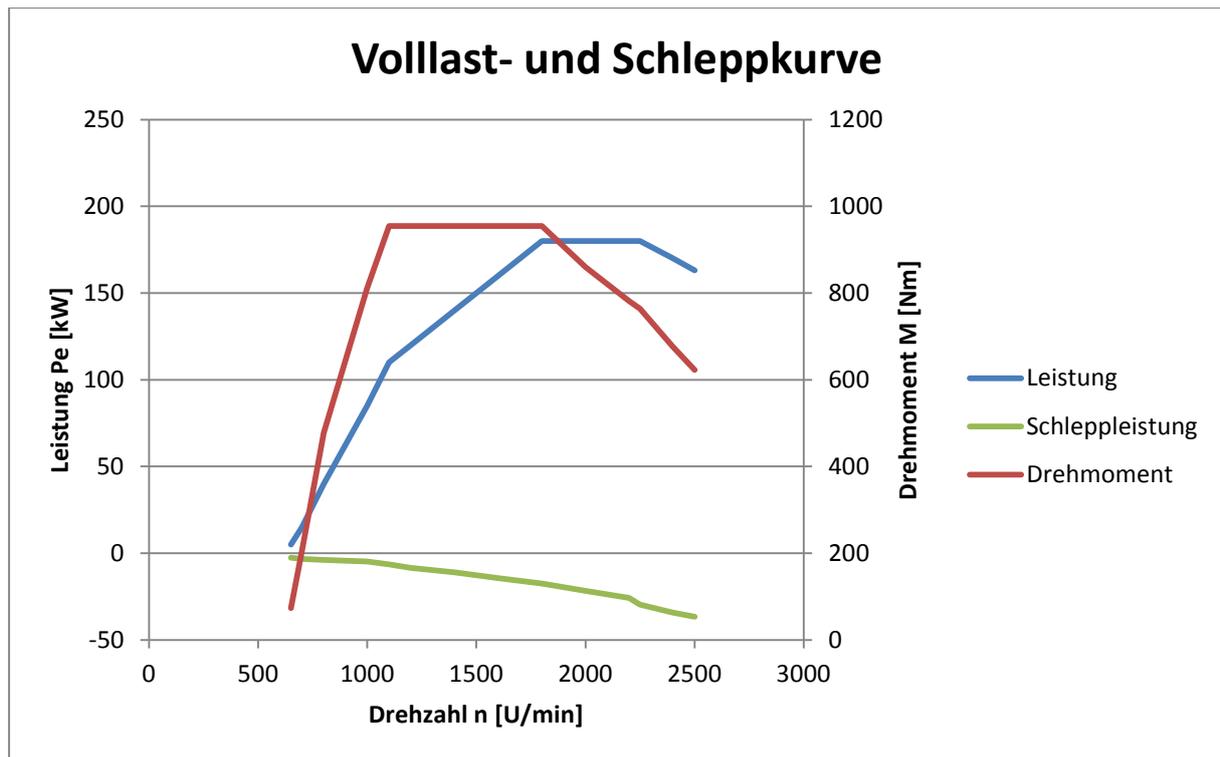


Abbildung 4: Vollast und Schleppkurve Fahrzeug 2

Tabelle 6: Volumen des Abgasstranges von Fahrzeug 2

Modul	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Volumen [l]
Flexibles Rohr nach ATL:	540	75	2,39
Anschlussrohr:	1380	75	6,10
Anschlussrohr zum DPF/KAT:	500	75	2,21
DPF:	750	200	23,56
Dosierstrecke:	500	100	3,93
SCR:	750	250	36,82
Knie nach Abgasnachbehandlung:	400	125	4,91
EFM semtech:	1200	125	14,73
Entnahme FTIR (hinter EFM noch ein zusätzliches Rohr bis zur Entnahme)	1000	100	7,85
Gesamtvolumen:			102,48

Tabelle 7: Getriebeübersetzungen von Fahrzeug 2

Getriebe:	ZF 6 AS 1000 TO					
	Gang					
	1	2	3	4	5	6
Übersetzungsverhältnis :	6,75	3,6	2,13	1,39	1,00	0,78
Hinterachsübersetzung:	2,33					

Fahrzeug 3:

Abbildung 5: Fahrzeug 3

Tabelle 8: Technische Daten von Fahrzeug 3

Motor:	DC 13 147 L01
Hubraum:	12700 ccm ³
Nennleistung:	331 kW
AGR	Nein
Abgasnorm	Euro VI
Nenn Drehzahl:	1900 U/min
Leerlaufdrehzahl:	500 U/min
Gesamtmasse:	40000 kg (Zugfahrzeug + Auflieger)
Leermasse:	15050 kg
Beladung:	12650 kg (46,25%)
Getriebe:	12 Gang automatisiertes Schaltgetriebe
Reifen Antriebsräder:	385/65 R22.5
Fahrzeugklasse:	N3
Aufladung:	Einfach mit FTG

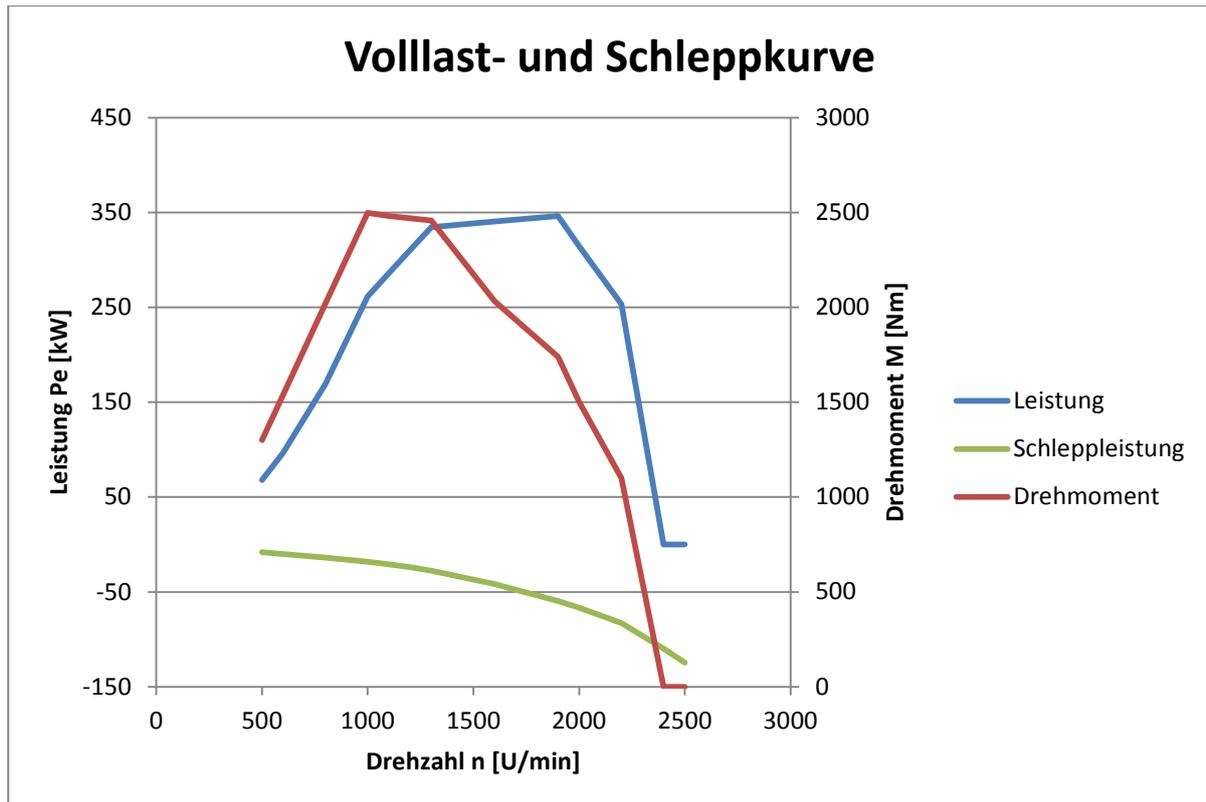


Abbildung 6: Vollast und Schleppkurve Fahrzeug 3

Tabelle 9: Volumen des Abgasstranges von Fahrzeug 3

Modul	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Volumen [l]
Rohr nach ATL bis Schalldämpfer:	1000	110	9,5
DPF:	600	300	42,41
Dosierstrecke:	600	200	18,85
SCR (erster Katalysator):	600	250	29,45
SCR (zweiter Katalysator):	600	250	29,45
Rohr nach Schalldämpfer bis EFM:	550	127	6,96
EFM bis Entnahmesonde:	1000	125	12,27
Gesamtvolumen:			148,89

Tabelle 10: Getriebeübersetzungen von Fahrzeug 3

Getriebe:	GSR895	
	Niedrige Range-Gruppe	Hohe Range-Gruppe
Split		
Niedrig	11,320	3,019
Hoch	9,132	2,435
Niedrig	7,207	1,922
Hoch	5,814	1,550
Niedrig	4,648	1,240
Hoch	3,750	1,000
Hinterachsübersetzung:	2,71	

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Martin Johannes Röck

Graz, 16.03.2017

Zusammenfassung

Nach der aktuellen EU-Verordnung [16], müssen schwere Nutzfahrzeuge, auch im realen Straßenverkehr gewisse Grenzwerte einhalten. Um zu überprüfen, ob diese Limits tatsächlich eingehalten werden, bzw. wie sich die Emissionen unter Realbedingungen verhalten und wie genau die mobile Messtechnik (PEMS) bei solchen Tests arbeitet, wurden Messungen an drei Versuchsfahrzeugen sowohl am Rollenprüfstand als auch im Straßenverkehr durchgeführt. Bei der Erstellung des Messprogrammes wurde darauf geachtet, möglichst weitreichende Erkenntnisse bezüglich unterschiedlicher Betriebszustände aus den Messungen zu erhalten. Deshalb erfolgten die RDE-Messungen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, während die Prüfstandsmessungen verschieden vorkonditioniert wurden. Bei der Wahl der RDE-Messstrecken galt es die vom Gesetzgeber vorgegebenen Randbedingungen [16] hinsichtlich Routenzusammensetzung einzuhalten, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

Im Kapitel Simulation werden anhand der gemessenen Daten Simulationsmodelle erstellt. Dabei werden die Stickoxide mittels eines physikalischen Modells der gesamten Abgasnachbehandlung, hauptsächlich um die Temperatureinflüsse zu berücksichtigen, simuliert. Alle anderen Komponenten werden auf einem kennfeldbasierten Ansatz berechnet. Die Erstellung eines Motor-Abgas-Temperaturkennfeldes zur Simulation der Abgastemperatur entlang des Abgasstranges, erfolgt mit Hilfe einer Messung von Stationärpunkten. Daraufhin wird dieses Kennfeld anhand der gefahrenen Zyklen noch auf den transienten Betrieb angepasst. Die Modellierung des SCR-Systems erfolgt durch SCR-Konvertierungskennfelder. Die Simulationsergebnisse werden zur Modellvalidierung mit der Messung verglichen.

Da dafür ein gewisses Hintergrundwissen notwendig ist, werden die Möglichkeiten zur Abgasnachbehandlung von Dieselfahrzeugen, sowie die technologischen Methoden verschiedener Messtechniken im Kapitel Theoretische Grundlagen erläutert.

Aus den Messergebnissen geht hervor, dass sich die betrachteten Versuchsfahrzeuge, trotz teilweise unterschiedlicher Abgasnachbehandlungskonzepte, auf sehr geringen Emissionsniveaus befinden. Die Simulation liefert brauchbare Ergebnisse um einschätzen zu können in welcher Größenordnung sich die Summenemissionen über einen gesamten Zyklus befinden. Bei der Betrachtung der zeitdiskreten Emissionswerte erkennt man, dass eine Erweiterung des Simulationsmodells um eine Heizstrategie und ein Ammoniak Speichermodell im SCR Katalysator untersucht werden sollte.

Abstract

According to the actual eu-regulations, heavy duty vehicles, have also comply certain limits in the real road traffic. To check, if these limits are really respected, or how the emissions react under real conditions 3 vehicles have been tested on the chassis dynamometer and in the road traffic. Furthermore these tests gave precise information about the behaviour of the PEMS compared to the CVS-measurement. At the creation of the measuring program it was important to get as many findings and measurements at different operating points as possible. That is why the RDE-measurements have been done at different ambient temperatures, while the test bench measurements have been preconditioned differently. To get representative results the route for the RDE-trips nearly fulfilled the conditions given in the legislation.

Simulation models are setup based on the measured data. The simulation of the nitrogen oxide is based on physical models of the whole after-treatment system of exhaust gases, especially to consider temperature influences. The other emission components were calculated by an emission map. The creation of the engine exhaust temperature map for the simulation of the exhaust temperature along the exhaust gas system was carried out with the help of measured stationary points on the chassis dynamometer. The map was adjusted on the transient operation by simulating RDE trips and comparing these results with the measurement. The modelling of the SCR-system is done by a SCR-conversion map and again the validation is done by comparing and measurement.

To get some background knowledge, the chapter theoretical basics explains how the after-treatment system of exhaust gases from diesel vehicles and the technological approaches of different measuring technologies work.

Measurement results of the considered test vehicles show a very low emission level in spite of partly different exhaust after-treatment concepts. The simulation provides good results, regarding the level of total emissions during a complete RDE cycle. Considering time-discrete emission values an extension of the simulation model about a heating strategy and an ammonia storage strategy in the SCR-catalytic converter should be examined.

1 Einleitung

In einer Zeit, in der der Verbrennungsmotor fast täglich infrage gestellt wird, obwohl es bisher keine vergleichbare und konkurrenzfähige Alternative gibt, spielen die Emissionen eine übergeordnete Rolle in der Fahrzeug- bzw. Motorenentwicklung. Durch die steigende Mobilität in den "Entwicklungsländern", sowie durch die immer weiterwachsende Weltbevölkerung, zeigt der Trend der in Zukunft gefahrenen Kilometer stark nach oben. Um die aktuelle Lebensqualität, hinsichtlich Luftqualität auch in Zukunft beibehalten zu können, wurden die zulässigen Grenzwerte für die Schadstoffe im Abgas, in den letzten Jahren stark reduziert. Mit Inkrafttreten der Abgasnorm EURO VI mussten insbesondere im Nutzfahrzeugbereich, neue Systeme entwickelt werden, um die Grenzwerte einhalten zu können. Auf diese Systeme wird im Kapitel "3.2 Abgasnachbehandlung von Euro VI Dieselmotoren" näher eingegangen. Nur mit innermotorischen Maßnahmen wäre es nicht möglich die aktuellen Grenzwerte einzuhalten.

Für manche Befürworter des Verbrennungsmotors sind Fahrzeuge mit EURO VI Technologie bereits "Luftreiniger", was so viel bedeutet, dass die Luft aus dem Auspuff bis auf das CO₂, was ja ein Produkt der vollständigen Verbrennung ist, sauberer als die Umgebungsluft ist. Für Gegner steht hingegen fest, dass die modernen EURO VI Fahrzeuge die Grenzwerte nur unter bestimmten Standardbedingungen einhalten und im realen Straßenverkehr deutlich über diesen Werten liegen. Diese Arbeit wird unter anderem zeigen, wo sich das Emissionsniveau solcher Fahrzeuge tatsächlich befindet. Dafür wurden mit drei verschiedenen Versuchsfahrzeugen (siehe Kapitel 4), sowohl Messungen unter Laborbedingungen am Rollenprüfstand sowie im realitätsnahen Straßenbetrieb durchgeführt (Kapitel 5)

Des Weiteren stellt sich die Frage wie gut der Schadstoffausstoß von schweren Euro VI Nutzfahrzeugen in der virtuellen Welt simuliert werden kann. Um diese Frage beantworten zu können, wurde in Kapitel 6 ein Modell erstellt, welches mit den aus der Messung gewonnen Werten bedatet wurde. Anhand der Simulation einzelner Fahrzeuge, können dann die Emissionen für Verkehrsmodelle erstellt werden.

2 Aufgabenstellung

Die Umweltbelastung durch schädliche Stickoxide und andere Schadstoffe, stellt ein großes Problem dar. Betrachtet man den Straßenverkehr, gehören Dieselfahrzeuge zu den Hauptverursachern dieser Umweltbelastung. Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung von Emissionsfaktoren von schweren Euro VI Nutzfahrzeugen. Um etwaige Abschaltvorrichtungen zur Schadstoffreduzierung zu erkennen, als auch zur Kalibrierung mobiler Abgasmessvorrichtungen, sollen die Fahrzeuge sowohl am Rollenprüfstand als auch im realen Straßenverkehr vermessen werden. Bei der Auswahl der Versuchsfahrzeuge sind unterschiedliche Methoden zur Stickoxid Reduzierung zu berücksichtigen. Nach Abschluss der Messungen ist anhand der gewonnenen Messdaten ein Simulationsmodell zu erstellen. In diesem Modell ist die gesamte Abgasanlage, inklusive der Abgastemperaturen abzubilden, wobei die Konvertierungsraten des SCR-Katalysators in einem Kennfeld hinterlegt sind. Durch einen Abgleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten ist dieses Modell zu bewerten bzw. zu verbessern.

3 Theoretische Grundlagen

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen zur Abgasnachbehandlung von Euro VI Dieselmotoren, sowie über die aktuelle Abgasgesetzgebung von schweren Nutzfahrzeugen. Des Weiteren werden Methoden zur Emissionsmessung, sowohl am Rollenprüfstand als auch auf der Straße näher beschrieben.

3.1 Abgasgesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge

Seit 31.12.2012 ist zur Erlangung einer allgemeinen Betriebserlaubnis (Typprüfung) die Erfüllung der Abgasnorm Euro VI erforderlich. Ab 31.12.2013 mussten alle neu zugelassenen schweren Nutzfahrzeuge (SNF) diese Abgasnorm erfüllen (Serienprüfung). Die Grenzwerte der einzelnen Schadstoffe sind in Tabelle 11 dargestellt [16].

Tabelle 11: Emissionsgrenzwerte für Euro VI LKW

	Euro VI	
	EG 582/2011 Anhang XV Diesel-Fzg	EG 582/2011 Anhang XV Diesel-Fzg
Zyklus	WHSC	WHTC
	Grenzwert [g/kWh]	
CO	1,5	4
THC	0,13	0,16
NOx	0,4	0,46
NH ₃ [ppm]	10	10
Partikelmasse	0,01	0,01
Partikelanzahl [Stk./kWh]	8x10 ¹¹	6x10 ¹¹

Die Typprüfung für SNF erfolgt nicht mehr ausschließlich am Motorprüfstand. Mit Einzug der Abgasnorm EURO VI müssen nun auch Abgaswerte auf der Straße also im realen Verkehr (RDE) eingehalten werden. Am Motorprüfstand werden als Prüfzyklen ein stationärer Zyklus, der sogenannte "World Harmonized Stationary Cycle" (WHSC) und ein dynamischer Zyklus, der "World Harmonized Transient Cycle" (WHTC) vorgegeben. Letzterer besteht aus zwei gleichen Stufen, wobei die erste einen Kaltstart darstellt. In Abbildung 7 ist das Motormoment und die Motordrehzahl über der Zeit für eine Phase des WHTC dargestellt. Die Lastanteile stellen einen Stadt-, Überland- sowie Autobahnanteil dar. Der Stadtanteil ist mit 50% doppelt so schwer gewichtet, als die restlichen Anteile. Für genauere Angaben bzw. Details zur Typprüfung wird auf [16] verwiesen.

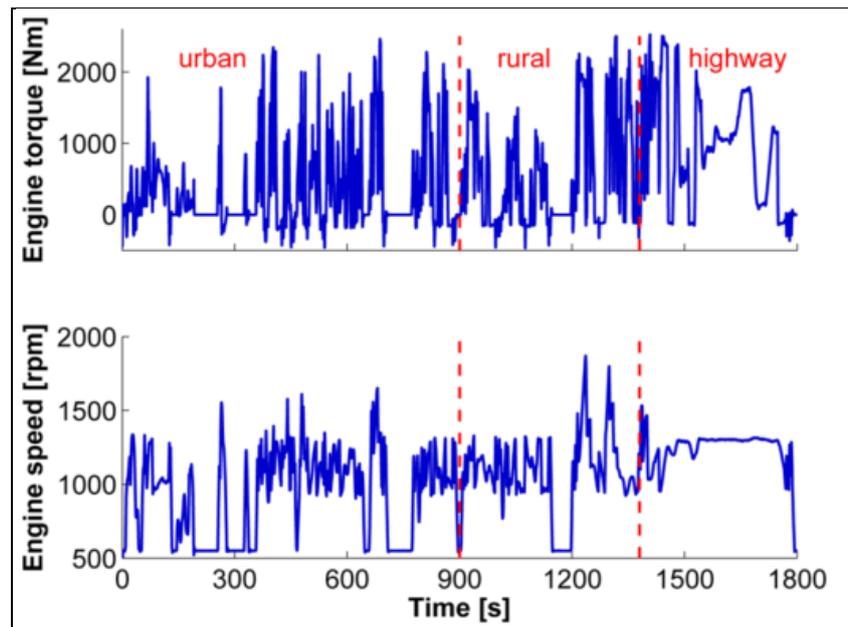


Abbildung 7: Motormoment (oben) und Motordrehzahl (unten) für eine Phase des WHTC [17]

Für die Überprüfung der Real Drive Emissions müssen bestimmte Bedingungen erfüllt werden, folgend werden die wichtigsten erläutert.

- Beladung

Die Beladung muss 50-60% der Nutzlast des Fahrzeuges entsprechen. Dieser Wert wurde mittels Statistiken ermittelt.

- Umgebungsbedingungen

Der Atmosphärendruck darf 82,5kPa nicht unterschreiten. Die Umgebungstemperatur muss größer oder gleich -7°C sein und darf den Wert nach Gleichung (3-1) nicht überschreiten.

$$T_U = -0,4514 * (101,3 - pb) + 311 \quad (3-1)$$

Wobei T_U die Umgebungstemperatur in [K] und pb den Atmosphärendruck in [kPa] darstellt.

- Kühlmitteltemperatur

Für den Test muss der Motor warm sein. Das ist dann der Fall, wenn die Kühlmitteltemperatur das erste Mal die 70°C erreicht, oder sie sich für 5 min stabilisiert hat ($\pm 2^{\circ}$).

- Streckenvoraussetzungen

Je nach Gewichtsklasse gelten unterschiedliche Anforderungen an die Streckenführung. In Tabelle 12 sind die erlaubten Stadt-, Überland- und Autobahnanteile dargestellt. Wobei es sich bei der Aufteilung um zeitliche Anteile handelt.

Tabelle 12: Zeitanteile für eine gesetzeskonforme Messung

	Stadt	Überland	Autobahn
N1	45%	25%	30%
N2	45%	25%	30%
N3	20%	25%	55%

Für die in Tabelle 12 angeführten Werte ist eine Abweichung von +/- 5% erlaubt.

Einen Stadtanteil kennzeichnet eine Geschwindigkeit von 0-50 km/h, eine Geschwindigkeit zwischen 50 und 75 km/h zählt zum Überlandanteil und Geschwindigkeiten über 75 km/h zum Autobahnanteil.

- Abgasgrenzwerte

Für die Auswertung und Beurteilung der RDE-Messdaten gelten nicht dieselben Grenzwerte wie für den WHTC bzw. WHSC (Tabelle 11). Der Gesetzgeber erlaubt für die gasförmigen Schadstoffe einen um den "conformity factor" höheren Grenzwert. Genauer gesagt muss das 90% kumulierte Perzentil, ermittelt nach dem „Averaging window principle“ [16] geringer sein als das Produkt von WHTC - Grenzwert und "conformity factor". Der maximale erlaubte "conformity factor" für CO, THC und NOx ist 1,5. Die Grenzwerte sind in Tabelle 13 dargestellt.

- Testdauer

Bei einem Test muss zumindest fünfmal die WHTC-Arbeit absolviert werden, oder die fünffache CO₂ Referenzmasse in kg/Zyklus des WHTC produziert werden.

Die Grenzwerte müssen bis zu einer Laufleistung von 700.000km oder sieben Jahre nachgewiesen werden können. Für weitere Details wird auf [16] verwiesen.

Tabelle 13: Grenzwerte bei einem ISC-konformen Test

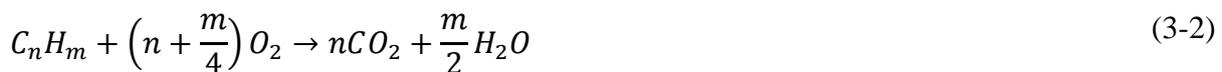
	ISC-Grenzwerte [g/kWh]
CO	6,00
HC	0,24
NOx	0,69

3.2 Abgasnachbehandlung von Euro VI Dieselmotoren

Aus Wirkungsgradgründen werden Dieselmotoren bekanntermaßen mit Luftüberschuss ($\lambda > 1$) betrieben. Deshalb kann der beim Ottomotor eingesetzte 3-Wege Katalysator zur NO_x -Reduktion nicht verwendet werden, weil die HC und CO Emissionen anstatt mit NO_x , mit dem Restsauerstoff im Abgas reagieren würden. Beim Dieselmotor kommen die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Methoden zur Abgasnachbehandlung zum Einsatz.

3.2.1 Diesel – Oxidationskatalysator (DOC)

Die Beseitigung der HC und CO Emissionen erfolgt entweder mit einem Oxidationskatalysator, oder mittels beschichteten Dieselpartikelfilter (DPF). Dabei oxidieren die HC Emissionen mit dem Restsauerstoff im Abgas zu CO_2 und H_2O (3-2) bzw. CO zu CO_2 (3-3).



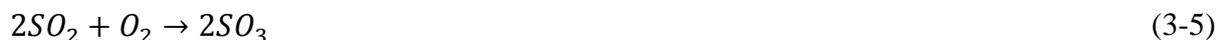
Durch Oxidation der Kohlenwasserstoffe wird auch die Partikelmasse um 15-30 Prozent reduziert, da die im Dieselmotor erzeugten Partikeln zum Teil aus diesen Kohlenwasserstoffen bestehen.

Ein weiterer wesentlicher Teil des DOC ist die in (3-4) dargestellte Oxidation von NO zu NO_2 .



Stickstoffdioxid kann wirksam zur Regeneration von Dieselpartikelfiltern (DPF) verwendet werden. Damit erfolgt der Rußabbrand bereits bei Temperaturen von 300...450°C. Des Weiteren wird NO_2 bei der SCR-Katalysation von NO_x benötigt, darauf wird in Kapitel 3.2.3 näher eingegangen. Ein zu hoher Anteil an NO_2 sollte jedoch vermieden werden, da NO_2 gesundheitsschädlicher als NO ist.[1]

Es laufen jedoch auch kontraproduktive Reaktionen im DOC ab. Wie zum Beispiel die Oxidation von Schwefeldioxid (SO_2) zu Schwefeltrioxid (SO_3) mit der anschließenden Bildung von Schwefelsäure (H_2SO_4) ((3-5) bzw. (3-6)).



Kühlen die Abgase, zum Beispiel durch Kontakt mit der Umgebungsluft ab, verbindet sich das gasförmige H_2SO_4 mit Wassermolekülen und es kommt zur Sulfatbildung. Dies erhöht die Partikelemissionen. Infolge des in Europa gesetzlich limitierten Schwefelgehalts von 10ppm bei Dieselkraftstoffen, ist dies eher in Länder mit hohem Schwefelanteil im Kraftstoff von Bedeutung. [2]

3.2.2 Dieselpartikelfilter (DPF)

Die vom Dieselmotor emittierten Partikel werden mittels DPF aus dem Abgas entfernt. In diesem Kapitel wird nur auf den geschlossenen DPF näher eingegangen, es wird aber darauf hingewiesen, dass es auch offene Partikelfilter sprich sogenannte Partikelkatalysatoren gibt. Der Aufbau eines Partikelfilters ist in Abbildung 8 dargestellt. Grundsätzlich besteht er aus

einer Vielzahl von aneinander liegenden Kanälen, wobei die nebeneinanderliegenden jeweils an den gegenüberliegenden Seiten verschlossen sind. Als Materialien werden meist Siliziumcarbid aber auch Cordierit oder Sintermetalle verwendet.

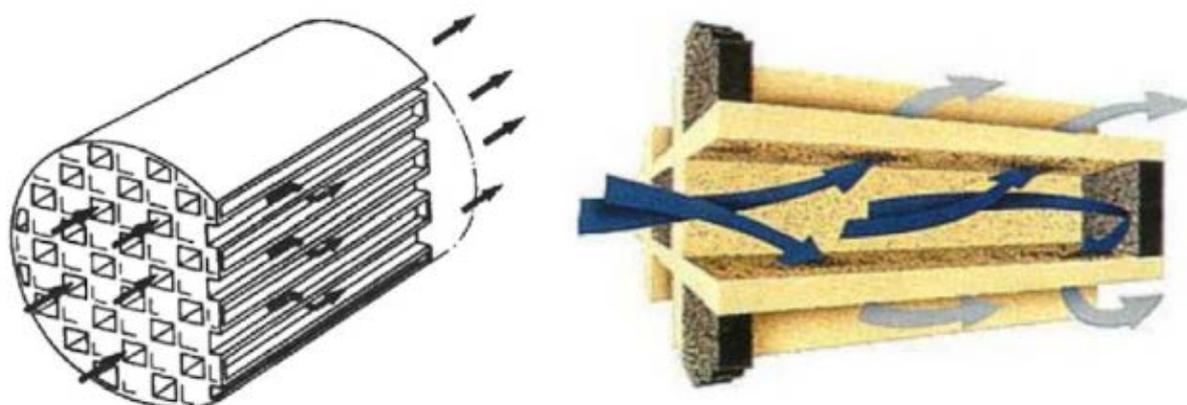


Abbildung 8: Aufbau eines Partikelfilter [3]

In Abbildung 9 werden die Ablagerungen in einen DPF schematisch dargestellt. Zuerst erfolgt die Filterung aufgrund von Diffusion und Anlagerung von Partikeln (Tiefenfilterung). Mit der Zeit bildet sich eine Rußschicht auf der Oberfläche der Kanäle welche eine sehr effiziente Filterung (Oberflächenfilterung) der Partikel bewirkt. Einen Einfluss auf den Verlauf der Filterung hat der Porendurchmesser. Er liegt bei keramisch monolithischen Filtern zwischen 9 und 35µm. Bei großen Poren (35µm) wird zu Beginn der Filterung etwa nur die Hälfte der Partikel zurückgehalten, Filter mit kleineren Poren haben hingegen schon zu Beginn einen relativ guten Rückhaltegrad, jedoch ist dann die Ablagerung in den Poren gering. [3]

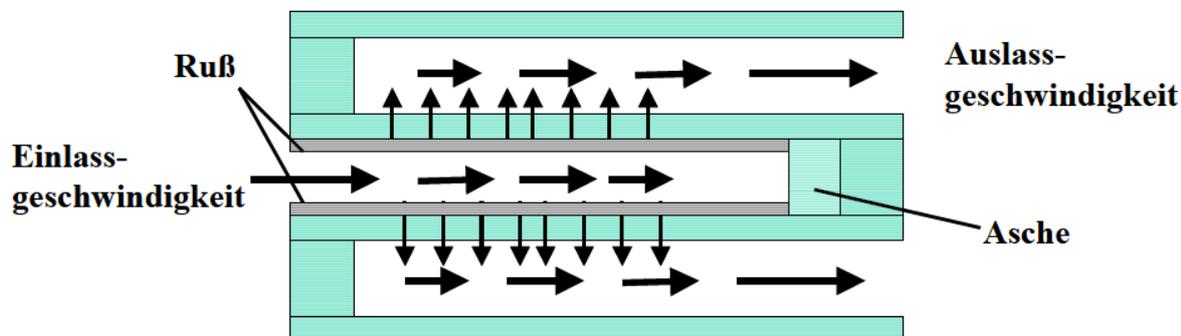


Abbildung 9: Ablagerungen in einem DPF [4]

Durch das ständige einlagern der Partikel verengt sich der Strömungsquerschnitt im Filter was zur Folge hat, dass der Abgasgedruck ansteigt. Dies wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad und auf das Beschleunigungsverhalten des Motors aus. Bei zu langem Betrieb mit erhöhtem Abgasgedruck kann es auch zu Motorschäden kommen. Die Rußabbrandtemperatur liegt bei über 550°C, so hohe Temperaturen erreicht das Abgas im realen Fahrbetrieb nur selten. Um den Rußabbrand trotzdem zeitgerecht zu ermöglichen, muss entweder die Abgastemperatur erhöht werden oder die Rußzündtemperatur gesenkt werden. Dazu gibt es folgende Möglichkeiten:

- Beimischung von Additiven zum Kraftstoff

Durch Beimischung von Metallen wie Platin, Eisen oder Kupfer wird die Rußzündtemperatur auf ca. 300°C gesenkt. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass die durch die verbrannten Additive entstandene Asche sich im Filter ablagert, dies führt zu einer kürzeren Lebensdauer des DPF.

- Katalytische Beschichtung des Filters

Sind die Filterwände katalytisch beschichtet kann die Zündtemperatur auf 400°C gesenkt werden. Bei dieser Methode muss die benötigte Abgastemperatur länger zu Verfügung stehen, da die Regeneration langsamer abläuft.

- Kontinuierliche Regeneration mit NO₂

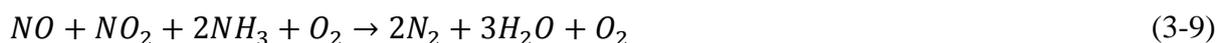
Das hierzu benötigte NO₂ wird in einem zuvor geschalteten Oxidationskatalysator oder direkt im Filter, falls dieser katalytisch beschichtet ist umgewandelt (3-4). Dieses NO₂ reagiert ab ca. 230°C mit dem Ruß und bildet Kohlendioxid und Stickoxide (3-7) bzw. (3-8).



Bei dieser Variante ergibt sich jedoch ein stark erhöhter NO₂ Anteil an den NO_x Emissionen. [5]

3.2.3 Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden (SCR)

Die im Abgas enthaltenen Stickoxide befinden sich im metastabilen Zustand, d.h. es kommt zu keiner Rückreaktion zu N₂ und O₂. Für einen raschen Zerfall der Stickoxide in N₂ und O₂ müsste die Aktivierungsenergie dementsprechend gesenkt werden. Katalytisch ist dies bisher nicht möglich [7]. Man benötigt daher einen zusätzlichen Reaktionspartner (Reduktionsmittel) zur Reduktion der Stickoxide. Die selektive katalytische Reaktion beruht also darauf, dass ein "Reduktionsmittel" mit Beisein von Sauerstoff selektiv NO_x reduziert. Selektiv bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Oxidation des Reduktionsmittels nicht mit dem in molekularer Form vorhandenen Sauerstoff erfolgt sondern mit den Sauerstoff der Stickoxide [1]. Ideal wäre ein Reduktionsmittel welches sowieso bei der dieselmotorischen Verbrennung entsteht, wie z.B. Kohlenmonoxid CO, jedoch reicht die Selektivität hierbei noch nicht aus um die geforderten Emissionsgrenzwerte zu erreichen. Bei heutigen technisch relevanten Anwendungen von SCR hat sich Ammoniak NH₃ als Reduktionsmittel bewährt (3-9).



Wie in (3-9) zu sehen ist sollten die Anteile von NO und NO₂ im Abgas im Verhältnis 1:1 sein. Dies kann durch eine geeignete Auslegung der Vorkatalysation mittels DOC erfolgen. Ist im Abgasstrom nur NO und kein NO₂ enthalten, so kommt es zu folgender Reaktion (3-10).



Diese Reaktion wird oft auch als Standardreaktion bezeichnet und läuft im Vergleich zu (3-9) langsamer ab. Ist das Verhältnis von NO₂ zu NO größer als eins, herrscht also NO₂ Überschuss dann läuft die Reaktion noch langsamer ab und es kommt zu NH₃-Verlusten (3-11).



Neben den zuvor genannten Basisreaktionen ((3-9) - (3-11)) kann es auch zu unerwünschten Reaktionen kommen. Diese werden in N₂O-Bildung, NO-Bildung und NH₃-Verlust gegliedert. Alle diese unerwünschten Reaktionen haben eine fehlende Reduktion und somit eine Verschlechterung der Konvertierung zu Folge. In dieser Arbeit wird darauf jedoch nicht

näher eingegangen. [6]

Abbildung 10 wurde anhand von Messdaten erstellt und zeigt die Konvertierungsrate über der Temperatur, zu sehen ist, dass der Katalysator erst ab einer gewissen Temperatur (ca. 200°C) effizient arbeitet. Bei zu hohen Temperaturen kommt es zur Reduktion des Reduktionsmittel mit Luftsauerstoff, wodurch die Konvertierungsrate absinkt.

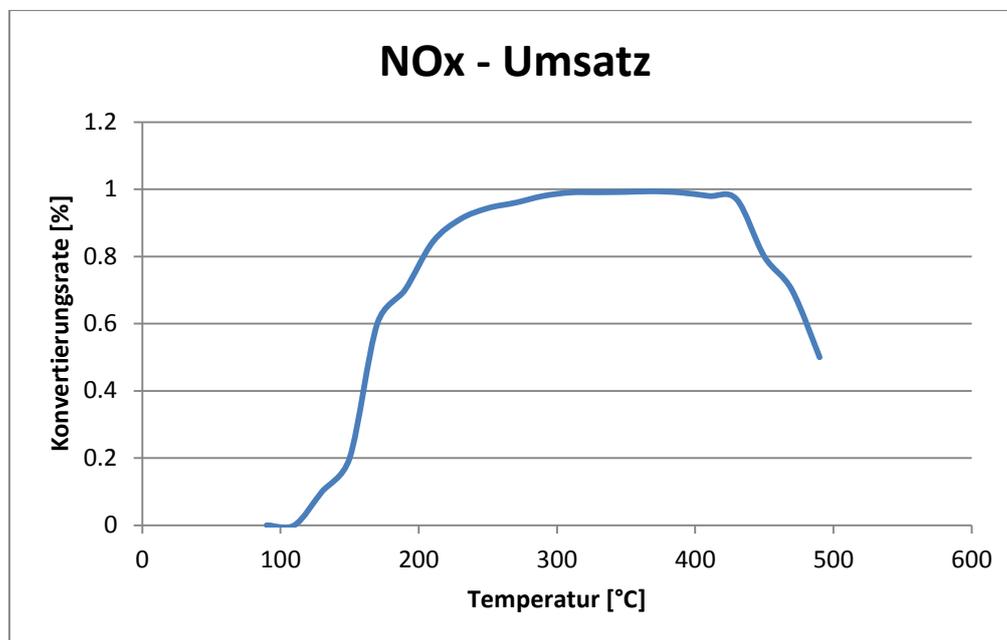


Abbildung 10: NOx - Umsatz mit SCR – Katalysator

Für die Anwendung im Fahrzeug wird das benötigte NH₃ aus Harnstoff erzeugt. Genauer gesagt aus einer wässrigen Harnstofflösung bestehend aus 32,5 Prozent reinem Harnstoff und 67,5 Prozent deionisiertem Wasser, auch als AdBlue bekannt. Da aufgrund der Toxizität von NH₃ der Transport in den benötigten Mengen bedenklich ist. Damit NH₃ bedarfsgerecht vorliegt sind die in Abbildung 11 dargestellten Verfahrensschritte notwendig. [7]

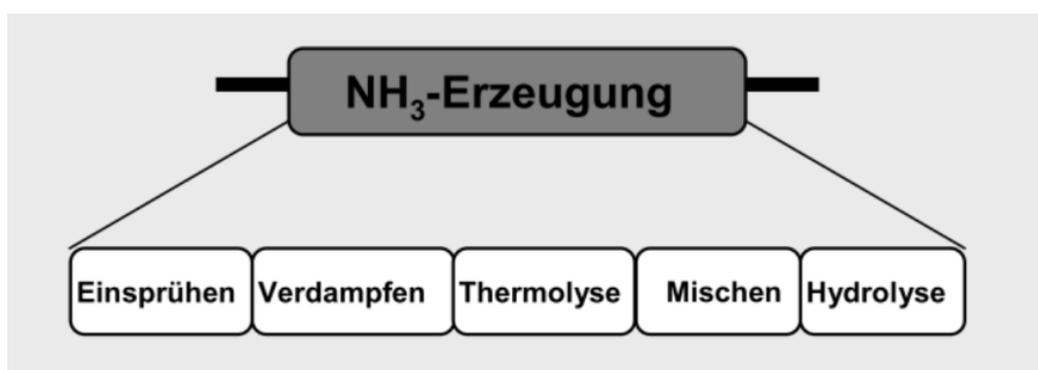
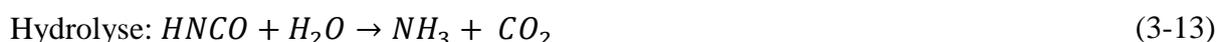


Abbildung 11: Verfahrensschritte der NH₃ Erzeugung [7]

Zur NH₃ Bildung kommt es durch die folgenden zwei Reaktionsschritte:



Bei der Thermolyse (3-12) wird der Harnstoff durch Erhitzung auf Temperaturen von 150°C und höher in Ammoniak und Isocyanäure umgewandelt. Im nächsten Schritt (3-13) reagiert die Isocyanäure mit Wasser und bildet ebenfalls Ammoniak sowie Kohlendioxid. Diese

Reaktion läuft bei Temperaturen unter 250°C ohne Katalysator langsam ab, darum ist bei Anwendungen mit niedrigen Temperaturen ein Hydrolysekatalysator in den SCR-Kat integriert bzw. vorgeschaltet [8]. HNCO ist sehr reaktiv weshalb es neben der Reaktion mit Wasser auch komplexere Moleküle bilden kann. Diese lagern sich dann als Feststoffe ab. Solch unerwünschte Reaktionsbedingungen treten vor allem in Bereichen, an denen sich Flüssigkeit sammelt, auf. [7]

3.2.3.1 Dosiersystem

Grundlage für ein funktionierendes SCR-System ist eine präzise und zuverlässige Dosierung der Harnstoff - Wasser - Lösung bei allen Betriebsbedingungen. Das von der Firma Bosch entwickelte Denoxtronic System ist in Abbildung 12 dargestellt.

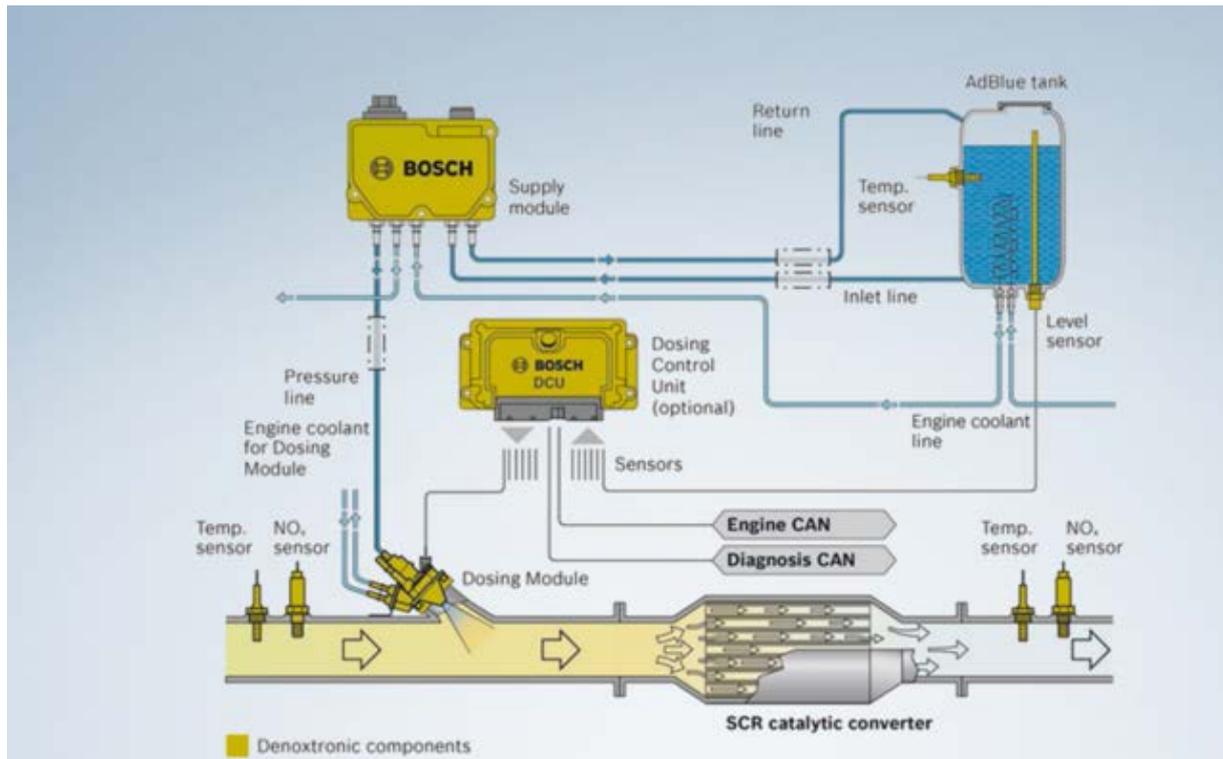


Abbildung 12: Denoxtronic System [9]

Hierbei saugt ein Fördermodul das AdBlue aus dem Tank und bringt es auf Betriebsdruck. Das Dosiermodul übernimmt die richtige Mengenzugabe und sorgt für eine optimale Zerstäubung und Verteilung, lt. [10] ist die Verteilungsgüte des Reduktionsmittels am Eintritt des SCR-Katalysators, die wichtigste Größe, welche mit dem Einspritzsystem beeinflusst wird. Bei älteren Systemen erfolgte die Dosierung mit Luftunterstützung, was zwar hinsichtlich der Tropfengröße ein Vorteil war angesichts der wesentlich höheren Systemkomplexität jedoch nicht weiterverfolgt wurde. Bei Systemen ohne Luftunterstützung dauert die Verdampfung aufgrund der größeren Tröpfchen länger, (siehe Abbildung 13) das kann zu dem Problem führen, dass der Tropfen den SCR-KAT oder ein anderes Bauteil erreicht bevor er verdampft ist. Deshalb kommen bei Systemen ohne Luftunterstützung nach der Dosierung teilweise Einbauten zum Einsatz, welche die Tropfen zerkleinern. [7]

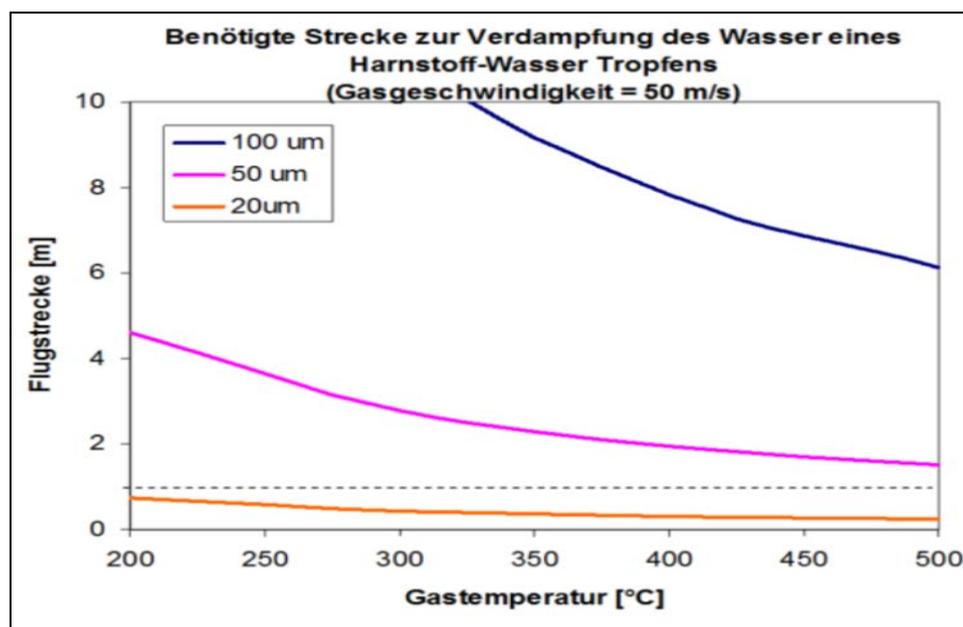


Abbildung 13: Benötigte Strecke zur Verdampfung des Wassers eines Harnstoff-Wasser Tropfens [7]

Die genauen Dosiermengen und Zeitpunkte werden vom Dosiersteuergerät auf Basis einer vorgegebenen Dosierstrategie berechnet.

3.2.3.2 Dosierstrategie

Der beste NO_x Umsatz wird mit voll beladenen SCR-Katalysator erreicht, am ausgeprägtesten ist dieses Verhalten bei niedrigen Temperaturen. Jedoch herrscht dabei auch die größte Gefahr, dass es bei einem Temperaturanstieg zu einem NH₃ - Schlupf kommt [10], weil ja die Speicherfähigkeit nach unten geht Ziel der Dosierstrategie ist also eine optimierte NO_x - Reduktion, ohne dass dabei ein NH₃ - Schlupf entsteht.

Eine wichtige Applikationsgröße ist das molare Verhältnis von dosierten NH₃ zum NO_x im Abgas.

$$\alpha = \frac{n_{NH_3}}{n_{NO_x}} \quad (3-14)$$

Unter Ausschluss von NH₃ - Schlupf, NH₃ - Oxidation und etwaigen unerwünschten Nebenreaktionen ist α proportional zur NO_x-Reduktionsrate. Bei einem $\alpha > 1$ kommt es je nach Betriebszustand zu einer NH₃ Einspeicherung oder zu einem NH₃ Schlupf. Da diese idealen Betriebsbedingungen praktisch nicht vorkommen behilft man sich mit einer weiteren Größe, dem Selektivitätsverhältnis β . (3-15). Es entspricht dem Verhältnis von eingesetzter NH₃ - Menge zur umgesetzten Stickoxidmenge.

$$\beta = \frac{n_{NH_3}}{n_{NO_{x_{ein}}} - n_{NO_{x_{aus}}}} \quad (3-15)$$

Die im folgenden Text beschriebene Dosierstrategie, beruht auf einem stationären Modell welches dynamisch angepasst wird (siehe Abbildung 14).

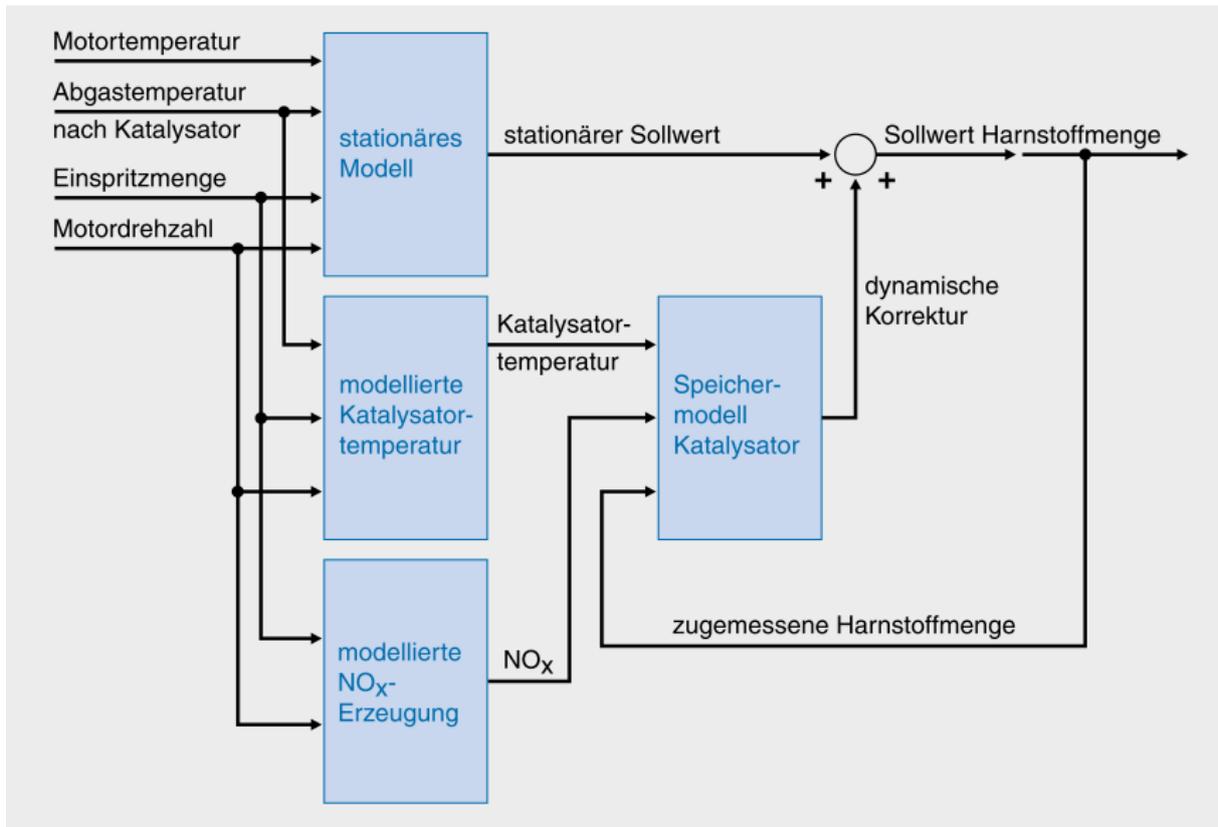


Abbildung 14: Blockschaltbild einer SCR-Dosierstrategie [1]

Für das stationäre Basismodell ist die zu dosierende AdBlue Menge als Funktion von Motordrehzahl und Einspritzmenge in einem Kennfeld hinterlegt. Damit die Alterung berücksichtigt wird fließen Korrekturgrößen wie z.B. Betriebsstunden, mit ein. In einem zweiten Kennfeld ist die stationäre Katalysatortemperatur abgelegt. Welche zur Berechnung des Korrekturfaktors für die Reduktionsmitteldosierung bei einem Wechsel zwischen zwei stationären Betriebspunkten benötigt wird. Dieser Korrekturfaktor, welcher in einem weiteren Kennfeld abgelegt ist, ergibt sich aus der Differenz zwischen stationärer Katalysatortemperatur und der Abgastemperatur nach dem SCR-Modul.[1]

Mit diesem stationären Basismodell kann der schon zuvor besprochene Einfluss des NH_3 Speichervermögens nicht abgebildet werden, was wie bereits zuvor erwähnt, zu einem NH_3 - Schlupf bei steigenden Abgastemperaturen führt. Um diesen Effekt zu beheben, werden das NO_x vor SCR (Roh) und die Katalysatortemperatur mittels Kennfelder und Verzögerungsglieder bestmöglich bestimmt. In einem SCR-Kennfeld sind die Konvertierungsraten als Funktion von Temperatur und NH_3 - Speicherstand abgelegt. Multipliziert man die Konvertierungsrate mit vorhandenem NO_x -Roh erhält man die Menge an umgesetztem Reduktionsmittel. Die Differenz aus zugeführtem und umgesetztem Reduktionsmittel gibt Auskunft über die im Katalysator gespeicherte NH_3 - Menge, welche ständig berechnet wird. Abhängig von einer temperaturabhängigen Schwelle, wird bei Überschreitung der eingespeicherten Ammoniak Menge die Dosierung reduziert um einen NH_3 - Schlupf zu vermeiden bzw. bei Unterschreitung erhöht um die NO_x Konvertierung zu optimieren.[1] Es sei noch gesagt, dass sich die Konvertierung bei höheren Speicherstand verbessert.

3.2.4 Abgasschalldämpfer

Mit Einführung der Abgasgesetzgebung erhöhten sich die Aufgaben des Schalldämpfers. War er zunächst für die Reduzierung übertragener Schallwellen und Druckstöße zuständig, so enthält er mittlerweile die gesamten Komponenten der Abgasnachbehandlung welche in den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.3 zuvor beschrieben wurden.

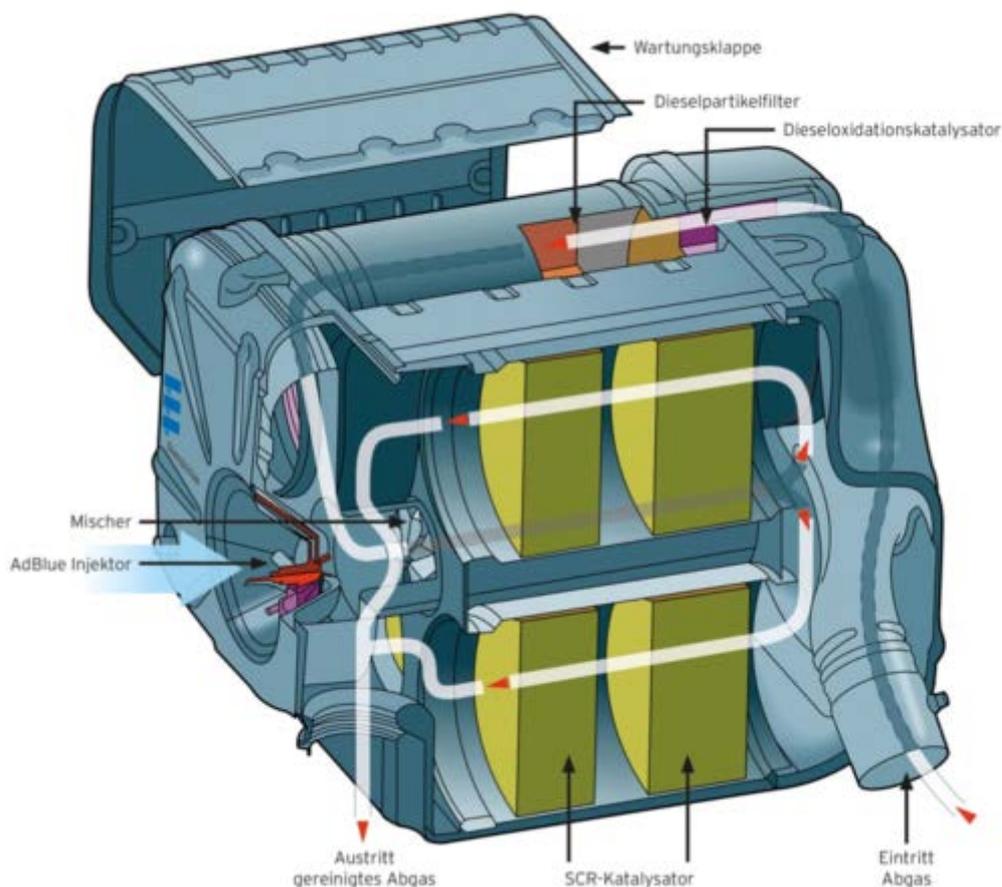


Abbildung 15: Aufbau Abgasschalldämpfer [11]

In Abbildung 15 ist der Aufbau eines Abgasschalldämpfers dargestellt. Die Abgase strömen vom Auslassventil des Motors über Rohre zum Turbolader, von dort aus über ein weiteres Rohr in den Abgasschalldämpfer. Im nächsten Schritt durchströmen die Abgase den DOC und anschließend den DPF. Entlang der Dosierstrecke wird dann das Reduktionsmittel mit dem Abgas vermischt, bevor es durch die SCR-Stufe(n) gelangt. In den meisten Modellen ist der SCR-Stufe noch ein NH_3 Sperrkatalysator nachgeschaltet. Dieser oxidiert etwaiges NH_3 zu N_2 und H_2O . Am Ende gelangen die Abgase über ein Endrohr in die Umgebung.

3.3 Rollenprüfstand

Am Rollenprüfstand (Abbildung 16) können verschiedenste Fahrscenarien unter Laborbedingungen nachgestellt werden. Das Fahrzeug wird mit den Antriebsrädern auf Rollen aufgespannt und am Ende des Auspuffs an die Abgas-Messtechnik angeschlossen. Je nach Prüfstand sind dabei ein oder mehrere angetriebene Achsen möglich. Die Rolle wird über eine Gleichstrommaschine angetrieben bzw. gebremst. Die Bremskraft soll dabei so geregelt werden, dass sie den Fahrwiderständen, des jeweiligen Fahrzeuges, entspricht. Massenträgheiten des Fahrzeuges werden einerseits durch die rotatorische Masse der Rollen sowie durch einen zusätzlich zuschaltbaren Massensatz simuliert. Über das Fahrerleitgerät bekommt der Prüfstandsfahrer die vorgegebene Geschwindigkeit und Steigung angezeigt. [12]

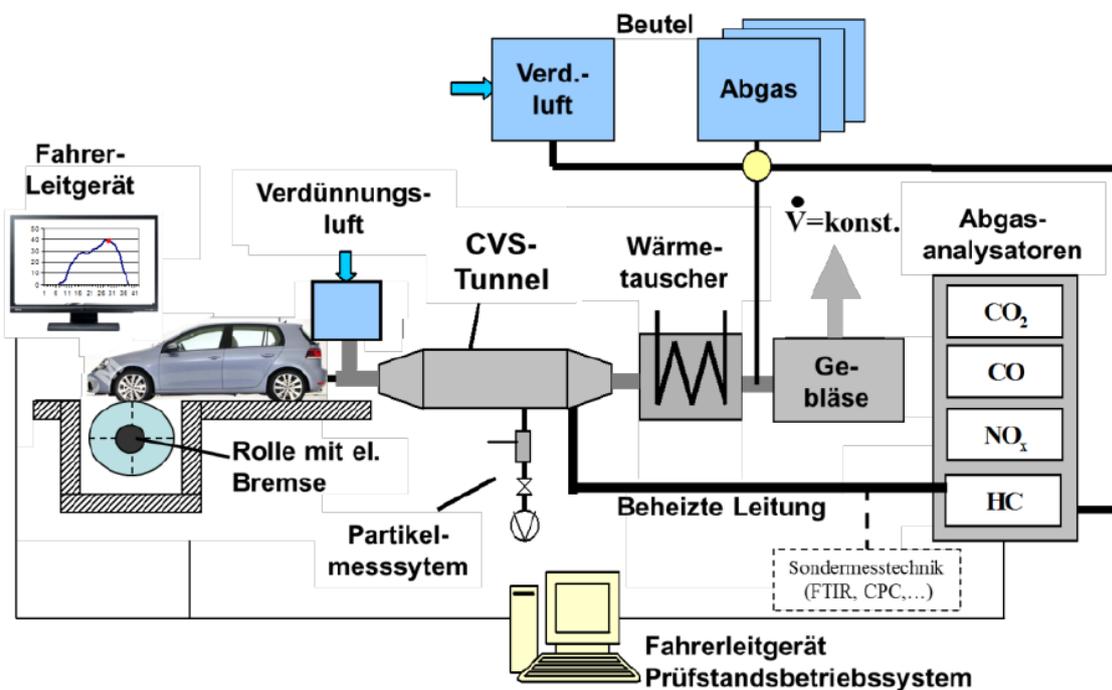


Abbildung 16: Rollenprüfstand mit CVS - Anlage [12]

3.4 Emissionsmesstechnik

Das Einsatzgebiet der Emissionsmesstechnik ist groß, zum einen, wenn es darum geht gesetzlich vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte einzuhalten (Typprüfung), zum anderen werden aus den gemessenen Emissionen wichtige Erkenntnisse für die Motorenentwicklung gewonnen. Des Weiteren bilden Messdaten die Grundlage von Simulationsmodellen und sind somit auch für diesen Bereich unersetzlich. Emissionsmessungen können am Rollenprüfstand, Motorprüfstand und im realen Betrieb auf der Straße durchgeführt werden. Nach Art der Probenentnahme aus dem Abgas unterscheidet man zwischen:

- Vollstromverdünnung
- Teilstromverdünnung
- Unverdünnte Entnahme

3.4.1 CVS- Constant Volume Sampler

Das CVS Verfahren (Abbildung 16) ist eine sehr weit verbreitete und anerkannte Methode zur Emissionsmessung, sowohl im stationären als auch im dynamischen Motorbetrieb. Dabei wird der gesamte Abgasstrom mit gefilterter Umgebungsluft verdünnt. Die Zumischung der Umgebungsluft wird entweder mittels Venturi-Düse oder Roots-Gebläse so geregelt, dass der Gesamtvolumenstrom konstant ist. Aus dem verdünnten Abgasstrom werden kontinuierlich Proben entnommen (Abbildung 17).

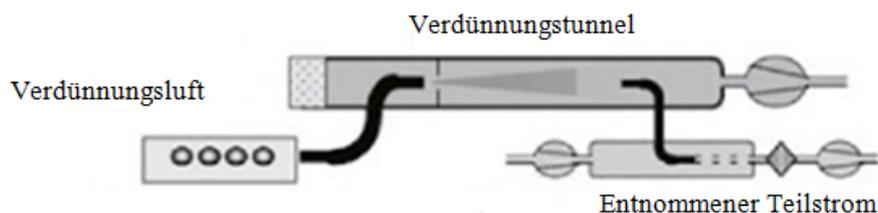


Abbildung 17: Prinzip Vollstromverdünnung [13]

Der Teilstrom der ersten Probe wird zur Erfassung der Partikelmasse über Filterplättchen geleitet. Mit dem zweiten Teilstrom werden die Konzentrationen der gasförmigen Emissionskomponenten (hauptsächlich CO_2 , CO , HC , NO_x) zeitlich aufgelöst gemessen. Dabei wird der verdünnte Teilstrom direkt den Analysatoren zugeführt. Ein weiterer Teilstrom wird einem oder mehreren Abgasbeuteln zugeführt, darin gesammelt und anschließend den Analysatoren zugeführt. Aufgrund des annähernd konstanten Volumenstroms entspricht die Konzentration der Emissionen im Beutel dem Mittelwert der Konzentration im verdünnten Abgas. Die gemessenen Konzentrationen enthalten neben den Schadstoffen des Abgases noch die Schadstoffe der Verdünnungsluft. Um den Messwert um die Hintergrundkonzentration zu bereinigen wird ein weiterer Beutel mit Verdünnungsluft gefüllt und danach analysiert. Die Differenz aus Gesamtkonzentration und Hintergrundkonzentration mit Berücksichtigung des Verdünnungsfaktors stellt dann die vom Fahrzeug emittierten Schadstoffe dar. [13] [12]

3.4.2 PEMS – Portable Emission Measurement System

Für schwere Nutzfahrzeuge ab der Abgasnorm Euro VI (siehe Kap.: 3.1) erfolgt die Überprüfung der Emissionsgrenzwerte nicht nur am Motorprüfstand wie bisher, sondern auch im realen Fahrbetrieb, besser bekannt als RDE (Real Drive Emissions). Um die Emissionen im realen Fahrbetrieb erfassen zu können, kommen speziell entwickelte Onboard Messsysteme sogenannte PEMS – Systeme (Portable Emission Measurement Systems) zum Einsatz. Die für das PEMS – System notwendige Energie wird sinnvollerweise von einer externen Stromquelle, bei SNF einem Stromgenerator, zur Verfügung gestellt, damit das Fahrzeug trotzdem nur die Energie für die Bewegung und die üblichen Nebenaggregate aufbringen muss. Bei SNF kann das PEMS meist im Ladebereich mitgeführt werden (Abbildung 18), dies ist beim PKW und vor allem bei Motorrädern nicht so leicht möglich und erfordert somit spezielle Vorrichtungen.



Abbildung 18: PEMS - Aufbau LKW

Mit diesen Messsystemen können zum einen die gasförmigen Emissionen CO_2 , CO , HC , NO_2 und NO (NO_x), als auch Ruß gemessen werden [12]. Dabei wird jeweils für die gasförmigen Komponenten (Abbildung 19), sowie für die Rußmessung (Abbildung 20), ein Teilstrom aus dem Abgasstrom entnommen und unverdünnt den Analysatoren zugeführt. Zur Ermittlung der Emissionsmassen muss entweder der Abgas-Massenstrom direkt gemessen (Abbildung 20) werden oder man bestimmt ihn über eine Massenbilanz, wobei der Gesamtmotor als abgeschlossenes System betrachtet wird und fordert dabei, dass die Zuströme (Luft und Kraftstoff) gleich groß sein müssen wie der Abgasmassenstrom. [13]

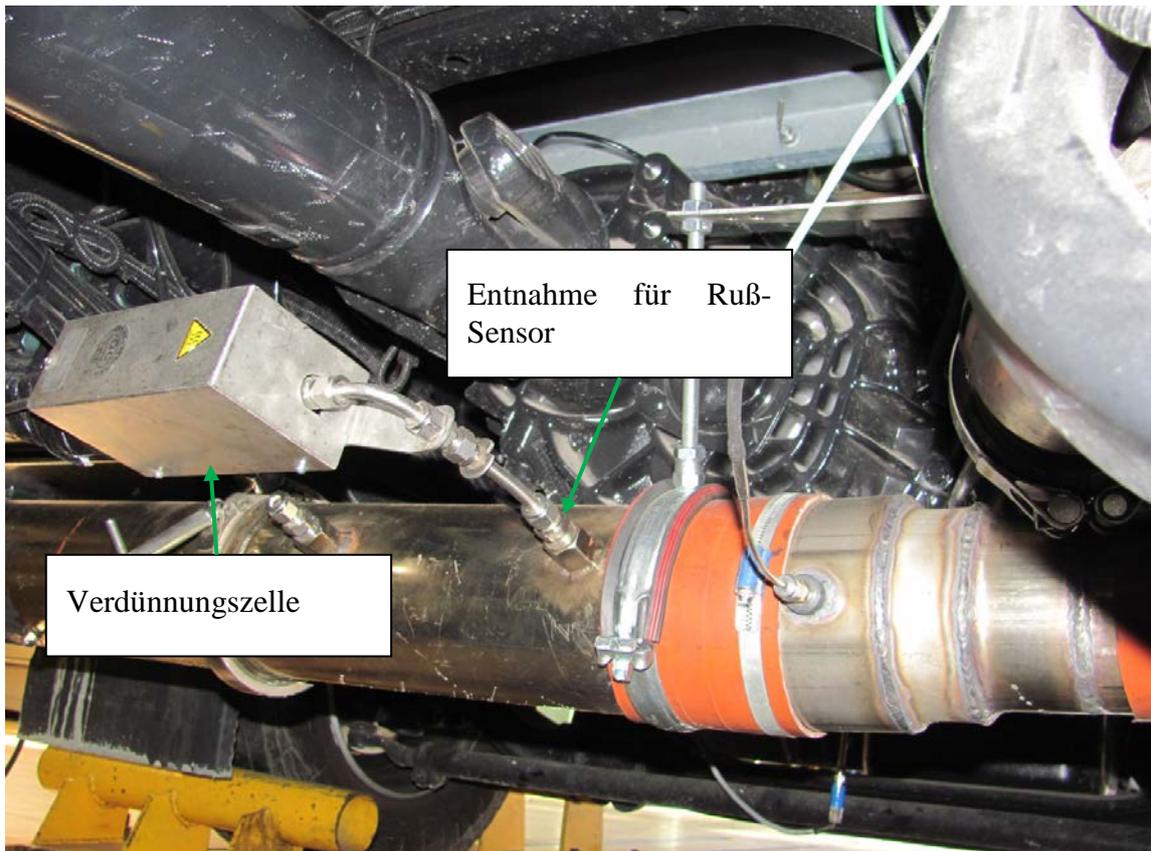


Abbildung 19: Entnahme eines Abgasteilstroms zur Rußmessung

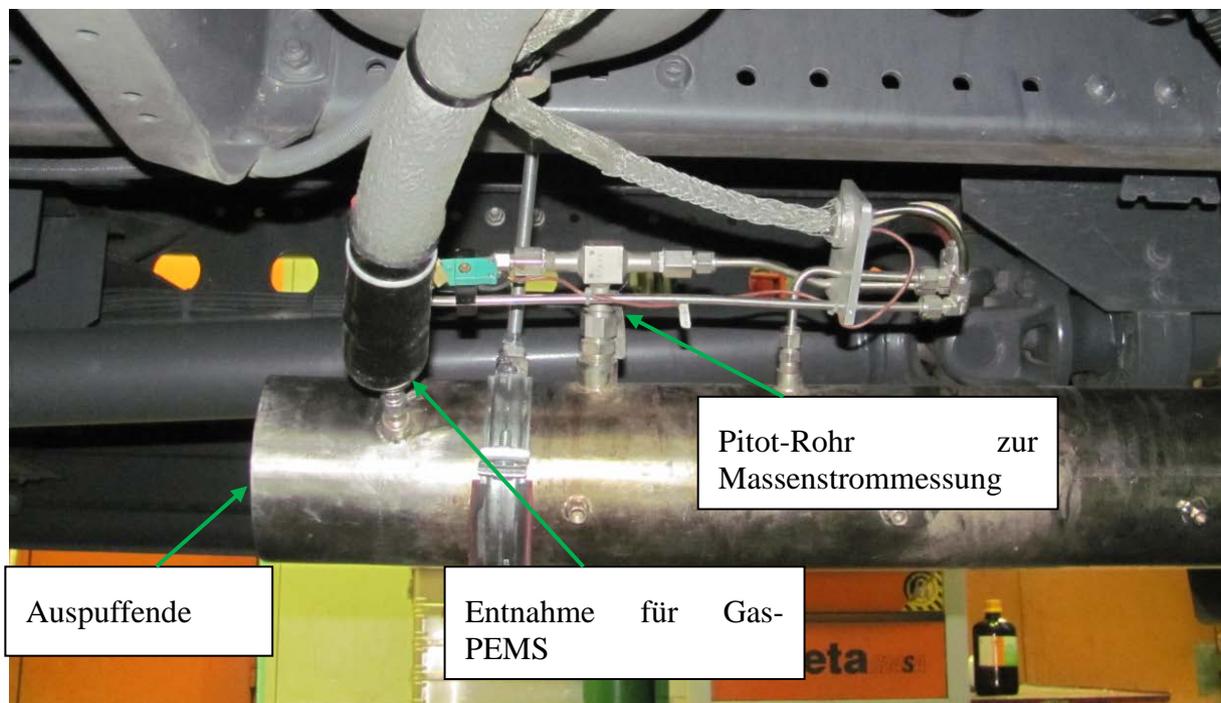


Abbildung 20: Entnahme eines Abgasteilstroms zur Messung der gasförmigen Komponenten.

3.4.3 Methode zur variablen Zeitverschiebung zeitdiskreter Emissionsmassen

Ein wesentlicher Punkt bei der Auswertung der zeitaufgelösten Messdaten einer dynamischen Messung, sowohl im verdünnten Abgas mittels CVS als auch bei der unverdünnten Entnahme (PEMS), ist die richtige Zuordnung der Messdaten zum jeweiligen Motorbetriebspunkt. Dafür wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen eine Methode entwickelt, welche die variablen Gastransportzeiten auf Basis des gemessenen Abgasmassenstroms der Volumina und der Temperaturen im Messsystem berücksichtigt. [14]

3.4.4 Abgasmesssysteme

Abgasanalysatoren ermitteln die Konzentration der zu messenden Gaskomponente, indem sie bestimmte Eigenschaften der Gase nutzen. Die für eine Typprüfung relevanten Messverfahren und Analysatorprinzipien sind genau definiert und werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

3.4.4.1 Nichtdispersiver Infrarot-Analysator (NDIR)

Nichtdispersiver Infrarot-Analysatoren können zur Messung von Gasen mit elektrischem Dipolmoment (CO , CO_2 , C_6H_{14} oder SO_2) eingesetzt werden. NDIR – Analysatoren gibt es in verschiedenen Varianten, sprich mit verschiedenen Detektionstechniken. Wobei Optopneumatische Detektoren, Interferenzfilterphotometer und Gasfilterkorrelation die am häufigsten verwendeten Typen sind. Die Theorie hinter diesen Verfahren beruht darauf, dass die Gase bestimmte Wellenlängen der Infrarotstrahlung absorbieren. Durch Absorption der Strahlungsenergie werden die Moleküle in Bewegung versetzt. In Abbildung 21 ist das Prinzip eines Optopneumatischen NDIR – Analysator dargestellt.

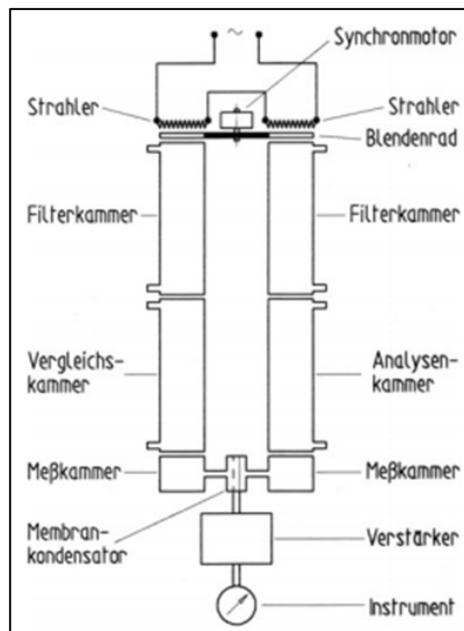


Abbildung 21: Prinzip eines Optopneumatischen NDIR – Analysator [15]

„Zwischen Strahler und Messkammer befinden sich zwei voneinander getrennte und mit Infrarot durchlässigen Fenstern versehene Filterkammern, die für die Wellenlängen von z.B. CO ausgelegt sind. Beide Strahlengänge werden durch ein Blendenrad gleichzeitig periodisch unterbrochen. Befindet sich nun in den beiden Kammern (Vergleichskammer und Analysenkammer) nicht infrarotabsorbierendes Gas, z.B. N_2 , dann gelangt die Strahlung durch beide Kammern mit gleicher Intensität in die Messkammern. Leitet man nun durch die vorgeschaltete Analysenkammer das Messgas, das bezüglich der Konzentration der Messkomponente (CO) untersucht werden soll, so wird dieser Strahlengang je nach der CO -Konzentration mehr oder weniger geschwächt, was eine unterschiedliche Absorption der

Infraroten Strahlung in den beiden Empfängerammern bedingt. Dies hat nun Temperatur und Druckdifferenzen zur Folge, was letztlich in einer periodischen, der Absorption proportionalen Durchbiegung der Metallmembran resultiert. Die Membran bildet die zweite Elektrode eines Membrankondensators. Die periodischen Druckschwankungen werden also umgesetzt in periodische Kapazitätsänderungen des Membrankondensators. Dieser ist über einen Widerstand an Gleichspannung gelegt, was eine Periodizität des Ladestromes zur Folge hat. Die dadurch bedingte Änderung des Spannungsabfalls am Widerstand wird verstärkt und auf ein Anzeige- oder Registrier-Instrument übertragen, dass direkt in Volumenprozenten der Messkomponente (CO) geeicht werden kann.“ [20]. Es sei noch zu erwähnen, dass die NDIR – Analytoren eine starke Querempfindlichkeit gegenüber Wasserdampf haben, deshalb üblicherweise Wasser abscheiden und trocken messen.

3.4.4.2 Nichtdispersiver Ultraviolett-Analysator (NDUV)

NDUV – Analytoren werden zur Messung von Stickoxiden eingesetzt. Bei dieser Methode wird NO und NO₂ simultan gemessen und zu NO_x addiert. Im Unterschied zum zuvor beschriebenen NDIR besitzt der Analysator zwei Strahlungsquellen mit unterschiedlichen Wellenlängen, wobei beide Strahlung im UV-Spektrum emittieren. Zur Messung von NO kommt eine elektrodenlose Entladungslampe (EDL) zum Einsatz, für NO₂ eine UV-LED. Der Vorteil gegenüber einem Chemilumineszenz Detektor (Kapitel 3.4.4.3) liegt in der geringeren Komplexität, da keine weiteren Betriebsgase benötigt werden und eine direkte NO₂ Messung erfolgt. Aus diesem Grund werden NDUV-Analysatoren vorwiegend bei mobilen Messsystemen (PEMS) eingesetzt.[15]

3.4.4.3 Chemilumineszenz Detektor (CLD)

Mit dieser Methode (Abbildung 22) werden hauptsächlich Stickoxide gemessen, dabei nutzt das Verfahren die Fluoreszenzstrahlung die als Folge einer Reaktion entsteht. Zur Messung von NO muss eine Ozon (O₃) Konzentration als Reaktionspartner zu Verfügung gestellt werden. Dadurch laufen verschiedene Reaktionen ab, wobei ein konstanter Anteil von ungefähr 10% des NO zu angeregten NO₂* Molekülen oxidiert (3-16).



Unter Emission von Strahlung (=Chemilumineszenz) fallen diese angeregten NO₂* Moleküle in ihrem Ausgangszustand zurück. Die Intensität der abgegebenen Strahlung, welche gemessen wird, ist proportional zur NO Konzentration. Im Messgas vorkommendes NO₂ muss zuvor mittels Konverter in NO umgewandelt werden. Für die Ermittlung von NO₂ wird die Probe in zwei gleiche Ströme aufgeteilt. In einer Messkammer wird das vorhandene NO gemessen, gleichzeitig wird in einer zweiten Kammer das gesamte NO (inkl. konvertierten NO₂) gemessen. Aus der Differenz ergibt sich dann der NO₂-Anteil an den NO_x.

Außerdem nimmt ein NO₂* Molekül seinen Grundzustand ein, wenn es mit anderen NO₂ Molekülen im Gasgemisch zusammenstößt, jedoch wird in diesem Fall keine Strahlung emittiert. Mit zunehmendem Druck steigt die Wahrscheinlichkeit solcher Zusammenstöße, aufgrund der höheren Gasdichte, an. Chemilumineszenz Detektoren werden darum bei einem Absolutdruck von 5-25mbar betrieben. [15]

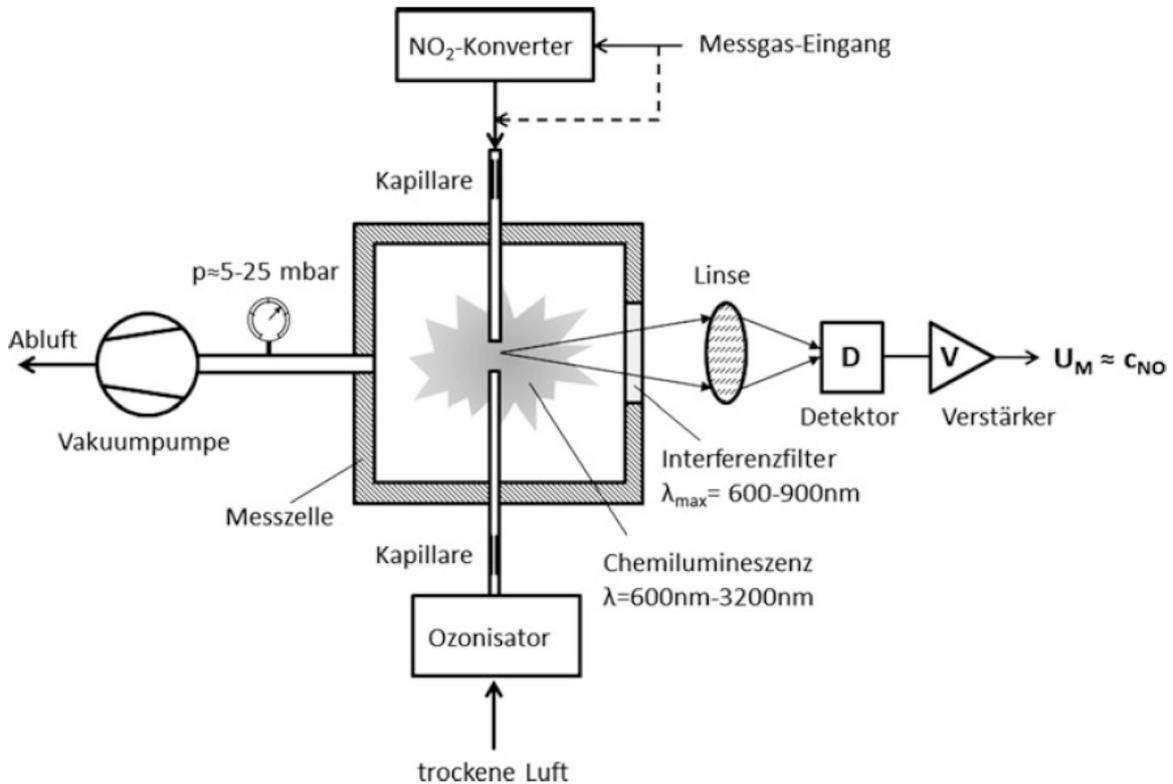


Abbildung 22: Prinzipieller Aufbau eines CLD-Messgerätes zum Nachweis von Stickoxiden (NO_x) [15]

3.4.4.4 Flammenionisationsdetektor (FID)

Der Flammenionisationsdetektor wird zur Messung der HC verwendet. Ein durch kontinuierlichen Unterdruck angesaugtes Messgas wird über eine beheizte Leitung (um Kondensation von HC's zu vermeiden) dem FID zugeführt. Dort wird das Gas mit einer Wasserstoffflamme verbrannt. Im inneren der Flamme entstehen durch cracking CH-Fragmente aus den Kohlenwasserstoffen, welche dann zu CHO-Ionen oxidieren. Die positiv geladenen Ionen werden in einem elektr. Feld von den negativ geladenen getrennt, der dadurch entstehende Strom ist proportional zu den Kohlenwasserstoffen im Messgas (Abbildung 23).

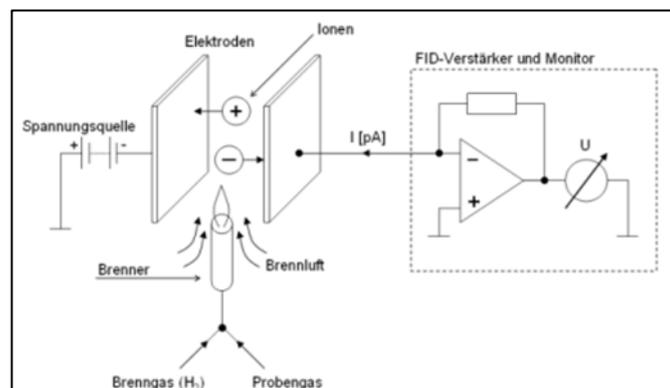


Abbildung 23: Prinzip eines Flammenionisationsdetektors [22]

3.4.4.5 Elektrochemischer O₂ Sensor

In Abbildung 24 ist das Prinzip eines elektrochemischen O₂ Sensors dargestellt. Dieses Messprinzip kommt bei der Messung von O₂ zum Einsatz.

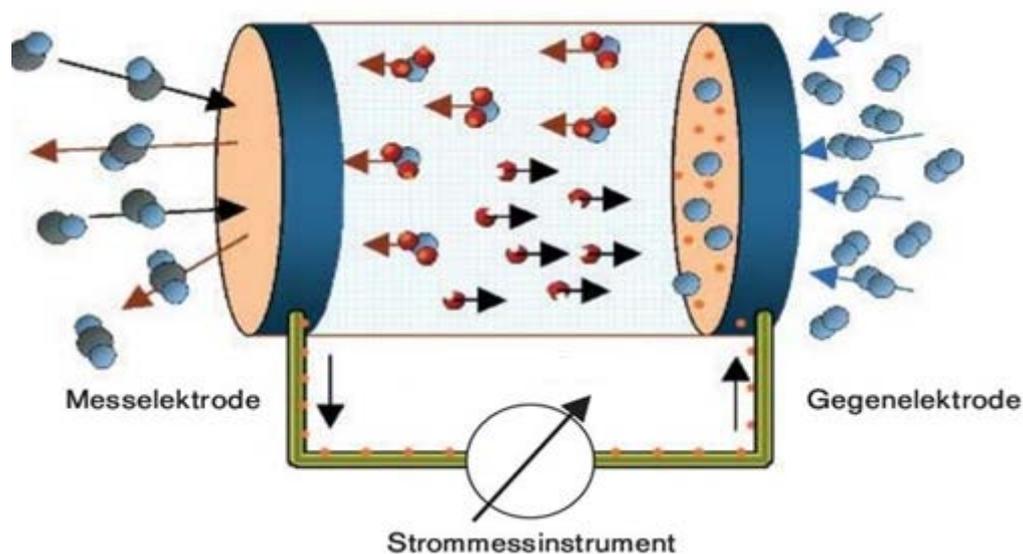


Abbildung 24: Prinzip eines elektrochemischen Sensors

Der Sensor besteht aus zwei katalytisch wirkenden Elektroden, die über einen äußeren Stromkreis miteinander verbunden sind. Zwischen den Elektroden befindet sich ein Elektrolyt. Das zu messende O₂ nimmt Elektronen auf und erzeugt somit einen elektrischen Strom, welcher mit einem geeigneten Amperemeter gemessen werden kann. [23]

3.4.4.6 Gravimetrische Filtermessung

Bei der gravimetrischen Filtermessung wird ein verdünnter Abgasteilstrom über Filterplättchen mit einer genormten Rückhalterate geleitet. Diese Plättchen werden vor und nach der Messung bei gleichen Bedingungen, hinsichtlich Luftfeuchte und Temperatur, gewogen, und somit eine gravimetrische Partikelmasse ermittelt. Voraussetzung ist dass die Temperatur des verdünnten Abgases am Ende der Mischstrecke 52°C unterschreitet. Dadurch ist gewährleistet, dass auch die flüchtigen Anteile der Partikel erfasst werden. Besteht ein Zyklus aus mehreren Phasen, so müssen gleich viele Filterplättchen wie Phasen im Filterhalter enthalten sein um die Partikelmasse der einzelnen Phasen zu messen. Um mit dieser Methode einen zeitaufgelösten Verlauf der Partikelmasse zu ermitteln, wird die Annahme getroffen, dass alle Partikel gleich schwer sind. Die zeitaufgelöste Partikelmasse ergibt sich dann als Quotient der Partikelmasse eines Partikels und der zeitlich aufgelösten Partikelanzahl. Es gibt auch dynamische Verfahren welche den zeitlichen Verlauf der Partikelmasse ermitteln können. Da diese im Zuge dieser Arbeit nicht verwendet wurden, wird darauf nicht näher eingegangen. [13]

3.4.4.7 Partikelanzahlmessung

Zur Ermittlung der Partikelanzahl wird ein sogenannter Kondensationspartikelzähler (CPC) verwendet (siehe Abbildung 25) Die im Abgas vorkommenden Partikel sind für eine optische Zählung zu klein (<1µm). Deshalb wird im CPC, 1-Butanol verdampft, was zu einer gesättigten Umgebung führt. Durch Abkühlen der Probe kondensiert das 1-Butanol an den Partikeln. Die dadurch entstehenden Tropfen sind groß genug um sie mit Hilfe des Lichtstreuungseffekts zählen zu können.

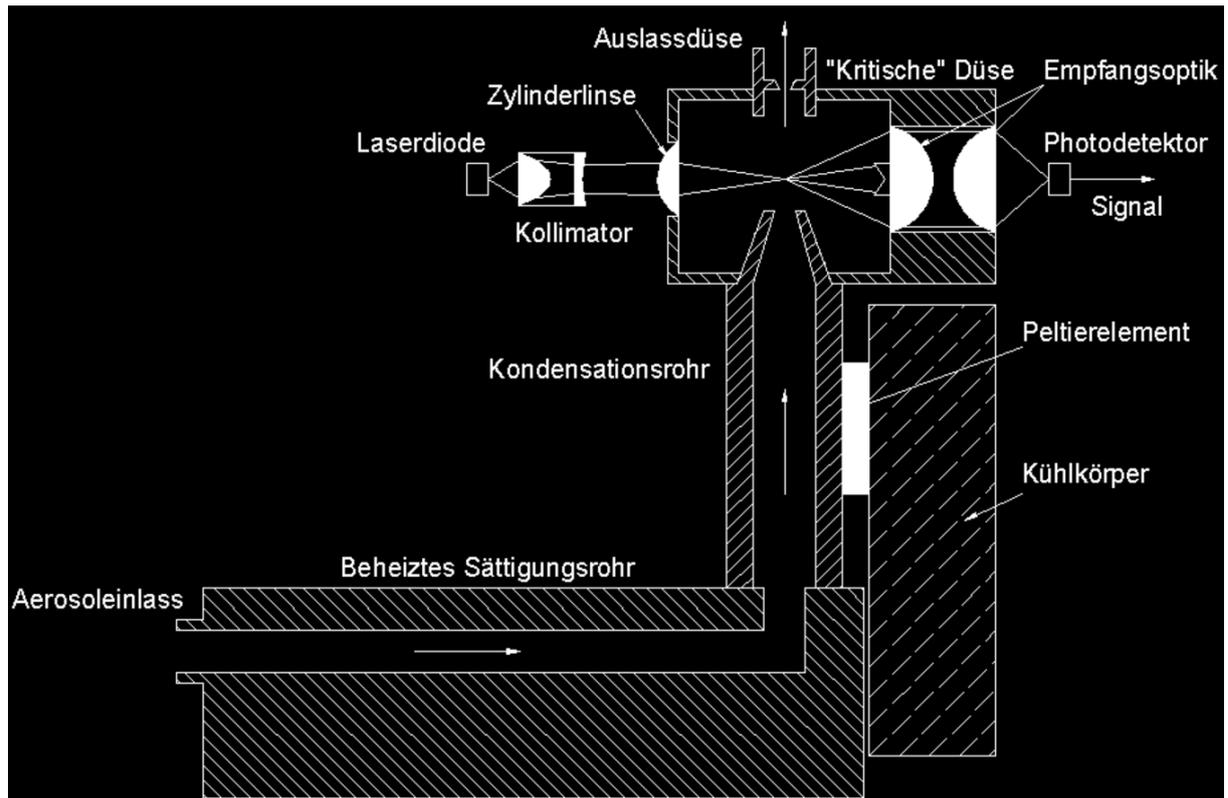


Abbildung 25: Funktionsschema CPC [34]

Durch eine kritische Düse kann der Volumenstrom durch den Kondensationspartikelzähler konstant gehalten werden. Bei der Probenheizung ist darauf zu achten, dass sie nicht zu heiß gewählt wird, da sonst die Gefahr eines Partikelabbrands gegeben ist. Zusätzlich können lösliche Abgasbestandteile in der Flüssigphase bleiben und würden somit nicht erfasst werden, obwohl diese Tropfen mengenmäßig die festen Partikeln bei weitem übersteigen. [20]

3.4.4.8 Photoakustische Spektroskopie

Die Messung von Ruß basiert auf der photoakustischen Spektroskopie. Dabei wird die Abgasprobe mit einem Laserstrahl beleuchtet. Infolge kommt es zu einer Erwärmung der schwarzen Rußpartikel, da diese den Laserstrahl absorbieren. Aus der Erwärmung und Abkühlung der Rußpartikel resultierte eine Ausdehnung und Verkürzung des Trägergases. Die dadurch gebildeten Druckschwingungen werden von einem Mikrofon detektiert. Das Signal steigt proportional mit der Rußkonzentration. Am Eingang des Messgerätes darf die Temperatur 43°C nicht überschreiten, deshalb muss die Messung am verdünnten Abgas erfolgen. [24]

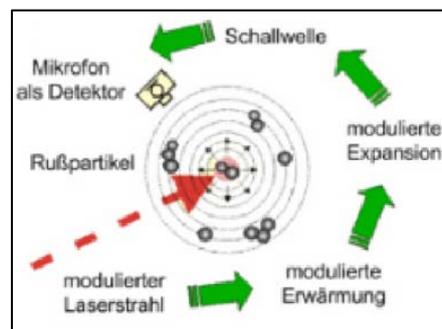


Abbildung 26: Funktionsprinzip der photoakustischen Spektroskopie [24]

3.4.4.9 Fourier Transform Infrarot Spektroskopie (FTIR)

Mit der Fourier Transform Infrarot Spektroskopie können alle Messkomponenten die Strahlung im vorkommenden Wellenspektrum absorbieren, kontinuierlich und gleichzeitig erfasst werden. Der Aufbau sowie das Prinzip sind in Abbildung 27 dargestellt.

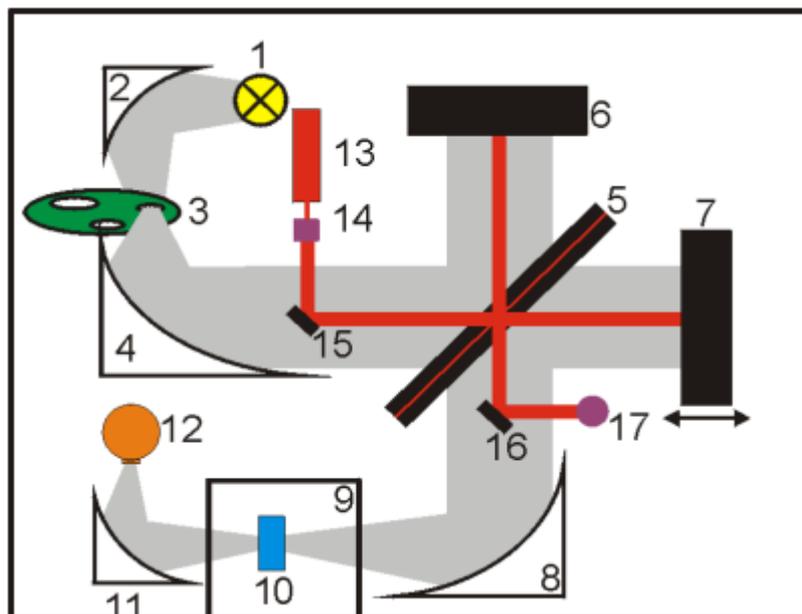


Abbildung 27: Prinzip einer Fourier Transform Infrarot Spektroskopie [25]

Eine Strahlungsquelle (1) emittiert Infrarotlicht, das über einen Spiegel (2) zu einer Lochblende (3) geleitet wird. Mit dieser kann die Größe der Lichtquelle eingestellt werden, was sich auf die Absorption des Spektrums auswirkt. Anschließend trifft der Strahl auf ein Interferometer, in dem er vom Strahlteiler (5) möglichst gleichmäßig auf einen unbeweglichen (6) und einen beweglichen Spiegel (7) aufgeteilt wird. Nachdem die Strahlen an den jeweiligen Spiegeln reflektiert wurden, werden sie am Strahlteiler wieder vereint und über einen Spiegel zum Probenraum (9), wo sie die Probe (10) in einer Gaskammer befinden, weitergeleitet. Durch den beweglichen Spiegel, erhält man eine Wegdifferenz der zwei Teilstrahlen, was eine spektralbreitbandige Interferenz bewirkt. Schließlich gelangt die Strahlung mit unterschiedlichen Intensitäten zum Detektor (12) wo sie als Interferogramm aufgezeichnet wird. Mit einer Fouriertransformation kann dann aus dem Interferogramm das Spektrum berechnet werden. Das Messprinzip beruht also auf der Absorption der Infrarotstrahlung mit verschiedenen Wellenlängen. [26]

3.5 Abgasrückführung (AGR)

Die Abgasrückführung ist ein bewährtes Mittel zur Reduktion von Stickoxiden. Grundsätzlich ist zwischen innerer und äußerer AGR zu unterscheiden, in dieser Arbeit wird jedoch nur auf die äußere AGR eingegangen. Hinsichtlich äußere AGR muss wiederum zwischen Hochdruck- und Niederdruck AGR unterschieden werden. Bei der bei SNF serienmäßigen Hochdruck AGR wird das Abgas vor der Turbine des TL entnommen und hinter dem Verdichter der angesaugten Frischluft zugeführt. Wenn das Abgas nach der Turbine entnommen und vor den Verdichter zugeführt spricht man von Niederdruck-AGR. Die höheren Gastemperaturen der Hochdruck-AGR wirken sich negativ auf die Zylinderfüllung aus, deshalb wird bei der Hochdruck-AGR die Temperatur der zurückgeführten Luft mittels AGR-Kühler gesenkt. Im Prinzip bewirkt eine AGR einen erhöhten Inertgas-Anteil im Zylinder, was aufgrund niedrigerer Brenngeschwindigkeiten, und Spitzentemperaturen zu einer schlechteren Verbrennung führt. Dadurch werden wiederum die NO_x Emissionen reduziert. Bei Dieselmotoren sind AGR - Raten von >60% möglich. Dabei kann der sich im zurückgeleiteten Abgas befindliche Ruß zu unerwünschten Ablagerungen führen. Setzen sich solche Ablagerungen an den Einlassventilen fest, wird der Ansaugquerschnitt verengt was die Motorleistung reduziert. Ein weiterer Nachteil zu hoher AGR Raten ist der Anstieg von Schadstoffen wie HC (Abbildung 29), CO und Ruß (Abbildung 28) aufgrund des Luftmangels sowie ein erhöhter Kraftstoffverbrauch. Bei einer zu hohen AGR kommt es zu einer instabilen Verbrennung die mit einem unruhigen Motorlauf einhergeht. Aufgrund dieser Gründe versuchen Hersteller zukünftig die Abgasgrenzwerte ohne AGR einzuhalten. [18] [26]

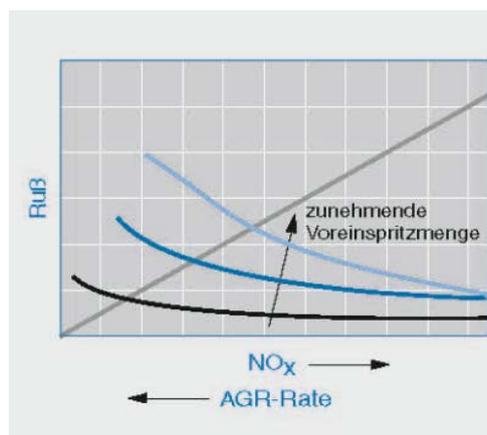


Abbildung 28: Einfluss der AGR auf die Ruß/NO_x-Emissionen [26]

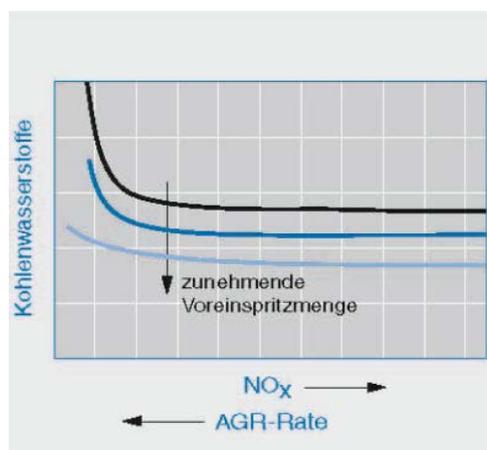


Abbildung 29: Einfluss der AGR auf die HC-Emissionen [26]

4 Versuchsfahrzeuge

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Euro VI LKW behandelt. Wobei ein Fahrzeug 1 schon zuvor vermessen wurde und die Messdaten nur noch ausgewertet werden mussten. Um eine gute Übersicht über die gesamte Flotte von Euro VI LKWs auf den Straßen zu erhalten, wurde bei der Auswahl der restlichen zwei Fahrzeuge neben der Herstellervielfalt, auf die Methode der Stickoxid Reduzierung und auf unterschiedliche Motorgrößen geachtet. Um unabhängige Messergebnisse zu erzielen wurden die Fahrzeuge von Leihfirmen gemietet. Folgend werden die Fahrzeuge vorgestellt.

4.1 Fahrzeug 1

Das Fahrzeug 1, ist das „Leichtgewicht“ unter den Versuchsfahrzeugen. Mit einer Gesamtmasse von 11990 kg gehört er zur Klasse N2 und repräsentiert damit die Fahrzeuge für den Nah- sowie Verteilerverkehr.

Bei dem Konzept zur Abgasnachbehandlung wird beim Fahrzeug 1 auf eine gekühlte Hochdruck-Abgasrückführung in Kombination mit einem SCR-System mit zwei parallel durchströmten SCR-Katalysatoren gesetzt. Durch die Abgasrückführung werden die NO_x Rohemissionen (EO) reduziert (Kapitel 3.5), was einen geringeren AdBlue Verbrauch zur Folge hat und somit einen wirtschaftlicheren Betrieb ermöglichen soll. Die Nachteile der AGR dürfen bei dieser Betrachtung jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Ein DOC sowie ein CRT-Filter ergänzen das SCR-System.

Die Aufladung erfolgt zweistufig durch zwei Lader mit fester Turbinengeometrie sowie Zwischen- und Hauptkühlung der Ladeluft. Beide Lader verfügen über ein Wastegate für eine konsequente Regelung von Ladedruck und Aufteilung auf die Turbostufen. Einen Überblick über die technischen Daten liefert Tabelle 2. Die Vollast- und Schleppcharakteristik des Motors ist in Abbildung 2 dargestellt. [27]

Um die am Ende des Abgasstranges gemessenen Abgase den richtigen Motorbetriebspunkten zuordnen zu können (siehe Kapitel 3.4.3), wird das Volumen vom Motorauslass bis zur Entnahmestelle des PEMS benötigt (Tabelle 3).

Für die in Kapitel 6 durchgeführte Simulation, sind noch zusätzliche Daten zu den einzelnen Module der Abgasanlage (siehe Tabelle 48 im Anhang), sowie die genauen Gangübersetzungen des Getriebes inklusive der Achsübersetzung erforderlich (Tabelle 4).

Es sei zu erwähnen, dass die Werte aus Tabelle 3 aufgrund der Zugänglichkeit nicht exakt bestimmt werden konnten. Die Werte aus Tabelle 48 wurden bestmöglich abgeschätzt, da bei Beginn dieser Arbeit das Fahrzeug nicht mehr zur Verfügung stand, beziehungsweise die Größen am Fahrzeug nicht exakt bestimmt werden konnten.

Bei den bei Fahrzeug 1 eingesetzten Getriebe, handelt es sich um ein automatisiertes 6 Gang Getriebe, dessen Basis ein manuelles Großserien-Getriebe ist. Durch verschiedene Module, (wie z.B.: Kupplungsmodul, Schaltmodul, usw.) wird das Getriebe automatisiert. Die Einbindung des Getriebes in die CAN - Kommunikation trägt zu einer Optimierung des Antriebstranges bei.

4.2 Fahrzeug 2

Bei Fahrzeug Nr. 2 handelt es sich um einen DAF LF 250 (Abbildung 3), mit einer Gesamtmasse von 16000 kg zählt er zur Gewichtsklasse N3 und wird hauptsächlich für den Verteilerverkehr eingesetzt.

Das Konzept zu Abgasnachbehandlung wird bei diesem Fahrzeug in 2 Gruppen unterteilt, in die Filtergruppe und in die SCR-Gruppe. Für maximale Flexibilität können diese Gruppen getrennt oder als Einheit montiert werden. In unserem Fall wurden beide Gruppen zusammen im Abgasschalldämpfer angebracht. Die Filtergruppe besteht aus einem DOC und einem DPF. Zur SCR-Gruppe gehören ein SCR-Katalysator für die Reduktion der Stickoxide und ein NH_3 Sperrkatalysator. Auch bei diesem Fahrzeug kommt eine Abgasrückführung zur Senkung der Rohemissionen zum Einsatz.

Für die Aufladung wird ein Turbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) verwendet. Dadurch kann die zurückgeführte Abgasmenge durch Variierung des Abgasgedrucks präzise bestimmt werden was eine Optimierung der AGR zur Folge hat. Zudem stehen dem Motor immer die idealen Turboeinstellungen zur Verfügung was sich in der Maximierung der Leistung widerspiegelt.

In Tabelle 5 sind weitere technische Daten aufgelistet. Nennleistung und maximales Drehmoment sind in Abbildung 4 ersichtlich.

Wie schon bei Fahrzeug 1 ist auch bei diesem Fahrzeug das Volumen des Abgasstranges (siehe Fahrzeugverzeichnis) bis zur Entnahmestelle der Abgase, für eine richtige Zuordnung der Messdaten erforderlich. Die Volumina der einzelnen Bauteile sind in Tabelle 6 aufgelistet. Im Unterschied zu Fahrzeug 1 waren die Bauteile besser zugänglich ohne große Zerlegung des Schalldämpfers eine genaue Messung konnte aber auch hier nicht erfolgen.

Die im Anhang in Tabelle 49 dargestellte Werte zur Modellierung der Module des Abgasstranges basieren wie schon bei Fahrzeug 1 auf Erfahrungswerten und Annahmen.

Beim Fahrzeug 2 wurde von Aufbau her das gleiche Getriebe eingesetzt wie bei Fahrzeug 1. Der Unterschied zum Modell von Fahrzeug 1 liegt am höheren Eingangsmoment und einer anderen Getriebeübersetzung im ersten Gang. Trotz umfangreicher Recherche wurde kein genauer Wert für die Achsübersetzung gefunden. Deshalb wurde sie mittels Gangübersetzung und der gemessenen Geschwindigkeit in einem Bereich, in dem der Gang fix gehalten wird, berechnet (Tabelle 7).

4.3 Fahrzeug 3

Das dritte und somit letzte Versuchsfahrzeug dieser Arbeit ist eine Sattelzugmaschine. Mit einer Gesamtmasse von 40t (inkl. Auflieger) gehört das Fahrzeug zur Klasse N3 und ist ein Repräsentant für den Fernverkehr.

Hinsichtlich der Abgasnachbehandlung von Stickoxiden setzt das Fahrzeug 3 ausschließlich auf SCR, das heißt im Vergleich zu den Fahrzeugen 1 und 2 entfallen die Komponenten zur Abgasrückführung. Dies spiegelt sich in geringerem Gewicht und geringerer Motorkomplexität nieder. Die Folge einer damit verbundenen Kraftstoffverbrauchsreduzierung und somit einer Senkung des CO₂ Ausstoßes ist ein erhöhter AdBlue-Verbrauch.

Nach dem Eintritt in den Abgasschalldämpfer durchströmt das Abgas zunächst einen DOC gefolgt von einem DPF. Bevor zwei mit Vanadium - Pentoxid beschichtete SCR - Katalysatoren parallel durchströmt werden, erfolgt die Vermischung des Abgases mit dem Reduktionsmittel AdBlue.

Bei der Aufladung setzt Scania auf einen einfachen Turbolader mit fester Turbinengeometrie. Da eine teure Aufladungsstrategie mit VTG, bei Fahrzeugen ohne AGR nicht notwendig ist.

Im Fahrzeugverzeichnis sind weitere technische Daten (Tabelle 8), Vollast- und Schleppkurve (Abbildung 6) und das Volumen des Abgasstranges bis zur Entnahmestelle (Tabelle 9) dargestellt.

Das Fahrzeug 3 besitzt ein Zwölfganggetriebe mit Range und Splitgruppe. Die Tabelle 10 im Fahrzeugverzeichnis zeigt die Übersetzungsverhältnisse dieses Getriebes. Bei der Antriebsachse handelt es sich um eine einfach übersetzte Hypoidachse mit Differentialsperre.

5 Messung

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messungen an den drei Versuchsfahrzeugen behandelt. Zunächst wird auf die Emissionsmessungen im realen Straßenverkehr (RDE) näher eingegangen. Neben diesen, erfolgten weitere Messungen am Rollenprüfstand. Am Ende dieses Kapitels folgt ein Überblick über die erfassten Messdaten, sowie eine Gegenüberstellung der Prüfstandsergebnisse mit den Daten der RDE-Messung.

5.1 RDE - Messungen

Die Emissionsmessungen im öffentlichen Straßenverkehr sind nicht vergleichbar mit jenen Messungen unter Laborbedingungen auf Prüfständen, da die Hersteller die Möglichkeit haben ihre Fahrzeuge auf den jeweiligen Standard einer Typprüfung optimieren. Der Vorteil von RDE-Messungen ist, dass wirklich jenes Emissionsverhalten eines individuellen Fahrzeuges bei einer Fahrt mit realen Rahmenbedingungen (Fahrwiderstände, Umgebungstemperaturen, Beladung, usw.) im öffentlichen Verkehr erfasst wird. Jedoch lassen sich diese Messwerte nicht miteinander vergleichen. Denn dies würde identische Rahmenbedingungen und eine genaue Wiederholung des gefahrenen Zyklus erfordern, was in Wirklichkeit nicht möglich ist.

5.1.1 RDE-Messstrecken

Für eine gesetzeskonforme RDE-Messung sind je nach Gewichtsklasse die Anteile von Stadt, Überland und Autobahn unterschiedlich aufgeteilt (siehe Kapitel 3.1). In Folge dessen mussten für das Fahrzeug 1 (N2), andere Routen gefunden werden als für die Fahrzeuge 2 und 3 (N3), da die Anteile weitestgehend eingehalten werden sollen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Die Messfahrten erfolgten jeweils auf zwei unterschiedlichen Strecken, mit Fahrzeug 3 wurden noch zusätzlich zwei reine Stadtrouten absolviert. Bei der Routenauswahl wurde auf die Erfahrung aus älteren Projekten am Institut zurückgegriffen. Es sei noch zu erwähnen, dass vor jeder Testfahrt eine Aufwärmrunde durchgeführt wurde um die laut [16] geforderten Testbedingungen erfüllen zu können. Diese Aufwärmroute wird hier nicht näher beschrieben, da für weitere Untersuchungen nur Emissionen bei betriebswarmen Motor verwendet werden.

5.1.1.1 Route Köflach N2

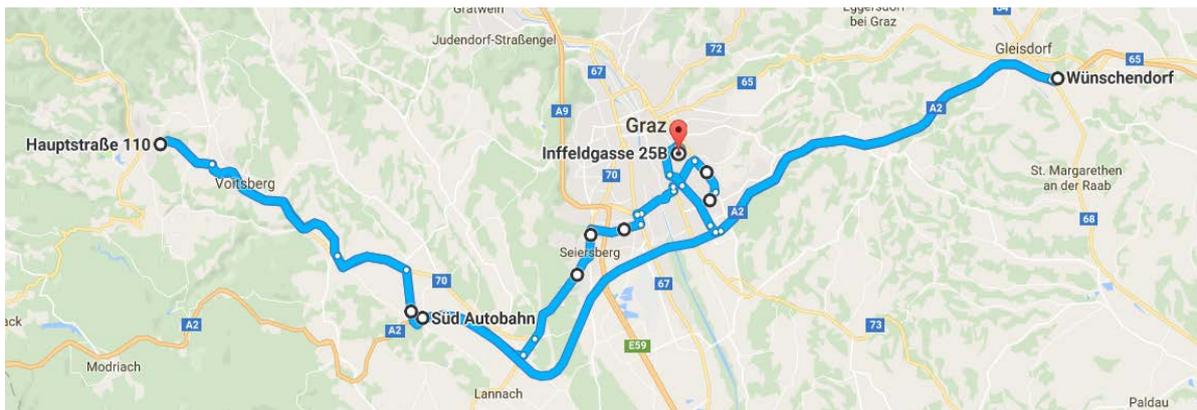


Abbildung 30: Streckenführung der Route Köflach N2 [21]

Die Route Köflach N2 (Abbildung 30) erstreckt sich über eine Länge von 138 km. Sie startet am St.-Peter-Gürtel 10B und führt dann entlang der St.-Peter Hauptstraße durch das Grazer Stadtgebiet auf die Packerstraße/B70 und weiter auf die Autobahn A2 in Richtung Klagenfurt. Die Autobahn wird an der Abfahrt Mooskirchen verlassen, von dort aus geht es entlang der Packerstraße/B70 bis nach Köflach, wo bei einem Kreisverkehr auf Höhe Hauptstraße 110 das erste Mal gewendet wird. Nun führt die Route wieder zurück bis zu Autobahnauffahrt Mooskirchen, und weiter auf die Autobahn A2 in Richtung Graz/Wien, bis auf Höhe

Gleisdorf-Süd, wo zum zweiten Mal gewendet wird. Die weitere Streckenführung führt entlang der A2 retour nach Graz-Ost, dort wird die Autobahn verlassen, weiter über die Münzgrabenstraße zum Zielort Inffeldgasse 25B.

5.1.1.2 Route Köflach N3

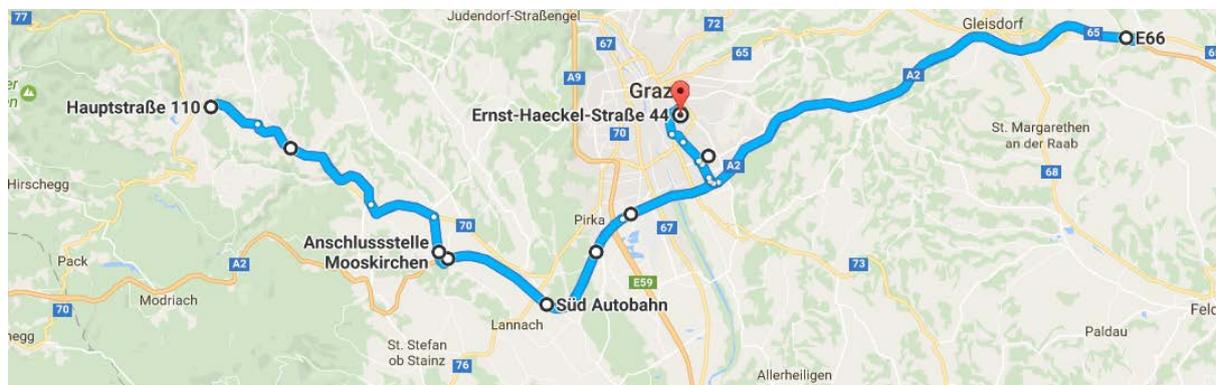


Abbildung 31: Streckenführung der Route Köflach N3 [21]

Bei der Streckenführung für N3-Fahrzeuge musste im Vergleich zur N2-Route der Stadtanteil um 25% gekürzt werden und der Autobahnanteil um 25% erhöht werden. Startpunkt ist wiederum am St.-Peter-Gürtel 10B, von dort aus führt die Route nicht übers Grazer Stadtgebiet auf die Autobahn sondern direkt über den St.-Peter-Gürtel auf die A2. Bis auf das, dass sich der zweite Wendepunkt von Gleisdorf-Süd auf Höhe Sinabelkirchen geändert hat ist die Route analog zu jener Köflach Route für N2 Fahrzeuge. Die Gesamtlänge der Messstrecke beträgt 151 km.

5.1.1.3 Route Ries N2

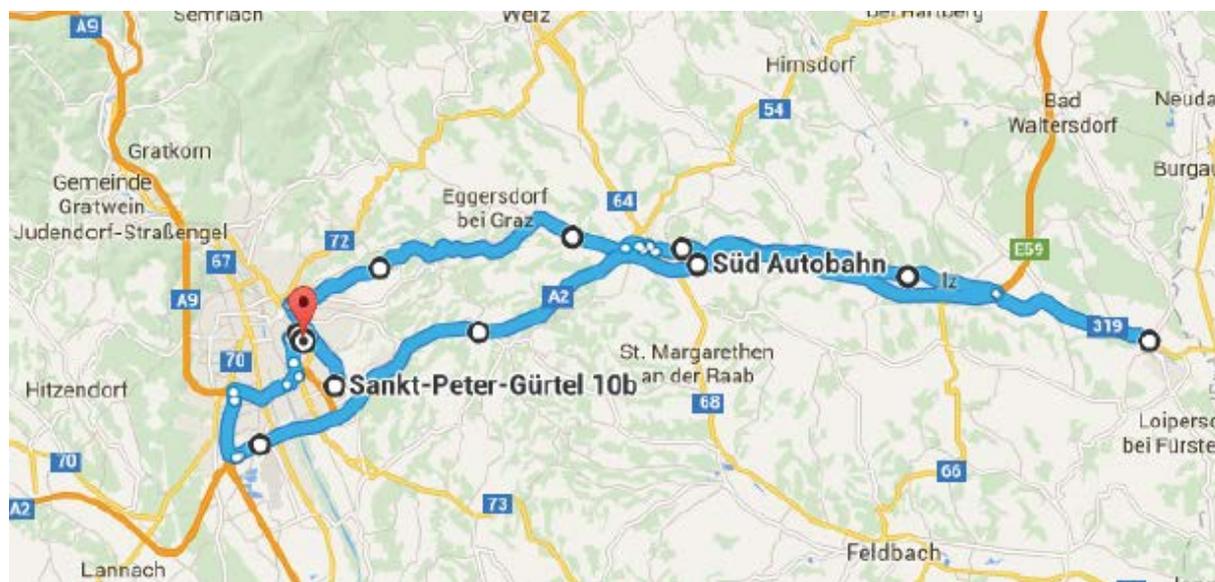


Abbildung 32: Streckenführung der Route Ries N2 [21]

Ausgehend vom Startpunkt St.-Peter-Gürtel 10B führt diese Route über die St.Peter Hauptstraße und die Plüdemanngasse auf die Elisabethstraße. Dieses Teilstück stellt überwiegend einen Stadtanteil dar. Für den Überlandanteil führt die Route weiter auf die hügelige Riesstraße/65 und anschließend auf die Gleisdorfstraße/65 bis nach Fürstenfeld, wo gewendet wird. Weiter geht es bis zur Autobahnauffahrt Fürstenfeld, von dort aus führt die Strecke entlang der A2 retour nach Graz - West, wo die Autobahn verlassen wird. Über die

Puntigamerstraße und die Münzgrabenstraße erreicht man schließlich den Zielort, Ernst-Haeckel-Straße 44. Mit einer Länge von 127 km ist die Strecke ähnlich lang, wie die Köflach Route für N2 Fahrzeuge.

5.1.1.4 Route Ries N3

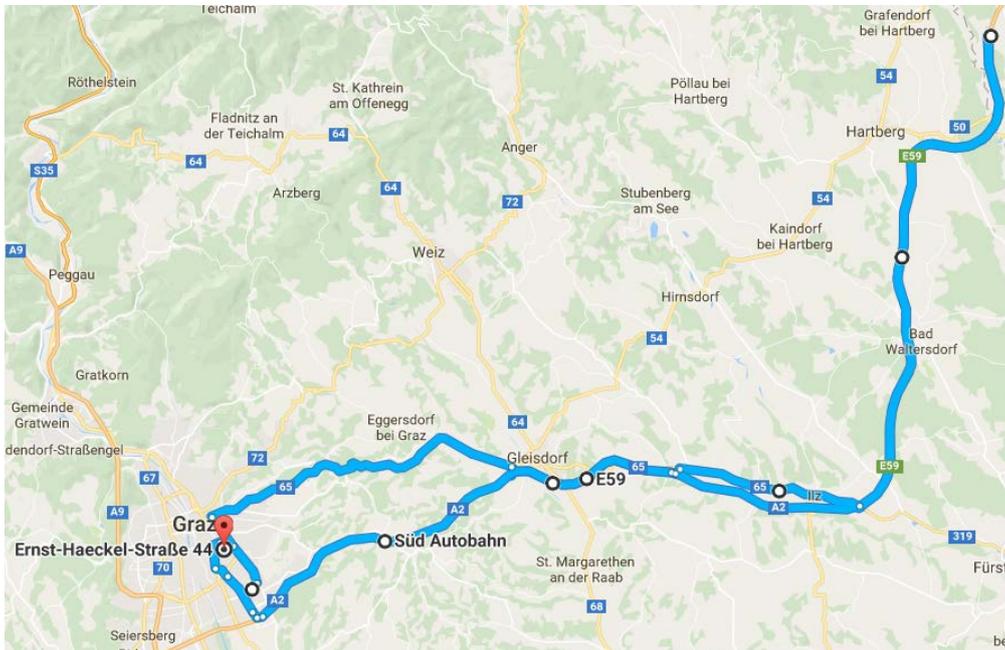


Abbildung 33: Streckenführung der Route Ries N3 [21]

Auch hier liegt der einzige Unterschied zu N2 Route darin, dass der Stadtanteil am Ende der Route gekürzt und der Autobahnanteil verlängert wurde um die geforderte Aufteilung zu erreichen.

5.1.1.5 Stadtroute 1

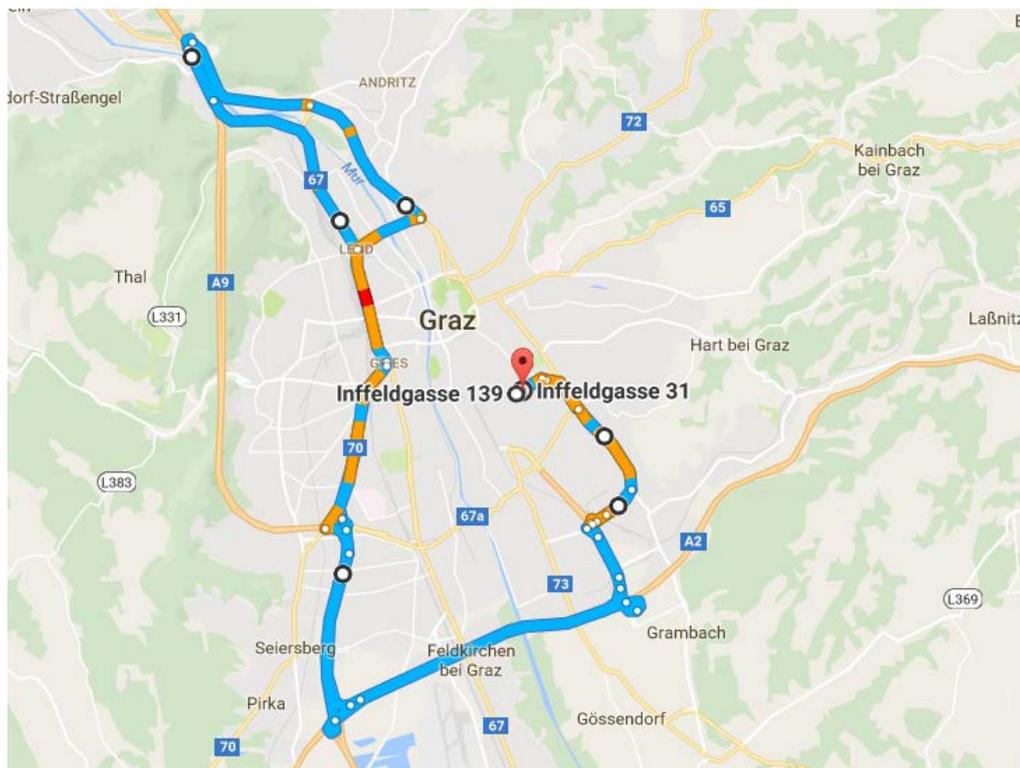


Abbildung 34: Streckenführung der Stadtroute [21]

Anhand der in Abbildung 34 dargestellten Route wurde das Abkühlverhalten des Abgasstranges und etwaige Heizstrategien im Stadtverkehr bzw. bei SCR kritischen Temperaturen genauer untersucht. Im Nachhinein wurde festgestellt, dass diese Route für diese Betrachtungen nicht optimal war. Der Grund dafür liegt im Autobahnanteil zwischen den Stadtanteilen. In diesem Teilstück erwärmt sich das SCR-System so stark, dass es länger nicht mehr abkühlt und speichert NH_3 ein, was zu einer Überdurchschnittlichen NO_x Konvertierung im Stadtbereich führt. Jedoch können die Daten nach dem Autobahnanteil für mögliche Untersuchungen bzgl. Der NH_3 -Einspeicherung verwendet werden. Deshalb erfolgte die Aufzeichnung der Messdaten bei einer weiteren Fahrt mit beinahe 100% Stadtanteil (Stadtroute 2).

5.1.2 Eingesetzte Messtechnik

5.1.2.1 Gasförmige Abgaskomponenten

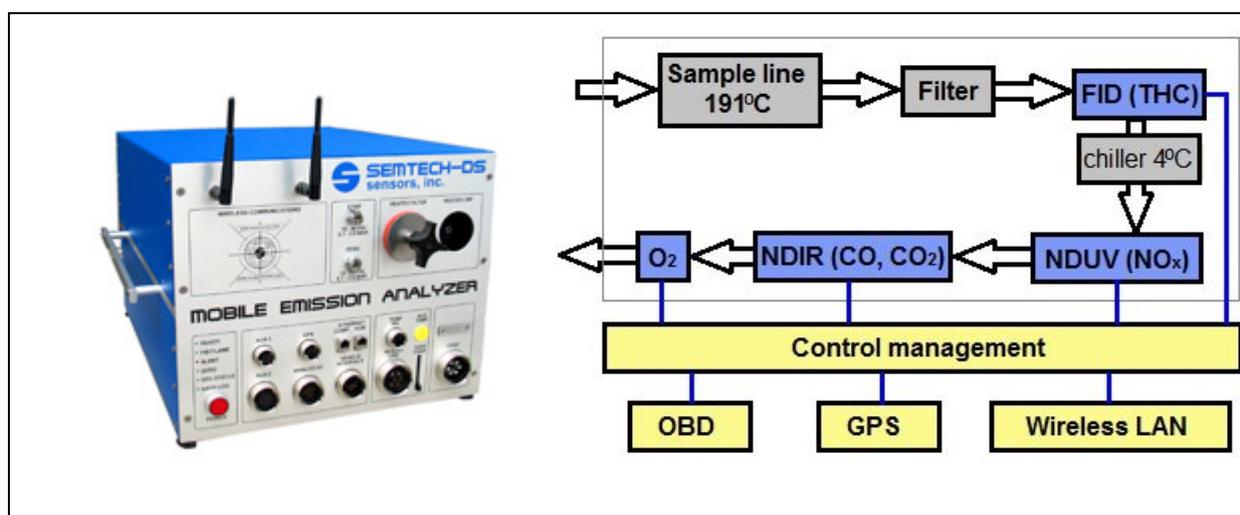


Abbildung 35: Messsystem Semtech DS (links) [12] sowie Gasfluss und elektrische Anschlüsse (rechts) [28]

Zur Messung der gasförmigen Emissionskomponenten wurde das Semtech DS (Abbildung 35) der Firma Sensors verwendet. Die Probenentnahme erfolgt aus dem unverdünnten Abgasstrom, mit einem Volumenstrom von 8 l/min]. Um eine Kondensation im Abgas zu verhindern muss ein Teil des Messsystems, bestehend aus Entnahmeleitung, Gerätefilter und FID (siehe 3.4.4.4) auf 190°C beheizt werden. Vom Einschalten bis zur Betriebsbereitschaft muss aufgrund des Aufheizvorganges eine Vorbereitungszeit eingeplant werden. Bevor mit der Messung begonnen werden kann, ist noch eine 2-Punkt-Kalibrierung durchzuführen. Bei den durchgeführten Messungen erfolgte die Kalibrierung mit Umgebungsluft und Mischgas sowie einer zusätzlichen Gasflasche mit NO_2 . Die Abgase gelangen zuerst zum FID, danach werden sie mit einem Kondensator getrocknet und anschließend dem NDIR-Analysator (siehe 3.4.4.1), den NDUV-Analysatoren (siehe 3.4.4.2) und einem elektrochemischen O_2 - Sensor (3.4.4.5) zugeführt. Für die genauen Spezifikationen wird auf [38] verwiesen. Neben den Daten aus dem Abgasanalyse-System, können Daten aus anderen digitalen und analogen Eingängen, wie z.B.: Massenstrommessung (EFM), GPS-Daten, Umgebungssensoren (Temperatur, Druck) gespeichert werden. Die Verwaltung der Daten erfolgte mit einem mitgeführten Notebook. Die erfassten Daten werden in 1Hz Schritten als Excel-file abgespeichert.

5.1.2.2 Massenstrommessung

Mit den im Semtech verbauten Sensoren werden ausschließlich Emissionskonzentrationen gemessen. Um nun auf die Emissionsmassen schließen zu können ist eine Messung des Abgasmassenstromes erforderlich. Bei diesen Messungen wurde dafür das Exhaust Flow Meter (EFM) der Firma Sensors eingesetzt. Der Massenstrom wird dabei mittels Staudruckprinzip (Pitot-Rohr) ermittelt. Durch die Kombination eines eingebauten Temperaturfühlers und eines Durchflussrechners können auch temperaturabhängige Massenströme berechnet werden (Abbildung 36) und eignet sich somit für die Messung des Abgasmassenstroms:



Abbildung 36: EFM mit Auswerteeinheit [29]

Die Emissionsmassen werden nach folgender Formel

5.1.2.3 GPS Daten

Zur Bestimmung der geodätischen Höhe, der genauen Fahrzeugposition und der Fahrgeschwindigkeit wurden zwei voneinander unabhängige GPS Systeme verwendet (VBOX von Racelogic und Semtech). Die dafür notwendige Antenne wurde am Dach der Fahrzeuge angebracht. Mit Hilfe dieser Daten wurde die Geschwindigkeit im Post-Processing direkt von Semtech bestimmt und in Kombination mit den Höhendaten kann die Steigung bestimmt werden. Für die weiteren Betrachtungen und Auswertungen werden die Semtech-GPS Daten verwendet, die Racelogic Daten werden zur Validierung verwendet.

5.1.2.4 Messung der Umgebungsbedingungen

Die Kenntnis über die Umgebungsbedingungen bei der Testfahrt ist für eine Analyse der Messdaten sowie für die Simulation von großer Bedeutung, um gegebenenfalls einen Einfluss zu erkennen. Deshalb wurden Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur und relative

Luftfeuchte mit geeigneten Sensoren gemessen und ins Semtech DS eingelesen.

5.1.2.5 CAN Daten

Die über CAN-Bus verfügbaren Daten, wie Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl, Kühlmitteltemperatur, Drehmoment und falls vorhanden auch Übersetzungsverhältnis und Gang, wurden mit der Analyse-Software CANalyser dargestellt und ausgewertet. Zur Bestimmung des Drehmomentes wird vom CAN-Bus ein sogenanntes " Actual Engine Percent Torque" ein " Nominal Friction Percent Torque" und ein " Reference Torque" ausgegeben. Die Berechnung des Drehmomentes erfolgt nach Gleichung (5-1).

$$M_{CAN} = \frac{(\text{Actual Engine Percent Torque} - \text{Nominal Friction Percent Torque})}{100} * \text{Reference Torque} \quad (5-1)$$

[37]

Damit man schließlich die Leistung erhält, muss das Moment noch mit der Winkelgeschwindigkeit multipliziert werden (5-2).

$$P_{CAN} = M_{CAN} * \omega \quad (5-2)$$

$$\omega = \frac{\pi * n}{30} \quad (5-3)$$

5.1.2.6 Messung der Abgastemperatur

Zur Ermittlung der Abgastemperaturen wurden beim Fahrzeug 1 zwei 3 mm dicke Thermoelemente verbaut. Das erste Thermoelement wurde ca. 310 mm vor Eintritt in den Abgasschalldämpfer angebracht, das zweite ca. 130 mm nach dem Abgasschalldämpfer (Abbildung 37).

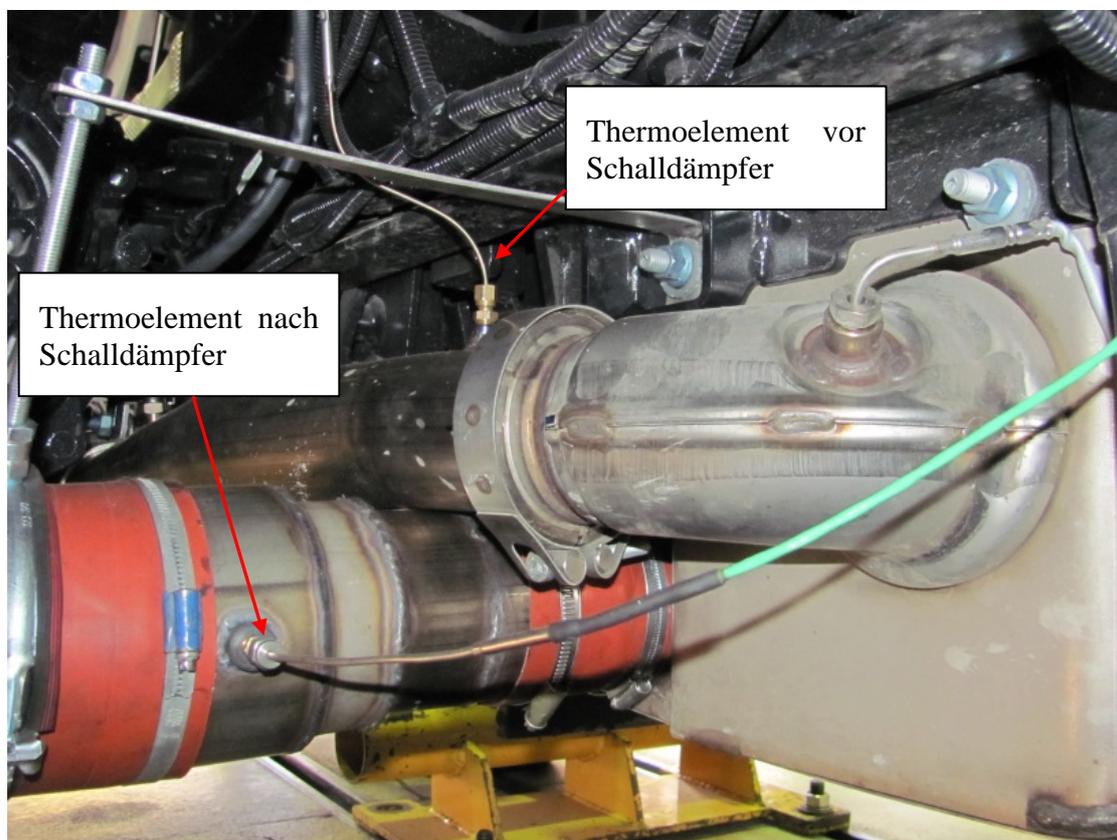


Abbildung 37: Anordnung der Thermoelemente bei Fahrzeug 1

Für die spätere Erstellung eines SCR-Konvertierungskennfeldes (Kapitel 6.6) wäre die

Anordnung direkt vor dem SCR-Katalysator sinnvoller. Aus Gründen der Zugänglichkeit durch den geschlossenen Schalldämpfer, war so eine Positionierung ohne Beschädigung des Schalldämpfers jedoch nicht möglich.

Bei den Fahrzeugen 2 und 3 wurden Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1,5 mm verwendet um ein besseres Ansprechverhalten zu erreichen. Zusätzlich erfolgte die Anordnung eines weiteren Thermoelementes direkt nach dem Abgasturbolader. Dadurch wird die Erstellung eines Motortemperatur-Kennfeldes erleichtert.

5.1.2.7 Drehzahlsensor

Um die Plausibilität der Motordrehzahl des CAN-Signals zu überprüfen wurde zusätzlich ein mechanischer Drehzahlsensor eingebaut. Dabei wird mit einer Lichtschranke die Zeit für eine Umdrehung gemessen und daraus die Drehzahl berechnet.

5.1.2.8 NO_x Engine-Out Messung

Eine Aussage über die Effizienz der einzelnen Methoden zur Stickoxidreduzierung kann nur getroffen werden, wenn die Stickoxide vor dem Eintritt in den Schalldämpfer (Roh) ebenfalls erfasst werden. Diese Messstelle muss auch vor der AdBlue-Eindosierung liegen, da sonst eine Querempfindlichkeit bzgl. NH₃ die Messung verfälschen würde. Zu diesem Zweck wurde ein NO_x-Roh Sensor in dem Rohr zwischen Turbolader und Schalldämpfer angebracht. Abbildung 38 zeigt exemplarisch die Applikation des NO_x-ROH Sensors am Fahrzeug 1.

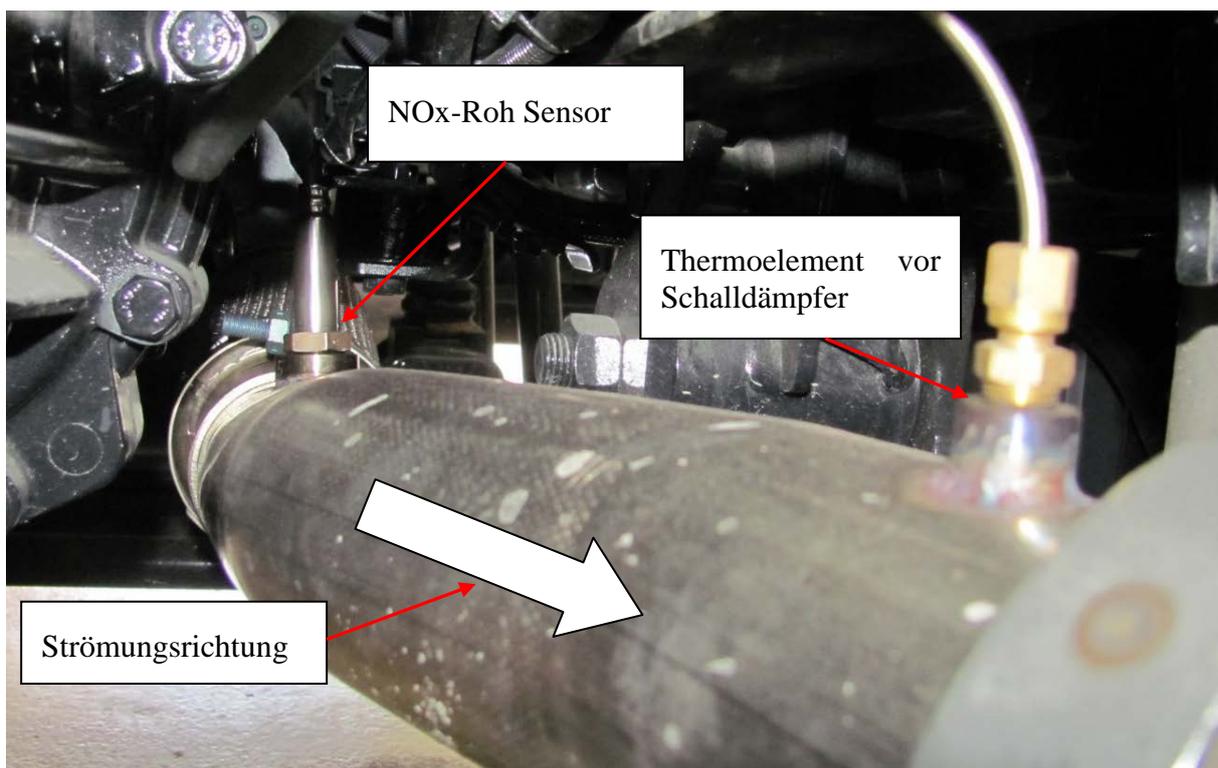


Abbildung 38: Position des NO_x-Roh Sensors (Fahrzeug 1)

5.1.2.9 Rußmessung

Für die Messung der Rußpartikel im Abgas wurde ein Micro Soot Sensor der Firma AVL verwendet. Dieser Sensor arbeitet nach dem Prinzip der photoakustischen Spektroskopie siehe Kapitel 3.4.4.8.

5.1.3 Messprogramm

Im Zuge der RDE-Messungen wurden die im Kapitel 5.1.1 angegebene Ries-Route und die Köflach-Route mit jedem Fahrzeug mindestens zweimal absolviert. Mindestens bedeutet hier, so oft, bis 2 gültige Messungen zustande gekommen sind. Um den Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperaturen herausfinden zu können, sollte je Route, stets eine Messung am Vormittag und eine am Nachmittag stattfinden. Mit dem Fahrzeug 3 sind überdies zwei Stadtrouten geplant, die Gründe dafür wurden bereits im Kapitel 5.1.1.5 erläutert. Tabelle 14 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messungen.

Tabelle 14: Messprogramm RDE

Fahrzeug Nr.	Messroute	Ergebnisse	Auffälligkeiten
1	Köflach N2/VM	siehe Kapitel 5.1.5.1	siehe Kapitel 5.1.5.2
1	Köflach N2/NM		
1	Ries N2/VM		
1	Ries N2/NM		
2	Köflach N3/VM	siehe Kapitel 5.1.6.1	siehe Kapitel 5.1.6.2
2	Köflach N3/NM		
2	Ries N3/NM_1		
2	Ries N3/NM_2		
3	Köflach N3/VM	siehe Kapitel 5.1.7.1	siehe Kapitel 5.1.7.2
3	Köflach N3/NM		
3	Ries N3/VM		
3	Ries N3/NM		
3	Stadtroute 1		
3	Stadtroute 2		

5.1.4 Auswertung der Messdaten

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messdaten exemplarisch erklärt.

5.1.4.1 Variable Zeitverschiebung

Zuerst wurden jene mit dem Semtech DS gemessenen gasförmigen Emissionskomponenten wie CO₂, CO, NO_x, HC der Fahrzeuge 2 und 3 mit dem Ermes Tool variabel zeitverschoben (siehe Kapitel 3.4.3). Das heißt, die am Ende des Abgasstranges gemessenen Daten werden zum Motorauslass verschoben, um die Emissionsmassen passend zu den jeweiligen Betriebspunkten zu erhalten. Variabel bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Variabilität des Massenstromes mitberücksichtigt wird. Der Unterschied zwischen den variabel zeitverschobenen und den gemessenen Daten ist anhand eines Ausschnittes einer Versuchsfahrt mit Fahrzeug Nr. 3 in Abbildung 39 verdeutlicht. Bei Fahrzeug 1 wurden die Messdaten um einen konstanten Wert unabhängig vom Betriebspunkt des Motors zeitverschoben.

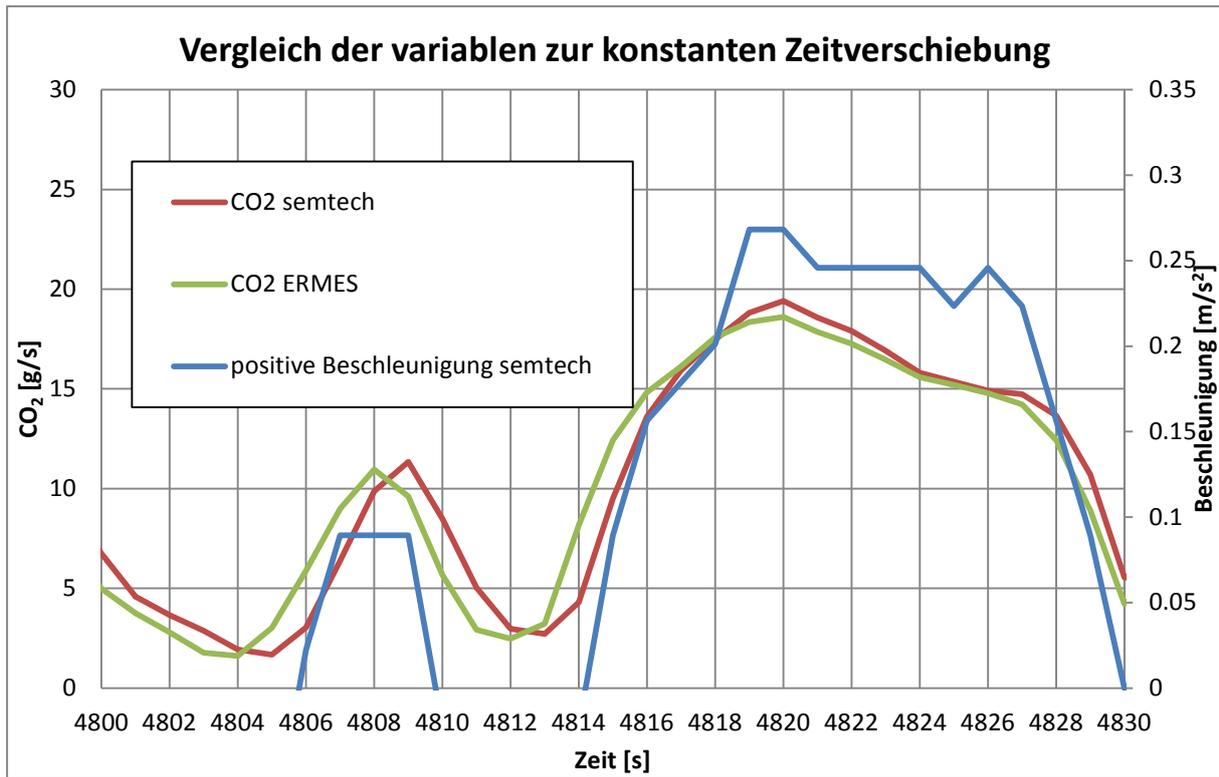


Abbildung 39: Zeitverschiebung

Wie in Abbildung 39 zu erkennen ist, treten bei RDE-Messungen sehr unterschiedliche Lastbereiche auf, dadurch kommt es zu deutlicher Variabilität der Gaslaufzeiten. Der Abgleich der Drehzahlen erfolgt anhand der Beschleunigung da bei den RDE-Messungen nicht immer eine Leistung vorhanden ist. Bei konstanter Zeitverschiebung würden den jeweiligen Emissionskonzentrationen falsche Massenströme zugeordnet werden. Der dadurch entstehende Fehler ist in Abbildung 39 ersichtlich. Kommt es nur zu geringen Änderungen der Laufzeiten, sei es entweder Zyklusbedingt oder aufgrund eines geringen Volumens zwischen Messstelle und Motorauslass, dann reicht eine konstante Zeitverschiebung auch aus.

Im Folgenden wird dies anhand eines Beispiels für die konstant verschobenen NO_x-Roh Daten gezeigt:

Für die Massenströme 200, 500 und 1000 kg/h wurden zunächst mit der idealen Gasgleichung (5-4) die Volumenströme bei 200, 250 und 300 °C bestimmt.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{p} \quad (5-4)$$

Dabei ist R die relative Gaskonstante von Luft (Abgas wird vereinfachend als Luft betrachtet) und hat einen Wert von 287 J/kg·K. Für den Druck p wurden aufgrund des Gegendruckes 1,1 bar angenommen.

Um schlussendlich die Laufzeit zu erhalten muss das Volumen des Abgasstranges von Motor bis zur Messstelle dividiert werden.

$$t_L = \frac{V}{\dot{V}} \quad (5-5)$$

Das Volumen bis zur Messstelle setzt sich aus dem Volumen des Turboladers und der anschließenden Verrohrung zusammen. Hierfür wurden exemplarisch die Daten von Fahrzeug

3 genommen, also ein Volumen von 24,5 [l]. Das darin enthaltene Volumen des Turboladers wurde mit 15 [l] angenommen.

Tabelle 15: Laufzeiten von Motor bis zum NO_x-Sensor

ExMf [kg/h]	Temperatur [°C]		
	200	250	300
Laufzeiten [s]			
200	0,3572	0,3230	0,2949
500	0,1428	0,1292	0,1179
1000	0,0714	0,0646	0,0589

Tabelle 11 zeigt die Laufzeiten für die zuvor angegebenen Massenströme und Temperaturen, bis zum NO_x-Roh Sensor. Angesichts der geringen Laufzeiten im Vergleich zur Messfrequenz von 1Hz erfolgte für NO_x-Roh Emissionen keine Laufzeitverschiebung mit der Methode zur variablen Zeitverschiebung. Die Daten wurden konstant so verschoben, dass die NO_x-Roh Spitzen mit den NO_x-Tailpipe Spitzen zusammenfallen (Abbildung 40).

5.1.4.2 NO_x-Roh Berechnung

Zuvor mussten noch die gemessenen NO_x-Roh Konzentrationen (ppm) in Emissionsmassen umgerechnet werden. Dies erfolgte nach Gleichung (5-6).

$$E_M = E_K * ExMf * U_{Gas} \quad (5-6)$$

Die oben gezeigte Methode zur Umrechnung der Emissionskonzentrationen in Emissionsmassen gilt für alle gasförmigen Komponenten, es ist nur der U_{Gas} -Faktor zu ändern. Dieser wird nach Gleichung (5-7) berechnet und stellt den Massenanteil der betrachteten Komponente zum gesamten Abgas dar.

$$U_{Gas} = \frac{M_{Komp.}}{M_{Abgas}} \quad (5-7)$$

Wobei bei der Berechnung des U_{Gas} – Faktors für NO_x die molare Masse von NO₂ angenommen wird.

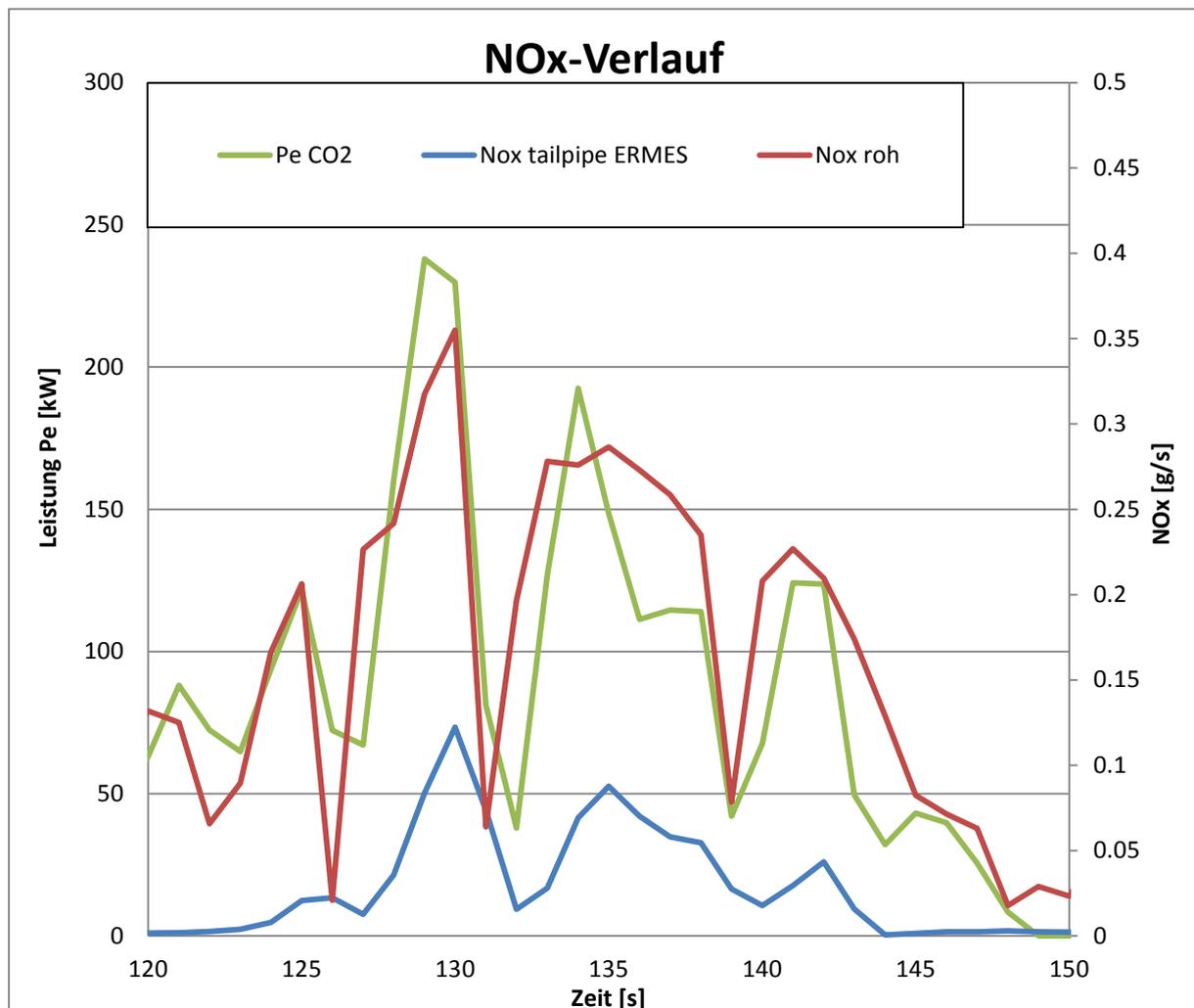


Abbildung 40: Exemplarischer Verlauf von NO_x-Roh, NO_x-Tailpipe und der Leistung über der Zeit (Fahrzeug 3)

Zur Kontrolle wurde zugleich der Leistungsverlauf dargestellt, da in der Regel die NO_x-Spitzen mit den Leistungsspitzen einhergehen.

5.1.4.3 Leistungsberechnung bei RDE-Fahrten

Die Bestimmung der Leistung kann Grundsätzlich auf drei Arten erfolgen. Entweder über eine Längsdynamiksimulation, über das CAN-Signal (siehe Kapitel 5.1.2.5) oder mit der sogenannten "CO₂-Methode". Bei dieser Arbeit wurde entschieden, für weitere Auswertungen und Betrachtungen die CO₂-Methode zur Leistungsermittlung zu verwenden. Diese wurde aber immer mit der Leistung aus dem CAN-Signal validiert. Die CAN-Leistung wurde nicht verwendet da diese nicht bei jedem Fahrzeug vorhanden ist. Folgend wird die CO₂-Methode kurz beschrieben.

Ausgehend von einem Basis-Verbrauchskennfeld in welchem der Verbrauch über Drehzahl und Leistung gespeichert ist, wird mit dem gemessenen CO₂ und der gemessenen Drehzahl die Leistung interpoliert (Abbildung 41). Die Berechnung des CO₂ aus dem Verbrauch (FC) erfolgt über eine Näherungsformel, siehe Gleichung (5-8).

$$CO_2 = 3,153 * FC \quad (5-8)$$

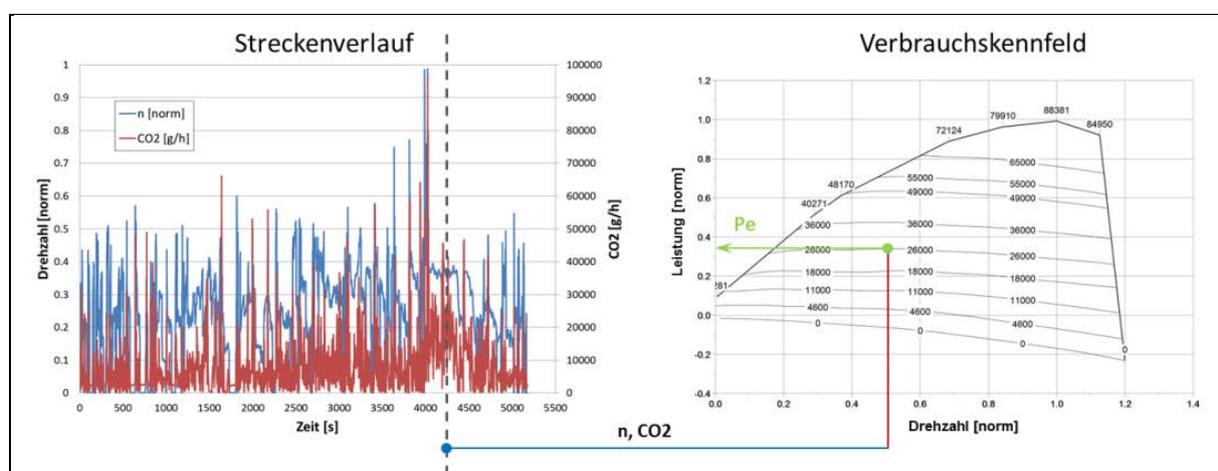


Abbildung 41: Schema zur CO₂ Leistungsermittlung [30]

Die verwendeten Verbrauchskennfelder dieser Arbeit stammen aus anderen Institutsprojekten und basieren auf Messungen von Stationärpunkten am Motorprüfstand. Dabei wurde je nach Motorgröße ein geeignetes Kennfeld ausgewählt. In der Regel sind Verbrauchskennfelder normiert, damit können sie einfach für unterschiedliche Leistungsklassen ungerechnet werden. Die Normierung erfolgt nach den Gleichungen (5-9) und (5-10).

$$P_{norm} = \frac{P_e}{P_{Nenn}} \quad (5-9)$$

$$n_{norm} = \frac{n - n_{Leer}}{n_{Leer} - n_{Nenn}} \quad (5-10)$$

Für eine durchgängig richtige Berechnung bzw. Auswertung müssen natürlich auch die anderen Werte zeitlich korrekt zugeordnet werden. Dazu werden die mit unterschiedlichen Methoden gemessenen Geschwindigkeitsverläufe (Abbildung 42), die Drehzahlen samt Geschwindigkeit (Abbildung 43) sowie der Drehzahl und Massenstromverlauf über der Zeit (Abbildung 44) aufgetragen.

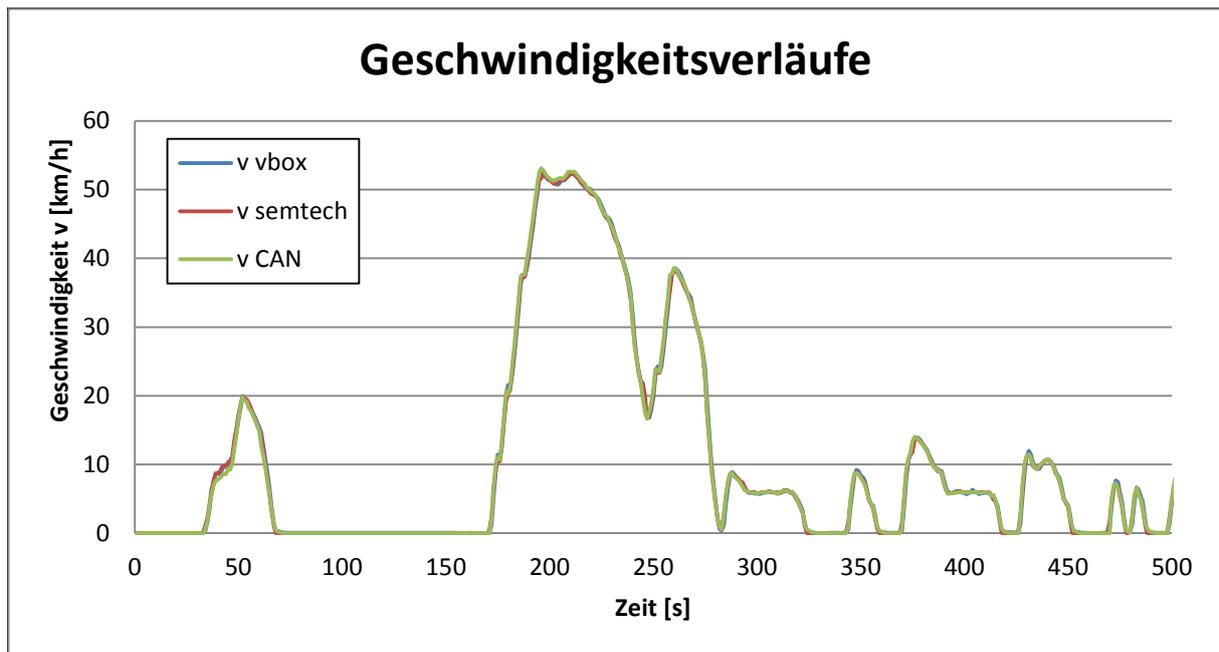


Abbildung 42 Geschwindigkeitsverläufe (VBOX, Semtech, CAN) über der Zeit

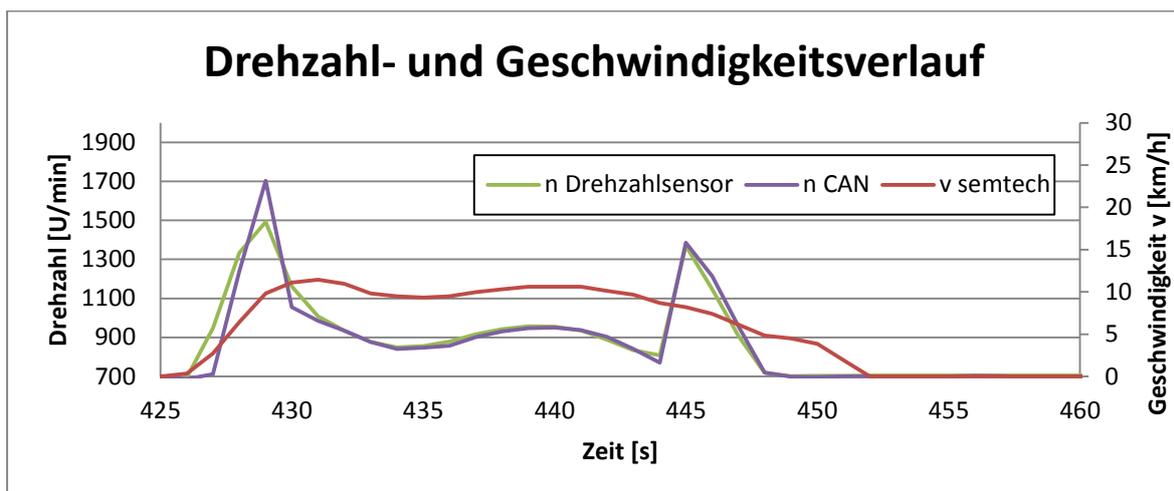


Abbildung 43: Verlauf der Drehzahlen (CAN, Drehzahlsensor) und der Geschwindigkeit über der Zeit

Zum Abgleich der Geschwindigkeit wird die Drehzahl verwendet, da sich bei einem konstanten Gang beide gleich verhalten. Für weitere Betrachtungen wurde die CAN-Drehzahl verwendet da sie Drehzahl des mechanischen Drehzahlsensors öfters ausfällt.

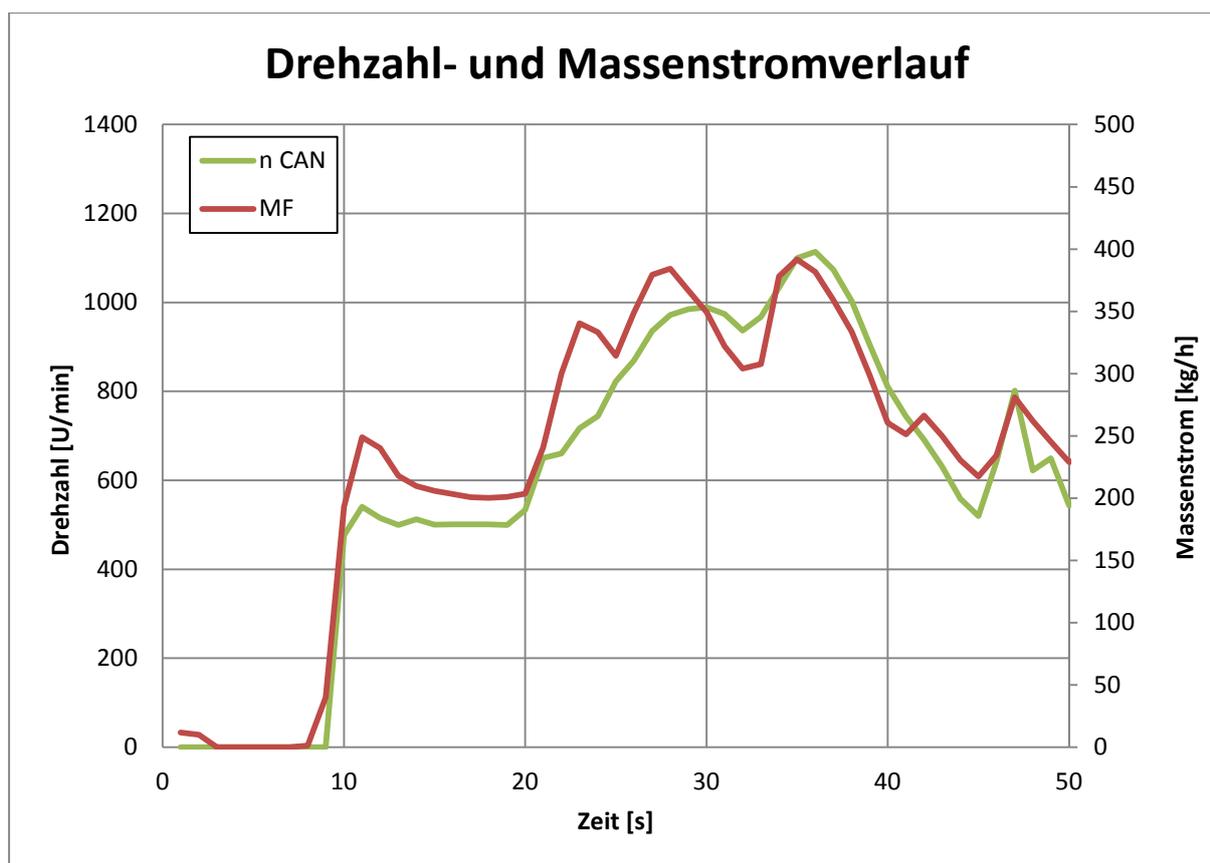


Abbildung 44: Verlauf der CAN-Drehzahl und des Massenstromes über der Zeit

Für den Abgleich des Massenstroms eignet sich die Drehzahl, obwohl sie unabhängig vom Ladedruck ist am besten [36].

Es sei darauf hingewiesen, dass die gasförmigen Abgaskomponenten im trockenen Zustand gemessen wurden und durch eine post processing Funktion im Semtech DS, eine dry to wet Korrektur durchgeführt wurde, sprich eine Berücksichtigung der Feuchte im Abgas. Im Vergleich dazu findet bei den verwendeten Daten keine Korrektur der Ansaugluft hinsichtlich der Umgebungsbedingungen statt. Die Werte mit der sogenannten KH-Korrektur sind im Semtech zwar vorhanden werden aber nicht berücksichtigt.

5.1.5 Fahrzeug 1

5.1.5.1 Messergebnisse Fahrzeug 1

Die durchschnittlichen Emissionswerte der einzelnen Routen sind sowohl arbeitsspezifisch als auch streckenspezifisch in Tabelle 16 dargestellt. Wobei bei allen Messungen die Kühlmitteltemperatur über 70°C lag, somit fanden alle RDE Messungen bei betriebswarmen Motor statt.

Tabelle 16: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 1

Route	Umgebungs- temperatur	Emissionen gesamt							
		arbeitsspezifisch							
		CO2 [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx Tp [g/kWh]	NOx Roh [g/kWh]	NO [g/kWh]	Verbrauch [g/kWh]	Soot [g/kWh]
Köflach N2/VM	5 - 11°C	750,3	1,253	0,032	0,166	2,949	0,166	238,8	3,70E-05
Köflach N2/NM	13 - 16°C	750,7	1,684	0,007	0,113		0,101	239,1	4,24E-05
Ries N2/VM	2 - 7°C	748,0	0,429	0,051	0,181	3,306	0,170	237,7	5,32E-05
Ries N2/NM	15°C	757,8	0,894	0,007	0,045	3,395	0,045	241,0	4,78E-05
		streckenspezifisch							
		CO2 [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx Tp [g/km]	NOx Roh [g/km]	NO [g/km]	Verbrauch [l/100km]	Soot [g/km]
Köflach N2/VM	5 - 11°C	589,7	0,985	0,025	0,130	2,316	0,130	22,4	2,91E-05
Köflach N2/NM	13 - 16°C	564,3	1,266	0,005	0,085		0,076	21,5	3,19E-05
Ries N2/VM	2 - 7°C	572,5	0,328	0,039	0,138	2,530	0,130	21,7	4,07E-05
Ries N2/NM	15°C	555,2	0,655	0,005	0,033	2,488	0,033	21,1	3,50E-05

Auffallend ist, dass die Stickoxide bei den Nachmittagsfahrten, also bei höheren Umgebungstemperaturen, niedriger sind als jene bei niedrigeren Umgebungstemperaturen, obwohl sich die NOx-Roh Emissionen geringfügig erhöhen. Dies dürfte mit der geringeren Effektivität des SCR-Systems bei niedrigen Temperaturniveaus zusammenhängen. Hinsichtlich der unterschiedlichen Routen lassen sich keine großen Unterschiede bezüglich der Emissionen erkennen.

Tabelle 17: Streckeneigenschaften Fahrzeug 1

Zyklus	Strecke [km]	positive Arbeit [kWh]	Dauer [min]	streckenbasiert			zeitbasiert		
				Stadt- Anteil [%]	Überland- Anteil [%]	Autobahn- Anteil [%]	Stadt- Anteil [%]	Überland- Anteil [%]	Autobahn- Anteil [%]
Köflach N2/VM	140,2	110,1	178	23,2	23,3	53,5	52,4	18,4	29,2
Köflach N2/NM	137,1	103,0	172	23	22	55	51,7	17,6	30,7
Ries N2 / VM	127,7	97,7	165	23,2	42,5	34,3	48,9	32,2	18,9
Ries N2 / NM	127,8	93,6	168	23,7	34,9	41,4	50,9	26,5	22,6

Die genauen Streckencharakteristiken sind in Tabelle 17 aufgelistet. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den zeit- und streckenbasierten Anteilen. Wobei die Stadtanteile für ein N2 Fahrzeug durchwegs um ca. 5-7% zu hoch sind (siehe Tabelle 12). Die restlichen Abweichungen sind Routenabhängig. Die WHTC – Arbeit wurde mit einem

institutseigenen Tool auf Basis der Vollastkurve berechnet und ist für dieses Fahrzeug 14.75KWh, dadurch erfüllen die Routen die Anforderung hinsichtlich geleisteter Arbeit.

Zusätzlich wurde die Auswertung der gesamten Tailpipe-Emissionen noch in Stadt-, Überland-, und Autobahnanteile getrennt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 1

Zyklus	Umgebungs- temperatur	arbeitsspezifisch					
		CO ₂ [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x Tp [g/kWh]	NO [g/kWh]	Verbrauch [g/kWh]
Emissionen Stadt							
Köflach N2/VM	5 - 11°C	934,3	2,172	0,092	0,514	0,514	296,3
Köflach N2/NM	13 - 16°C	925,7	3,141	0,024	0,412	0,367	293,5
Ries N2/VM	2 - 7°C	967,9	0,768	0,119	0,379	0,362	306,9
Ries N2/NM	15°C	975,6	1,684	0,023	0,087	0,087	309,4
Emissionen Überland							
Köflach N2/VM	5 - 11°C	692,0	1,143	0,037	0,080	0,080	219,5
Köflach N2/NM	13 - 16°C	689,5	1,425	0,005	0,077	0,069	218,7
Ries N2/VM	2 - 7°C	679,0	0,354	0,044	0,154	0,152	215,3
Ries N2/NM	15°C	681,3	0,753	0,004	0,066	0,066	216,1
Emissionen Autobahn							
Köflach N2/VM	5 - 11°C	695,9	0,902	0,004	0,005	0,005	220,7
Köflach N2/NM	13 - 16°C	701,9	1,180	0,000	0,003	0,002	222,6
Ries N2/VM	2 - 7°C	684,6	0,291	0,013	0,000	0,000	217,1
Ries N2/NM	15°C	697,7	0,561	0,000	0,003	0,003	221,2

In Tabelle 18 ist gut zu sehen, dass der überwiegende Teil der Schadstoffemissionen im Stadtverkehr emittiert wird. Dabei muss aber auch berücksichtigt werden, dass die verrichtete Arbeit im Stadtverkehr geringer ist und sich somit die arbeitsspezifischen Emissionen erhöhen. Auf den Autobahnanteilen konnten praktisch keine HC und NO_x-Emissionen mehr gemessen werden. Dies liegt mitunter auch an der Streckenführung. Da das Abgasnachbehandlungssystem bei den Autobahnanteilen zum größten Teil auf Betriebstemperatur ist und falls das Abgasnachbehandlungssystem steigungsbedingt abkühlt, so ist für diese eher kurzen kühleren Phasen genug NH₃ eingespeichert (Abbildung 45).

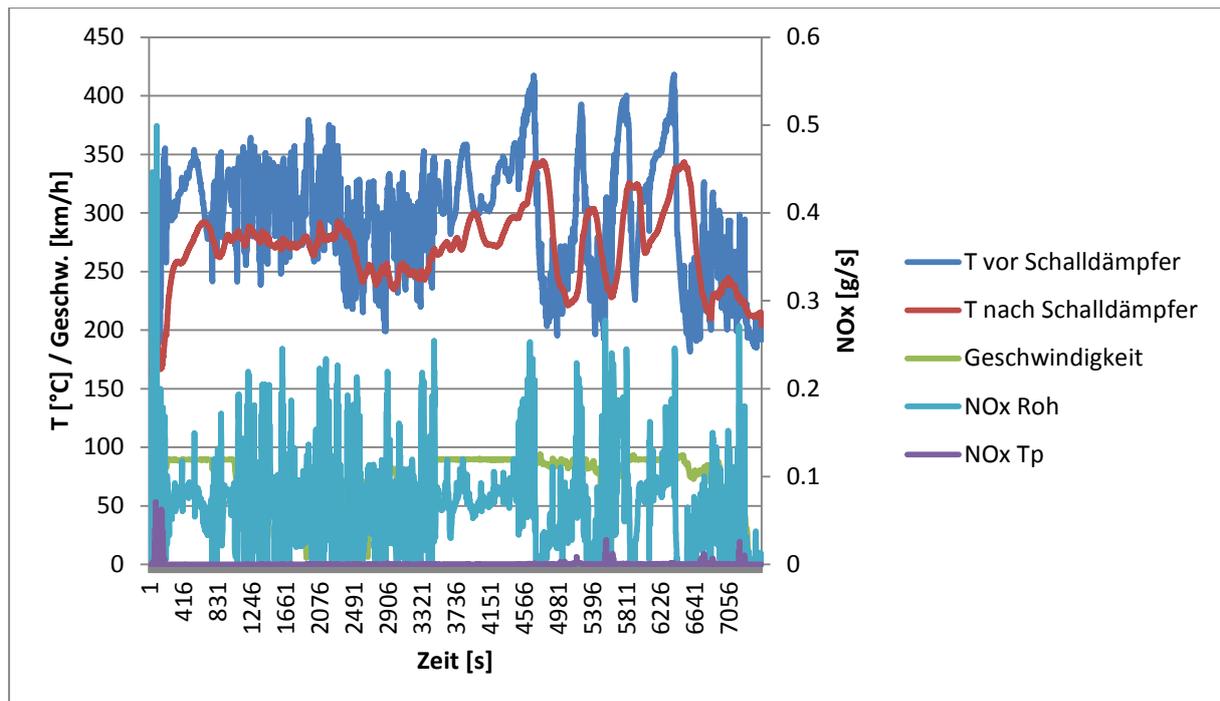


Abbildung 45: Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf einer Köflach-Route (Fahrzeug 2)

Um die Messwerte mit den geforderten Grenzwerten (siehe Tabelle 13) vergleichen zu können, müssen die 90% Perzentil Ergebnisse mittels Moving Average Windows [16], berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 19 sichtbar. Diese Auswertung wurde mit den gesetzlichen Auswertetool EMROAD durchgeführt.

Tabelle 19: 90% Perzentil EMROAD Ergebnisse Fahrzeug 1

Emroad Ergebnisse		
90 % Perzentil		
CO	HC	NOx Tp
[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
1,14	0,04	0,03
1,48	0,01	0,03
0,45	0,07	0,31
0,89	0,02	0,13

5.1.5.2 Auffälligkeiten Fahrzeug 1

Wie schon vorab erwähnt, waren die Messdaten von Fahrzeug 1 bereits vorhanden und mussten nur noch ausgewertet werden. Aus technischen Gründen stehen keine CAN-Daten für dieses Fahrzeug zu Verfügung. Des Weiteren war bei der Nachmittagsfahrt der Köflach-Route der NOx-Sensor nicht einsatzbereit, somit konnten für diese Fahrt keine NOx-Roh Emissionen gemessen werden. Bei der Vormittagsfahrt der Köflach Route wurde der geplante Wendepunkt in Köflach versäumt, aus diesem Grund ist die Strecke am Vormittag länger als jene am Nachmittag (siehe Tabelle 17).

Bei der Auswertung der Stickoxide wurde eine Drift von NO und NO₂ Konzentrationen ins Negative erkannt (Abbildung 46). Zu diesem Problem kam es bei allen vier Messfahrten dieses Fahrzeuges. Eine Driftkorrektur erfolgt je nach Driftverhalten, so wurde bei der Messung in Abbildung 46, der NO₂-Drift durch eine Gerade korrigiert. Je nach Drift-

Verhalten erfolgte die Korrektur bei anderen Messfahrten.

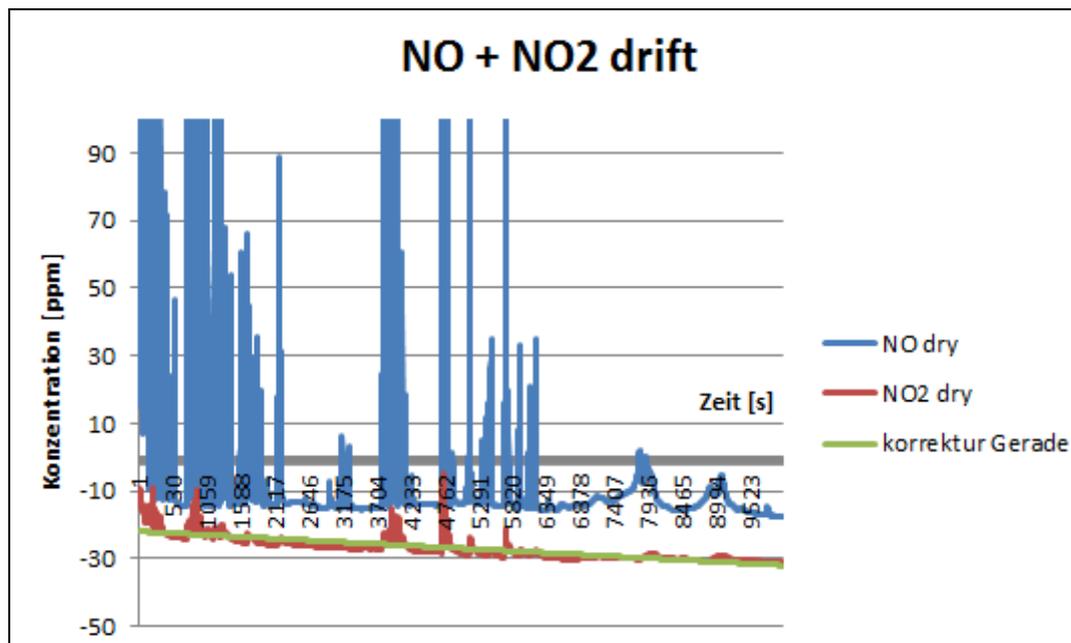


Abbildung 46: Abgedriftete NO_x-Konzentrationen von Fahrzeug 1

Bei einem bereits vor dieser Arbeit ausgewerteter Vergleich zwischen Semtech und CVS waren die CO₂ Massen mit dem Semtech gemessen durchwegs um ca. 10% höher als mit der CVS. Bei einem Abgleich des Massenstromsignals mit einem Referenzgerät, konnte die gleiche Tendenz festgestellt werden. Aus diesem Grund wurde der gemessene Massenstrom bei den RDE-Fahrten um 10% nach unten korrigiert.

5.1.6 Fahrzeug 2

5.1.6.1 Messergebnisse Fahrzeug 2

Auch bei diesem Fahrzeug lag die Kühlmitteltemperatur über 70°C und somit fanden alle RDE Messungen bei betriebswarmen Motor statt.

Tabelle 20: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 2

Zyklus	Umgebungs- temperatur	Emissionen gesamt						
		arbeitspezifisch						
		CO2 [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx Tp [g/kWh]	NOx Roh [g/kWh]	NO [g/kWh]	Verbrauch [g/kWh]
Köflach N3/NM	20°C	636,1	0,052	0,002	0,046	4,115	0,046	201,9
Köflach N3/VM	10 - 14.5°C	646,0	0,188	0,005	0,051	3,928	0,049	205,1
Ries N3/NM_1	12 - 15°C	659,6	0,389		0,047	3,896	0,047	209,5
Ries N3/NM_2	9 - 13°C	652,2	0,142	0,004	0,102	4,246	0,097	207,1
		streckenspezifisch						
		CO2 [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx Tp [g/km]	NOx Roh [g/km]	NO [g/km]	Verbrauch [l/100km]
Köflach N3/NM	20°C	513,1	0,042	0,002	0,037	3,319	0,037	19,5
Köflach N3/VM	10 - 14.5°C	522,4	0,152	0,004	0,041	3,176	0,040	19,8
Ries N3/VM_1	12 - 15°C	528,7	0,312		0,038	3,123	0,038	20,1
Ries N3/VM_2	9 - 13°C	522,8	0,114	0,003	0,082	3,404	0,078	19,8

Hinsichtlich der NOx-Emissionen kann bei diesem Fahrzeug kein Einfluss der Umgebungsbedingungen festgestellt werden. Die NOx-Roh Emissionen sind im Vergleich zu Fahrzeug 1 zwar höher, dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die NOx-Tailpipe Emissionen, welche sich wie auch die restlichen Emissionskomponenten auf extrem niedrigem Niveau befinden. Auch der streckenspezifische Verbrauch bzw. CO₂ Ausstoß liegt bei diesem Fahrzeug unter jenen von Fahrzeug 1. Davon konnte aufgrund des höheren Energieverbrauchs (Tabelle 21) infolge der höheren Beladung und des stärkeren Motors nicht ausgegangen werden. Die gesamten HC – Emissionen sind sowohl bei diesem als auch beim ersten Fahrzeug auf geringstem Niveau.

Tabelle 21: Streckeneigenschaften Fahrzeug 2

Zyklus	Strecke [km]	positive Arbeit [kWh]	Dauer [min]	streckenbasiert			zeitbasiert		
				Stadt- Anteil [%]	Überland- Anteil [%]	Autobahn- Anteil [%]	Stadt- Anteil [%]	Überland- Anteil [%]	Autobahn- Anteil [%]
				Köflach N3/NM	149,5	120,6	139	6,2	21,2
Köflach N3/VM	149,9	121,3	132	6,4	24,3	69,3	20,2	25,5	54,4
Ries N3/VM_1	164,4	121,3	182	10,9	22,6	66,4	38,3	19,6	42,1
Ries N3/VM_2	164,6	127,9	162	12	20	68,1	32,8	19,1	48,1

Die Köflach Route für N3 – Fahrzeuge eignet sich durchaus, für einen den Richtlinien entsprechenden Test. Bei der Nachmittagsfahrt wurden die Kriterien dafür komplett eingehalten, bei der Vormittagsfahrt war der Stadtanteil um 0,2% zu hoch. Es zeigt sich, dass sich die Streckenführung prinzipiell eignet. Ob die Geschwindigkeitsverteilungen eingehalten

werden können, hängt bei dieser Route somit vom Verkehrsaufkommen ab. Bei der Ries-Route muss der Stadt und Autobahnteil noch angepasst werden. Die geleistete Arbeit dieser Routen liegt ca. 8-mal über der WHTC – Arbeit dieses Fahrzeuges welche bei 15,7 kWh liegt (Tabelle 21). Somit können die Routen prinzipiell gekürzt werden.

Tabelle 22: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 2

Zyklus	Umgebungs- temperatur	arbeitspezifisch					
		CO ₂ [g/kWh]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x Tp [g/kWh]	NO [g/kWh]	Verbrauch [g/kWh]
Emissionen Stadt							
Köflach N3/NM	20°C	784,0	0,148	0,007	0,187	0,184	248,9
Köflach N3/VM	10 - 14.5°C	792,7	0,334	0,016	0,165	0,164	251,8
Ries N3/NM_1	12 - 15°C	842,6	0,671		0,113	0,113	267,8
Ries N3/NM_2	9 - 13°C	766,8	0,245	0,022	0,221	0,199	243,5
Emissionen Überland							
Köflach N3/NM	20°C	609,7	0,069	0,001	0,044	0,044	193,5
Köflach N3/VM	10 - 14.5°C	626,4	0,165	0,004	0,047	0,047	198,9
Ries N3/NM_1	12 - 15°C	670,9	0,374		0,061	0,061	213,1
Ries N3/NM_2	9 - 13°C	680,7	0,151	0,001	0,212	0,204	216,1
Emissionen Autobahn							
Köflach N3/NM	20°C	622,3	0,033	0,001	0,027	0,027	197,5
Köflach N3/VM	10 - 14.5°C	629,5	0,175	0,004	0,033	0,033	199,9
Ries N3/NM_1	12 - 15°C	635,4	0,335		0,025	0,025	201,8
Ries N3/NM_2	9 - 13°C	629,6	0,115	0,000	0,044	0,043	199,9

Anhand von Tabelle 22 ist auch bei diesem Fahrzeug zu erkennen, dass im Stadtbereich die meisten Schadstoffe ausgestoßen werden. Auch hier dürfte, wie schon zuvor beschrieben die Routenführung einen Einfluss dazu beitragen.

Die mit EMROAD durchgeführten 90% Perzentil Ergebnisse (siehe Tabelle 23) sind bei allen Messfahrten klar unterm Grenzwert (siehe Tabelle 13).

Tabelle 23: 90% Perzentil EMROAD Ergebnisse Fahrzeug 2

Emroad Ergebnisse		
90 % Perzentil		
CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x Tp [g/kWh]
0,08	0,00	0,06
0,22	0,00	0,08
0,44		0,10
0,18	0,00	0,29

5.1.6.2 Auffälligkeiten Fahrzeug 2

Bei allen vier Messfahrten mit Fahrzeug 2 war der Soot-Sensor defekt, dadurch gibt es für die RDE-Messungen dieses Fahrzeug keine Messdaten bezüglich der Rußpartikel. In Abbildung 47 ist durch den starken Anstieg der Temperatur nach Schalldämpfer, eine aktive Regeneration des DPF zu erkennen, weil die Temperatur vor dem Schalldämpfer nicht sprunghaft anstieg, wird vermutet, dass Kraftstoff beim Ausstoßtakt eingespritzt wurde und dieser dann im DOC verbrannt ist. Damit waren die Werte dieser Messfahrt für die Simulation nicht zu gebrauchen und der Test musste wiederholt werden, da eine aktive DPF Regeneration nur ca. alle 1000 km vorkommt und somit für diese Betrachtungen nicht repräsentativ ist. Bei der Wiederholung dieser Fahrt kam es zu mehrmaligen Systemabstürzen, wodurch die Messdaten der CAN-Schnittstelle und des NO_x-Roh Sensors verloren gingen. Die Folge dessen war, dass die Fahrt ein weiteres Mal wiederholt werden musste. Schließlich konnte die Vorgabe lt. Messprogramm eine Fahrt am Nachmittag und eine am Vormittag zu absolvieren, aus terminlichen Gründen nicht mehr eingehalten werden.

Bei der ersten verwendbaren Riesfahrt (Ries N3/VM_1) musste trotzdem auf die HC-Messung verzichtet werden, da der FID nicht gezündet hat.

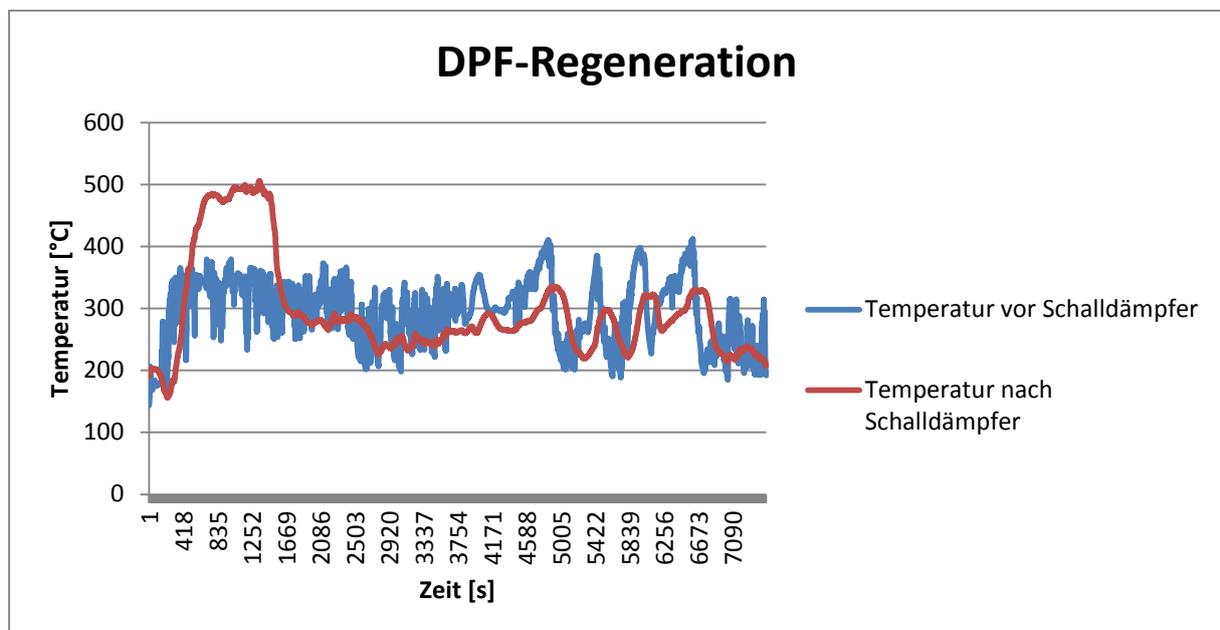


Abbildung 47: Zeigt die Temperaturverläufe vor und nach Schalldämpfer für die erste Messfahrt mit Fahrzeug 2

5.1.7 Fahrzeug 3

5.1.7.1 Messergebnisse Fahrzeug 3

Bei der Stadtroute 1 handelt es sich um einen Kaltstart, die anderen Messungen wurden bei betriebswarmen Motor durchgeführt.

Tabelle 24: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 3

Zyklus	Umgebungs- temperatur	Emissionen gesamt					
		arbeitsspezifisch					
		CO ₂ [g/kWh]	CO [g/kWh]	NO _x Tp [g/kWh]	NO _x Roh [g/kWh]	NO [g/kWh]	Verbrauch [g/kWh]
Köflach N3/VM	12°C	649,3	0,316	0,161	9,488	0,15	206,2
Köflach N3/NM	22°C	647,6	0,164	0,202	9,541	0,195	205,6
Ries N3/VM	10 - 16°C	642,3	0,385	0,22	9,344	0,207	204
Ries N3/NM	15°C	655,5	0,161	0,259	9,565	0,253	208,1
Stadtroute 1	5 - 8°C	682,1	0,747	1,135	8,853	0,879	216,9
Stadtroute 2	9 - 12°C	740,6	0,444	1,253	7,524	1,192	235,3
		streckenspezifisch					
		CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x Tp [g/km]	NO _x Roh [g/km]	NO [l/100km]
Köflach N3/VM	12°C	766,7	0,373	0,19	11,204	0,177	29,1
Köflach N3/NM	22°C	752,1	0,19	0,235	11,081	0,227	28,6
Ries N3/VM	10 - 16°C	761,7	0,457	0,261	11,081	0,246	28,9
Ries N3/NM	15°C	786,3	0,193	0,311	11,473	0,304	29,9
Stadtroute 1	5 - 8°C	1006,3	1,102	1,675	13,062	1,297	38,3
Stadtroute 2	9 - 12°C	1091,5	0,654	1,847	11,088	1,756	41,5

Die durchschnittlichen Emissionswerte von Fahrzeug 3 (Tabelle 24) zeigen im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen, um den Faktor 3 höhere NO_x- Roh Emissionen. Davon war angesichts der fehlenden Abgasrückführung und der damit verbundenen höheren Verbrennungstemperatur, auszugehen. Beachtlich dagegen sind die Werte für die NO_x-Tailpipe Emissionen, diese sind trotz der hohen Rohemissionen auf niedrigem Niveau. Bei diesem Fahrzeug konnte kein Einfluss der Umgebungstemperaturen festgestellt werden.

Die NO_x-Roh Emissionen befinden sich bei den Fahrten der Ries-, sowie der Köflachroute praktisch im selben Bereich. Bei den zwei Stadtfahrten liegen sie etwas darunter. Dazu muss jedoch erwähnt werden dass es sich bei Stadtroute 1 um einen Kaltstart gehandelt hat, und bei der Stadtroute 2, die Hälfte der Fahrt ohne Beladung absolviert wurde, was wiederum zu geringeren Temperaturen führt und somit die niedrigeren NO_x-Roh Emissionen erklärt.. Der arbeitsspezifische Verbrauch befindet sich in ähnlichen Bereichen wie bei Fahrzeug 2. Die erhöhten NO_x-Emissionen der Stadtroute sind auf ein zu geringes Temperaturniveau zurückzuführen, was in Kapitel 6 noch genauer betrachtet wird.

Bemerkenswert ist, dass bei allen drei Fahrzeugen der NO-Anteil an den Stickoxiden wesentlich höher ist als der NO₂-Anteil. Obwohl für eine selektive katalytische Reduktion ein Anteil von 1:1 von Vorteil wäre (Kapitel 3.2.3).

Tabelle 25: Streckeneigenschaften Fahrzeug 3

Zyklus	Strecke [km]	positive Arbeit [kWh]	Dauer [min]	streckenbasiert			zeitbasiert		
				Stadt- Anteil [%]	Überland- Anteil [%]	Autobahn- Anteil [%]	Stadt- Anteil [%]	Überland- Anteil [%]	Autobahn- Anteil [%]
				Köflach N3/VM	148,6	175,5	149	12	18,3
Köflach N3/NM	149,3	173,4	142	10,6	19,8	69,6	29	19,6	51,4
Ries N3/VM	163,9	194,4	160	14,3	16,3	69,4	34,1	15,9	50
Ries N3/NM	164,2	197	166	14,1	17	68,9	35,7	16,5	47,8
Stadtroute 1	61,9	91,32	115	46,9	17,7	35,4	76,5	9,8	13,7
Stadtroute 2	25,5	37,58	111	91,8	8,2	0	97,9	2,1	0

Die geforderte Geschwindigkeitsaufteilung konnte mit diesem Fahrzeug bei keiner Route eingehalten werden. Obwohl sich das Fahrzeug in der gleichen Gewichtsklasse (N3) befindet wie das Fahrzeug 2, ergeben sich gänzlich andere Verteilungen, aufgrund der Größe und Masse eines Sattelzuges. Für die Absolvierung des WHTC benötigt dieses Fahrzeug eine Arbeit von 34,4kWh. Bei der Köflachroute wird die WHTC – Arbeit ca. 5,1-mal gebraucht, damit erfüllt die Route in dieser Hinsicht gerade noch den geforderten Wert für einen konformen Test. Des Weiteren ist in Tabelle 25 ersichtlich, dass es bei Stadtroute 2 fast ausschließlich einen Stadtanteil gibt, was für eine spätere Betrachtung des Temperaturmanagements von Vorteil ist.

Auch für dieses Fahrzeug wurden die gesamten Emissionen in einen Stadt-, Überland- und Autobahnanteil aufgeteilt (Tabelle 26). Im Unterschied zu den beiden anderen Fahrzeugen gibt es nicht so einen markanten Kontrast zwischen den verschiedenen Anteilen, hinsichtlich der NOx Emissionen.

Tabelle 27 zeigt, dass die Euro VI Grenzwerte mit diesem Fahrzeug deutlich unterschritten werden, obwohl bei der Reduktion der Stickoxide auf innermotorische Maßnahmen verzichtet wurde.

Tabelle 26: Durchschnittliche Emissionswerte von Fahrzeug 3

Zyklus	Umgebungs- temperatur	arbeitsspezifisch				
		CO ₂ [g/kWh]	CO [g/kWh]	NO _x Tp. [g/kWh]	NO . [g/kWh]	Verbrauch [g/kWh]
Emissionen Stadt						
Köflach N3/VM	12°C	712,4	0,373	0,205	0,194	226,3
Köflach N3/NM	22°C	694,9	0,201	0,217	0,215	220,7
Ries N3/VM	10 - 16°C	666,7	0,360	0,384	0,360	211,8
Ries N3/NM	15°C	707,9	0,231	0,309	0,300	224,8
Stadtroute 1	5 - 8°C	712,0	0,843	1,693	1,370	226,4
Stadtroute 2	9 - 12°C	730,8	0,442	1,261	1,198	232,2
Emissionen Überland						
Köflach N3/VM	12°C	659,9	0,289	0,230	0,217	209,6
Köflach N3/NM	22°C	662,4	0,184	0,292	0,285	210,3
Ries N3/VM	10 - 16°C	645,6	0,336	0,197	0,190	205,1
Ries N3/NM	15°C	627,6	0,143	0,329	0,325	199,3
Stadtroute 1	5 - 8°C	657,5	0,630	0,525	0,342	209,0
Stadtroute 2	9 - 12°C	1065,1	0,518	1,004	0,985	338,3
Emissionen Autobahn						
Köflach N3/VM	12°C	625,4	0,307	0,124	0,114	198,7
Köflach N3/NM	22°C	628,8	0,146	0,167	0,159	199,7
Ries N3/VM	10 - 16°C	632,0	0,410	0,165	0,155	200,8
Ries N3/NM	15°C	642,9	0,137	0,216	0,210	204,1
Stadtroute 1	5 - 8°C	629,8	0,603	0,250	0,102	200,2
Stadtroute 2	9 - 12°C					

Tabelle 27: 90% Perzentil EMROAD Ergebnisse Fahrzeug 3

Emroad Ergebnisse 90 % Perzentil	
CO [g/kWh]	NO _x Tp [g/kWh]
0.340	0.230
0.180	0.300
0.470	0.220
0.170	0.290

5.1.7.2 Auffälligkeiten Fahrzeug 3

Bei Fahrzeug 3 konnten wie schon bei Fahrzeug 2 keine Rußpartikel gemessen werden. Diesmal war ein Einbau des Soot-Sensors aus Platzgründen nicht möglich. Des Weiteren waren die Messwerte des Drehzahlsensors unplausibel und fehlerhaft. Zudem machte ein Defekt des FID die HC-Messung unmöglich.

Hinsichtlich der GPS-Daten standen nur jene der VBOX zur Verfügung. Das Semtech war bei diesem Fahrzeug in der Fahrerkabine angebracht. Da durch das Ausscheren des Aufliegers bei Kurvenfahrten die Leitungen der Messgeräte beschädigt werden könnten, wenn es sich im Auflieger befinden würde.

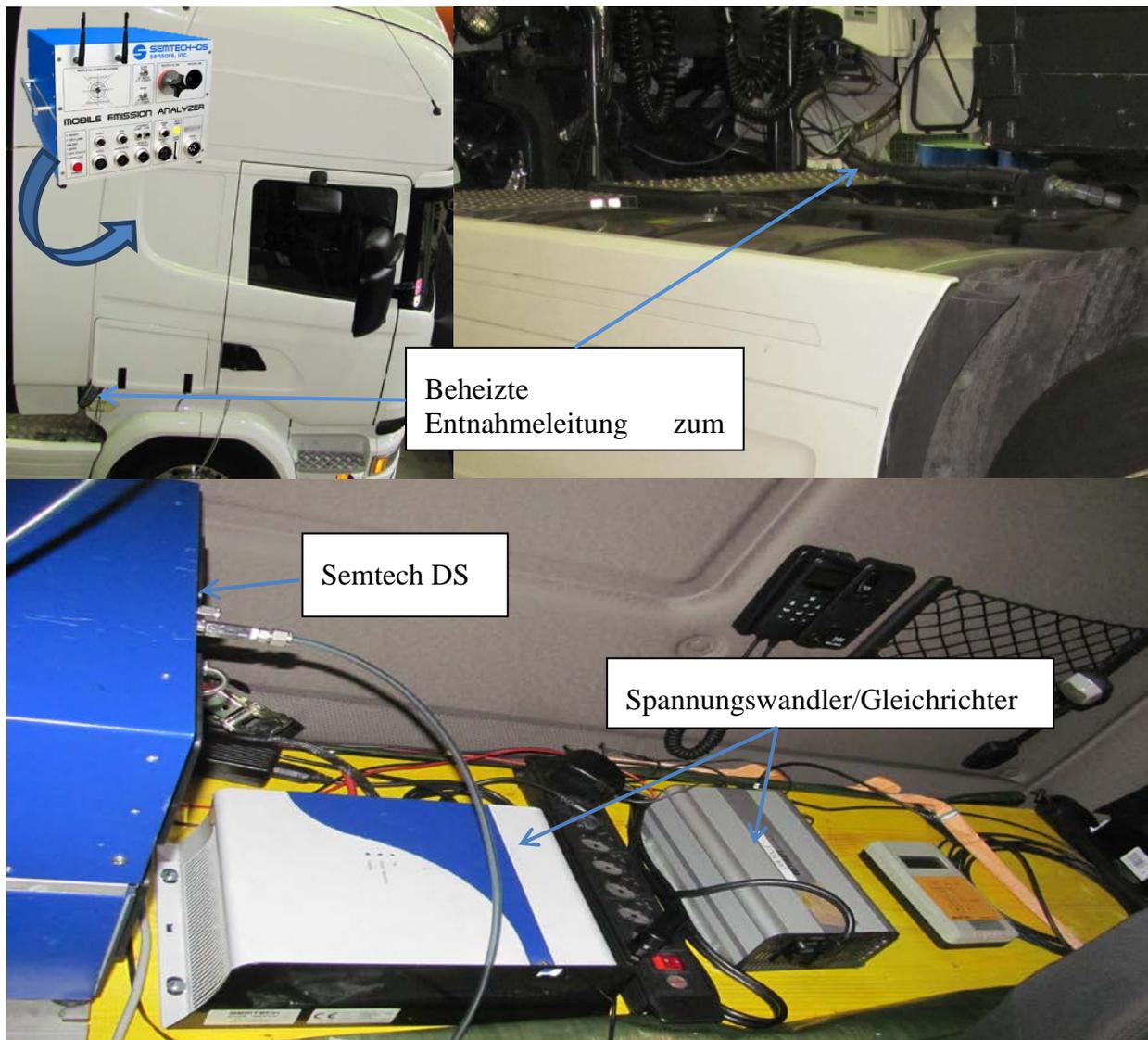


Abbildung 48: Aufbau Semtech Fahrzeug 3

5.1.8 Einfluss der Umgebungstemperatur

Der Einfluss der Umgebungstemperaturen wurde anhand der gemessenen CO₂ und NO_x-Roh (EO) Emissionen der ISC konformen Messungen analysiert und von Abbildung 49 bis Abbildung 51 graphisch dargestellt. Wie zu sehen ist kann anhand der vorhandenen Messdaten kein deutlicher Einfluss der Umgebungstemperaturen festgestellt werden.

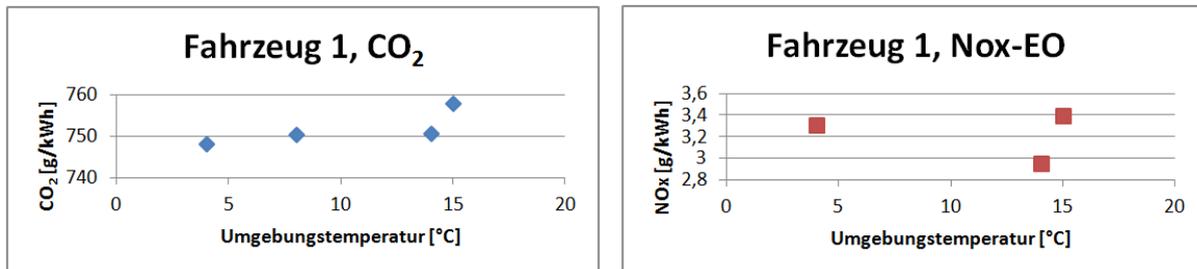


Abbildung 49: Einfluss der Umgebungstemperatur (Fahrzeug 1)

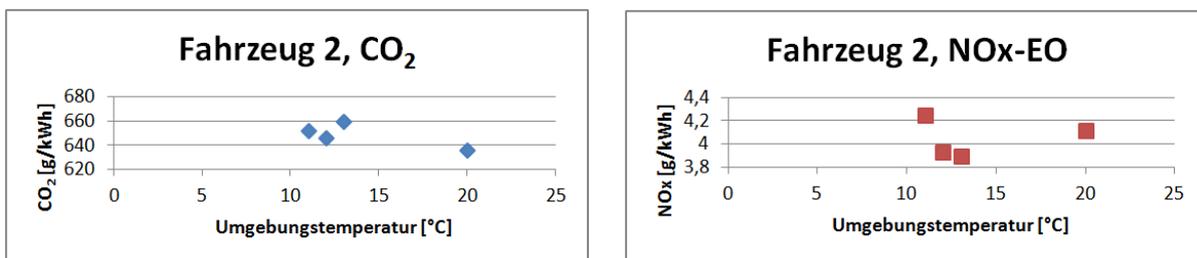


Abbildung 50: Einfluss der Umgebungstemperatur (Fahrzeug 2)

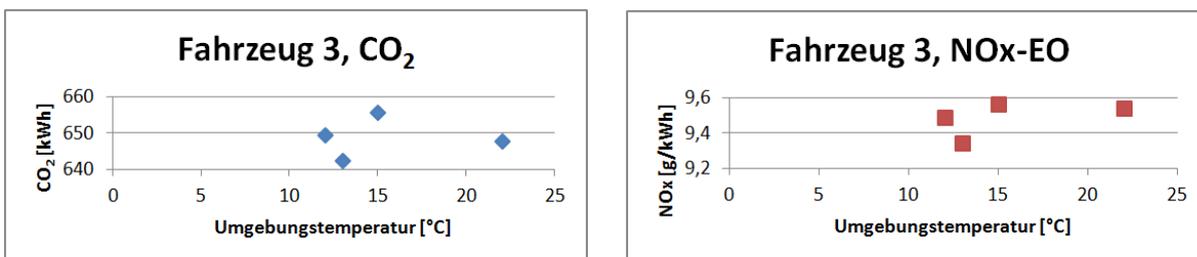


Abbildung 51: Einfluss der Umgebungstemperatur (Fahrzeug 3)

5.2 Messungen am Rollenprüfstand

Durch die Messungen am Rollenprüfstand kann die Plausibilität der PEMS-Messungen, sowohl hinsichtlich der Messgeräte als auch in Bezug auf die RDE-Zyklen, beurteilt werden. Andererseits liefern diese Messungen nützliche Werte zur Bedienung des Simulationsmodells. Der große Vorteil dieser Tests unter Laborbedingungen ist, dass sie jederzeit reproduziert werden können.

5.2.1 Eingesetzte Messtechnik

Grundsätzlich bleibt die Gesamte, in Kapitel 5.1.2 beschriebene Messtechnik der RDE-Messungen beibehalten. Zusätzlich kamen noch folgende Messgeräte zur Anwendung.

Zur Messung der gasförmigen Abgaskomponenten sowie der Partikel, kommt das System KS 3000 der Firma Kristl, Seibt & Co zum Einsatz (Abbildung 52). Dabei handelt es sich um eine CVS-Anlage mit Partikelentnahmesystem. Die Abgasanalyse der gasförmigen Komponenten passiert mit dem Analysesystem CEB-II der Firma AVL. Dieses System besitzt folgende Analysatoren:

- NDIR zu Messung von CO und CO₂ (siehe Kapitel 3.4.4.1)
- Flammenionisationsdetektor (FID) für CmHn (siehe 3.4.4.4)
- Chemoluminiszenzdetektor für NO_x (siehe 3.4.4.3)

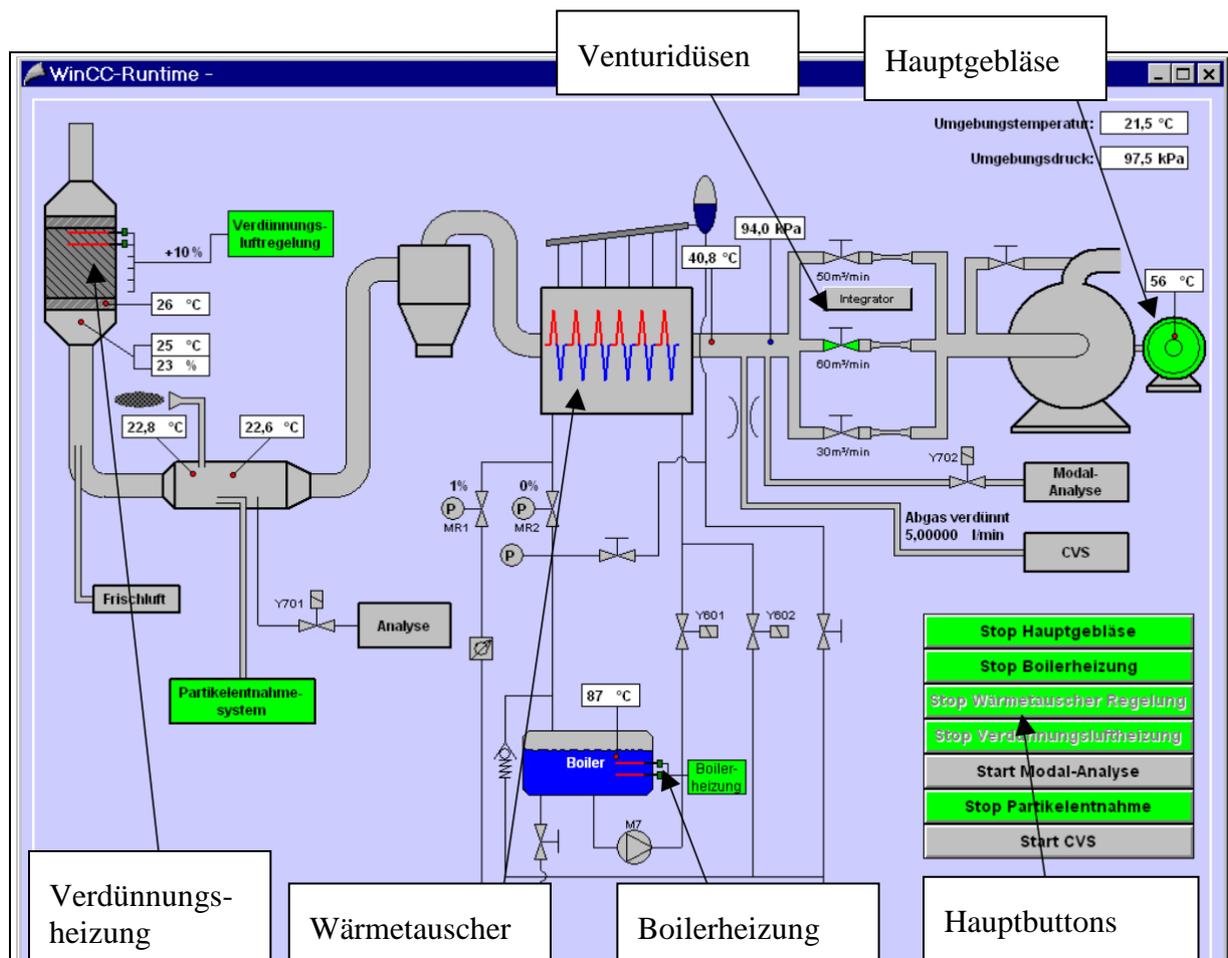


Abbildung 52: Schaltbild CVS-Anlage [31]

Die Partikelanzahlmessung erfolgte mit dem CPC Modell 3790 (Condensation Particle Counter) der Firma TSI. Dieses Modell erfüllt die folgenden Anforderungen:

- Variable Verdünnung (1:1 bis 1:1000)
- Beheizung zur Beseitigung von Nukleationspartikeln ohne festen Kohlenstoffkern
- Antistatische Materialien und kurze Baulängen zur Minimierung von Verlusten

und ist somit für eine konforme Messung geeignet. [12]

Die Ermittlung der Partikelmasse wird gravimetrisch durchgeführt, wie in Kapitel 3.4.4.6 beschrieben.

Bei Fahrzeug Nr.2 wurden die gasförmigen Emissionskomponenten zusätzlich mit dem FTIR-Modell versa 06 der Firma IAG. Mit diesem Verfahren wurden die Komponenten CO₂, NO, NO₂, N₂O und NH₃ gemessen. Rein aus Verfahrenssicht könnten noch wesentlich mehr Abgaskomponenten erfasst werden, da jedoch bei der vorhandenen Software zur Datenerfassung (Tornado von KS) nur noch fünf Eingänge frei waren mussten wir uns auf die zuvor erwähnten Komponenten beschränken. Die Funktionsweise einer Fourier Transform Infrarot Spektroskopie (FTIR) wurde bereits in Kapitel 3.4.4.9 erklärt.

5.2.2 Messprogramm

Tabelle 28: Messprogramm am Rollenprüfstand von Fahrzeug 2

Messnummer	Zyklus	Vorkonditionierung
2305	WHVC 2 Phasig	cold
2306	WHVC 1 Phasig	hot 250°C
2307	HBEFA St&Go (13023)	30' idling
2308	HBEFA St&Go (13023)	hot 250°C
2309	WHVC 2 Phasig	cold
2310	Realworld_urban	hot 180°C
2311	Realworld_motorway	hot 260°C
2312	Realworld_urban	hot 180°C
2313	Realworld_motorway	hot 260°C
2314	Realworld_urban_noload	hot 180°C
2315	Realworld_urban_noload	hot 180°C
2316	Stationärpunkte bei 1000 rpm 4 x 6 Minuten	
2317	Stationärpunkte bei 1500 rpm 4 x 6 Minuten	
2318	Stationärpunkte bei 2000 rpm 4 x 6 Minuten	
2319	Leerlauf_30min	

Das Messprogramm für die Messungen am Rollenprüfstand wird anhand von Fahrzeug 2 (Tabelle 28), beispielhaft für die anderen Versuchsfahrzeuge beschrieben. Das Messprogramm von Fahrzeug 3 ist in dargestellt. Zuerst wurde immer eine Phase des WHVC (siehe Abbildung 7) als Kaltstart durchgeführt. Der WHVC ist ein Rollentest, der die Motorbetriebspunkte des WHTC (Motorprüfstand) abbildet. Dadurch können die Grenzwerte miteinander verglichen werden. Zwischen den zwei Phasen dieses Tests (2305), befand sich der Motor im Leerlauf. Der nächste Testzyklus war ebenfalls wieder eine Phase des WHVC, dieses Mal allerdings mit Vorkonditionierung auf 250°C. Anschließend folgte zweimal der HBEFA Stop & Go Zyklus (Abbildung 53) mit unterschiedlichen Vorkonditionierungen. Bei den Messungen 2310-2315 handelt es sich um Ausschnitte aus den RDE-Fahrten, um die Emissionen am Prüfstand und auf der Straße vergleichen zu können. Die Messungen 2316-2318 wurden ausschließlich zur Erstellung eines Temperaturkennfeldes verwendet. Dafür wurden bei jeweils drei verschiedenen Drehzahlen Stationärpunkte im Schleppbetrieb sowie

bei 25%, 50% und 75% der Last angefahren. Zum Schluss des Messprogrammes erfolgte noch eine 30 minütige Leerlaufmessung.

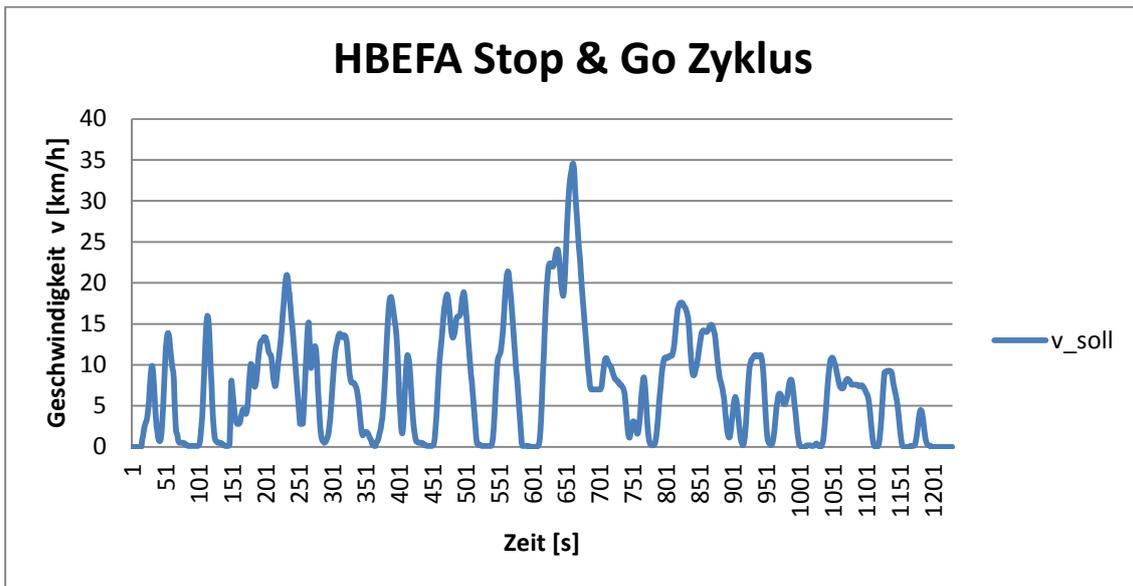


Abbildung 53: Geschwindigkeitsverlauf des HBEFA Stop & Go Zyklus

Tabelle 29: Messprogramm am Rollenprüfstand von Fahrzeug 3

Messnummer	Zyklus	Vorkonditionierung
2329	WHVC 2 Phasig	cold
2330	WHVC 1 Phasig	hot 250°C
2331	HBEFA St&Go (13023)	30' idling
2332	HBEFA St&Go (13023)	hot 250°C
2334	Realworld_urban	hot 265°C
2335	Realworld_motorway	hot 207°C
2336	Realworld_urban	hot 265°C
2337	Realworld_motorway	hot 207°C
2338	Realworld_WarmUp Zyklus	cold
2339	Realworld_urban	hot 265°C
2340	Realworld_motorway_ohne höchsten Gang	hot 207°C
2341	Realworld_urban_noload	hot 265°C
2342	900 rpm 4 x 6 Minuten	
2343	1300 rpm 4 x 6 Minuten	
2344	1800 rpm 4 x 6 Minuten	

5.2.3 Prüfaufbau

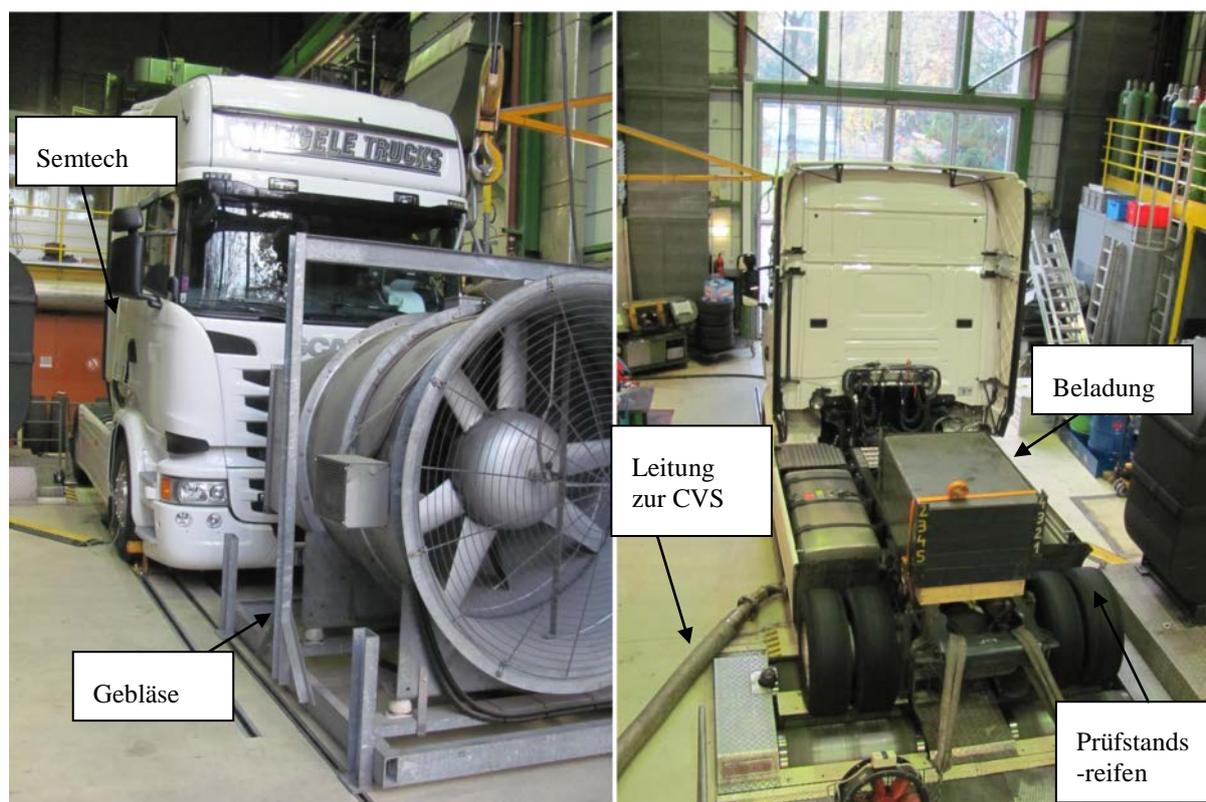


Abbildung 54: Prüfaufbau am Rollenprüfstand

In Abbildung 54 ist der Prüfaufbau einer Rollenmessung anhand von Fahrzeug 3 exemplarisch dargestellt. Die Abgase werden dabei am Ende des Abgasstranges entnommen, und über eine flexible Metallleitung (BOA) dem Verdünnungstunnel der CVS zugeführt. Zusätzlich erfolgt eine weitere Probenentnahme für das PEMS-System, um die Messwerte vergleichen zu können analog zu den RDE-Fahrten. Die Fahrwiderstände werden dabei vom Rollenprüfstand (siehe Kapitel 3.3) simuliert. Damit der Motor nicht überhitzt und reale Bedingungen wie auf der Straße nachgebildet werden, wird der Kühler von einem Gebläse angeblasen. Bei dem verwendeten Gebläse konnte nur ein konstanter Luftstrom eingestellt werden. Eine stufenlose Regelung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit war also nicht möglich. Die Beladung garantiert in diesem Fall eine bessere Auflage der Reifen auf den Rollenköpern, um den Schlupf zu verringern. Bei den Fahrzeugen 1 und 2 sind die Messungen mit den serienmäßigen Reifen durchgeführt worden. Dabei war die Belastung auf die Reifen so groß, dass es bei Fahrzeug 2 zu einer Vulkanisation und somit Zerstörung der Reifen kam. Aus diesem Grund wurden die Messungen am Fahrzeug 3 mit speziellen Prüfstandsreifen durchgeführt. Die Prüfstandsreifen hatten im Gegensatz zu den serienmäßig verbauten Reifen eine geringe Dimension, da bei diesen Reifen das Profil abgezogen wurde, damit sich der Reifen weniger stark erwärmt. Um nun bei den RDE-Zyklen auf der Rolle dieselben Betriebspunkte bzgl. Drehzahl wie auf der Straße anzufahren, musste ein aufgrund der kleineren Reifen entstandener Faktor zwischen Rollen und Straßengeschwindigkeit bestimmt werden. Hierfür wurde bei einer konstanten CAN-Geschwindigkeit die GPS-Geschwindigkeit auf der Straße durch die Geschwindigkeit der Rolle dividiert (5-11).

$$F = \frac{v_{\text{Rolle}}}{v_{\text{GPS}}} \quad (5-11)$$

Besser wäre, wenn mit den unterschiedlichen Reifen die Rollengeschwindigkeit bei Vollgas im höchsten Gang ermittelt und anschließend den Faktor aus diesen beiden Geschwindigkeiten

bestimmt wird. Da dies aber einen Reifenwechsel zufolge hätte, wurde aus zeitlichen Gründen die GPS-Geschwindigkeit herangezogen.

Die für die Rollenmessung vorzugebende Geschwindigkeit erhält man, indem man die gemessene GPS-Geschwindigkeit mit den Faktor F multipliziert (5-12).

$$v_{korr} = F * v_{GPS} \quad (5-12)$$

Neben der Geschwindigkeit muss aus den gleichen Grund auch der geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstandfaktor $R2$ korrigiert werden (5-12).

$$R2_{korr} = \frac{R2}{F^2} \quad (5-12)$$

In Gleichung (5-13) ist die Leistung der Fahrwiderstände dargestellt.

$$P_{FW} = (R0 + R2 * v^2) * v \quad (5-13)$$

5.2.4 Ermittlung der Fahrwiderstände

Um die Betriebspunkte der RDE-Zyklen auf der Rolle bestmöglich nachbilden zu können, ist eine genaue Bestimmung der Fahrwiderstände äußerst wichtig. Es gibt zwar am Institut für alle Fahrzeugtypen Defaultwerte. Da aber der Fahrwiderstand vom Fahrzeugaufbau den Reifen sowie von Windrichtung und Fahrbahnzustand welche bei den Messfahrten unterschiedlich sein können, abhängt, wäre eine Messung mit Default-Werten zu ungenau. Am Institut wird deshalb eine Methode angewendet, die es ermöglicht für jede Messfahrt die mittleren Fahrwiderstände zu berechnen. Diese Methode beruht auf dem Vergleich der Längsdynamiksimulation mit einer gemessenen Leistung (CAN od. CO₂) und wird folgend erklärt.

Die erforderliche Antriebsleistung setzt sich wie folgt zusammen:

$$P_e = P_{Roll} + P_{Luft} + P_{Beschl.} + P_{Stg.} + P_{Nebenaggregate} + P_{Getriebe} \quad (5-14)$$

Korrekterweise müsste Gleichung (5-14) noch mit $P_{Schlupf}$ ergänzt werden. Da der Schlupf einen geringen Einfluss hat und eine exakte Bestimmung schwer möglich wäre, wurde er für diese Betrachtung vernachlässigt.

Für den Rollwiderstand gilt:

$$P_{Roll} = (m_{Fzg.} + m_{Bel.}) * g * (fr0 + fr1 * v) * v \quad (5-15)$$

darin sind $fr0$ und $fr1$ die Rollwiderstandskoeffizienten. Für die Betrachtung von SNF kann $fr1 = 0$ gesetzt werden, da dieser Faktor erst bei höheren Geschwindigkeiten relevant wird.

$$P_{Luft} = fr2 * v^3 \quad (5-16)$$

wobei $fr2$ der Luftwiderstandskoeffizient ist und nach Gleichung (5-17) bestimmt wird.

$$fr2 = c_w * A_{quer} * \frac{\rho_L}{2} \quad (5-17)$$

$P_{Beschl.}$ stellt die Beschleunigungsleistung dar, und wird nach Gleichung (5-18) berechnet.

$$P_{Beschl.} = (m_{Fzg.} + m_{Bel.} + m_{rot}) * a * v \quad (5-18)$$

Die rotatorische Trägheit der Räder wird durch m_{rot} dargestellt. Die rotatorische Masse m_{rot} beträgt überschlagsmäßig 3% vom Leergewicht.

$$P_{Stg.} = (m_{Fzg.} + m_{Bel.}) * g * \sin\alpha * v \quad (5-19)$$

In Gleichung (5-19) ist die Steigungsleistung dargestellt. Sie tritt bei einer Änderung der geodätischen Höhe auf.

Um Gleichung (5-14) zu vervollständigen müssen noch Werte für die Getriebe- und Nebenaggregatsleistung definiert werden. Dabei wird der Getriebewirkungsgrad $\eta_{Getriebe}$ mit 0,9 angenommen. Zur Bestimmung der Nebenaggregatsleistung wird ein Mittelwert aus jenen Werten der CO₂ - Leistung berechnet, bei denen die Geschwindigkeit null ist und somit nur die Nebenaggregate in Betrieb sind.

Wenn man jetzt alle bekannten Größen in die obigen Gleichungen einsetzt, so erkennt man, dass neben der Leistung P_e nur noch die Fahrwiderstände R0 (5-20) und R2 (5-21) unbekannt sind.

$$R0 = fr0 * m_{Fzg.+Bel.} * g \quad (5-20)$$

$$R2 = c_w * A_{quer} * \frac{\rho_L}{2} * v^2 \quad (5-21)$$

Die Leistung P_e kann aber, wie schon bekannt mit der CO₂-Methode ermittelt werden, somit sind R0 und R2 die einzigen Unbekannten. Diese Werte wurden mit der Solver Funktion im Excel so optimiert, dass die Differenz aus der positiven CO₂-Arbeit und der positiven Arbeit aus den Fahrwiderständen ein Minimum ist. Dieser Vorgang wurde pro Fahrzeug für jede Route einmal durchgeführt. Die für die Rollenmessung erforderlichen Fahrwiderstände ergaben sich aus dem Mittelwert der einzelnen Fahrten.

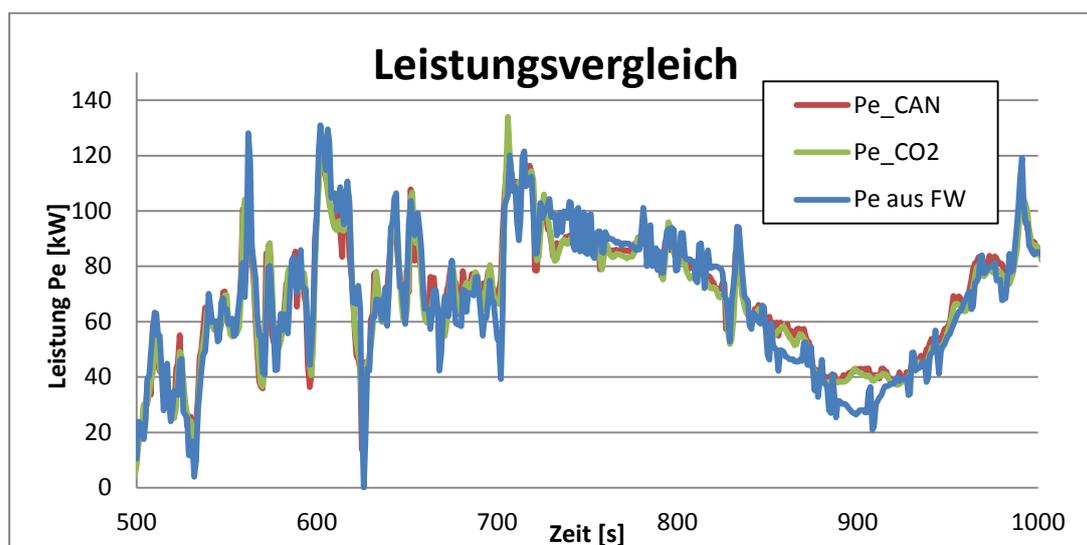


Abbildung 55: Vergleich der Leistungen von Fahrzeug 2 einer Köflach-Route

In Abbildung 55 ist ein Ausschnitt der Leistungen von Fahrzeug 2 entlang der Köflach-Route zu sehen. Dabei ist ersichtlich, dass die zuvor beschriebene Methode zur Bestimmung der Fahrwiderstände recht gut funktioniert. Dies war allerdings nur bei den Fahrzeugen 1 und 2 der Fall, bei Fahrzeug 3 kam es zu erheblichen Abweichungen zwischen der Leistung aus der Längsdynamiksimulation (P_e aus FW) und den CAN bzw. CO₂ Leistungen (siehe Abbildung 56).

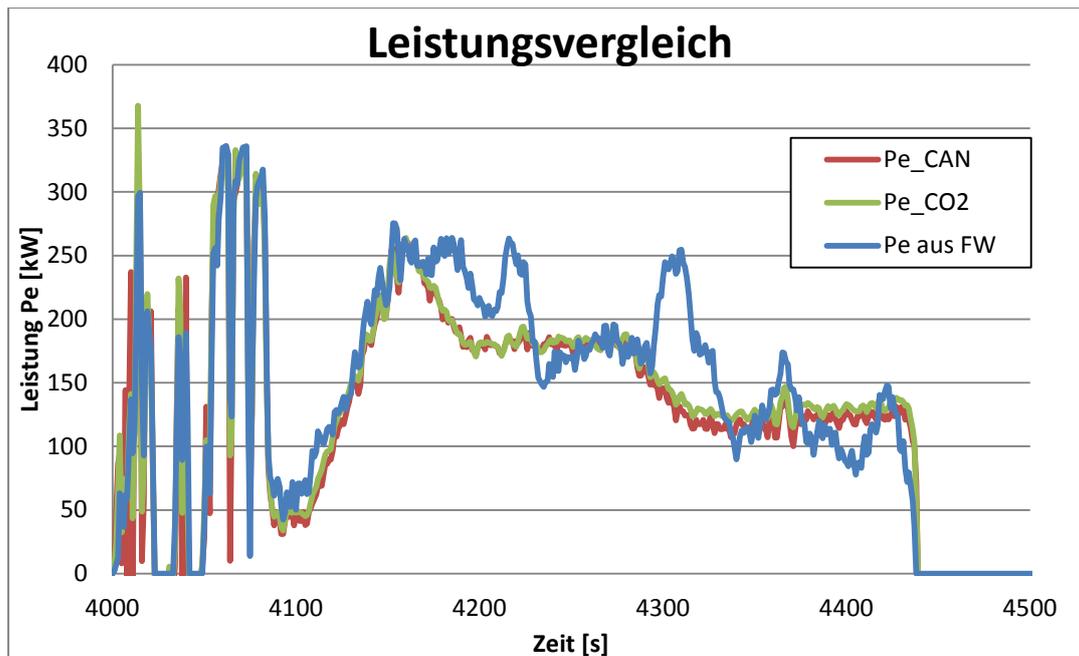


Abbildung 56: Vergleich der Leistungen von Fahrzeug 3 einer Ries-Route

Bei genauerer Betrachtung der Leistung aus der Längsdynamik-Rechnung wurde herausgefunden, dass der Fehler in der Berechnung durch die Steigungsleistung und somit von der geodätischen Höhe verursacht wird. Die Höhe wird vom GPS Signal übernommen und ist somit relativ ungenau. Aus diesem Grund musste eine andere Methode überlegt werden, um auf der Rolle dieselben Betriebspunkte wie auf der Straße nachfahren zu können. Dabei wurden für die Fahrwiderstände Defaultwerte verwendet und über eine Längsdynamiksimulation (siehe Gleichung (5-14)-(5-19)) kontinuierlich die Steigung in jedem Punkt berechnet. Diese Steigung musste dann noch geglättet werden, damit der Zyklus auf der Rolle nachgefahren werden konnte. Ohne Glättung wären die Steigungsunterschiede so groß gewesen, dass die vorgegebene Geschwindigkeit nicht mehr eingehalten werden könnte. In Tabelle 30 sind die verwendeten Fahrwiderstandskonstanten der drei Fahrzeuge abgebildet.

Tabelle 30: Fahrwiderstandskonstanten

Fahrzeug:	1	2	3
R0	929,14	635	1562,5
R2	3,09	2,97	3,18

Bei einer späteren Analyse wurde die Längsdynamikberechnung nochmals durchgeführt, jedoch stammten diesmal die Höhendaten aus einer Höhenkarte von [32]. Dafür wurde entlang der gefahrenen Route eine punktweise Höhenabfrage durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnung, mit den so ermittelten Höhen ist in Abbildung 57 dargestellt.

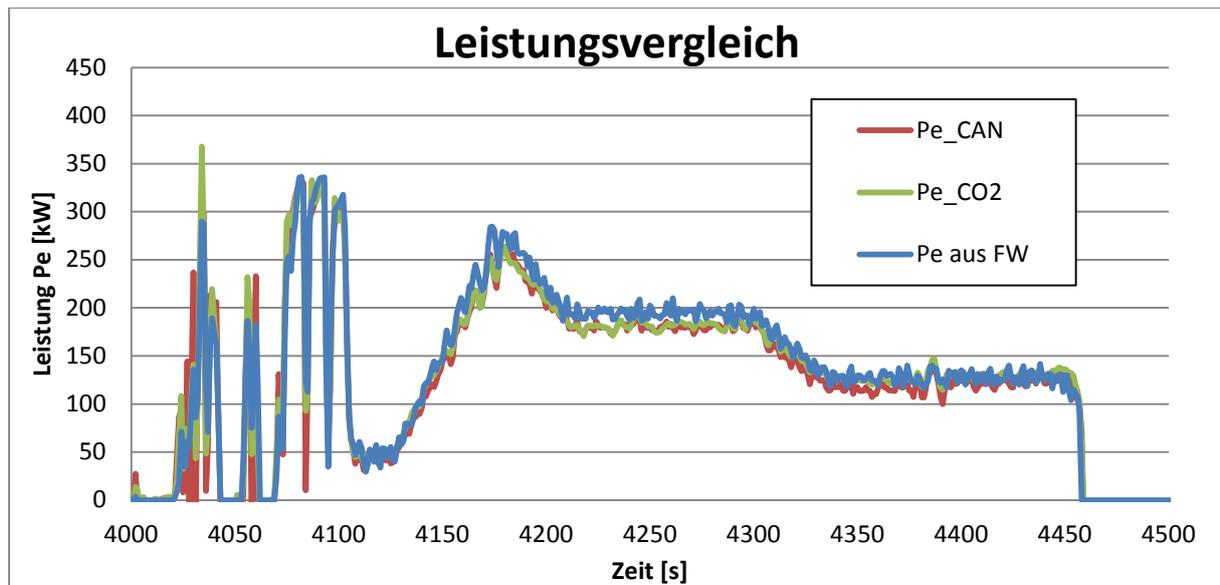


Abbildung 57: Leistungsvergleich mit anderen Höhendaten

Wie zusehen ist lag der Fehler bei der Berechnung tatsächlich an den ungenauen GPS-Höhendaten. Die Genauigkeit der GPS-Daten ist mit $\pm 10\text{m}$ angegeben, was hinsichtlich der Höhe und damit der berechneten Steigung doch zu beträchtlichen Fehlern führen kann. Für zukünftige Projekte wird daher empfohlen die Höhendaten von [32] zu verwenden.

5.2.5 Ergebnisse der CVS-Messung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Beutelwerten der CVS-Messung von Fahrzeug 2 und 3 artikuliert. Für das Fahrzeug 1 waren die Rollenmessungen bereits ausgewertet und somit nicht mehr Teil dieser Arbeit. Die Leistungsermittlung erfolgte auch bei den Messungen am Rollenprüfstand mit der CO₂-Methode.

Tabelle 31: CVS-Beutelwerte von Fahrzeug 2

Messnummer	Zyklus	Beutelwerte						
		CO ₂	CO	HC	NO _x	NO	PM	Verbrauch
		[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
2305	WHVC_2Phasig*	784,4	0,038	0,075	0,524	0,459	0,010	249,125
2306	WHVC_1Phasig	734,9	0,000	0,056	0,062	0,045	0,005	233,364
2307	HBEFA St&Go	1417,2	0,226	0,650	4,658	4,322	0,029	450,654
2308	HBEFA St&Go	1375,0	0,000	0,335	0,418	0,359	0,000	436,844
2309	WHVC_2Phasig*	756,5	0,058	0,017	0,478	0,418	0,001	240,193
2310	Realworld_urban	1013,0	0,014	0,060	0,825	0,842	0,016	321,661
2311	Realworld_motorway	682,0	0,000	0,009	0,000	0,000	0,012	216,510
2312	Realworld_urban	978,7	0,020	0,034	0,659	0,575	0,014	310,740
2313	Realworld_motorway	678,7	0,027	0,007	0,000	0,000	0,014	215,482
2314	Realworld_urban no load	1091,4	0,055	0,050	1,545	1,476	0,025	346,547
2315	Realworld_urban no load	933,0	0,088	0,063	1,237	1,153	0,024	296,309
2319	Leerlauf_30min	1693,1	2,695	0,992	9,824	9,441	-0,131	539,814

Tabelle 32: CVS-Beutelwerte von Fahrzeug 3

Messnummer	Zyklus	Beutelwerte						
		CO ₂	CO	HC	NO _x	NO	PM	Verbrauch
		[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
2329	WHVC_2Phasig*	659,3	0,026	0,011	0,893	0,713	0,005	209,336
2330	WHVC_1Phasig	628,8	0,013	0,005	0,29	0,277	0,006	199,639
2331	HBEFA St&Go	948,3	0,182	0,211	12,427	11,397	0,012	301,334
2332	HBEFA St&Go	926,1	0,023	0,061	7,112	6,467	0,004	294,057
2334	Realworld_urban	678,9	0,018	0,019	0,973	0,81	0,005	215,548
2335	Realworld_motorway	581,3	0,001	0	0,24	0,194	0,004	184,55
2336	Realworld_urban	671,2	0,003	0	0,228	0,232	0,004	213,077
2337	Realworld_motorway	577,2	0,003	0	0,187	0,141	0,003	183,245
2338	Realworld_warmup*	764,8	0,052	0,012	1,03	0,763	0,004	242,834
2339	Realworld_urban	678,6	0,012	0,007	0,424	0,376	0,006	215,448
2340	Realworld_motorway-ohne höchsten Gang	614,0	0	0,003	0,155	0,123	0,005	194,91
2341	Realworld_urban no load	733,3	0,037	0,009	0,491	0,5	0,006	232,598

* Kaltstarts

Im Prinzip zeichnet sich bei den Rollenmessungen das gleiche Bild wie bei den RDE-Messungen ab. CO, HC und Partikelemissionen sind sehr gering. Die NO_x-Emissionen hängen stark vom gefahrenen Zyklus ab. So sind bei den Autobahnzyklen durchwegs geringere Emissionen gemessen worden als bei den Stadtzyklen. Am höchsten war der NO_x Ausstoß beim HBEFA Stop&Go Zyklus und 30 min Leerlauf als Vorkonditionierung. Durch die Leerlaufphase vor dem Test, ist das eingespeicherte NH₃ im SCR-Katalysator vollständig aufgebraucht. Weiters kommt das Abgasnachbehandlungssystem aufgrund der vielen Stopps und des geringen Lastniveaus dieses Zyklus, nie auf die nötige Betriebstemperatur. Die schlechte Konvertierung wird durch Abbildung 58 noch einmal verdeutlicht. Dabei sieht man, dass bis zur Hälfte des Zyklus, die Taipipe-Emissionen mit den Roh-Emissionen einhergehen. Danach wird die Konvertierung temperaturbedingt ein wenig besser.

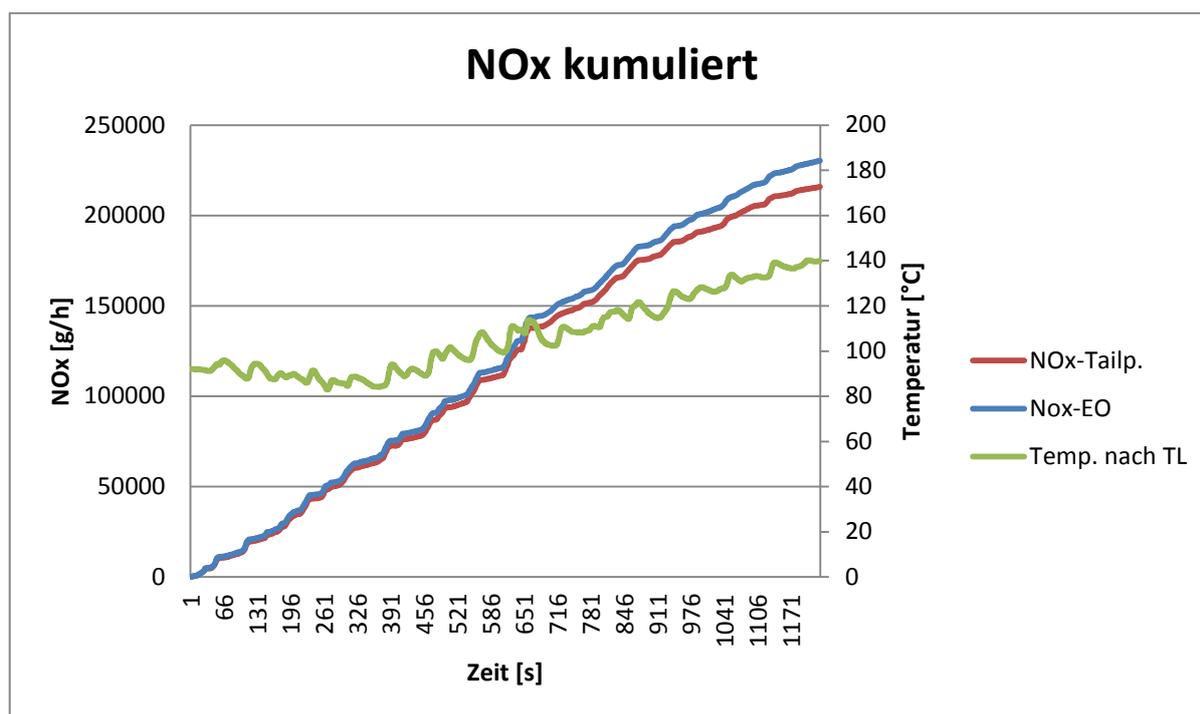


Abbildung 58: NO_x-Roh und NO_x-Tailpipe von Test Nr.: 2331

5.2.6 Ergebnisse PEMS und FTIR sowie Vergleich mit CVS

Wie bereits erwähnt, kam das PEMS-System Semtech DS auch bei den Rollenmessungen zum Einsatz. Damit konnte ein Abgleich von diesem zur CVS erfolgen. Für das Fahrzeug 2 werden die CVS und PEMS-Methode zusätzlich noch mit der FTIR-Methode verglichen. Darüber hinaus kam es für ein Teilstück der RDE-Route zum Emissionsvergleich zwischen Straßenmessung und Rollenmessung.

Tabelle 33: Vergleich Semtech mit CVS Fahrzeug 2

			CO ₂		CO		Nox		HC		N ₂ O	NH ₃
			g/h		g/h		g/h		g/h			g/h
WHVC kalt (2305) 2 phasig	Rollenmessung	Semtech	24105.7	3.5%	9.115	492.7%	17.577	6.0%	0.180	41.0%		
		FTIR	24253.8	4.1%			15.718	-5.2%			1.86211849	0.33851931
		CVS Modal	23289.9		1.538		16.579		0.128			
WHVC hot 1 phasig (2306)	Rollenmessung	Semtech	26396.2	1.7%	2.376	919.7%	2.088	221.1%	0.00010	-100.1%		
		FTIR	27025.1	4.1%			1.276	96.2%			2.53434764	0.14797049
		CVS Modal	25964.5		0.233		0.650		-0.171			
HBEFA St&Go (13023) (2307) 30' idling	Rollenmessung	Semtech	9440.5	1.2%	3.719	111.7%	33.742	6.3%	3.278	20.0%		
		FTIR	10139.7	8.7%			33.344	5.0%			0.64386178	0.00995173
		CVS Modal	9329.7		1.757		31.744		2.732			
HBEFA St&Go (13023) (2308) hot	Rollenmessung	Semtech	8780.6	-1.0%	2.722	6933.3%	1.546	-46.8%	0.024	-82.1%		
		FTIR	9453.3	6.6%			1.571	-45.9%			0.97685746	0.00953125
		CVS Modal	8865.2		0.039		2.905		0.133			
WHVC kalt (2309) 2 phasig	Rollenmessung	Semtech	24469.8	3.6%	16.879	826.5%	16.404	9.6%	0.315	-18.2%		
		FTIR	24798.3	5.0%			16.212	8.3%			1.79523764	0.05974116
		CVS Modal	23614.7		1.822		14.970		0.385			
Stadt 1 (2310)	Rollenmessung	Semtech	13396.8	4.4%	16.210	37156.0%	11.930	17.0%	0.000034	-100.0%		
		FTIR	13940.3	8.7%			9.704	-4.9%			1.49146408	0.01173804
		CVS Modal	12828.6		0.044		10.201		0.392			
	Straßenmessung	Semtech	13502.4	0.8%	11.292	-30.3%	1.327	-88.9%				
Stadt 2 (2312)	Rollenmessung	Semtech	13094.6	4.7%	19.697	4097.1%	7.996	-11.5%	0.000	-		
		FTIR	13371.1	6.9%			7.952	-12.0%			1.66586297	0.01457228
		CVS Modal	12502.9		0.469		9.034					
	Straßenmessung	Semtech	13502.4	3.1%	11.292	-42.7%	1.327	-83.4%	0.000			
Autobahn 1 (2311)	Rollenmessung	Semtech	26117.8	5.1%	22.830	3812.5%	0.000	-100.0%	0.000	-100.0%		
		FTIR	26025.0	4.8%			0.142	-82.8%			2.54269063	0.25849375
		CVS Modal	24840.8		0.584		0.822		0.103			
	Straßenmessung	Semtech	26951.2	3.2%	3.524	-84.6%	0.791	-	0.052	-49.6%		
Autobahn 2 (2313)	Rollenmessung	Semtech	25941.9	4.1%	2.501	216.9%	0.775	-	0.001	-97.8%		
		FTIR	26419.6	6.0%			0.162	-			3.99859557	0.83991229
		CVS Modal	24930.7		0.789		0.000		0.066			
	Straßenmessung	Semtech	26951.2	3.9%	3.524	40.9%	0.791	2.1%	0.052	-20.8%		
Leerlaufstest (2319)	Rollenmessung	Semtech	2920.1	-14.3%	7.070	29.6%	17.736	-6.7%	1.680	-17.5%		
		FTIR	2932.1	-14.0%			17.232	-9.3%			0.08144101	0.0036323
		CVS Modal	3408.5		5.455		19.004		2.037			

Tabelle 34: Vergleich Semtech mit CVS Fahrzeug 3

			CO2		CO		Nox		HC	
			g/h	%	g/h	%	g/h	%	g/h	%
WHVC kalt 2 phasig (2329)	Rollenmessung	Semtech	36621.2	6.1%	43.364	3257.0%	52.804	3.6%	0.205	-50.4%
		CVS Modal	34529.7		1.292		50.975		0.412	
WHVC hot 1 phasig (2330)	Rollenmessung	Semtech	40033.9	6.6%	51.566	11130.2%	17.019	-11.6%	0.00000	-100.0%
		CVS Modal	37552.7		0.459		19.251		-0.024	
HBEFA St&Go (13023) 30' idling (2331)	Rollenmessung	Semtech	11496.6	5.5%	33.561	1267.3%	175.742	10.7%	1.141	-49.6%
		CVS Modal	10894.1		2.455		158.788		2.265	
HBEFA St&Go (13023) hot (2332)	Rollenmessung	Semtech	11327.8	6.0%	30.753	15597.4%	98.215	7.0%	0.000	-100.0%
		CVS Modal	10682.4		0.196		91.787		0.372	
Stadt 1 (2334)	Rollenmessung	Semtech	29932.3	4.5%	13.311	50817.6%	51.013	12.7%	0.074	-55.7%
		CVS Modal	28637.5		0.026		45.262		0.168	
	Straßenmessung	Semtech	28563.6	-4.6%	32.735	145.9%	15.793	-69.0%	0.000	-100.0%
Autobahn 1 (2335)	Rollenmessung	Semtech	68522.0	3.2%	18.201	23738.5%	36.060	10.3%	0.000000	-100.0%
		CVS Modal	66394.2		0.076		32.682		0.126	
	Straßenmessung	Semtech	68292.1	-0.3%	40.156	120.6%	10.322	-71.4%	0.000	-
Stadt 2 (2336)	Rollenmessung	Semtech	28816.4	3.1%	6.082	-28199.4%	10.005	-9.3%	0.000	-100.0%
		CVS Modal	27948.4		-0.022		11.034		-0.080	
	Straßenmessung	Semtech	27493.9	-4.6%	32.068	427.3%	15.580	55.7%	0.000	-
Autobahn 2 (2337)	Rollenmessung	Semtech	68532.6	3.4%	17.956	4004.9%	18.978	-21.3%	0.000	-100.0%
		CVS Modal	66298.8		0.437		24.119		0.048	
	Straßenmessung	Semtech	68253.5	-0.4%	40.154	123.6%	10.315	-45.6%	0.000	-
Warm up Zyklus (2338)	Rollenmessung	Semtech	41252.7	6.2%	47.442	2444.4%	54.327	8.5%	0.068	-117.8%
		CVS Modal	38858.5		1.865		50.083		-0.384	
	Straßenmessung	Semtech	40590.1	-1.6%	36.429	-23.2%	62.781	15.6%	0.270	295.4%
Stadt 3 (2339)	Rollenmessung	Semtech	30007.8	5.7%	46.364	16376.2%	17.889	1.2%	0.000	-100.0%
		CVS Modal	28378.0		0.281		17.680		0.004	
	Straßenmessung	Semtech	28563.6	-4.8%	32.733	-29.4%	15.794	-11.7%	0.000	-
Autobahn ohne höchsten Gang (2340)	Rollenmessung	Semtech	76866.7	5.3%	120.840	579064.4%	12.878	-37.2%	0.000	-100.0%
		CVS Modal	73012.8		0.021		20.510		0.306	
Stadt no load (2341)	Rollenmessung	Semtech	20737.3	4.3%	44.659	4632.2%	13.972	-9.2%	0.000	-100.0%
		CVS Modal	19879.1		0.944		15.390		0.004	
Leerlaufstest (2346)	Rollenmessung	Semtech	4116.5	10.1%	3773.024	205714.7%	20.615	-69.1%	0.672	-53.8%
		CVS Modal	3739.4		1.833		66.817		1.453	

Die Abweichungen in Tabelle 33 und Tabelle 34 beziehen sich bei den Rollenmessungen auf die CVS-Werte und bei den Straßen-Messungen auf die Semtech-Werte. Dadurch werden die gleichen Messgeräte verglichen, somit sind die Abweichungen von Rollen- zu Straßenmessung nur noch von unterschiedlichen Randbedingungen wie z.B. Umgebungstemperatur, wechselnde Fahrwiderstände, usw. abhängig. Um Gleiches mit Gleichem zu Vergleichen wurde die KH-Korrektur bei den CVS-Werten für diese Gegenüberstellung entfernt, d.h. der Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte wird nicht berücksichtigt. Damit alle Messungen den gleichen Start und Endpunkt besitzen, mussten bei der Auswertung einige Messungen am Beginn und/oder am Ende gekürzt werden. Deshalb wurden bei dieser Betrachtung die sekundlichen CVS-Werte herangezogen. Diese Werte haben jedoch nicht so eine hohe Genauigkeit wie die Beutelwerte.

Wenn man nun die CO₂-Werte in Tabelle 33 und Tabelle 34 betrachtet, so ist bei beiden Fahrzeugen, sowohl die Abweichung von Semtech zu CVS, als auch von RDE zu Rolle, bis auf den Leerlauftest, immer in einem annehmbaren Bereich von ca. 5%. Hinsichtlich der Messung von CO sieht die Sache wesentlich anders aus. Während bei den CVS-Messungen fast kein CO gemessen wurde, treten bei der Messung mit den Semtech durchaus relevante Massen von CO auf, so kamen Abweichungen von bis zu 579064% zustande. Um den Unterschied zu verdeutlichen ist der zeitliche Verlauf der CO-Massen von Test Nr.: 2310 (Fahrzeug 2) und Test Nr.: 2340 (Fahrzeug 3) in Abbildung 59 bzw. Abbildung 60 dargestellt. Bei der HC-Messung ist dieser Trend genau umgekehrt erkennbar. Das heißt die CVS-Messung weist höhere HC-Emissionen auf als die Semtech-Messung. Ein Grund dafür wurde nicht gefunden. Dazu werden in Zukunft am IVT weitere Untersuchungen durchgeführt.

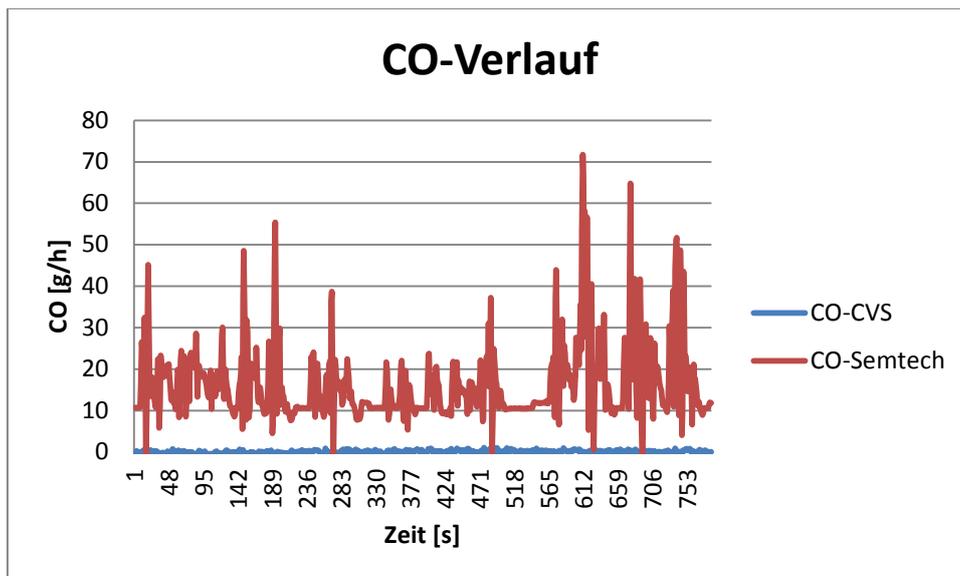


Abbildung 59: CO-Verlauf von Messung 2310

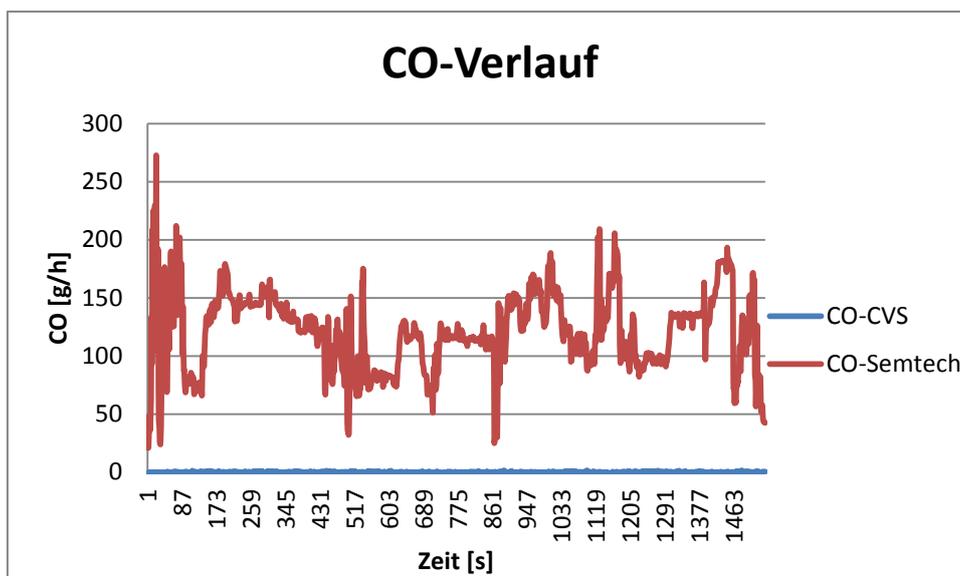


Abbildung 60: CO-Verlauf von Messung 2340

Bei den Vergleichen der Stickoxidmessungen ist auffallend, dass bei höheren NO_x-Ausstößen die Messergebnisse der unterschiedlichen Verfahren recht gut übereinstimmen. Bei Zyklen mit geringen NO_x-Emissionen kommt es jedoch zu prozentuell recht deutlichen Abweichungen. Bezüglich der Messverfahren kann kein Trend zu höheren bzw. niedrigen Emissionen ausgerechnet werden. Weiters sind relativ hohe Abweichungen der

Rollenmessungen zu den RDE-Messungen hinsichtlich NO_x bemerkenswert. Aufgrund der Abweichungen, ob Rolle oder Straße den größten Messwert liefert, kann hier kein Trend erkannt werden. Zudem sind die NO_x-Emissionen auch sehr stark von der Temperatur des Katalysators abhängig und diesbezüglich kann keine absolute Gleichheit zwischen den Messungen garantiert werden.

Für den Test 2310 von Fahrzeug 2 sind die NO_x-Verläufe sowie die Temperaturverläufe in Abbildung 61 dargestellt.

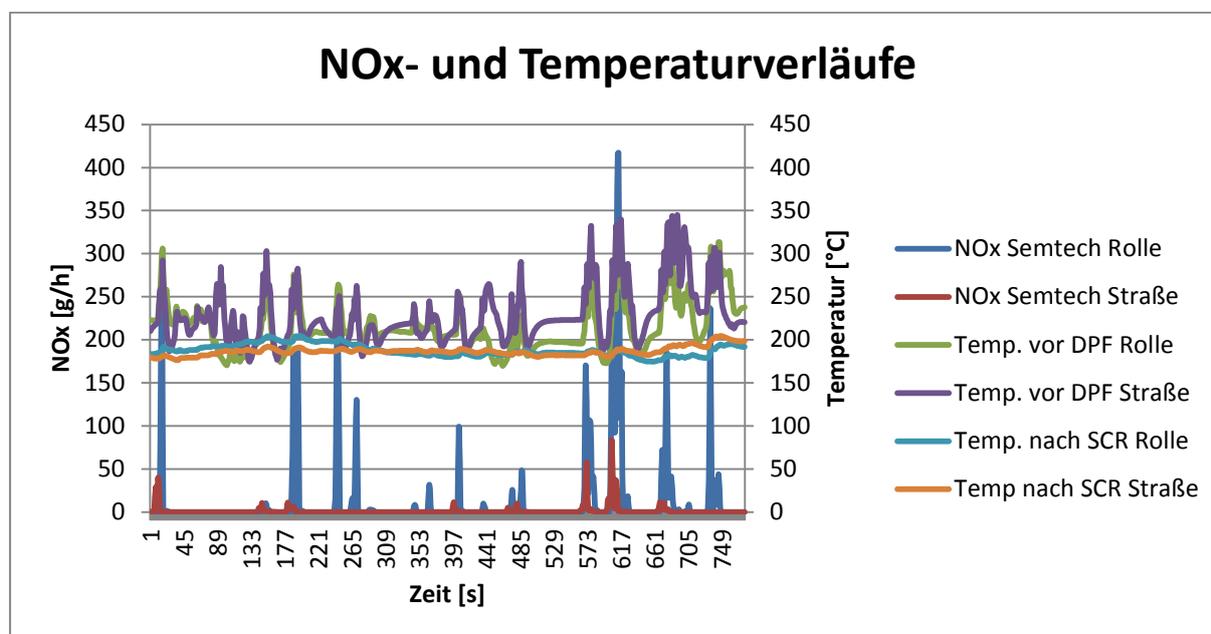


Abbildung 61: NO_x- und Temperaturverläufe von Test Nr.:2310 (Fahrzeug 2)

Zunächst wurde davon ausgegangen, dass unterschiedliche Abgastemperaturen der Grund für die hohe Abweichung sind. Dies kann aufgrund der in Abbildung 61 zu sehenden Temperaturverläufe widerlegt werden. Aufgrund der Temperaturverläufe müssten die NO_x-Emissionen im ersten Teil des Zyklus (ca. bis Sekunde 400) bei der Straßenmessung höher als bei der Rollenmessung sein, da in diesen Bereich die Abgastemperaturen der Straßenmessung niedriger sind. Somit können die Unterschiede nur noch auf einen unterschiedlichen NH₃-Speicherstand am Beginn der Zyklen zurückgeführt werden.

6 Simulation

Ausgehend von den in Kapitel 5 erfassten Messdaten, wurde im Simulationsprogramm PHEM [19] für jedes Fahrzeug ein Simulationsmodell erstellt. Zur Simulation der Stickoxide wurde ein physikalisches Modell erstellt, welches das gesamte Abgasnachbehandlungssystem abbildet. Dafür sind für jedes Fahrzeug ein Temperaturkennfeld (6.4) und mehrere Varianten von SCR-Konvertierungskennfeldern (6.6) erstellt worden. Die Emissionskomponenten CO₂, CO, HC, NO_x-Roh, PM, PN wurden aus Emissionskennfeldern (6.3) interpoliert.

6.1 Simulationsprogramm PHEM

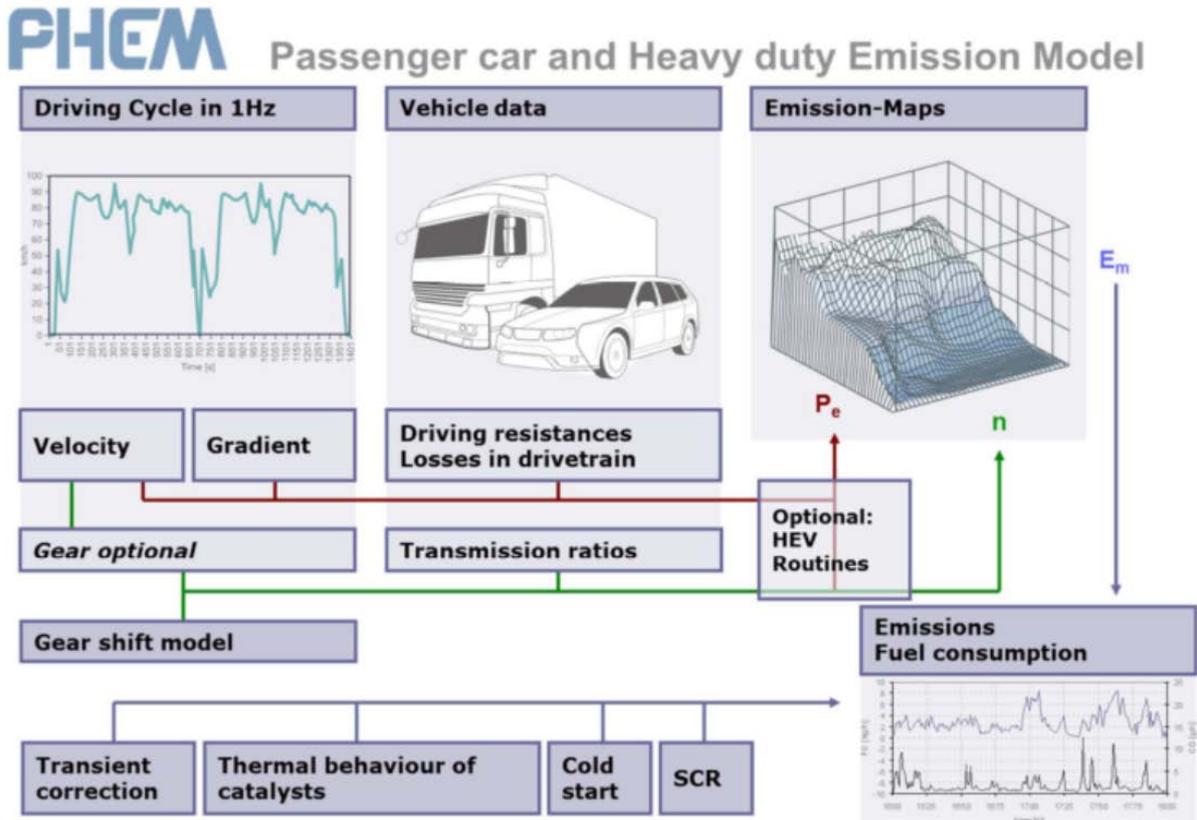


Abbildung 62: Funktionsschema von PHEM [19]

Das „Passenger car and Heavy duty Emission Model“ (PHEM) wurde bzw. wird am Institut für Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) der TU Graz entwickelt und ist ein kennfeldbasiertes Simulationsprogramm für Emissionen. In Abbildung 62 ist die Funktionsweise bildlich dargestellt. Für die Berechnungen stehen ein Standard- und ein Engine-Only-Modus zu Verfügung. Der Standardmodus basiert auf einem Längsdynamikmodell zur Berechnung der sekundlichen Antriebsleistung. Der verwendete Gang wird dabei mit einem im Programm hinterlegten Schaltmodell berechnet. Als Eingabedaten werden die Fahrzeugdaten wie: Dynamischer Reifendurchmesser, Reduzierte Rad Masse, Getriebeübersetzung, Achsübersetzung, Fahrwiderstände, Leistung der Nebenverbraucher sowie die Trägheiten von Motor und Getriebe, in einem sogenannten vehicle-file (veh) vorgegeben.

Die Motorträgeit bzw. Getriebeträgeit wurden überschlagmäßig mit den Gleichungen

$$I_{Motor} = 0,0066 * P_{Nenn} \quad (6-1)$$

$$I_{Getriebe} = 0,00072 * P_{Nenn} \quad (6-2)$$

berechnet.

Die Schlepp- und Vollastkurve (fld), sowie der Fahrzyklus mit Geschwindigkeit und Steigung in einem dri-file müssen ebenfalls vorgegeben werden. Im Engine-Only-Modus wird nur der Motor alleine betrachtet, anstatt den Fahrzyklus (dri) muss hierfür ein Lastzyklus (npi) bestehend aus Leistung und Motordrehzahl vorgegeben werden. Emissionen werden in Emissionskennfeldern hinterlegt. Damit können die Emissionen für einen gewünschten Zyklus, anhand von Motordrehzahl und Antriebsleistung, aus den Kennfeldern interpoliert werden. Die Abgasnachbehandlungsanlage wird in einem weiteren file, mit dem Namen `exs` modelliert. Dies beinhaltet auch die Möglichkeit den Verlauf der Abgastemperatur zu simulieren. Es sei noch erwähnt, dass alle Simulationen dieser Arbeit im Engine-Only-Modus durchgeführt wurden.

6.1.1 Kennfelderstellung

Für die Erstellung von Emissionskennfeldern, wurden die sekundlichen Messdaten der am Auspuffende gemessenen Abgase mit einem npi-file, sprich durch Vorgabe von Drehzahl und Leistung in ein Kennfeld eingerastet (Abbildung 63). Die Leistung wurde zuvor anhand der gemessenen CO₂-Massen bestimmt (siehe Kapitel 5.1.4.3). Punkte die außerhalb der Vollastkurve liegen werden vom PHEM korrigiert in dem sie auf die Vollastkurve gelegt werden.

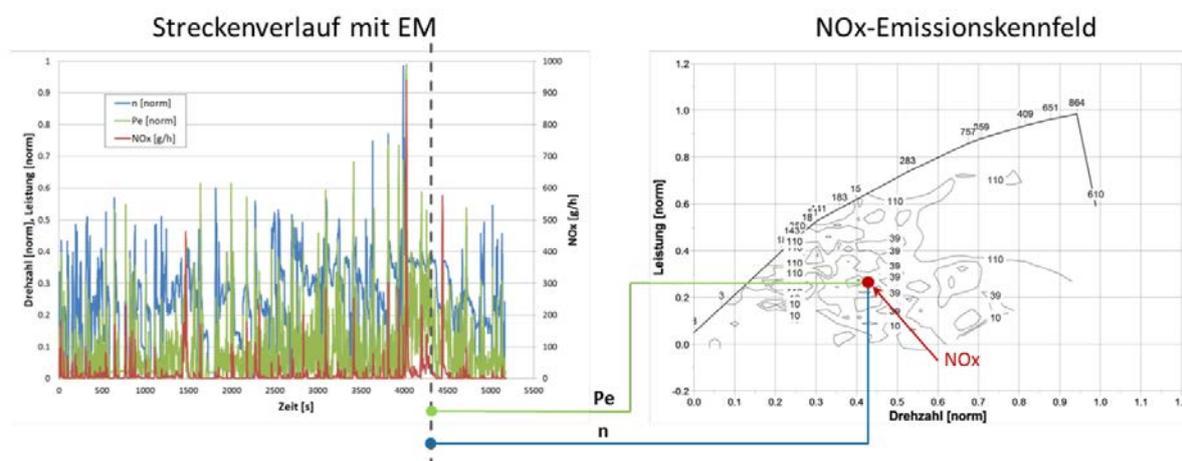


Abbildung 63: Schema Kennfelderstellung [30]

Die Abgastemperatur nach dem Turbolader (siehe Kapitel 6.1.3.1) wird ebenfalls im Emissionskennfeld gespeichert. Die Referenztemperatur kann im Kennfeld eingegeben werden, standardmäßig ist eine Temperatur von 25°C vorgegeben.

6.1.2 Kennfeldbasierte Simulation

Auf Basis von Kennfeldern können Fahrzyklen nachsimuliert werden. Dabei werden auf Basis von Leistung und Drehzahl die Emissionen aus dem entsprechenden Emissionskennfeld sekundlich für einen vorgegebenen Zyklus herausinterpoliert.

6.1.3 Abgasnachbehandlungssystem

6.1.3.1 Temperaturmodell

Die NO_x-TP Emissionen sind aufgrund der Abhängigkeit von Temperatur und Raumgeschwindigkeit keine Kennfeldgröße, weshalb zur Simulation ein physikalisches Modell benötigt wird. Dazu muss ein Temperaturmodell für die gesamte Abgasanlage generiert werden. Hierzu werden, ausgehend von einem quasi-stationären Temperaturkennfeld (siehe Kapitel 6.4) nach TL, die Wärmeverluste durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung der einzelnen Module nach dem TL, entlang des Abgasstranges berechnet. Der Turbolader wird nur hinsichtlich seiner thermischen Trägheit modelliert, sprich ohne Temperaturänderung aufgrund des Wärmeverlustes. Da es sich bei dem vorgegebenen Temperaturkennfeld, wie zuvor erwähnt um das quasi-stationäre Temperaturkennfeld nach TL handelt. In Abbildung 64 ist ein Modell des Abgasstranges dargestellt. Wobei sich bei der Simulation ein DOC/DPF-Modul und ein SCR-Modul im Abgasschalldämpfer befinden.

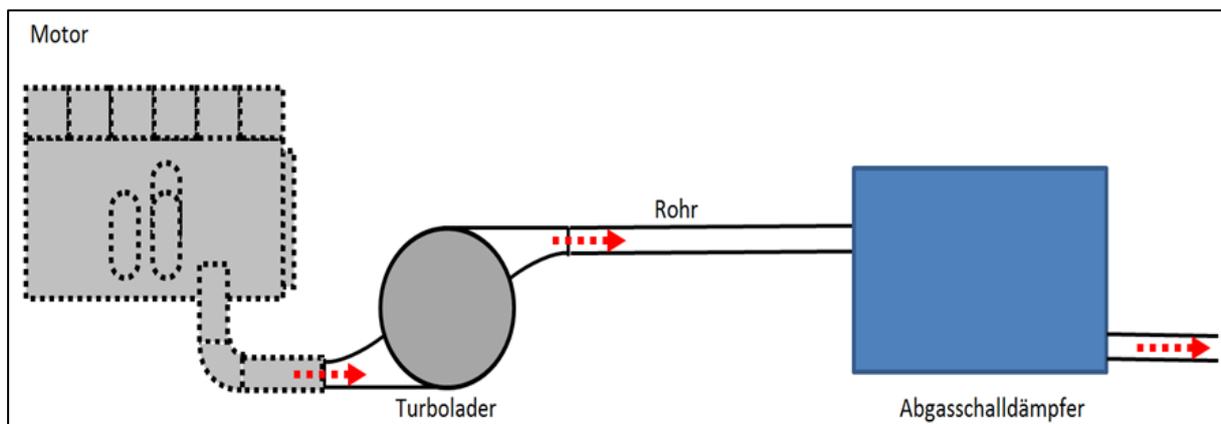
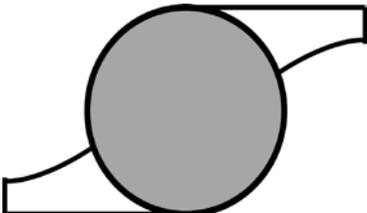
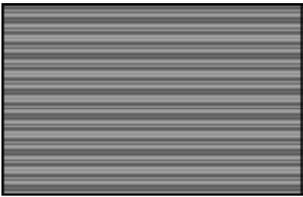


Abbildung 64: Modell Abgasstrang

Für die Berechnungen der Wärmeverluste ist im PHEM ein 1-dimensionales Modell hinterlegt. Als Eingabedaten sind für das jeweilige Modul des Abgasstranges, die folgenden Eigenschaften zu definieren.

Tabelle 35: Eingabedaten Temperatursimulation

<p>Modul Turbolader</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • normierte Masse [kg/kW_{rated}] • Wärmekapazität [J/(kg*K)] • start Temperatur [°C] • laminar od. turbulente Strömung • normierte Wärmedurchgangszahl [m^{0,2}/mm pipe diameter] • normierte Querschnittsfläche [mm²/kW_{rated}] • Gegendruck [mbar] • Durchmesser Thermoelement [mm] • Dicke des Rußfilms am Thermoelement [mm] • Abkühldaten des Thermoelementes (falls vorhanden)
---	--

<p>Modul Rohr</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Länge [mm] • Wärmekapazität [J/(kg*K)] • start Temperatur [°C] • Durchmesser [mm] • Wandstärke [mm] • Faktoren für konvektiven Wärmeübergang • Gegendruck [mbar] • Durchmesser Thermoelement [mm] • Dicke des Rußfilms am Thermoelement [mm] • Abkühldaten des Thermoelementes (falls vorhanden)
<p>Module DOC/DPF sowie SCR</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • normierte Masse [kg/kW_{rated}] • Wärmekapazität [J/(kg*K)] • start Temperatur [°C] • Faktoren für konvektiven Wärmeübergang • Faktoren für Strahlungswärme • laminar od. turbulente Strömung • normierte Wärmedurchgangszahl [m^{0,2}/mm pipe diameter] • äußere Oberfläche [m²] • normierte Querschnittsfläche [mm²/kW_{rated}] • Gegendruck [mbar] • Durchmesser Thermoelement [mm] • Dicke des Rußfilms am Thermoelement [mm] • Abkühldaten des Thermoelementes (falls vorhanden)

Neben den Eingabedaten aus

Tabelle 35, muss noch die Umgebungstemperatur des zu simulierenden Zyklus bekanntgegeben werden, da sich eine Änderung der Umgebungstemperatur im gleichen Maße auf die Abgastemperatur auswirkt [35]. Diese Daten werden dem PHEM in einem sogenannten exs-file vorgegeben. Der Klarheit halber sei noch gesagt, dass die Module DOC/DPF und SCR sehr wohl getrennt betrachtet werden können. Sie besitzen jedoch dieselben Eingangsdaten. Für die genauen Formeln des im PHEM implementierten Modells wird auf [33] verwiesen.

Die verwendeten Eingabedaten für die Module des Abgasstranges für die drei Versuchsfahrzeuge sind wie schon in Kapitel 4 erwähnt, im Anhang abgebildet. Aus welchen Modulen der Abgasstrang modelliert wurde ist in Tabelle 36 ersichtlich

Tabelle 36: Modellierung des Abgasstranges

Modul:	Fahrzeug:		
	1	2	3
Rohr:	✓	✓	✓
DOC/DPF:			✓
SCR:	✓	✓	✓

6.1.3.2 SCR-Konvertierungskennfeld

Um die Effizienz des SCR-Systems simulieren zu können, wird im exs-file bei dem Modul SCR, ein Konvertierungskennfeld hinterlegt. In diesem Kennfeld sind die jeweiligen SCR-Konvertierungsraten über der Temperatur und Raumgeschwindigkeit gespeichert. Die Raumgeschwindigkeit stellt den Kehrwert der Verweilzeit dar (Gl.: 6-3).

$$SV[1/s] = \frac{\dot{m}}{\rho_L * V_{KAT}} \quad (6-3)$$

Anhand der, mittels Temperaturmodell simulierten Temperatur und der aus dem Massenstrom berechneten Raumgeschwindigkeit (Gl.: (6-3)) wird auf die hinterlegten Konvertierungsraten zugegriffen. Dabei verwendet PHEM immer die Temperatur nach dem Modul vor dem SCR-Katalysator, also bei den Fahrzeugen 1 und 2 die Temperatur nach dem Rohr (sprich vor dem Schalldämpfer) und bei Fahrzeug 3 die Temperatur nach dem Modul DOC/DPF.

6.2 Kennfeldraasterung

Bevor die Emissionssimulation begonnen wurde, wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Rasterungen bezüglich der Stützstellen der CO₂-Basiskennfelder untersucht, um eine sinnvolle Basis für die Simulationen zu haben. Für diese Untersuchung wurde das bisher standardmäßige LKW-Grid (Abbildung 65), mit einem feineren Grid (Abbildung 66) das bisher bei Simulationen im PKW Bereich eingesetzt wurde, verglichen.

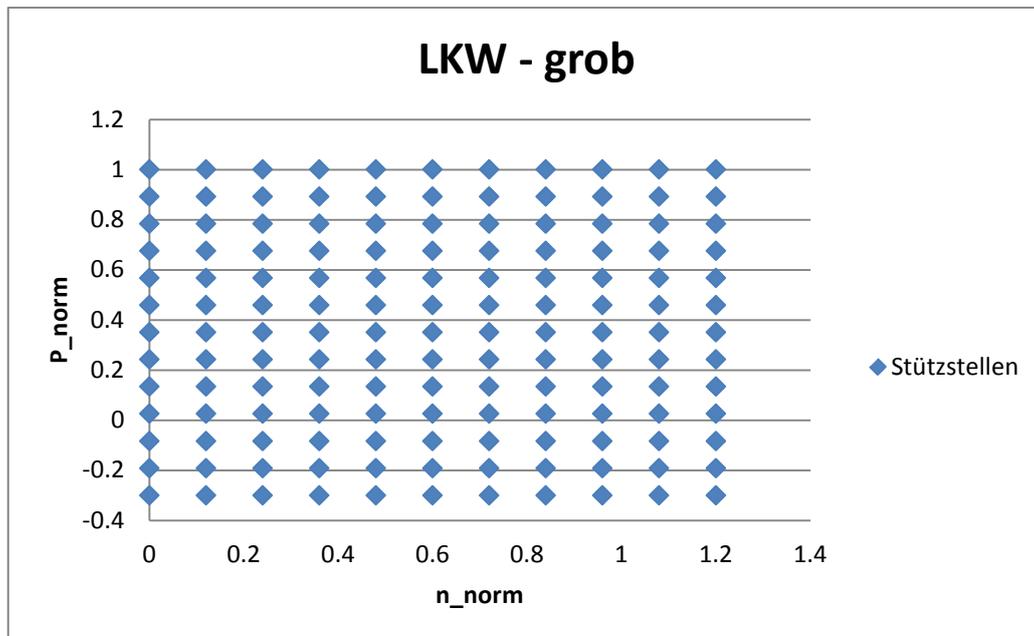


Abbildung 65: LKW-Grid

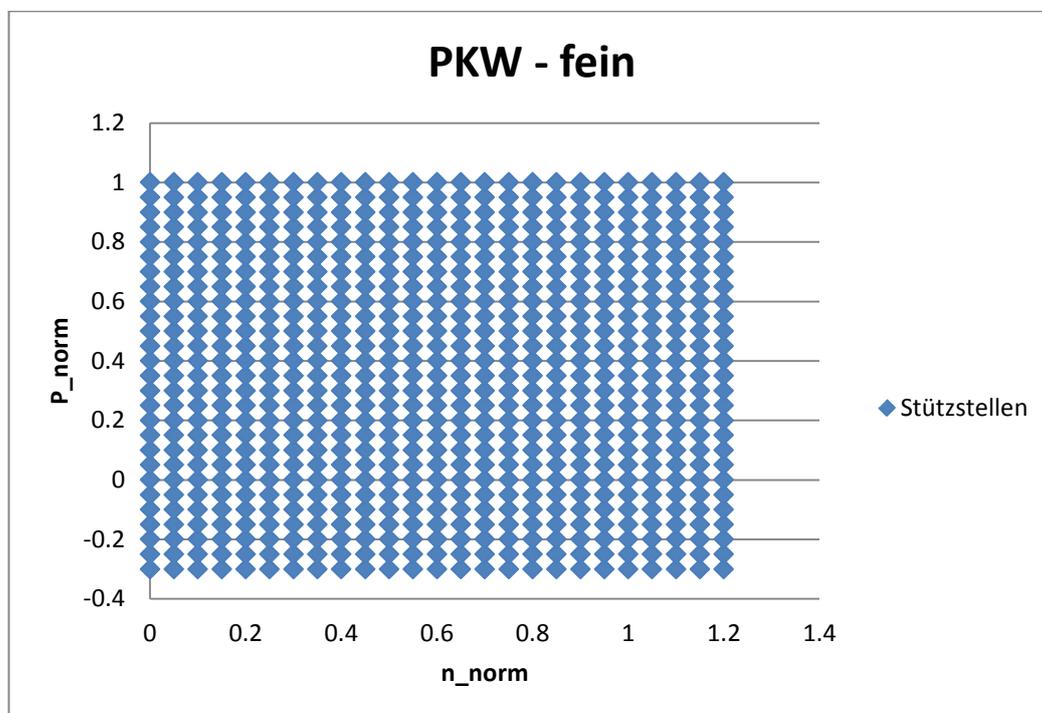


Abbildung 66: PKW-Grid

Bei der Erstellung eines Emissionskennfeldes, wird je nach Grid, ein unterschiedlich großes Rechteck um jede Stützstelle gebildet. Der Wert für die Stützstelle ergibt sich dann aus den Mittelwerten der Messwerte eines Rechteckes. Mit den beiden unterschiedlichen Rasterungen wurde jeweils ein Emissionskennfeld aus vier unterschiedlichen RDE-Fahrten erstellt anhand dieses Kennfeldes sind dann die jeweiligen Messrouten nachgerechnet worden. In diesem Fall spiegeln die unterschiedlichen Abweichungen genau die Differenz der unterschiedlichen Grids wieder, da sonst nichts verändert wurde. Die zugrundeliegenden Messdaten stammen von einem Versuchsfahrzeug eines anderen Projektes. Das Ergebnis für CO₂ und NO_x ist in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Ergebnis der Interpolation mit unterschiedlichen Kennfeldraasterungen (CO₂,NO_x)

Rasterung	CO ₂			NO _x		
	Mittelwert CO ₂ gemessen	Mittelwert CO ₂ Phem	CO ₂ - Abweichung vom Messwert	Mittelwert NO _x gemessen	Mittelwert NO _x Phem	NO _x - Abweichung vom Messwert
	[g/h]	[g/h]	[%]	[g/h]	[g/h]	[%]
PKW	24181,5	24027,8	0,6	268,7	272,4	-1,4
LKW	24181,5	23949,2	0,9	268,7	272,9	-1,6
PKW	22604,9	22359,3	1,1	254,5	252,8	0,7
LKW	22604,9	22279,7	1,4	254,5	252,3	0,9
PKW	20767,9	20430,8	1,6	227,8	235,9	-3,6
LKW	20767,9	20404,6	1,7	227,8	235,8	-3,5
PKW	21721,1	21351,3	1,7	243,3	248,8	-2,3
LKW	21721,1	21258,9	2,1	243,3	247,6	-1,8

Es ist zu erkennen, dass durch die feinere Rasterung ein leichter Vorteil gegenüber dem größeren Grid besteht. Da dieser jedoch sehr gering ist wurde beschlossen, die Simulationen mit den größeren Grid durchzuführen. Als dann ein für Fahrzeug 1 passendes CO₂-Basiskennfeld auf dieses Grid gebracht wurde und daraus die Leistung interpoliert wurde, kam es zu Auffälligkeiten bei der Leistung der Nebenverbraucher. Das heißt, bei Stillstand des Fahrzeuges, wo die Leistung ausschließlich für den Antrieb der Nebenaggregate aufgewendet werden muss, war die Leistung negativ. Dies ist in Abbildung 67 ersichtlich.

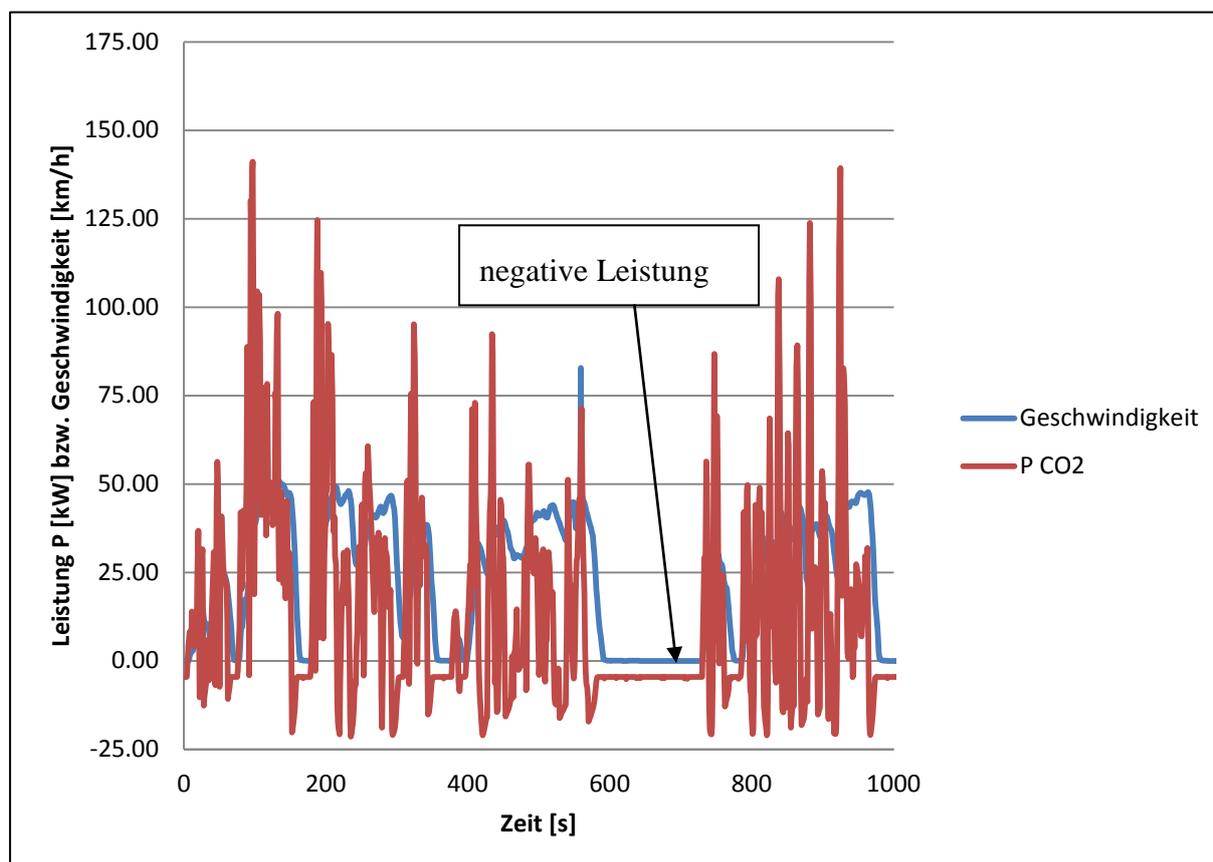


Abbildung 67: Verlauf der CO₂-Leistung und der Geschwindigkeit über der Zeit

Aufgrund der Annahme eines Interpolationsfehlers wurde die Rasterung noch einmal abgeändert, um diesen Effekt entgegen zu wirken. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich Stützstellen auf der Achse, auf der die normierte Leistung null ist, befinden. Mit dieser Rasterung wurde die Berechnung nochmals durchgeführt. Es zeigte sich dann eine positive Leistung der Nebenverbraucher die mit ca. 2,3 kW für dieses Fahrzeug durchaus plausibel ist (siehe Abbildung 69). Diese Rasterung besitzt auf der normierten Leistungsachse (von -0,3 bis 1) 14 Stützstellen, auf der Achse mit der normierten Drehzahl (von 0 bis 1,2) 15 Stützstellen (Abbildung 68) und wurde für alle weiteren Simulationen dieser Arbeit verwendet.

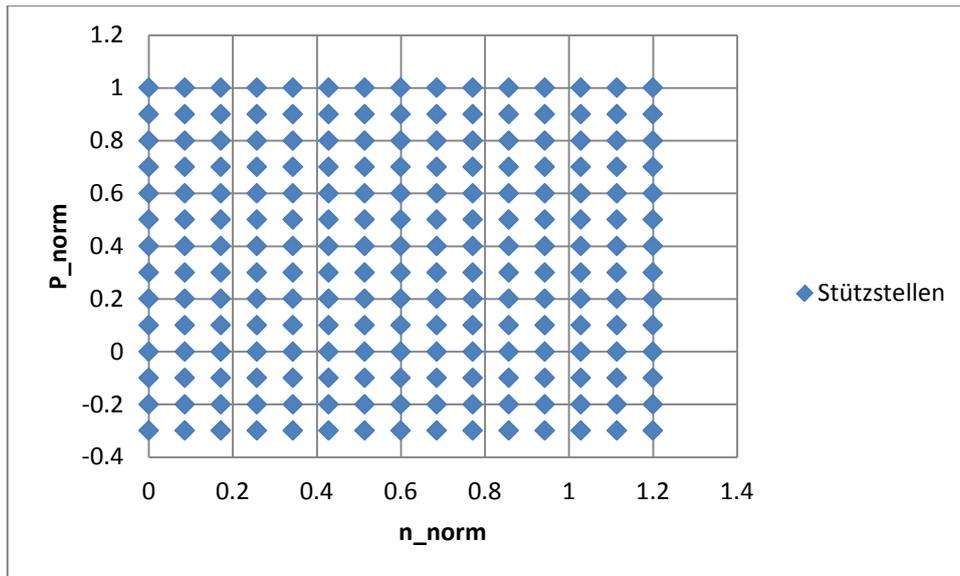
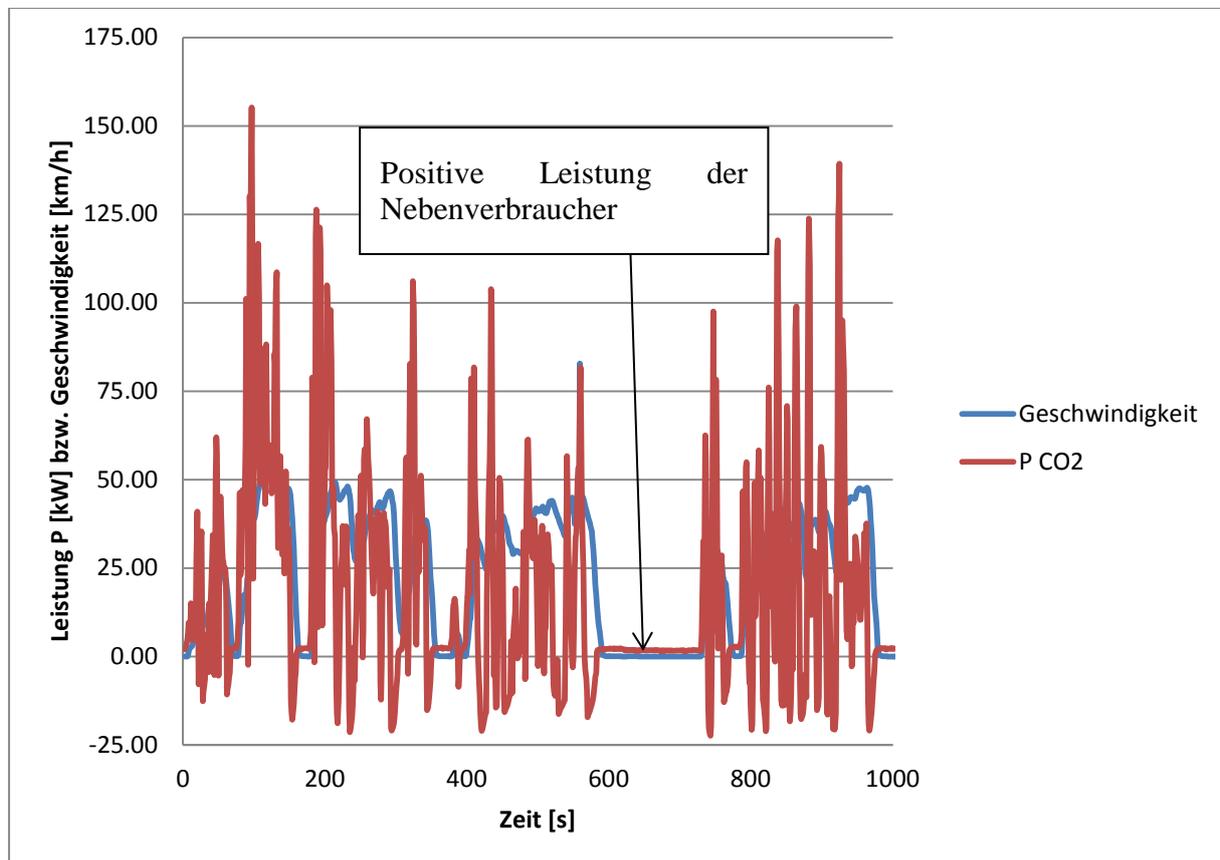


Abbildung 68: Neue Rasterung (rechts)

Abbildung 69: CO₂-Leistungs- und Geschwindigkeitsverlauf berechnet mit optimierten Kennfeld

6.3 Emissionskennfelder

Die Berechnung von Emissionskomponenten wie CO₂, CO, HC, PM, PN und NO_x-Roh, erfolgte anhand von Emissionskennfeldern. Die Erstellung dieser Kennfelder erfolgte wie im Kapitel 0 beschrieben.

Die Messdaten für Partikelmasse und Partikelanzahl stammen, bei allen Fahrzeugen aus den CVS-Messungen am Rollenprüfstand. Für die anderen Abgaskomponenten wurden die Semtech-Daten herangezogen, weil dann die Daten aus den Straßen- und Rollenmessungen verwendet werden können. Wobei für das Fahrzeug 1 nur die RDE-Fahrten verwendet wurden, da davon ausgegangen wurde, dass anhand dieser Messungen die Kennfelder ausreichend bedatet sind. Bei den Fahrzeugen 2 und 3 wurden sowohl die RDE- als auch die Messungen am Rollenprüfstand zur Erstellung des Emissionskennfeldes mit den gasförmigen Emissionskomponenten herangezogen.

Bei der Kennfelderstellung wurde die Überlegung angestellt, den Einfluss der Umgebungstemperatur zu berücksichtigen. Da laut Kapitel 5.1.8 jedoch kein deutlicher Einfluss zu erkennen ist, wurde für jedes Fahrzeug ein Emissionskennfeld, das unabhängig von der Umgebungstemperatur ist, erstellt.

6.4 Erstellung des Temperaturkennfeldes.

Wie schon im Kapitel 6.1.3.1 erwähnt ist das Temperaturkennfeld die Basis für die Simulation der Abgastemperaturen entlang des Abgasstranges. Da eine Messung der Abgastemperatur direkt am Motor nicht möglich war, wurde wie folgt vorgegangen.

Bei den Messungen der Stationärpunkte am Rollenprüfstand wurden für unterschiedliche Drehzahlen und Lastpunkte die Temperaturen mit Thermoelementen ermittelt. Die Anordnung der Thermoelemente ist in Abbildung 70 ersichtlich.

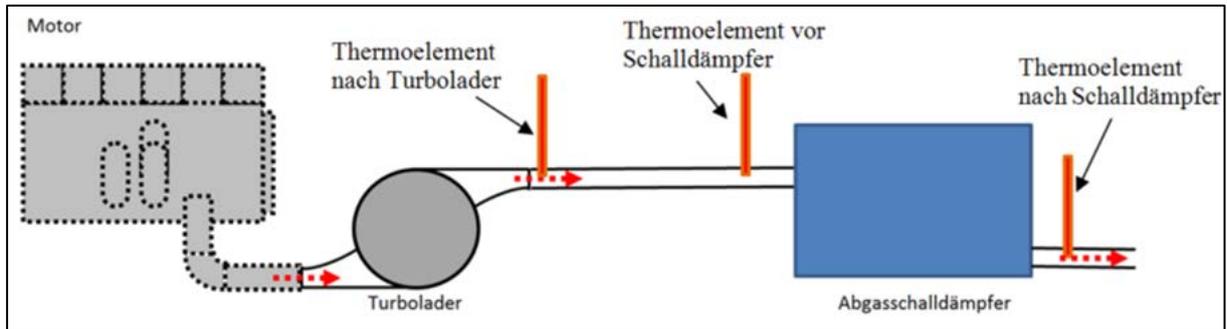


Abbildung 70: Anordnung der Thermoelemente

Anhand der Messdaten des Thermoelementes nach Turbolader, wird im PHEM eine Berechnung der Temperatur bei TL, ohne thermische Trägheit des TL, durchgeführt. Die Temperatur wird somit invertiert. Die so erhaltene Temperatur ist also die quasistationäre Temperatur vor Turbolader. Für diese Rechnung sind wieder die in

Tabelle 35 vorgegebenen Eigenschaften des Turboladers zu definieren. Neben der Temperatur nach TL und den Eigenschaften des TL sind noch die Motordrehzahl, die Leistung und der Massenstrom vorzugeben. In Abbildung 71 sind die Temperaturverläufe einer solchen Berechnung graphisch dargestellt.

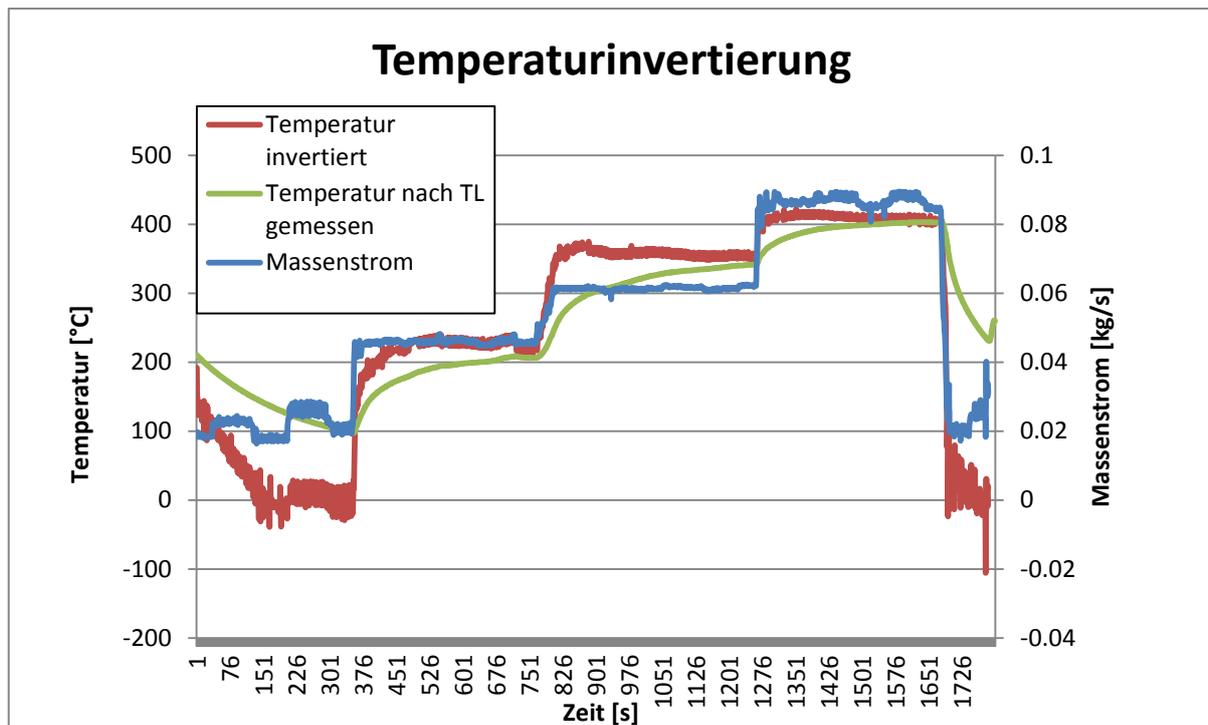


Abbildung 71: Temperatur- und Massenstromverlauf bei der Temperaturinvertierung

In dem Bereich in dem die invertierte Temperatur annähernd konstant ist, wird ein Mittelwert berechnet. Dieser Vorgang wurde für alle Lastpunkte bei jeweils drei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt. Die so erhaltenen Temperaturen wurden in ein Kennfeld eingetragen und sind anhand von Fahrzeug 1 in Abbildung 72 exemplarisch dargestellt.

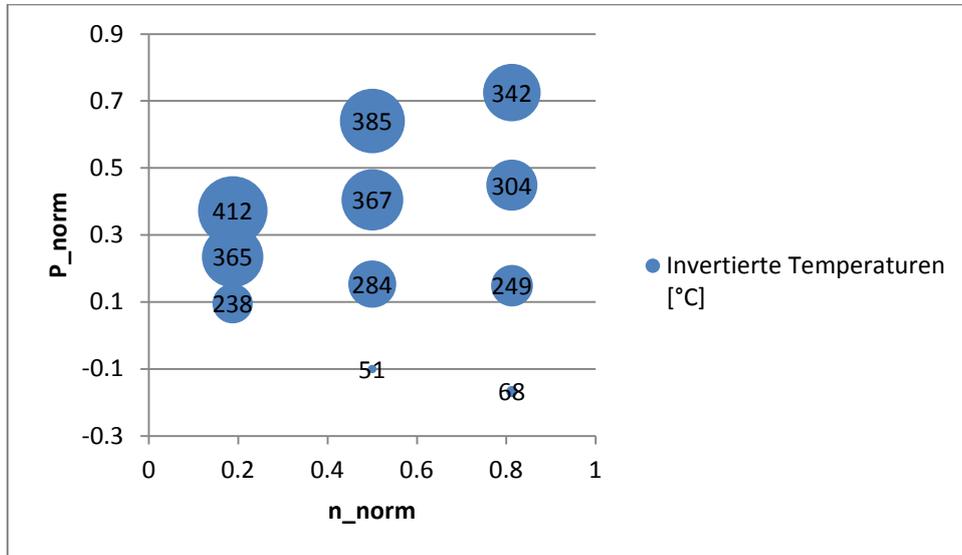


Abbildung 72: Invertierte Temperaturen von Fahrzeug 1

Damit mit dem Temperaturkennfeld eine Simulation im PHEM durchgeführt werden kann, muss es zunächst noch auf die gleiche Rasterung wie das Emissionskennfeld gebracht werden. Dafür wurde ausgehend von den Invertierten Temperaturen eine lineare Extrapolation durchgeführt. Das extrapolierte Temperaturkennfeld samt den Invertierten Temperaturen ist in Abbildung 73 dargestellt.

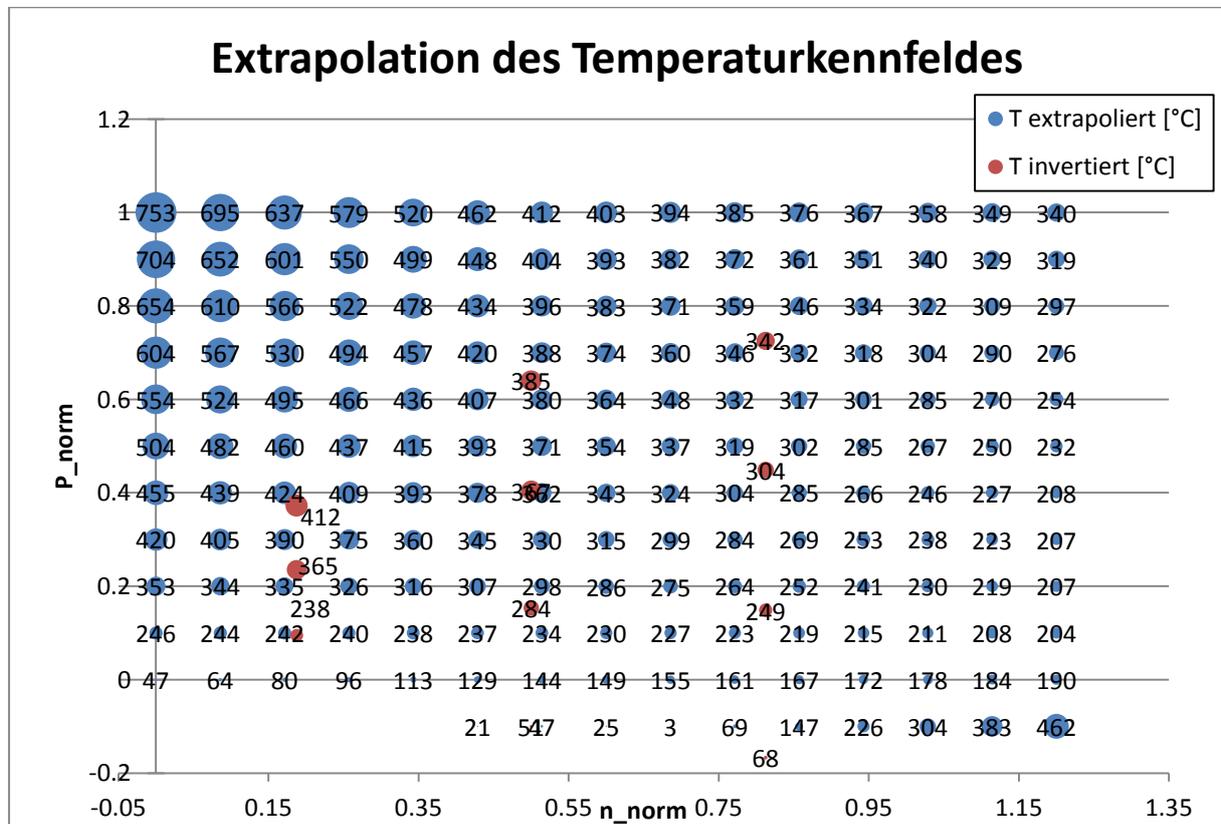


Abbildung 73: Extrapoliertes Temperaturkennfeld (Fahrzeug 1)

6.5 Abgleich und Anpassung des Temperaturmodelles

Um die Qualität des Temperaturmodells zu überprüfen, wurden damit alle RDE-Fahrten eines Fahrzeuges simuliert, und die daraus erhaltenen Temperaturen mit den Messwerten vor und nach Abgasschalldämpfer verglichen. Wobei die relevante Temperatur jene vor dem Schalldämpfer ist, da diese für die Bestimmung der Konvertierungsrate aus dem SCR-Konvertierungskennfeld von Bedeutung ist. Bei Unstimmigkeiten wurden dann die Eigenschaften der einzelnen Module und das Temperaturkennfeld so abgestimmt, dass die Simulation mit der Messung übereinstimmt. Dazu wurden neben den Temperaturverläufen noch der Verlauf von Drehzahl und Leistung analysiert. So konnten fehlerhafte Stellen im Temperaturkennfeld angepasst werden.

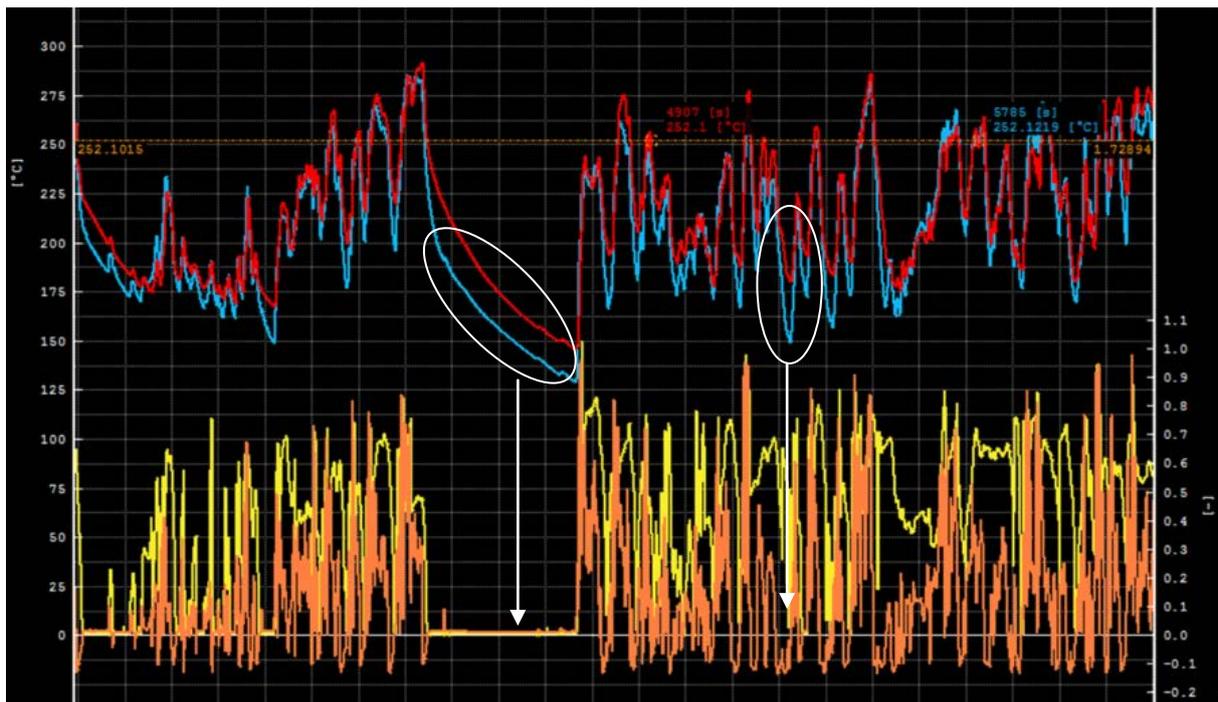


Abbildung 74: Temperaturvergleich Simulation (blau) zu Messung (rot) mit extrapoliertem Kennfeld, sowie P_norm-Verlauf (orange) und n_norm-Verlauf (gelb)

In Abbildung 74 ist der Vergleich der simulierten- mit der gemessenen Temperatur vor Schalldämpfer für eine Köflach-Route von Fahrzeug 1 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die simulierte Temperatur in Bereichen mit geringer Drehzahl und geringer Last zu kalt ist. Die Untersuchungen ergaben hierfür zu geringe Temperaturen im Kennfeld, deshalb wurden diese Bereiche optimiert. Das angepasste Kennfeld ist in Abbildung 75 zu sehen. Mit diesen wurde die Simulation erneut durchgeführt und wiederum mit der Messung verglichen. Dieser iterative Vorgang wurde so lange wiederholt, bis Messung und Simulation annähernd übereinstimmten. Die Ergebnisse der Temperatursimulation sind von Abbildung 76 bis Abbildung 78 exemplarisch für jedes Fahrzeug dargestellt.

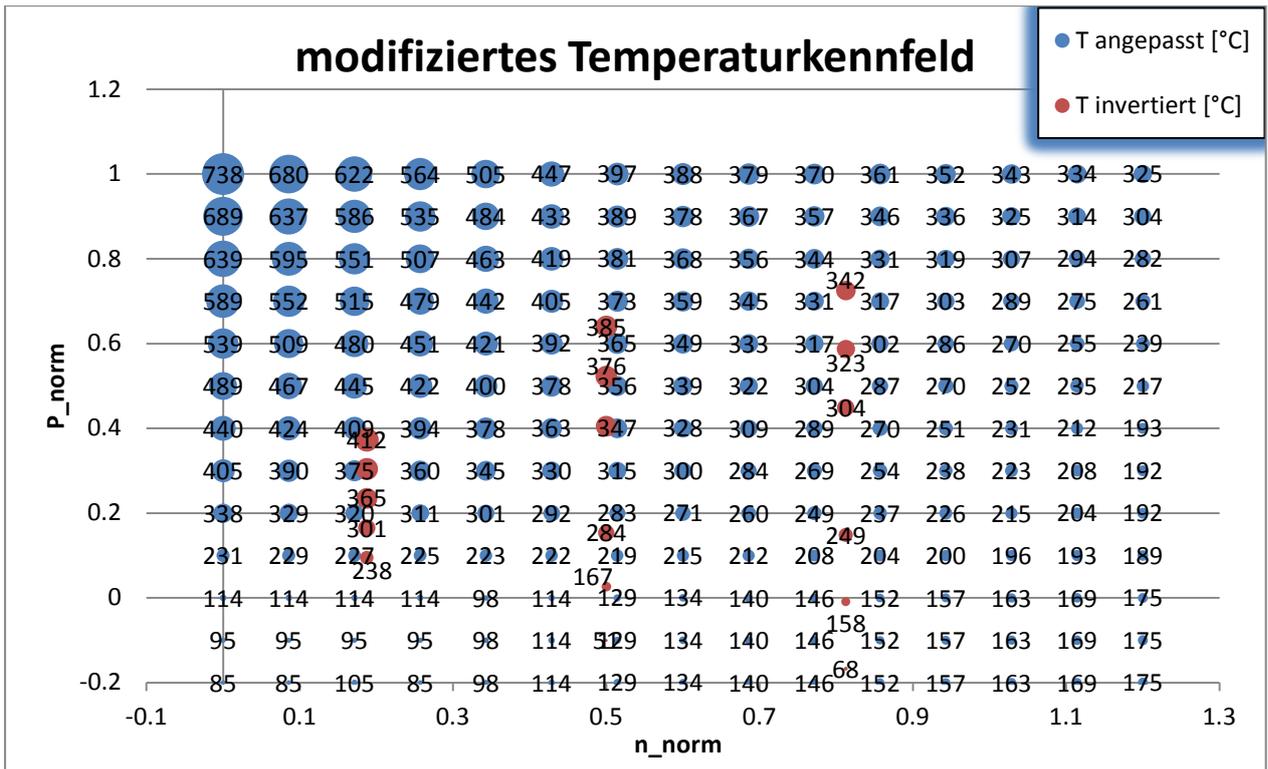


Abbildung 75: Angepasstes Temperaturkennfeld (Fahrzeug 1)

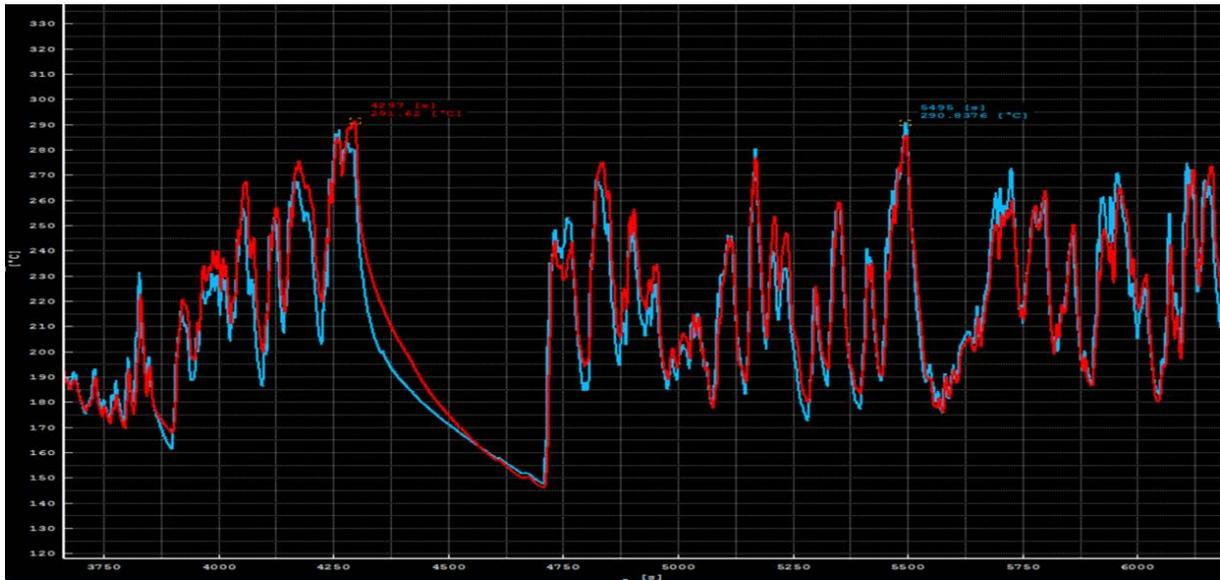


Abbildung 76: Temperaturvergleich vor Schalldämpfer von Simulation (blau) zu Messung (rot) mit angepasstem Kennfeld, für eine Köflach-Route von Fahrzeug 1

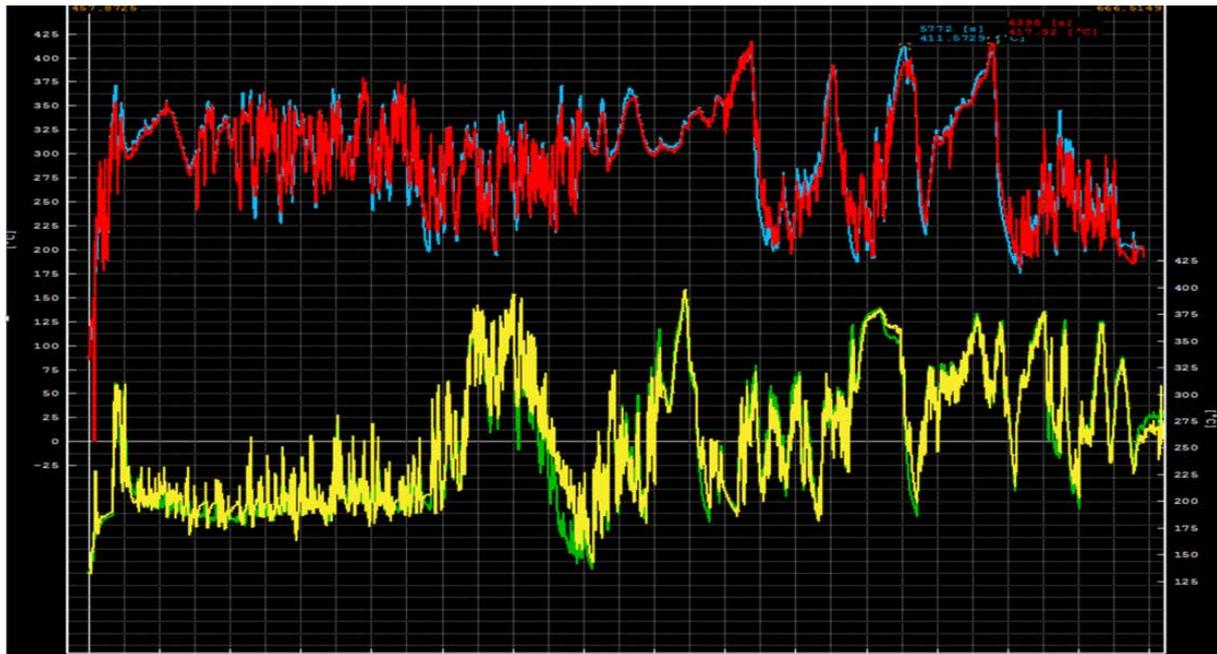


Abbildung 77: Ergebnis der Temperatursimulation (rot bzw. gelb) von Fahrzeug 2 im Vergleich zur Messung (blau bzw. grün) für ein Köflach-Fahrt (oben) und eine Ries-Fahrt (unten)

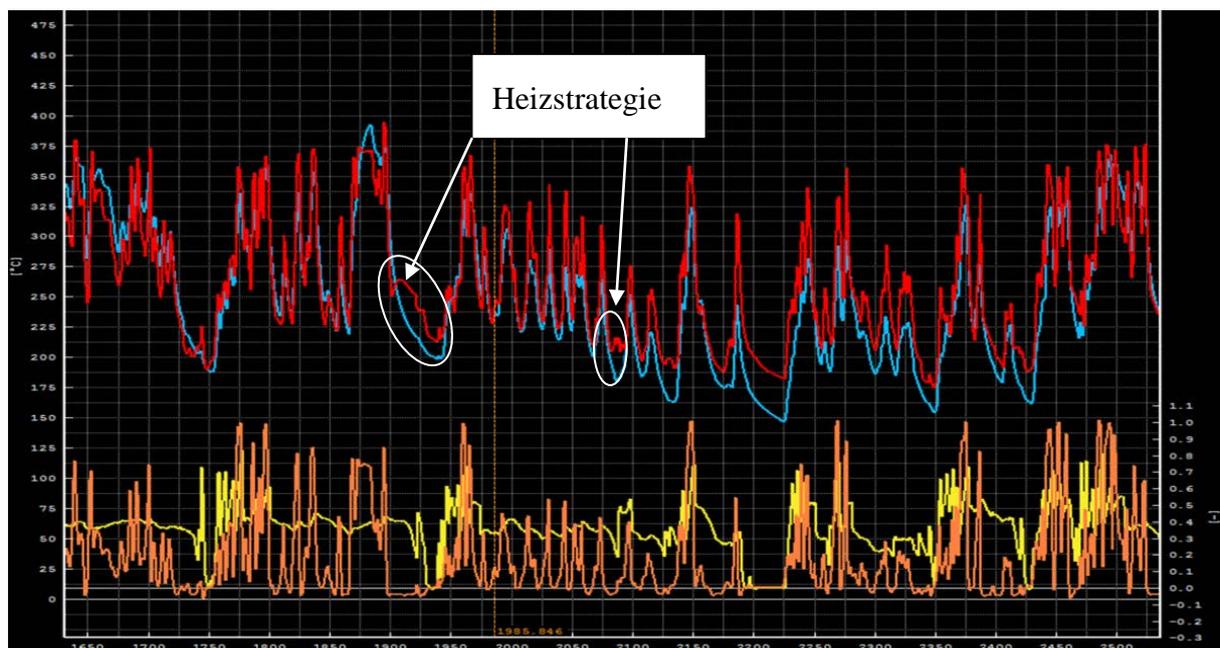


Abbildung 78: Temperaturvergleich Simulation (blau) zu Messung (rot) von Fahrzeug 3, sowie P_norm-Verlauf (orange) und n_norm-Verlauf (gelb)

Anhand dieser Abbildungen ist gut zu erkennen, dass die Methode zur Temperatursimulation bei den Fahrzeugen mit AGR (Fahrzeug 1 und 2) gut funktioniert. Bei Fahrzeug 3 (ohne AGR) ist erkennbar, dass die Temperatur im Schleppebetrieb auf einmal sprunghaft ansteigt. Dadurch passt die Simulation mit der Messung in bestimmten Punkten nicht mehr überein und durch die thermischen Trägheiten der Bauteile zieht sich der Fehler weiter durch. Dies kann nur auf eine Heizstrategie für das SCR-System zurückzuführen sein. Derartige Strategien werden vom hier gezeigten Modell nicht abgebildet. In weiterer Folge werden die Auswirkungen auf die Konvertierung untersucht.

6.6 Erstellung der SCR-Konvertierungskennfelder

6.6.1 SCR-Kennfeld von Fahrzeug 1 und 2

Basis des Kennfeldes sind die Messdaten der NO_x-Roh Emissionsmassen und die NO_x-Tailpipe Emissionen des Semtech DS. Bei den Fahrzeugen 1 und 2 wurden die gemessenen Temperaturen vor dem Abgasschalldämpfer, zur Erstellung des SCR-Kennfeldes, herangezogen. Die Messwerte zur Bedatung stammen bei diesen Fahrzeugen ausschließlich aus den RDE-Messungen. Da davon ausgegangen wurde, dass diese Messdaten alle Kennfeldbereiche ausreichend abdecken.

Bei der Erstellung der Kennfelder wurde zuerst aus dem gemessenen Abgasmassenstrom die Raumgeschwindigkeit berechnet (6-3). Als nächstes wurden die sekundlichen NO_x-Emissionen, Temperaturen und die Raumgeschwindigkeiten auf 20s gemittelt. Dadurch sollten etwaige Messausreißer geglättet werden. Anschließend wurden für die jeweiligen Stützstellen im Kennfeld die Mittelwerte aus NO_x-Roh und NO_x-Tailpipe Emissionen gebildet. Damit findet eine NO_x-Gewichtung statt, das heißt, Konvertierungsraten bei hohen absoluten Emissionsmassen werden stärker gewichtet. Schließlich werden noch die Konvertierungsraten der einzelnen Stützstellen mit Gleichung (6-4) berechnet.

$$DeNO_x = \frac{NO_{xRoh} - NO_{xTP}}{NO_{xRoh}} \quad (6-4)$$

Das dadurch erhaltene Kennfeld ist anhand der Messdaten von Fahrzeug 1 symbolisch in Abbildung 79 dargestellt. Bei den leeren Feldern waren keine Messdaten vorhanden.

	Gesamt	RG < 0,5	RG 0,5-1	RG 1-1,5	RG 1,5-2	RG 2-2,5	RG 2,5-3	RG 3-3,5	RG 3,5-4	RG 4-4,5
T<100	100%	100%								
100<T<120	60%	100%	47%							
120<T<140	90%		90%							
140<T<160	75%		97%	34%	42%					
160<T<180	80%		92%	60%	34%					
180<T<200	85%		89%	81%	75%					
200<T<220	86%		85%	87%	84%	99%				
220<T<240	88%		98%	89%	83%	85%	81%	86%		
240<T<260	95%		99%	96%	94%	94%	97%			
260<T<280	98%		99%	97%	98%	98%	98%			
280<T<300	96%		99%	95%	97%	98%	94%	100%	88%	
300<T<320	98%			96%	99%	99%	98%	92%		
320<T<340	98%		97%	96%	96%	99%	99%	100%		
340<T<360	99%			95%	99%	100%	99%	98%	99%	
T>360	98%				98%	98%	98%	98%		

Abbildung 79: SCR-Kennfeld aus Messdaten von Fahrzeug 1

Die leeren Kennfeldpunkte in Abbildung 79 wurden dem Trend bzw. Erfahrungswerten nach aufgefüllt. Des Weiteren wurde das Kennfeld geglättet, d.h. Ausreißer zwischen vielen ähnlichen Werten an die Werte in ihrer Umgebung angepasst und unplausible Werte ersetzt. Dazu zählen auch die hohen Konvertierungsraten bei niedrigen Temperaturen, welche laut Theorie (siehe 3.2.3) nicht vorkommen dürften. Um die Plausibilität der Werte überprüfen zu können, wurde für jede Stützstelle die Anzahl der hinterlegten Messdaten dargestellt (siehe Abbildung 80). So wurde davon ausgegangen, dass Konvertierungsraten durch Glättung auf Basis vieler Daten plausibler sind als jene bei denen nur wenig Messwerte hinterlegt und Ausreißer möglich sind, sind. Das angepasste SCR-Kennfeld ist in Abbildung 81 zu sehen. Es wurde zusätzlich bis zu 490°C erweitert, um auch Zyklen mit höheren Temperaturen abzudecken. Bei dieser Erweiterung wurde darauf geachtet, dass es bei zu hohen Temperaturen zur Reduktion des Reduktionsmittel mit Luftsauerstoff kommt. Deshalb wurden die Konvertierungsraten bei höheren Temperaturen etwas geringer angenommen.

Temp. [°C]	RG[1/s] < 0,5	RG[1/s] 0,5-1	RG[1/s] 1-1,5	RG[1/s] 1,5-2	RG[1/s] 2-2,5	RG[1/s] 2,5-3	RG[1/s] 3-3,5	RG[1/s] 3,5-4	RG[1/s] 4-4,5
T<100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
100<T<120	1	2	0	0	0	0	0	0	0
120<T<140	0	15	0	0	0	0	0	0	0
140<T<160	0	35	5	6	0	0	0	0	0
160<T<180	0	77	17	4	0	0	0	0	0
180<T<200	0	103	32	5	0	0	0	0	0
200<T<220	0	115	91	24	2	0	0	0	0
220<T<240	0	65	93	26	11	2	1	0	0
240<T<260	0	29	104	50	13	3	0	0	0
260<T<280	0	12	73	52	19	6	0	0	0
280<T<300	0	4	38	37	12	5	3	2	0
300<T<320	0	0	28	86	49	12	2	0	0
320<T<340	0	1	3	14	30	12	1	0	0
340<T<360	0	0	3	5	5	5	5	1	0
T>360	0	0	0	1	1	2	2	0	0

Abbildung 80: Anzahl der hinterlegten Messwerte

Da im Kennfeld die Stützstellen nur Punkte und keine Bereiche sind, wurden den Temperatur- und Raumgeschwindigkeitsbereiche in Abbildung 81 gemittelt.

Temp. Gemittelt	RG[1/s] < 0,5	RG[1/s] 0,5-1	RG[1/s] 1-1,5	RG[1/s] 1,5-2	RG[1/s] 2-2,5	RG[1/s] 2,5-3	RG[1/s] 3-3,5	RG[1/s] 3,5-4	RG[1/s] 4-4,5
90	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	25%	47%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
130	90%	85%	20%	10%	5%	5%	5%	5%	5%
150	95%	90%	50%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
170	95%	92%	60%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
190	95%	89%	81%	75%	70%	70%	70%	70%	70%
210	98%	87%	87%	84%	80%	80%	80%	80%	80%
230	98%	95%	90%	90%	85%	81%	86%	80%	75%
250	99%	98%	96%	94%	94%	94%	92%	91%	90%
270	99%	99%	97%	98%	98%	98%	95%	95%	95%
290	99%	99%	98%	98%	98%	98%	95%	88%	95%
310	99%	98%	98%	99%	99%	98%	95%	90%	90%
330	99%	98%	98%	98%	99%	99%	98%	95%	95%
350	99%	99%	98%	99%	99%	99%	98%	99%	99%
370	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
390	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
410	99%	99%	98%	98%	98%	98%	95%	95%	95%
430	99%	99%	98%	98%	98%	98%	95%	95%	95%
450	99%	99%	95%	95%	95%	95%	95%	90%	85%
470	99%	99%	95%	95%	95%	95%	95%	90%	85%
490	99%	99%	95%	95%	95%	95%	95%	90%	85%

Abbildung 81: Angepasstes SCR-Kennfeld von Fahrzeug 1

Für das Fahrzeug 1 wurde wie schon in Kapitel 5.1.5.2 erläutert eine Driftkorrektur der gemessenen NO_x-Emissionen durchgeführt. Bei der Simulation wurden die Werte ohne Korrektur ebenfalls betrachtet. Aus diesem Grund wurde ein weiteres SCR-KF mit den unkorrigierten NO_x-Daten erstellt. Dieses wird hier aber nicht explizit dargestellt (siehe Anhang).

Das Konvertierungskennfeld für Fahrzeug 2 wurde analog zur Methode von Fahrzeug 1 erstellt. Da das Katalysatorvolumen dieses Fahrzeuges kleiner war, kam es trotz ähnlicher Massenströme zu höheren Raumgeschwindigkeiten. Das angepasste und bei der Simulation verwendete SCR-Kennfeld von Fahrzeug 2 ist in Abbildung 82 dargestellt.

Temp. Gemittelt [°C]	RG [1/s] < 0,5	RG [1/s] 0,5-1	RG [1/s] 1-1,5	RG [1/s] 1,5-2	RG [1/s] 2-2,5	RG [1/s] 2,5-3	RG [1/s] 3-3,5	RG [1/s] 3,5-4	RG [1/s] 4-4,5	RG [1/s] 4.75	RG [1/s] 5.25	RG [1/s] 5.75	RG [1/s] 6.25	RG [1/s] 6.75
90	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
130	50%	25%	10%	10%	10%	10%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
150	75%	50%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	10%	10%	10%	10%	10%
170	99%	99%	97%	94%	88%	80%	70%	60%	60%	55%	55%	50%	50%	50%
190	99%	98%	97%	94%	88%	76%	70%	60%	60%	55%	55%	50%	50%	50%
210	99%	98%	98%	96%	94%	80%	84%	75%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
230	99%	99%	98%	97%	96%	93%	91%	91%	90%	80%	80%	80%	80%	80%
250	99%	99%	98%	97%	98%	98%	94%	91%	90%	80%	80%	80%	80%	80%
270	99%	99%	98%	98%	98%	98%	94%	93%	92%	90%	90%	90%	90%	90%
290	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	93%	92%	90%	90%	90%	90%	90%
310	99%	99%	98%	99%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	94%	94%	94%	94%
330	99%	99%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	96%	96%	96%
350	99%	99%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	97%	97%
370	99%	99%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	94%
390	99%	99%	98%	98%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	94%
410	99%	99%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	97%	99%	99%	99%	99%	94%
430	99%	99%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	90%
450	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
470	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
490	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Abbildung 82: Angepasstes SCR-Kennfeld von Fahrzeug 2

6.6.2 SCR-Kennfeld von Fahrzeug 3

Die gemessene Temperatur vor dem Abgasschalldämpfer ist für die Betrachtung des SCR-Katalysators nicht ideal, da sich noch ein DOC und ein DPF zwischen Messstelle und Katalysator befinden. Eine Messung der Abgastemperatur direkt vor dem SCR-Katalysator, ist aber wie schon in Kapitel 5.1.2.6 erwähnt nicht möglich. Deshalb wurde diese Temperatur nach DPF bzw. vor SCR simuliert.

Für das Fahrzeug 3 wurden verschiedene Kennfeldvariationen erstellt. Bei der ersten Variante wurde gleich vorgegangen wie bei den Fahrzeugen 2 und 3. Die Messdaten stammen hier neben den RDE-Messungen noch aus den WHTC- und den HBEFA Stop&GO-Rollenzyklus, um das Kennfeld mit allen zur Verfügung stehenden Messwerten zu bedaten. Zusätzlich wurde ein SCR-Kennfeld erstellt, bei dem die verwendete Temperatur vor dem SCR-Katalysator mit dem in Kapitel 6.1.3.1 beschriebenen Temperaturmodell simuliert wurde. Diese Temperatursimulation musste somit vor der Erstellung der Kovertierungskennfelder erfolgen. Für einen Ausschnitt einer Köflach-Fahrt sind die Temperaturverläufe in Abbildung 83 dargestellt.

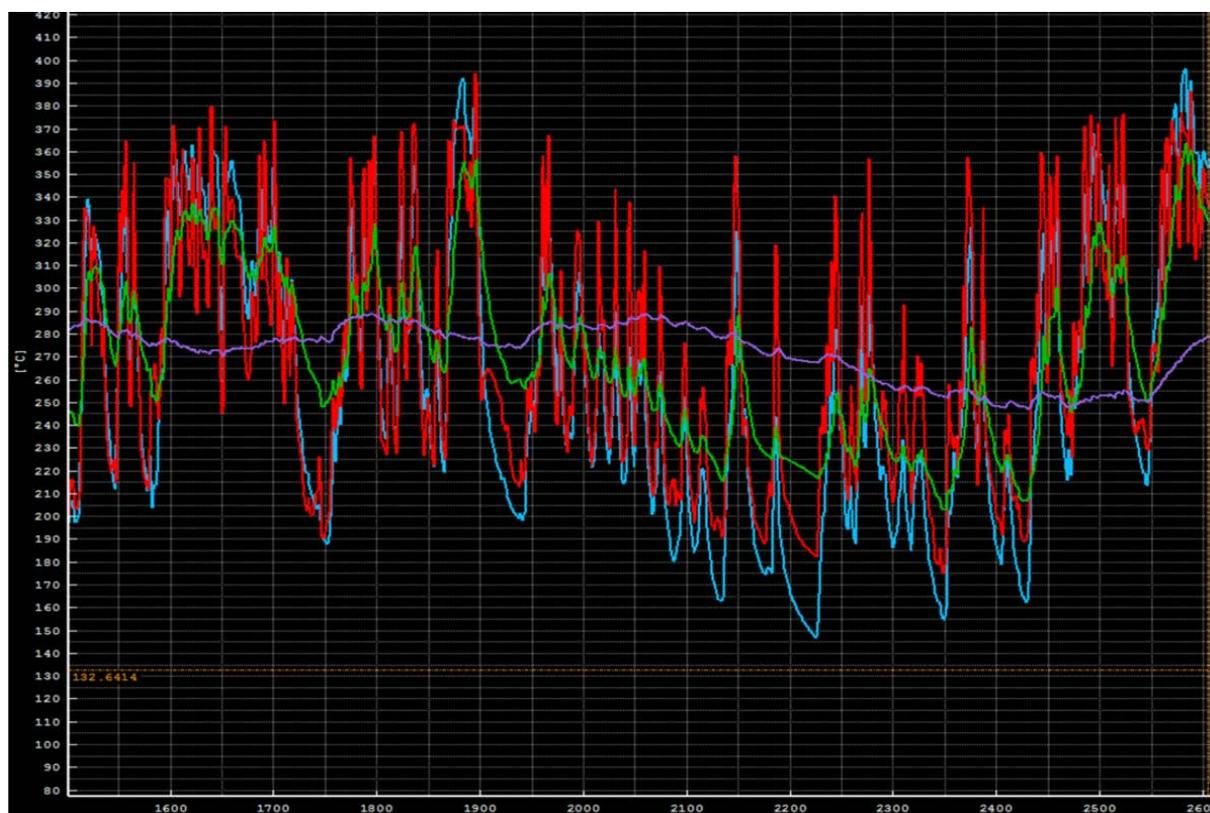


Abbildung 83: Gemessene Temperatur vor Schalldämpfer (rot), simulierte Temperatur vor Schalldämpfer (blau), gemessene Temperatur nach Schalldämpfer (violett), simulierte Temperatur vor SCR (grün)

Nachteilig hierbei ist das die Qualität der simulierten Temperatur aufgrund fehlender Messwerte nicht überprüft werden kann. Die einzige Plausibilitätskontrolle war, dass der Temperaturverlauf zwischen der gemessenen Temperatur vor und nach Schalldämpfer liegen muss, was laut Abbildung 83 auch der Fall ist.

Des Weiteren wurden für beide Varianten, die Messwerte in sekundlichen Schritten und über 20s gemittelt (wie bei Fahrzeug 1 und 2) vorgegeben. Die für die Simulation verwendeten, aufgefüllten und geglätteten SCR-Kennfelder von Fahrzeug 3 sind von Abbildung 84 bis Abbildung 87 dargestellt. Es sei noch erwähnt dass Konvertierungsraten von über 99% auf 99% beschränkt wurden.

Temp. Gemittelt [°C]	RG [1/s] < 0,5	RG [1/s] 0,5-1	RG [1/s] 1-1,5	RG [1/s] 1,5-2	RG [1/s] 2-2,5	RG [1/s] 2,5-3	RG [1/s] 3-3,5	RG [1/s] 3,5-4	RG [1/s] 4-4,5	RG [1/s] 4,75	RG [1/s] 5.25	RG [1/s] 5.75	RG [1/s] 6,25	RG [1/s] 6.75
90	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	50%	13%	10%	10%	10%	10%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
130	99%	45%	25%	20%	10%	10%	10%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
150	99%	70%	50%	48%	37%	24%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%
170	99%	98%	92%	83%	61%	48%	48%	48%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
190	99%	99%	99%	98%	95%	93%	80%	80%	60%	60%	50%	50%	50%	50%
210	99%	99%	98%	98%	97%	95%	92%	89%	87%	89%	84%	74%	79%	89%
230	99%	98%	97%	97%	97%	97%	93%	95%	93%	87%	90%	74%	89%	77%
250	99%	98%	97%	99%	99%	99%	98%	97%	95%	92%	94%	90%	87%	86%
270	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	96%	95%	94%	93%	88%	89%
290	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	97%	94%	94%	91%	90%
310	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	97%	93%	94%	91%
330	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	96%	94%
350	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	95%
370	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	95%
390	99%	99%	97%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	95%
410	99%	99%	95%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	95%
430	99%	99%	93%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	95%
450	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
470	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
490	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Abbildung 84: SCR-KF mit sekundlichen Werten und simulierter Temp. vor SCR

Temp. Gemittelt [°C]	RG [1/s] < 0,5	RG [1/s] 0,5-1	RG [1/s] 1-1,5	RG [1/s] 1,5-2	RG [1/s] 2-2,5	RG [1/s] 2,5-3	RG [1/s] 3-3,5	RG [1/s] 3,5-4	RG [1/s] 4-4,5	RG [1/s] 4,75	RG [1/s] 5.25	RG [1/s] 5.75	RG [1/s] 6.25	RG [1/s] 6.75
90	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	90%	15%	15%	15%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
130	90%	62%	37%	58%	45%	15%	15%	10%	10%	5%	5%	0%	0%	0%
150	95%	84%	64%	79%	45%	25%	15%	15%	10%	10%	5%	5%	5%	5%
170	95%	96%	93%	74%	69%	25%	25%	15%	15%	10%	10%	5%	5%	5%
190	98%	96%	91%	96%	89%	89%	77%	60%	60%	55%	55%	40%	40%	30%
210	99%	98%	94%	96%	95%	97%	87%	87%	80%	75%	75%	70%	70%	70%
230	99%	98%	94%	97%	98%	96%	94%	95%	95%	94%	80%	80%	80%	80%
250	99%	99%	96%	97%	98%	98%	96%	94%	94%	92%	85%	85%	85%	85%
270	99%	99%	98%	98%	98%	98%	98%	99%	98%	95%	96%	93%	90%	90%
290	99%	99%	99%	96%	98%	99%	99%	99%	97%	98%	95%	94%	92%	88%
310	99%	99%	99%	96%	98%	98%	98%	99%	97%	97%	95%	96%	93%	85%
330	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	97%	96%	96%	95%	94%	91%
350	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	97%	97%	96%	94%	93%
370	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	98%	97%	98%	98%
390	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	99%	99%	99%	99%	99%
410	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
430	99%	99%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	90%
450	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
470	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
490	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Abbildung 85: SCR-KF mit sekundlichen Werten und gemessener Temp. vor Schalldämpfer

Temp. Gemittelt [°C]	RG [1/s] < 0,5	RG [1/s] 0,5-1	RG [1/s] 1-1,5	RG [1/s] 1,5-2	RG [1/s] 2-2,5	RG [1/s] 2,5-3	RG [1/s] 3-3,5	RG [1/s] 3,5-4	RG [1/s] 4-4,5	RG [1/s] 4,75	RG [1/s] 5,25	RG [1/s] 5,75	RG [1/s] 6,25	RG [1/s] 6,75
90	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
130	50%	50%	30%	15%	5%	5%	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
150	79%	67%	37%	54%	28%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	10%
170	99%	99%	86%	87%	58%	55%	55%	55%	55%	50%	50%	50%	40%	40%
190	99%	99%	99%	97%	93%	98%	60%	55%	55%	55%	55%	50%	50%	50%
210	99%	99%	99%	98%	97%	94%	76%	73%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
230	99%	98%	97%	98%	97%	95%	94%	88%	84%	84%	81%	80%	80%	80%
250	99%	98%	96%	99%	99%	99%	98%	96%	92%	97%	92%	88%	85%	80%
270	99%	99%	95%	99%	99%	99%	98%	99%	95%	95%	90%	88%	85%	85%
290	99%	99%	95%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	96%	92%	91%	90%	90%
310	99%	99%	93%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	97%	97%	97%	92%	92%
330	99%	99%	90%	95%	99%	99%	99%	98%	98%	99%	97%	96%	94%	92%
350	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	99%	98%	96%
370	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
390	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
410	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
430	99%	99%	98%	98%	98%	98%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	97%	90%
450	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
470	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
490	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Abbildung 86: SCR-KF mit 20s-Mittelwerte und simulierter Temp. vor SCR

Temp. Gemittelt [°C]	RG [1/s] < 0,5	RG [1/s] 0,5-1	RG [1/s] 1-1,5	RG [1/s] 1,5-2	RG [1/s] 2-2,5	RG [1/s] 2,5-3	RG [1/s] 3-3,5	RG [1/s] 3,5-4	RG [1/s] 4-4,5	RG [1/s] 4,75	RG [1/s] 5,25	RG [1/s] 5,75	RG [1/s] 6,25	RG [1/s] 6,75
90	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
130	25%	25%	24%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
150	99%	85%	55%	55%	55%	40%	35%	35%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
170	99%	92%	84%	83%	75%	50%	35%	35%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
190	99%	93%	92%	93%	92%	65%	65%	65%	65%	65%	65%	65%	65%	65%
210	99%	96%	95%	97%	95%	91%	91%	89%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
230	99%	99%	98%	98%	97%	91%	91%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
250	99%	99%	99%	97%	98%	97%	93%	93%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
270	99%	99%	99%	98%	97%	98%	98%	96%	98%	92%	92%	92%	92%	92%
290	99%	99%	99%	97%	97%	99%	98%	97%	97%	97%	95%	92%	92%	92%
310	99%	99%	99%	99%	98%	98%	99%	98%	96%	94%	97%	98%	98%	92%
330	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	96%	97%	95%	95%	97%	92%
350	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	97%	98%	98%	96%	97%	94%
370	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%	99%	99%	99%	98%	99%
390	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
410	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
430	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
450	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
470	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
490	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Abbildung 87: SCR-KF mit 20s-Mittelwerte und gemessener Temp. vor Schalldämpfer

Wie in den obigen Konvertierungskennfeldern zu sehen ist, arbeiten die SCR-Systeme der betrachteten Versuchsfahrzeuge sehr effizient. Bei Temperaturen über 200°C liegen die Konvertierungsraten fast ausschließlich über 90%. Mit steigender Raumgeschwindigkeit nehmen die Konvertierungsraten ab. Auffallend ist das in bei einer Raumgeschwindigkeit von 1,25 1/s teilweise geringfügig schlechtere Konvertierungen auftreten.

6.7 Simulationsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse der drei Versuchsfahrzeuge dargestellt und analysiert. Damit das Resultat der Simulationen durch einen Vergleich mit der Messung bewertet werden kann, wurden exakt die Zyklen der RDE-Messungen nachgerechnet.

6.7.1 Fahrzeug 1

Tabelle 38: Vergleich Simulation zu Messung von CO₂, CO, HC, ExMF

Komponente	Köflach VM			Köflach NM		
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung
CO ₂ [g/h]	26978,24	27327,27	1%	27115,05	27399,90	1%
CO [g/h]	44,58	39,48	-11%	60,32	40,54	-33%
HC [g/h]	1,12	0,77	-31%	0,25	0,80	225%
Massenstrom [kg/s]	0,07	0,07	-3%	0,07	0,07	-1%
Komponente	Ries VM			Ries NM		
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung
CO ₂ [g/h]	24925,25	25306,69	2%	24249,98	24756,03	2%
CO [g/h]	14,29	33,50	135%	28,58	35,59	25%
HC [g/h]	1,7	0,85	-50%	0,23	0,82	259%
Massenstrom [kg/s]	0,07	0,07	-4%	0,07	0,07	-1%

In Tabelle 38 sind die Durchschnittswerte der Simulations- und Messergebnisse der einzelnen Zyklen dargestellt. Dabei bezieht sich die Abweichung immer auf den Unterschied der Simulation zur Messung. Bei der Abweichung der CO₂-Emissionen handelt es sich ausschließlich um einen Interpolationsfehler. Da die Leistung mit dem gemessenen CO₂ aus dem CO₂-Basiskennfeld ermittelt wird (siehe 5.1.4.3) und anschließend mit dieser Leistung wieder das CO₂ aus dem Kennfeldinterpoliert wird. Die Simulation der CO-Massen liefert recht brauchbare Ergebnisse um abschätzen zu können, in welchen Bereich sich die Emissionen ca. befinden. Nur bei der Simulation des Ries-VM Zyklus weicht die Simulation hinsichtlich CO relativ stark von der Messung ab. Für diesen Fall sind die Verläufe in Abbildung 88 dargestellt. Der Grund für die hohe Abweichung liegt darin, dass die absoluten CO Emissionen dieses Zyklus sehr gering waren im Vergleich zu den restlichen Zyklen.

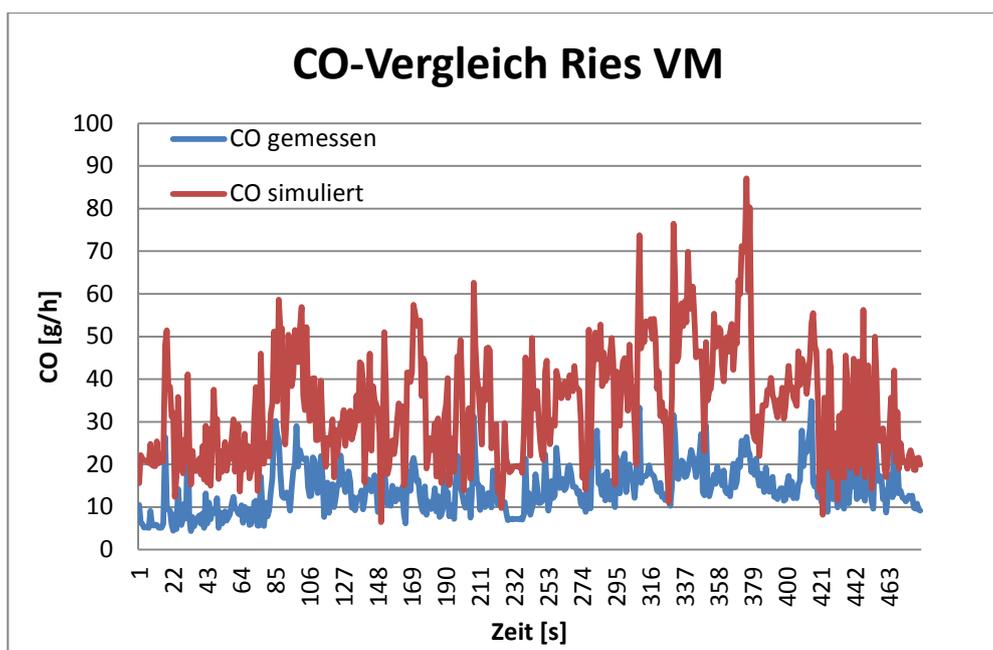


Abbildung 88: Vergleich der simulierten zu den gemessenen CO-Emissionen

Die simulierten durchschnittlichen Partikelemissionen sind in Tabelle 39 ersichtlich.

Tabelle 39: Durchschnittliche simuliert Partikelemissionen von Fahrzeug 1

	Köflach VM	Köflach NM	Ries VM	Ries NM
Komponente	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation
Partikelmasse [g/h]	0,079	0,077	0,079	0,080
Partikelanzahl [# /h]	5,267E+12	5,191E+12	5,461E+12	5,461E+12

Hier kann kein Vergleich mit den Messwerten angestellt werden, da diese bei den RDE-Fahrten nicht gemessen werden konnten. Die Bedatung für die Partikelsimulation basiert ausschließlich auf den CVS-Daten der Rollenmessungen. Es bestünde zwar die Möglichkeit aus dem Zusammenhang von Soot und Partikelmasse der Rollenmessungen, auf die Partikelmasse der RDE-Zyklen zu schließen. Dies wäre für eine Bewertung der Simulation jedoch zu ungenau.

Die Simulationsergebnisse für die Stickoxid Emissionen sind in Tabelle 40 dargestellt

Tabelle 40: Vergleich Simulation zu Messung von NOx (Fahrzeug 1)

			Mittelwert	Abweichung
			[g/h]	
Köflach VM	NOx roh	gemessen	108,95	
		simuliert	121,78	11,77%
	NOx Tailp.	gem. mit Driftkorr.	6,19	
		gem. ohne Driftkorr.	3,96	
	NOx Tailp. mit NOx roh aus KF simuliert	KF - mit Driftkorr.	7,93	28,08%
		KF - ohne Driftkorr.	5,32	34,42%
	NOx Tailp. mit NOx roh aus Messung simuliert	KF - mit Driftkorr.	7,15	15,59%
		KF - ohne Driftkorr.	5,51	39,06%

			Mittelwert	Abweichung
			[g/h]	
Köflach NM	NOx roh	gemessen	-	
		simuliert	125,55	-
	NOx Tailp.	gem. mit Driftkorr.	4,23	
		gem. ohne Driftkorr.	3,66	
	NOx Tailp. mit NOx roh aus KF simuliert	KF - mit Driftkorr.	7,03	66,06%
		KF - ohne Driftkorr.	4,43	21,01%
	NOx Tailp. mit NOx roh aus Messung simuliert	KF - mit Driftkorr.	-	-
		KF - ohne Driftkorr.	-	-

			Mittelwert	Abweichung
			[g/h]	
Ries VM	NOx roh	gemessen	112,79	
		simuliert	112,68	-0,10%
	NOx Tailp.	gem. mit Driftkorr.	6,17	
		gem. ohne Driftkorr.	4,88	
	NOx Tailp. mit NOx roh aus KF simuliert	KF - mit Driftkorr.	10,38	68,39%
		KF - ohne Driftkorr.	7,73	58,30%
	NOx Tailp. mit NOx roh aus Messung simuliert	KF - mit Driftkorr.	11,08	79,78%
		KF - ohne Driftkorr.	8,00	63,85%

			Mittelwert	Abweichung
			[g/h]	
Ries NM	NOx roh	gemessen	111,77	
		simuliert	126,30	13,00%
	NOx Tailp.	gem. mit Driftkorr.	3,38	
		gem. ohne Driftkorr.	1,33	
	NOx Tailp. mit NOx roh aus KF simuliert	KF - mit Driftkorr.	8,97	165,57%
		KF - ohne Driftkorr.	6,40	380,75%
	NOx Tailp. mit NOx roh aus Messung simuliert	KF - mit Driftkorr.	8,14	140,88%
		KF - ohne Driftkorr.	8,03	503,06%

Bei der Stickoxidsimulation sind unterschiedliche Varianten betrachtet worden. Zunächst wurden die NOx Rohemissionen kennfeldbasiert simuliert und anschließend mit den Messwerten verglichen. Während bei dem Zyklus Ries VM die Simulation mit dem Messwert beinahe identisch ist, weichen die NOx Rohemissionen bei den Zyklen Köflach VM und Ries NM um 11,8% bzw. 13% ab. Bei der Köflach NM Messung wurden keine NOx-Roh gemessen.

Hinsichtlich der NOx-Tailpipe Emissionen wurden zwei verschiedene SCR-Kennfelder erstellt, einmal wurde die Driftkorrektur berücksichtigt (siehe 5.1.5.2), bei der zweiten Variante wurden die unkorrigierten Messwerte herangezogen. Zudem wurden die zu konvertierenden NOx-Roh sowohl aus dem Kennfeld simuliert als auch als Messwert vorgegeben. Jene Varianten bei denen die NOx-Roh vorgegeben wurden geben Auskunft über das hinterlegte Modell, mit Temperatursimulation und SCR-Konvertierungskennfeld. Unterm Strich kann gesagt werden, dass die Simulation der Köflach-Strecke bessere Ergebnisse liefert als jene der Ries-Strecke. Da beide Strecken in etwa dieselben Stadtanteile haben (siehe Tabelle 17), und sich nur die Überland- bzw. Autobahnanteile ändern, ist davon auszugehen dass entweder die Temperatursimulation oder das SCR-Konvertierungskennfeld in diesen Bereichen nicht optimal abgestimmt ist. Der zur Berechnung der Raumgeschwindigkeit (6-3) notwendige Massenstrom wurde bei den obigen Ergebnissen aus den Messdaten vorgegeben. Obwohl eine kennfeldbasierte Simulation des Massenstroms bei diesem Fahrzeug auch sehr gut funktioniert (siehe Tabelle 43). Gerade bei Fahrzeugen mit AGR funktioniert diese Methode nicht immer sehr gut. Es ist zu bedenken, dass die relativ hohen prozentuellen Abweichungen aufgrund der niedrigen Absolutwerte zustande kommen. Auffallend ist dass

die simulierten Werte immer über den Messwerten liegen. Jene Verläufe bei denen die Abweichung der simulierten NO_x-Tailpipe Emissionen am geringsten (Abbildung 89) bzw. am größten (Abbildung 90) sind folgend dargestellt. Um die gesamte Simulation zu betrachten wurden jene Verläufe gegenübergestellt bei denen die Rohemissionen ebenfalls simuliert wurden.

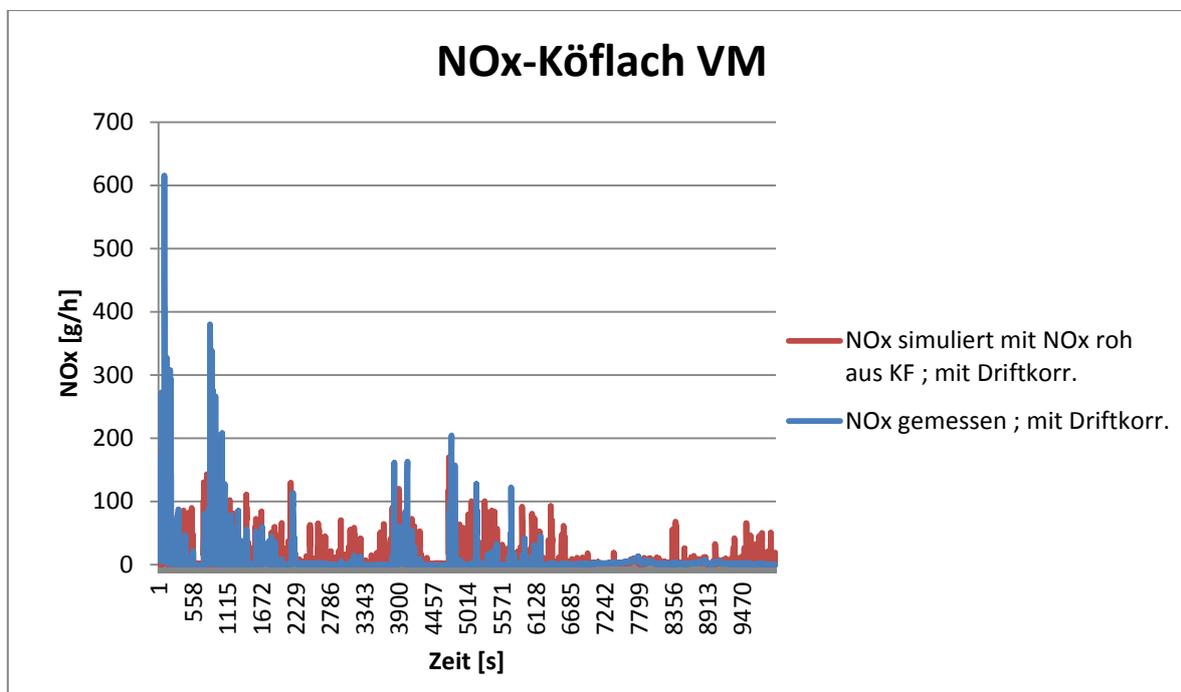


Abbildung 89: NO_x-Vergleich Messung zu Simulation für den Köflach VM Zyklus

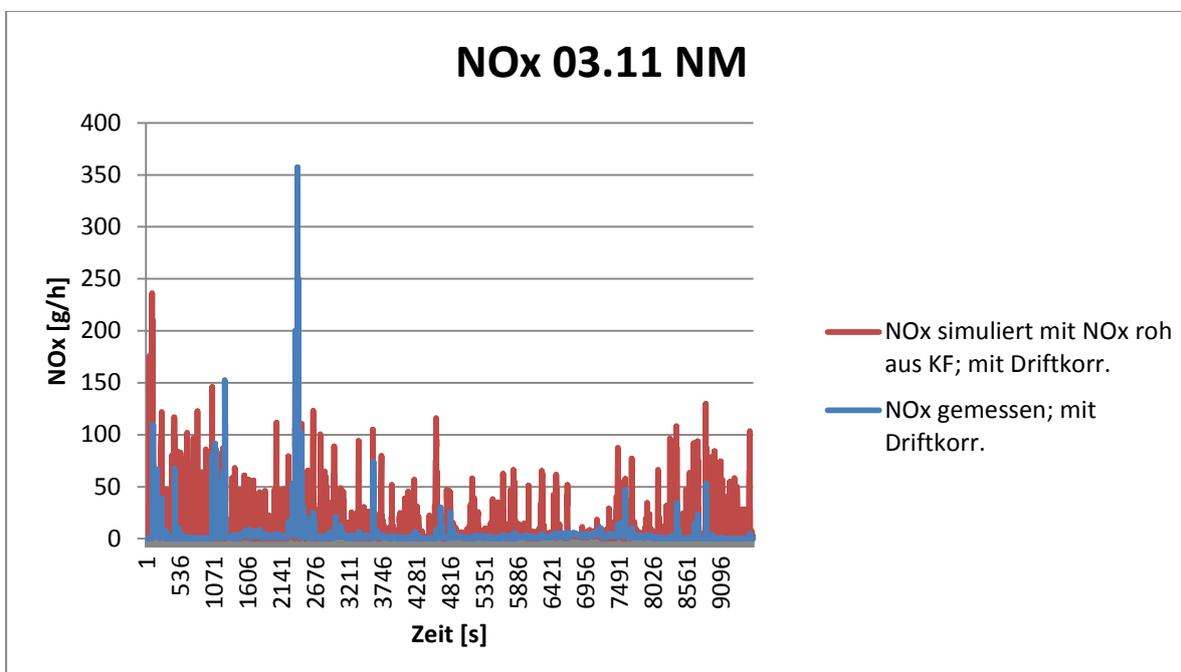


Abbildung 90: NO_x-Vergleich Messung zu Simulation für den Ries NM Zyklus

Anhand der dargestellten NO_x-Verläufe lässt sich vermuten, dass entweder das Konvertierungskennfeld in einigen Punkten zu geringe Konvertierungsraten aufweist, oder dass die simulierte Temperatur nicht mit der gemessenen Temperatur übereinstimmt. Deshalb wird in Abbildung 91 der Vergleich von simulierter zu gemessener Temperatur angestellt.

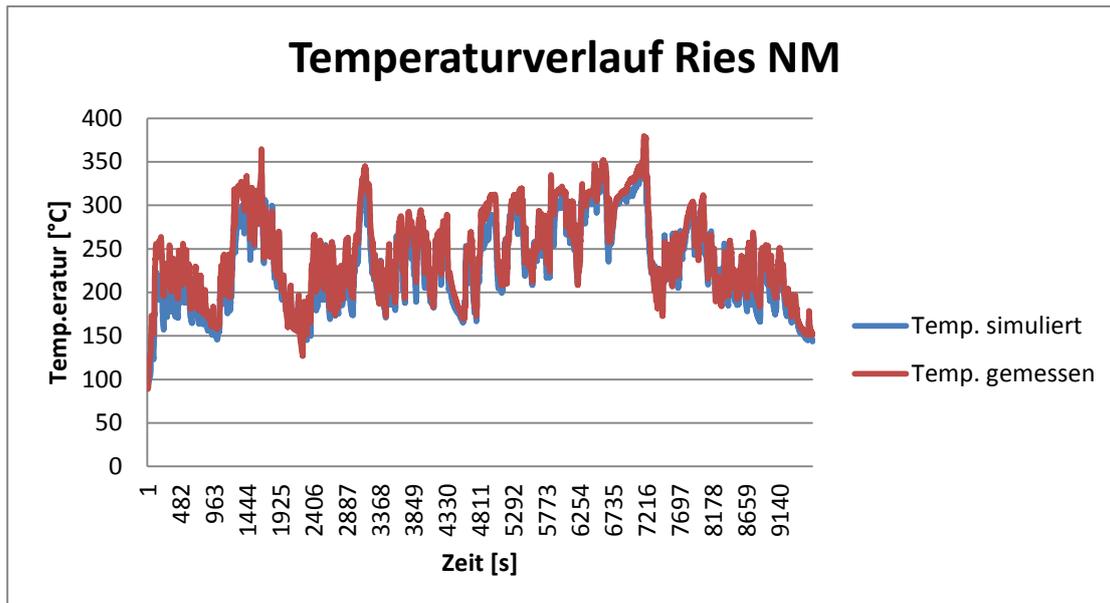


Abbildung 91: Vergleich der gemessenen und simulierten Temperatur für den Zyklus Ries NM von Fahrzeug 1

Aus Abbildung 91 ist ersichtlich, dass die Temperaturen eher zu kalt als zu heiß simuliert wurden. Über den gesamten Zyklus betrachtet stimmen die Messwerte mit den simulierten Werten gut überein. Das Konvertierungskennfeld basiert, bis auf die Änderungen bei niedrigen Temperaturen und gewissen Ergänzungen, auf Messwerten. Daraus lässt sich ableiten, dass die prozentuellen hohen Abweichungen aufgrund geringer Ungenauigkeiten der Temperatursimulation und des Konvertierungskennfeldes zurückzuführen sind. Eine genaue Analyse hinsichtlich des Konvertierungskennfeldes erfolgt bei Fahrzeug 3.

6.7.2 Fahrzeug 2

In Tabelle 41 sind die Simulationsergebnisse der Komponenten dargestellt die aus einer Kennfeldinterpolation bestimmt wurden.

Tabelle 41: Vergleich Simulation zu Messung von Fahrzeug 2

Komponente	Köflach NM			Köflach VM		
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung
CO ₂ [g/h]	36989,48	37299,49	1%	36386,16	36733,11	1%
HC [g/h]	0,11	0,19	62%	0,28	0,20	-28%
CO [g/h]	2,98	9,66	224%	10,62	9,95	-6%
NO _x Tailp. [g/h]	2,69	3,58	33%	2,82	3,52	25%
Massenstrom [kg/s]	0,10	0,10	-4%	0,10	0,10	-2%
Komponente	Ries VM_1			Ries VM_2		
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung
CO ₂ [g/h]	29815,18	30263,33	2%	32130,40	32614,60	2%
HC [g/h]	-	0,30	-	0,20	0,23	14%
CO [g/h]	16,88	9,80	-42%	6,98	9,67	38%
NO _x Tailp. [g/h]	2,00	3,12	57%	5,06	3,26	-36%
Massenstrom [kg/s]	0,10	0,09	-3%	0,10	0,09	-5%

Prinzipiell sind die Erkenntnisse ähnlich wie bei Fahrzeug 1. Das heißt, an Hand der Simulation lässt sich das durchschnittliche Emissionsniveau dieses Fahrzeuges bestimmen. Für genaue Betrachtungen der Schadstoffemissionen einzelner Zyklen ist eine kennfeldbasierte Simulation nicht zielführend. Die Abweichung der CO₂-Emissionen ist wiederum auf einen Interpolationsfehler zurückzuführen (siehe Fahrzeug 1). Zusätzlich wurden beim Fahrzeug 2 auch die NO_x-Tailpipe Emissionen kennfeldbasiert aus den gemessenen NO_x-Tailpipe berechnet (siehe Abbildung 92). Der Massenstrom wurde für die Simulationen aus den Messdaten vorgegeben.

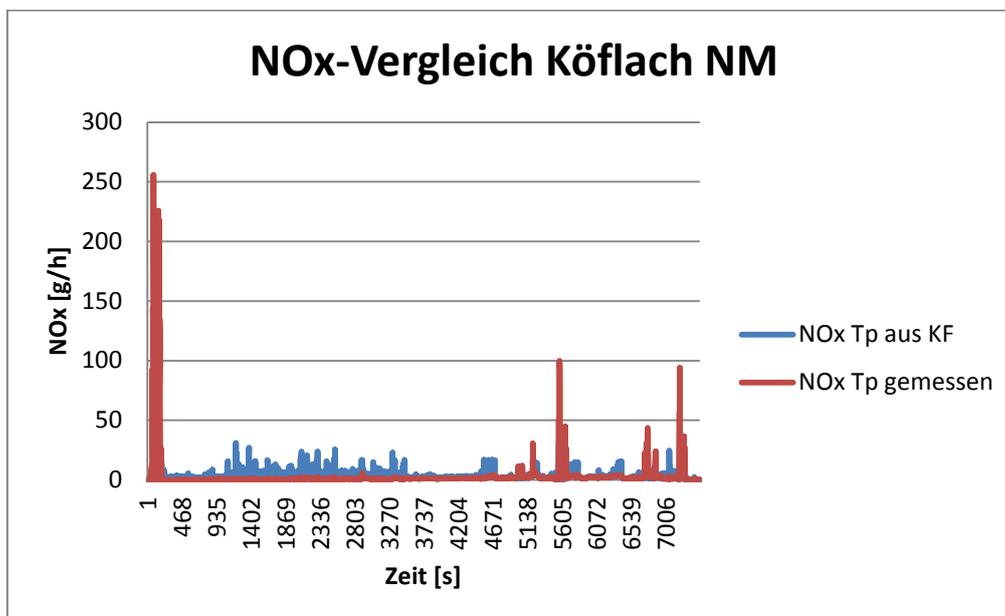


Abbildung 92: Vergleich von NO_x-gemessen und NO_x aus dem KF interpoliert

Aufgrund ihrer Abhängigkeit von der Katalysatortemperatur und Raumgeschwindigkeit sind die NO_x-Tailpipe Emissionen keine Kennfeldgröße. So stimmen bei der betrachteten Berechnung die Mittelwerte so gut überein, um das Emissionsniveau des Fahrzeuges bestimmen zu können. Die zeitlichen Verläufe hingegen haben keinen Zusammenhang, somit ist eine Simulation über das Abgasnachbehandlungssystem sinnvoll.

In Tabelle 42 sind die simulierten Werte der durchschnittlichen Partikelemissionen von Fahrzeug 2 dargestellt. Die Partikelmassen sind im Vergleich zu Fahrzeug 1 um den Faktor 10 geringer.

Tabelle 42: Durchschnittliche simulierte Partikelemissionen von Fahrzeug 2

	Köflach NM	Köflach VM	Ries VM_1	Ries VM_2
Komponente	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation
Partikelmasse [g/h]	0,008	0,008	0,008	0,008
Partikelanzahl [# /h]	3,343E+12	3,391E+12	3,361E+12	3,309E+12

Die Ergebnisse der NO_x-Simulation samt Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems sind in Tabelle 43 ersichtlich.

Tabelle 43: Vergleich Simulation zu Messung von NO_x (Fahrzeug 2)

			Mittelwert g/h	Abweichung
Köflach NM	NO _x roh	gemessen	235,81 €	
		simuliert	230,44 €	-2,28%
	NO _x Tailp.	gemessen	2,69 €	
	NO _x Tailp. mit NO _x roh aus KF simuliert	simuliert	5,12 €	90%
		simuliert	7,18 €	167%
				Mittelwert g/h
Köflach VM	NO _x roh	gemessen	221,65 €	
		simuliert	227,34 €	2,57%
	NO _x Tailp.	gemessen	2,82 €	
	NO _x Tailp. mit NO _x roh aus KF simuliert	simuliert	5,50 €	95%
		simuliert	5,34 €	89%
				Mittelwert g/h
Ries VM_1	NO _x roh	gemessen	176,19 €	
		simuliert	188,57 €	7,03%
	NO _x Tailp.	gemessen	1,99 €	
	NO _x Tailp. mit NO _x roh aus KF simuliert	simuliert	5,84 €	194%
		simuliert	5,33 €	168%
				Mittelwert g/h
Ries VM_2	NO _x roh	gemessen	209,11 €	
		simuliert	203,11 €	-2,87%
	NO _x Tailp.	gemessen	5,06 €	
	NO _x Tailp. mit NO _x roh aus KF simuliert	simuliert	6,68 €	32%
		simuliert	6,61 €	31%

Wie schon bei Fahrzeug 1 wurden zunächst die simulierten NO_x Rohemissionen mit den Messwerten verglichen. Die Abweichungen bewegen sich je nach Zyklus zwischen -3% und 7%. Anschließend erfolgte die Simulation der NO_x-Tailpipe Emissionen. Wobei zur Betrachtung des gesamten Simulationsprozesses die Rohemissionen kennfeldbasiert simuliert wurden. Um das hinterlegte Modell des Abgasnachbehandlungssystems beurteilen zu können, wurde eine weitere Simulation, diesmal mit den gemessenen Rohemissionen, durchgeführt. Mit Ausnahme der Köflach NM Fahrt, treten keine großen Unterschiede zwischen den beiden Varianten auf. Die genauen Ergebnisse sind in Tabelle 43 ersichtlich. Es sei noch zu erwähnen, dass der Massenstrom zur Bestimmung der Raumgeschwindigkeit (6-3), wie bei Fahrzeug 1 aus den Messdaten vorgegeben wurde. Auch bei diesem Fahrzeug liegen die simulierten Werte durchwegs über den Messwerten. Auffallend ist, dass trotz des Modells zur Simulation der gesamten Abgasnachbehandlung, die Abweichung der Mittelwerte höher ist, als durch eine vergleichsweise einfache Kennfeldinterpolation. Mit dem Abgasnachbehandlungsmodell kann dafür zwar der zeitliche Verlauf und somit die NO_x-Spitzen besser abgebildet werden, die Abweichungen zur Messung sind aber auch beim Verlauf noch recht deutlich. Dies ist in Abbildung 93 für den Zyklus Ries VM_2 ersichtlich.

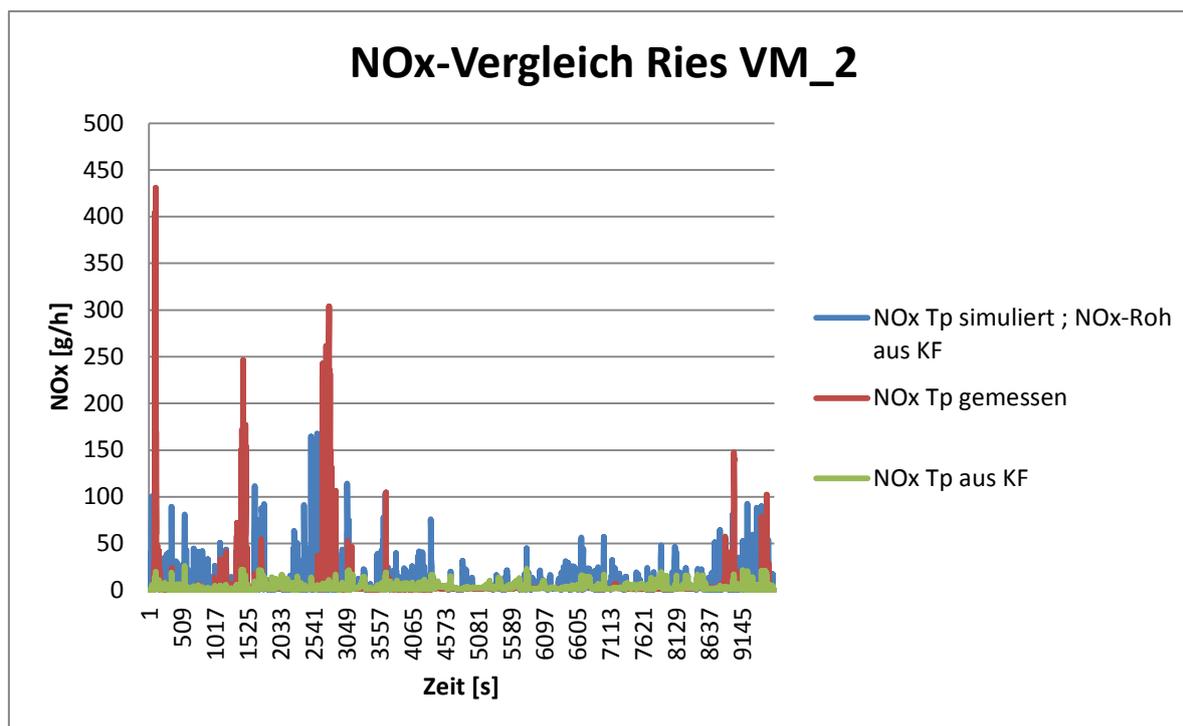


Abbildung 93: Vergleich von NOx-gemessen und NOx simuliert

Der Verlauf der Temperaturen wurde ebenfalls wieder überprüft (Abbildung 94), wobei die Simulation wieder sehr gut mit der Messung einhergeht.

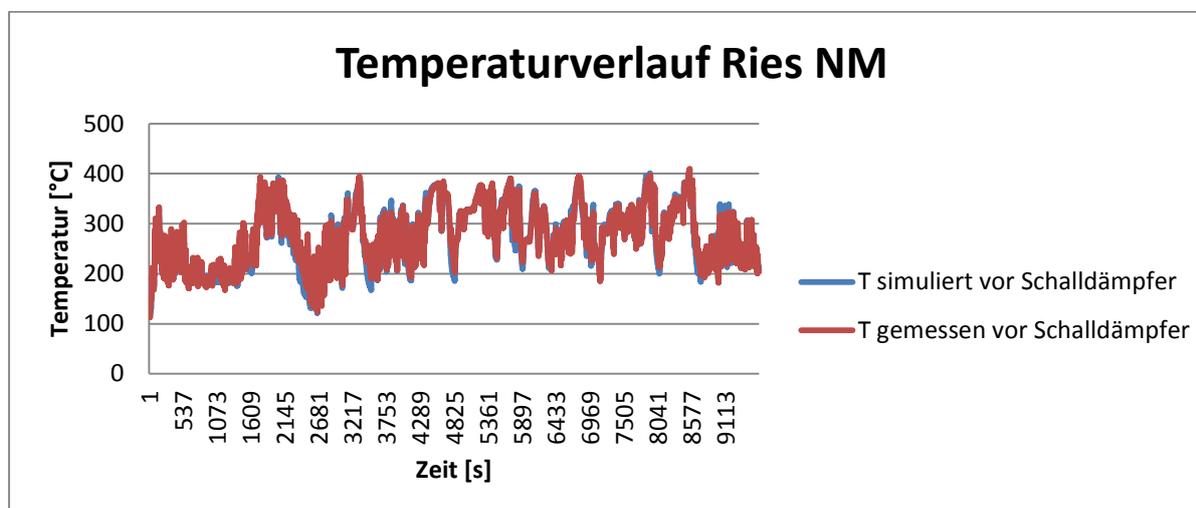


Abbildung 94: Vergleich der gemessenen und simulierten Temperatur für den Zyklus Ries NM von Fahrzeug 2

Durch eine Optimierung des SCR-KF könnte die Simulation angepasst werden jedoch würde dann wiederum der Bezug zu den Messdaten verloren gehen. Untersuchungen hinsichtlich der Konvertierungskennfelder erfolgen anhand von Fahrzeug 3 in Kapitel 6.7.3.

6.7.3 Fahrzeug 3

Die simulierten gasförmigen Abgaskomponenten CO₂, CO, HC, sowie der Massenstrom werden in Tabelle 44 mit den Messwerten verglichen.

Tabelle 44: Vergleich Simulation zu Messung von Fahrzeug 3

Komponente	Köflach VM			Köflach NM		
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung
CO ₂ [g/h]	46744,64	47502,40	2%	48544,57	49295,20	2%
HC [g/h]	-	0,31	-	-	0,31	-
CO [g/h]	22,76	23,82	5%	12,28	24,07	96%
Massenstrom [kg/s]	0,19	0,18	-3%	0,19	0,19	-2%
Komponente	Ries VM			Ries NM		
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung
CO ₂ [g/h]	47474,75	48508,37	2%	47212,39	48042,89	2%
HC [g/h]	-	0,31	-	-	0,31	-
CO [g/h]	28,49	23,75	-17%	11,57	23,35	102%
Massenstrom [kg/s]	0,19	0,185	-3%	0,19	0,18	-3%
Komponente	Stadt_2					
	Mittelwert Messung	Mittelwert Simulation	Abweichung			
CO ₂ [g/h]	15317,38	16034,329	5%			
HC [g/h]	0,02	0,297	1804%			
CO [g/h]	9,17	13,593	48%			
Massenstrom [kg/s]	0,10	0,10	-2%			

Die Abweichung der "simulierten" CO₂ Emissionen resultiert, wie schon bei den Fahrzeugen 1 und 2 aus einem Interpolationsfehler, da die Leistung für die Simulationen mit der CO₂ Methode (siehe Kapitel 5.1.4.3) bestimmt wurden. Für eine genauere Erklärung siehe Kapitel 6.7.1 Fahrzeug 1. Die Basis für die Simulation der HC's bilden die CVS-Daten aus den Rollenmessungen, da bei den RDE-Fahrten keine HC-Messung möglich war (Kapitel 5.1.7.2) Deshalb darf die hohe Abweichung bei der Stadt_2-Messung nicht zu kritisch gesehen werden, da die Ausgangswerte mit unterschiedlichen Messgeräten ermittelt wurden. Der Stadt_1 Zyklus wurde bei den Simulationen aufgrund des Kaltstarts nicht betrachtet (Kapitel 5.1.1).

Die Partikelemissionen sind in Tabelle 45 zu sehen, es ist ersichtlich das die Partikelmasse von Fahrzeug 3 im Vergleich zu Fahrzeug 1 um den Faktor 10 und zu Fahrzeug 2 sogar um den Faktoren 100 größer ist.

Tabelle 45: Durchschnittliche simulierte Partikelemissionen von Fahrzeug 3

	Köflach VM	Köflach NM	Ries VM	Ries NM	Stadt_2
Komponente	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation	Simulation
Partikelmasse [g/h]	0,292	0,300	0,294	0,292	0,120
Partikelanzahl [# /h]	2,215E+12	2,286E+12	2,262E+12	2,228E+12	8,097E+11

Folgend wird nun auf die NOx-Simulation von Fahrzeug 3 eingegangen. Wie in Kapitel 6.6.2 erläutert wurde, kamen hier unterschiedliche Methoden zur Erstellung der SCR-Kennfelder zum Einsatz. Der größte Unterschied war dabei, dass bei einer Kennfeldvariante die gemessene Temperatur vor Schalldämpfer (Tvor), wie bisher bei den Fahrzeugen 1 und 2, da die prozentuellen Abweichungen bei dieser Methode relativ hoch waren, wurden bei einer anderen Kennfeldvariante die simulierte Temperatur vor SCR-Katalysator bzw. nach DPF (Tnach) zur Erstellung herangezogen wurde. In sind die Ergebnisse der Stickoxidsimulation dargestellt.

Tabelle 46: NOx-Simulationsergebnisse von Fahrzeug 3

			Summe	Abweichung	KF
			g/h		Ranking
Köflach NM	NOx roh	gemessen	6142665,01		
		simuliert	6164114,67	0,35%	
	NOx Tailp.	gemessen	126310,93		
		sim 1s Tvor	255448,96	102,24%	3
	mit NOx roh aus KF	sim 20s Tvor	298491,49	136,31%	4
		sim 1s Tnach	161229,86	27,65%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	196710,93	55,74%	2
		sim 1s Tvor	227603,73	80,19%	3
	mit NOx gemessen	sim 20s Tvor	264820,94	109,66%	4
		sim 1s Tnach	141770,02	12,24%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	169980,00	34,57%	2
		aus KF simuliert	210782,90	66,88%	
Köflach VM	NOx roh	gemessen	6191345,86		
		simuliert	6200148,74	0,14%	
	NOx Tailp.	gemessen	101804,30		
		sim 1s Tvor	317967,70	212,33%	3
	mit NOx roh aus KF	sim 20s Tvor	364299,91	257,84%	4
		sim 1s Tnach	206201,46	102,55%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	239505,93	135,26%	2
		sim 1s Tvor	275786,06	170,90%	3
	mit NOx gemessen	sim 20s Tvor	314082,34	208,52%	4
		sim 1s Tnach	172089,47	69,04%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	198030,81	94,52%	2
		aus KF simuliert	209745,90	106,03%	
Ries NM	NOx roh	gemessen	7075582,46		
		simuliert	7099032,12	0,33%	
	NOx Tailp.	gemessen	164638,38		
		sim 1s Tvor	362247,08	120,03%	3
	mit NOx roh aus KF	sim 20s Tvor	411440,36	149,91%	4
		sim 1s Tnach	251529,09	52,78%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	300005,25	82,22%	2
		sim 1s Tvor	304846,71	85,16%	3
	mit NOx gemessen	sim 20s Tvor	345867,88	110,08%	4
		sim 1s Tnach	202536,13	23,02%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	239603,58	45,53%	2
		aus KF	250799,22	52,33%	
Ries VM	NOx roh	gemessen	6989582,47		
		simuliert	6889140,85	-1,44%	
	NOx Tailp.	gemessen	154068,17		
		sim 1s Tvor	369884,95	140,08%	3
	mit NOx roh aus KF	sim 20s Tvor	419537,45	172,31%	4
		sim 1s Tnach	276900,91	79,73%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	319994,71	107,70%	2
		sim 1s Tvor	312286,11	102,69%	3
	mit NOx gemessen	sim 20s Tvor	355384,16	130,67%	4
		sim 1s Tnach	238691,11	54,93%	1
	simuliert	sim 20s Tnach	275019,93	78,51%	2
		aus KF	241998,76	57,07%	
28.10_VM (Stadt)	NOx roh	gemessen	1063115,52		
		simuliert	1537930,45	44,66%	
	NOx Tailp.	gemessen	169883,08		
		sim 1s Tvor	425469,88	150,45%	1
	mit NOx roh aus KF	sim 20s Tvor	472093,05	177,89%	2
		sim 1s Tnach	545465,96	221,08%	3
	simuliert	sim 20s Tnach	563693,75	231,81%	4
		sim 1s Tvor	318838,28	87,68%	1
	mit NOx gemessen	sim 20s Tvor	362118,24	113,16%	4
		sim 1s Tnach	321630,18	89,32%	2
	simuliert	sim 20s Tnach	332810,68	95,91%	3
		aus KF	92057,86	-45,81%	

mit

Tabelle 47: Bedeutung der Abkürzungen aus Tabelle 46

1s	SCR-KF mit sekundlichen Eingabewerten erstellt
20s	Eingabewerte des SCR-KF wurden über 20s gemittelt
Tvor	SCR-KF wurde mit gemessener Temperatur vor Schalldämpfer erstellt
Tnach	SCR-KF wurde mit simulierter Temperatur nach DPF erstellt

In Tabelle 46 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen NO_x-Simulationsvarianten dargestellt. Auffallend ist, dass die Simulation der NO_x-Roh Emissionen bei den Ries und Köflach Zyklen, mit Abweichungen zwischen 0,14% und 1,44%, äußerst gut funktioniert, beim Stadtzyklus hingegen werden die NO_x-Roh Emissionen um ca.45% zu hoch simuliert. Dies hängt damit zusammenhängen, dass der Stadtzyklus zur Hälfte ohne Beladung gefahren wurde. Dadurch befindet sich der Motor in einem geringeren Lastbereich, was mit geringeren Spitzentemperaturen und somit geringer NO_x Rohemissionen einhergeht, als bei den restlichen Zyklen mit denen das Kennfeld für die NO_x-Roh Simulation erstellt wurde.

Obwohl die Simulation von NO_x-Roh so gut funktioniert, weichen die Tailpipe Emissionen bei diesen Simulationen deutlich mehr vom Messwert ab als bei den Simulationen mit vorgegebenen, sprich gemessenen Roh-Emissionen.

Zudem zeigt sich, dass die Werte der Simulationen mit der simulierten Temperatur nach DPF (Tnach) genauer sind als jene mit gemessener Temperatur vor Schalldämpfer (Tvor). Wovon aufgrund der fehlenden Validierung bei der Temperatursimulation nicht auszugehen war, obwohl die Einrasterung der Konvertierungsraten ins Kennfeld mit derselben Temperatur erfolgte.

Schließlich wurde noch der Einfluss von sekundlichen Eingabedaten zu 20 sekundlichen Mittelwerten, wie zuvor bei den Fahrzeugen 1 und 2 verglichen. Dabei schneidet durchwegs das Kennfeld mit den sekundlichen Eingabedaten besser ab.

Wie auch schon bei Fahrzeug 2 wurden ebenfalls die NO_x-Tailpipe Emissionen in ein Kennfeld eingerastert und anschließend heraus interpoliert. Diese Ergebnisse weisen im Mittel nicht viel höhere, oder bei einigen Zyklen sogar geringere Abweichungen auf, als jene bei denen das Abgasnachbehandlungssystem modelliert wurde.

Es ist festzustellen, dass wie schon bei den vorigen Fahrzeugen, die NO_x-Emissionen durchwegs zu hoch simuliert wurden. Für das Kennfeld mit den sekundlichen Eingangsdaten und simulierter Temperatur, werden nun die zeitlichen Verläufe der besten (Abbildung 95), sowie der schlechtesten (Abbildung 96), Simulation mit vorgegebenen (gemessenen) Rohemissionen dargestellt. Dadurch wird nur die Konvertierung verglichen.

Der Massenstrom, zur Berechnung der Raumgeschwindigkeit, wurde wie schon bei den beiden anderen Fahrzeugen, aus den Messdaten vorgegeben. Eine Simulation des Massenstroms hätte aber lt. Tabelle 44 nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis.

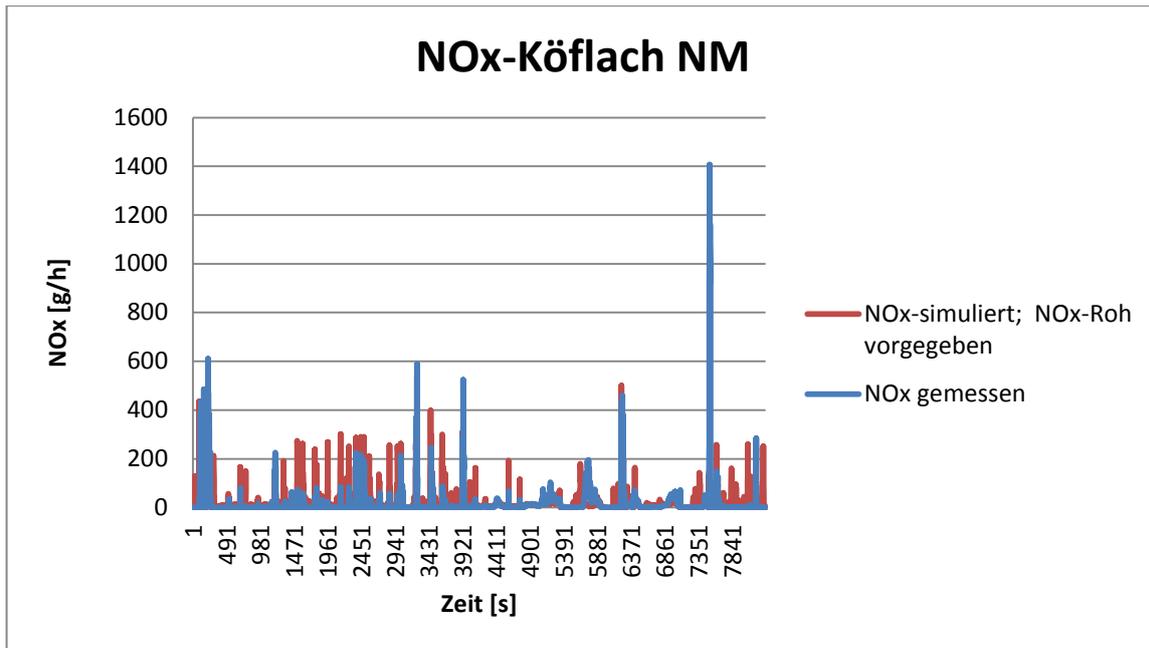


Abbildung 95: NOx-Vergleich Köflach NM (Fahrzeug 3)

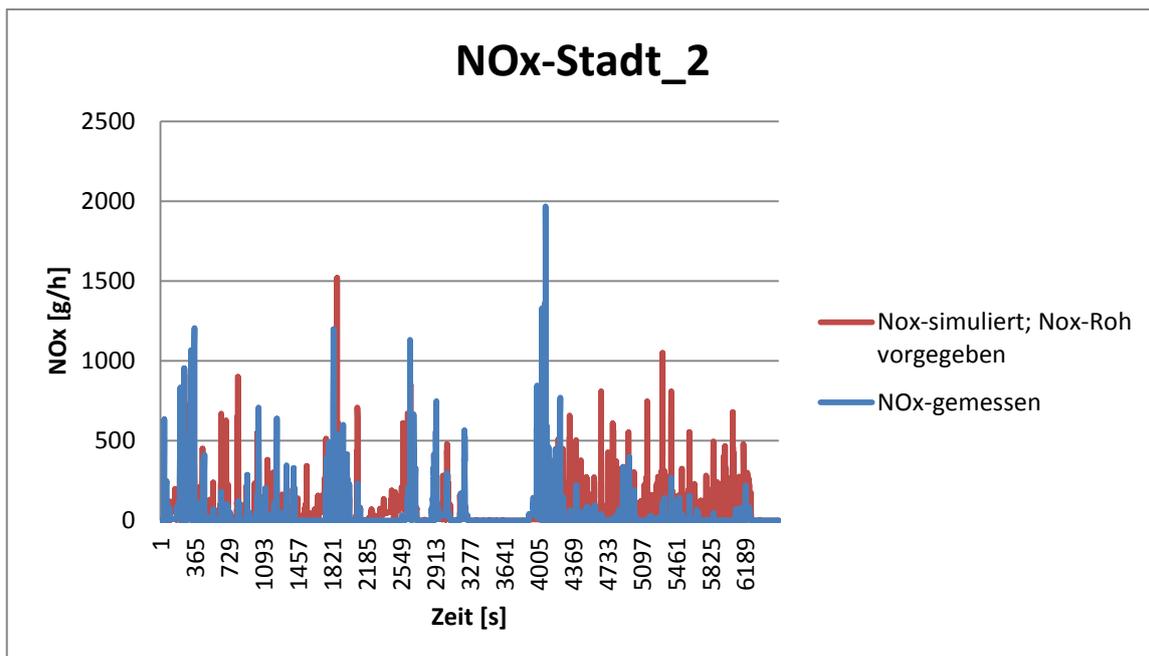


Abbildung 96: NOx-Vergleich Stadt_2 (Fahrzeug3)

Anhand der NO_x Verläufe in Abbildung 95 und Abbildung 96 ist zu erkennen, dass das Modell zur Simulation in Bereichen gut mit den Messwerten übereinstimmt und es auch Abschnitte gibt wo die Messwerte nicht zu den simulierten Werten passen. Um die Ursachen für die Abweichungen herauszufinden, wurde ein SCR-KF nur anhand der Köflach VM-Messdaten erstellt. Anschließend wurden für die einzelnen Stützstellen des Kennfeldes zunächst die absoluten und dann die prozentuellen Abweichungen zwischen den gesamten SCR-KF von Fahrzeug 3 also jenen das aus den Messwerten der RDE- sowie der Rollenmessungen erstellt wurde und jenen der RDE-Köflach VM Fahrt berechnet (siehe Abbildung 97). Wobei die Basis das KF mit den gesamten Messdaten ist, d.h. bei einer positiven Abweichung ist die Konvertierung im gesamt KF in um den jeweiligen Wert zu niedrig. Dieselbe Berechnung erfolgte für eine Ries-Route, wobei das Ergebnis ähnlich war.

Temp	RG 0.25	RG 0.75	RG 1.25	RG 1.75	RG 2.25	RG 2.75	RG 3.25	RG 3.75	RG 4.25	RG 4.75	RG 5.25	RG 5.75	RG 6.25	RG 6.75
90	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
110	0.0%	5.8%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
130	0.0%	5.3%	7.8%	3.8%	0.7%	0.1%	-0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
150	0.0%	2.0%	1.3%	6.2%	2.9%	0.7%	0.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
170	0.0%	0.7%	3.1%	10.4%	2.4%	3.2%	1.0%	3.2%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
190	0.0%	0.1%	1.0%	2.8%	2.7%	2.7%	1.5%	0.4%	1.0%	1.4%	0.8%	-0.3%	0.0%	0.0%
210	0.0%	0.1%	0.3%	2.3%	2.8%	1.6%	0.8%	-0.2%	-0.1%	-0.2%	-0.7%	0.0%	0.0%	0.4%
230	0.0%	0.1%	0.2%	1.4%	2.2%	1.7%	2.0%	0.7%	-0.8%	0.9%	-0.4%	-1.3%	0.0%	1.0%
250	0.0%	0.1%	0.2%	0.5%	1.1%	1.2%	0.9%	0.1%	0.2%	0.7%	-0.5%	0.5%	0.4%	0.0%
270	0.0%	0.0%	-0.1%	0.4%	1.5%	1.6%	0.7%	0.7%	0.1%	0.2%	0.6%	-0.9%	-1.4%	0.2%
290	0.0%	0.0%	-0.1%	0.0%	1.3%	1.8%	1.8%	1.1%	0.1%	0.4%	-0.1%	-0.2%	-0.5%	-1.3%
310	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	2.6%	1.9%	2.0%	-0.4%	0.1%	0.3%	-0.3%	-1.2%	-0.6%
330	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.7%	2.8%	-0.7%	-0.2%	0.2%	-0.2%	-1.1%	-2.3%
350	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.5%	-0.2%	-3.2%	-1.3%	-0.3%	0.0%	0.0%
370	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	-0.4%	-0.1%	0.0%	-0.1%	-0.7%	-0.1%	-0.1%
390	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.2%	-0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.4%	-0.2%
410	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.3%	-0.7%	-0.7%	0.3%	0.3%	0.6%	-0.2%

Abbildung 97: Prozentuelle Abweichung der Kennfelder

Anhand dieser Daten dieser Daten ist zu erkennen, dass bei einer Köflach- aber auch Ries-Route das gesamte SCR-Kennfeld dieses Fahrzeuges in Bereichen niedriger Temperatur, zu schlecht ist. Somit kann Schlussgefolgert werden, dass die Messdaten reiner Stadt- und Stop & Go Zyklen, das Kennfeld für eine Route mit relativ geringen Stadtanteil negativ beeinflussen. Weiters sinken die Temperaturen bei allen Zyklen zwar in Bereiche bei denen kein AdBlue mehr eindosiert wird, die NO_x-Konvertierung funktioniert in diesen Bereichen allerdings trotzdem, da aufgrund der Vorgeschichte, meistens genügen NH₃ im Katalysator gespeichert ist. Dieses Speichervermögen kann mit dem verwendeten Modell nicht abgebildet werden. Außerdem kommen bei Fahrzeug 3 Heizstrategien (siehe Kapitel 6.59 zum Einsatz welche auch nicht abgebildet werden können. So werden teilweise so niedrige Temperaturen simuliert, bei denen die Effizienz des SCR-Systems nicht mehr optimal ist, obwohl in Wirklichkeit höhere Temperaturen herrschen. Um mit dem aktuellen Simulationsmodell doch recht brauchbare Ergebnisse erzielen zu können, müssten abhängig von der Geschwindigkeitsverteilung der jeweiligen Zyklen, unterschiedliche SCR-Kennfelder verwendet werden.

6.8 Zusammenfassung der Simulation

Mit Hilfe der kennfeldbasierten Simulationen von CO, HC, PM, PN, NO_x kann das durchschnittliche Emissionsniveau von Euro VI Fahrzeugen für durchschnittliche Zyklen plausibel vorhergesagt werden. Jedoch ergeben sich Probleme bei reinen Stadt oder Autobahnzyklen. Bei der Simulation solcher Zyklen müssten eigene Kennfelder erstellt und mit den für den Zyklus entsprechenden Messwerten bedatet werden. Zur kennfeldbasierten NO_x-Simulation sei noch zu erwähnen, dass damit das durchschnittliche Emissionsniveau teilweise besser abgedeckt wird als mit dem Model des Abgasnachbehandlungssystems.

Hinsichtlich des Modells zur Abgasnachbehandlung der Stickoxide gibt es Schwierigkeiten aufgrund der thermischen Vorgeschichte des Katalysators und somit mit der NH₃-Speicherfähigkeit, welche in dem Modell nicht abgebildet wird. So kommt es bei Zyklen, bei denen die Temperatur ständig im optimalen Betriebsbereich verweilt und nur kurz unter die ideale Betriebstemperatur des SCR-Systems fällt zu hohen Konvertierungsraten, da der Katalysator hier genügend NH₃ zur Konvertierung eingespeichert hat. Dies zeigt sich zum Beispiel bei einem Stadtanteil, der auf einen Autobahnanteil folgt. Zum Vergleich kommt es bei Situationen mit geringerem Speicherstand, zum Beispiel einer längeren Stadtfahrt, beim gleichen Betriebspunkt zu geringeren Konvertierungsraten. Diese speziellen Zustände können nur mit einem NH₃-Speichermodell korrekt simuliert werden. Deshalb wären weitere Untersuchungen in diese Richtung sinnvoll.

Der Einfluss der NH_3 -Speicherfähigkeit spielte bei Fahrzeug 3 eine größere Rolle als bei den Fahrzeugen 1 und 2, da bei der Erstellung des Konvertierungskennfeldes die Daten des HBEFA Stop & Go Zyklus mit eingeflossen sind. Bei diesem entstehen aufgrund der Vorkonditionierung bei geringen Temperaturen (Abbildung 58) und somit einem leeren NH_3 -Speicher sehr geringe Konvertierungsraten.

Bei den Fahrzeugen 1 und 2 kommt bei der Simulation ein weiterer Unsicherheitsfaktor hinzu, da die Konvertierungsraten mit gemessener Temperatur ins Kennfeld eingerastert und anhand der simulierten Temperatur heraus interpoliert wurden.

Bei Fahrzeug 3 zeigte sich, dass das Kennfeld welches mit der simulierten Temperatur nach DPF und sekundlichen Eingabedaten erstellt wurde, die besten Ergebnisse liefert. Während die simulierten Temperaturen mit den Messwerten bei Fahrzeugen ohne AGR sehr gut korrelieren, zeigt das Temperaturmodell bei Fahrzeugen ohne AGR aufgrund von Heizstrategien, um den SCR-Katalysator auf Betriebstemperatur zu halten, Schwächen. Ebenso sollten weitere Untersuchungen bezüglich der Modellierung der jeweiligen Heizstrategie untersucht werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand der durchgeführten Messungen kann festgestellt werden, dass die vermessenen Euro VI Lastkraftwagen durchwegs ein sehr niedriges Emissionsniveau aufweisen, und somit deutlich unter den geforderten Grenzwerten für RDE-Fahrten liegen. Bemerkenswert ist die Effizienz der SCR-Systeme, so werden im Schnitt bei einer RDE Messung ca. 95 % der NO_x-Roh Emissionen konvertiert. Somit kann auch ein Fahrzeug ohne Abgasrückführung mit geringen Emissionen betrieben werden. Wenn man etwas kritisieren kann, dann sind es die Werte der Stickoxide bei reinen Stadt- bzw. Stop & Go Zyklen. Hier fallen wiederum die Werte von Fahrzeug 3 aufgrund der fehlenden AGR ins Auge. Die aufgrund der höheren Verbrennungstemperaturen entstehenden höheren Rohemissionen erfordern durchwegs höhere Temperaturen beim SCR-Katalysator. Eine weitere Erkenntnis bezüglich der Messungen ist, dass aufgrund der gesetzlich geforderten zeitlichen Geschwindigkeitsverteilung in den PEMS-Tests, eine große Abhängigkeit vom Verkehr und anderen äußeren Einflüssen besteht.

Grundsätzlich müssen die ermittelten Messdaten kritisch betrachtet werden, da der Vergleich der einzelnen Messmethoden teilweise doch recht deutliche Unterschiede zeigte. Dies gilt vor allem für die Messung der CO-Emissionsmassen, wo die ermittelten Werte, welche mit dem PEMS gemessen wurden, weit über jenen der CVS-Messung liegen. Um festzustellen welches Messsystem die richtigen bzw. besseren Ergebnisse liefert, werden in naher Zukunft Referenzmessungen durchgeführt. Dabei werden alle Messsysteme parallel aufgebaut, mit einem bekannten Gas beaufschlagt und die Konzentrationen verglichen.

Bei Ausschnitten von RDE-Fahrten welche auf der Rolle nachgefahren wurden, konnten keine großen Abweichungen festgestellt werden. Damit gibt es keine Hinweise, dass sich die Fahrzeuge hinsichtlich der Emissionen auf der Straße anders verhalten als auf dem Rollenprüfstand. Es scheint, als eigne sich diese Methode zur Überprüfung des Emissionsverhaltens von Rolle zu Straße.

Ansonsten ist in Bezug auf die Messungen noch zu erwähnen, dass die Ermittlung der geodätischen Höhen mittels GPS relativ ungenau ist und die daraus berechnete Steigung bei einer Längsdynamiksimulation zu erheblichen Fehlern führen kann. Dies ist vor allem bei einem Fahrzeug mit sehr hoher Masse aufgefallen. Aus diesem Grund wird am IVT bereits an einer anderen Variante die Höhendaten zu generieren gearbeitet.

Mit Hilfe der Simulationen ist es möglich, das mittlere Emissionsniveau von Euro VI Fahrzeugen für RDE-konforme Zyklen, d.h. mit einer durchschnittlichen Verteilung von Stadt-, Überland- und Autobahnanteil, recht gut vorherzusagen. Um die NO_x-Emissionen einzelner Fahrzeuge besser berechnen zu können, sollte untersucht werden, ob ein NH₃-Speichermodell des SCR-Katalysators sinnvoll wäre. Bei gewissen Fahrzeugen kommen zudem noch Heizstrategien zum Einsatz, die das SCR-System auf Betriebstemperatur halten. Auch bezüglich eines derartigen Modells sollten weitere Forschungen durchgeführt werden. Um mit dem aktuellen Modell hinsichtlich der NO_x-Emissionen bessere Simulationsergebnisse zu erzielen, müssten für unterschiedliche Zyklen, abhängig vom jeweiligen Stadt-, Überland und Autobahnanteil, speziell darauf abgestimmte Kennfelder erstellt werden.

Obwohl mit dem verwendeten Temperaturmodell bei Fahrzeugen ohne Berücksichtigung der Heizstrategie sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten, beruhten einige Eingabedaten des Modells auf Annahmen. Zum Beispiel wurde die Temperatur nach DPF aufgrund fehlender Messwerte simuliert. Es wäre für zukünftige Betrachtungen sinnvoll, die Temperatur nach DPF messtechnisch zu erfassen und damit das bestehende Temperaturmodell zu validieren.

Literatur

[1]	Reif Konrad: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren, Springer Vieweg Verlag Wiesbaden, 2015, ISBN 978-3-658-09522-2
[2]	Engine & emission technology online, DieselNet, https://www.dieseln.net/tech/cat_doc.php , (15.01.2017)
[3]	van Basshuysen Richard: Ottomotor mit Direkteinspritzung. Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potential, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg , 05/2013, 3.Auflage, ISBN 978-3-658-01408-7
[4]	Hausberger Stefan, Schüßler Martin: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil II. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2009
[5]	Homepage Umweltbundesamt, Schluss mit Ruß, http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/verkehr/auswirkungen_verkehr/verk_schadstoffe/abgasnachbehandlung/filter/ , (17.01.2017)
[6]	Homepage Auto-Umwelt, Umweltfreundliche Fahrzeugantriebe. SCR- System http://www.auto-umwelt.at/_umweltfr/umweltfr_abg.htm , (17.01.2017)
[7]	Hausberger Stefan, Schüßler Martin: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil II SCR. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2012
[8]	Homepage Exomission, http://www.exomission.de/index.php/technologien-2/stickoxidminderung-scr , (01.02.2017)
[9]	Homepage Bosch products, http://products.bosch-mobility-solutions.com/specials/de/abgasnachbehandlung/en/subpage/Denoxtronic_2.html . (02.02.2017)
[10]	Birkhold Felix, Selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden in Kraftfahrzeugen: Untersuchung der Einspritzung von Harnstoffwasserlösung. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007
[11]	Homepage Eberspächer, Medienservice. Eberspächer Euro-6-Abgasanlage für Nutzfahrzeuge. Funktionsgrafik, https://www.eberspaecher.com/presse/medienservice/bilder/exhaust-technology.html (18.01.2017)
[12]	Blassnegger, J.; Jauk, T.: Laborübungen Motor und Umwelt, Pkw Rollenprüfstand, Einspritzlabor. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013
[13]	van Basshuysen Richard, Schäfer Fred: Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg. 2014, 7.Auflage, ISBN 978-3-658-04678-1
[14]	Weller Konstantin, Rexeis Martin, Hausberger Stefan, Zach Bernhard: "A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements", Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Graz, 2016.

[15]	Wiegleb Gerhard: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis. Messgeräte, Sensoren, Anwendungen, Springer Vieweg Verlag Wiesbaden, 2016, ISBN 978-3-658-10687-4
[16]	Official Journal of the European Union. L 167/1: Regulations. Commission Regulation (EU) No 582/2011 of 25 May 2011
[17]	Emanuel Feru, Frank Willems, Bram de Jager und Maarten Steinbuch: Modeling and Control of a Parallel Waste Heat Recovery System for Euro-VI Heavy-Duty Diesel Engines, 14.10.2014
[18]	Braess Hans-Hermann, Seiffert Ulrich: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg , 09.2013, 7.Auflage, ISBN 978-3-658-01691-3
[19]	Hausberger, S.; Rexeis, M.; Luz, R.: PHEM User Guide for Version 11. Technische Universität Graz, 2012
[20]	Hausberger Stefa: Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil 1. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2011
[21]	Google Maps Österreich, https://www.google.at/maps , (02.02.17)
[22]	Homepage Ersatec. Analysemesstechnik, http://www.ersatec.com/de/das-fid-prinzip , (20.02.2017)
[23]	Homepage Dräger. Gasmesstechnik, http://legacy.draeger.com/ebooks/de/gds_eb_9046420_de/blaetterkatalog/blaetterkatalog/html/messprinzip_elektrochemischer_se.html (20.02.2017)
[24]	TU Braunschweig. optische Partikelmesstechnik, https://www.tu-braunschweig.de/ivb/forschung/ausstattung/partikelmessgeraete/optische (25.02.2017)
[25]	Jean-Pierre Lindner, Thies Nolte. FT-IR-Spektroskopie, Uni Muenster. Institut für physikalische Chemie, http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physikalische_chemie/praktikum/ft_ir_spektroskopie_lindner_jean_pierre__thies__nolte__thies_.pdf (15.02.2017)
[26]	Reif Konrad: Moderne Dieseleinspritzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2010, ISBN978-3-8348-1312-1
[27]	MAN Homepage. Pressebericht, https://www.mantruckandbus.com/de/presse/presseuebersicht/IAA-Premiere_-MAN-stellt-Euro-6-Abgastechnologie-fuer-Lkw-und-Reisebusse-vor-23360.html (20.02.2017)
[28]	Jerzy Merkisz, Paweł Fuć, Piotr Lijewski and Miłosław Kozak. Rapeseed Oil Methyl Esters (RME) as Fuel for Urban Transport, Poznan University of Technology, Institute of Combustion Engine and Transport, Poland, 2016
[29]	Sensors. Semtech EFM-HS, High Speed Exhaust Flow Meter http://www.sensors-inc.com/brochures/SEMTECH_EFM-HS.pdf (22.02.2017)

[30]	Klingler Rudolf. Messung und Simulation von Real World Emissionen beim PKW, Masterarbeit, Technischen Universität Graz, Mai 2016
[31]	Kristl, Seibt & Co Gesellschaft m. b. H, CVS - Anlage und Partikelentnahmesystem PES. KS 3000. Dokumentation, Graz, Februar 2000
[32]	Homepage Geoinformationen Steiermark, http://www.gis.steiermark.at/ , (20.12.2016)
[33]	Rexeis Martin. Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles, Dissertation, Graz University of Technology, Oktober 2009
[34]	Wiartalla Andreas, Severin Christopher. Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, FAT-Schriftenreihe 238, 18. Januar 2012
[35]	Kroißenbrunner, Barbara. Parametrierung des Emissionsmodells PHEM an einem EURO VI LKW, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2013
[36]	Eisenköck Patrick. Inbetriebnahme einer verbesserten Auswertmethodik für modale Emissionsmessungen, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2016
[37]	Homepage SAE International, http://www.sae.org/standardsdev/groundvehicle/j1939a.htm , 08.03.2017
[38]	Sensors. Semtech DS, User Manual, revision 1.14

Anhang

Tabelle 48: Eigenschaften des Abgasstranges von Fahrzeug 1

Modul Turbolader		Modul Rohr		Modul DPF/SCR	
Masse:	27 kg	Durchmesser:	100 mm	Masse:	80 kg
Wärme- kapazität:	410 J/(kg*K)	Länge:	500 mm	Wärme- kapazität:	400 J/(kg*K)
Art der Strömung:	turbulent	Wand- stärke:	1.75 mm	Art der Strömung:	laminar
Rohr- querschnitt:	4398,8 mm ²	Dichte:	7900 kg/m ³	Quer- schnitts- fläche:	49087 mm ²
		Wärme- kapazität:	460 J/(kg*K)	Oberfläche:	1,065 m ²

Tabelle 49: Eigenschaften des Abgasstranges von Fahrzeug 2

Modul Turbolader		Modul Rohr		Modul DPF/SCR	
Masse:	9 kg	Durchmesser:	75 mm	Masse:	25 kg
Wärme- kapazität:	410 J/(kg*K)	Länge:	1000 mm	Wärme- kapazität:	400 J/(kg*K)
Art der Strömung:	turbulent	Wand- stärke:	2 mm	Art der Strömung:	laminar
Rohr- querschnitt:	1800 mm ²	Dichte:	7900 kg/m ³	Quer- schnitts- fläche:	54541 mm ²
		Wärme- kapazität:	460 J/(kg*K)	Oberfläche:	1,065 m ²

Tabelle 50: Eigenschaften des Abgasstranges von Fahrzeug 3

Modul Turbolader		Modul Rohr		Modul DPF		Modul SCR	
Masse:	15 kg	Durchmesser:	110 mm	Masse:	40 kg	Masse:	60 kg
Wärme- kapazität:	410 J/(kg*K)	Länge:	1000 mm	Wärme- kapazität:	400 J/(kg*K)	Wärme- kapazität:	400 J/(kg*K)
Art der Strömung:	turbulent	Wand- stärke:	2 mm	Art der Strömung:	laminar	Art der Strömung:	laminar
Rohr- querschnitt:	9503,32 mm ²	Dichte:	7900 kg/m ³	Quer- schnitts- fläche:	70685,83 mm ²	Quer- schnitts- fläche:	196349,54 mm ²
		Wärme- kapazität:	460 J/(kg*K)	Oberfläche:	0,565 m ²	Oberfläche:	0,942 m ²

Temp. Gemittelt [°C]	RG [1/s] < 0,5	RG [1/s] 0,5-1	RG [1/s] 1-1,5	RG [1/s] 1,5-2	RG [1/s] 2-2,5	RG [1/s] 2,5-3	RG [1/s] 3-3,5	RG [1/s] 3,5-4	RG [1/s] 4-4,5
90	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
110	25%	52%	25%	10%	0%	0%	0%	0%	0%
130	100%	92%	50%	25%	10%	0%	0%	0%	0%
150	100%	98%	67%	40%	20%	10%	0%	0%	0%
170	100%	98%	82%	50%	30%	15%	5%	0%	0%
190	100%	98%	93%	85%	70%	60%	55%	50%	45%
210	100%	98%	95%	88%	85%	75%	65%	60%	55%
230	100%	100%	96%	87%	88%	87%	71%	65%	60%
250	100%	100%	99%	96%	96%	96%	90%	85%	80%
270	100%	100%	100%	100%	97%	97%	90%	85%	80%
290	100%	100%	100%	100%	100%	97%	92%	90%	85%
310	100%	100%	100%	100%	100%	99%	94%	90%	85%
330	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%
350	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%
370	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%
390	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%
410	100%	100%	100%	100%	100%	99%	94%	90%	85%
430	100%	100%	100%	100%	100%	95%	92%	90%	85%
450	100%	100%	96%	87%	88%	87%	71%	65%	60%
470	100%	100%	96%	87%	88%	87%	71%	65%	60%
490	100%	100%	96%	87%	88%	87%	71%	65%	60%
510	100%	100%	96%	87%	88%	87%	71%	65%	60%
530	100%	100%	96%	87%	88%	87%	71%	65%	60%

Abbildung 98: Konvertierungskennfeld ohne Driftkorrektur (Fahrzeug 1)