



Philipp Michelitsch, BSc

# **Simulation von EURO VI schweren Nutzfahrzeugen in Niedriglastzyklen**

## **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, Mai 2018



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



## Vorwort

Um meine Gedanken und Gefühle auf Papier zu bringen, bedarf es mehr Platz, als mir hier im Vorwort zu meiner Masterarbeit zur Verfügung steht. Jedoch möchte ich es in einer kurz gefassten Version hier versuchen.

Zuallererst möchte ich mich bei Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger bedanken, der mir die Möglichkeit gab, bereits meine Bachelorarbeit an dem Fachbereich Emissionen zu verfassen, und in weiterer Folge während des gesamten Masterstudiums mein Interesse auf diesem Themengebiet erweitert hat.

An gleicher Stelle gilt mein aufrichtiger Dank Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Rexeis, der mir bereits während der Verfassung meiner Bachelorarbeit, als auch später während meiner Masterarbeit stets mit Rat und Tat zur Seite stand und bei scheinbar unüberwindbaren Problemstellungen des Öfteren auch den Anstoß in die richtige Richtung gab.

Für jede Frage, sei sie noch so banal oder abertausende Male gestellt worden, stand mir Dipl.-Ing. Konstantin Weller, BSc. stets Rede und Antwort. Deine schier endlose Geduld mit mir beeindruckt mich zutiefst. Auf diesem Wege möchte ich mich bei dir bedanken, dass du mich sowohl durch meine Bachelor-, als auch meine Masterarbeit begleitet hast und immer ein offenes Ohr für mich hattest.

Auch dem restlichen Fachbereich für Emissionen gilt mein tiefster Dank für die Unterstützung, die mir während meiner Zeit am Institut entgegengebracht wurde.

Weiters möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, dass sie mich durch all meine Lebenslagen begleitet und mich in jeder denkbaren Weise unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt dabei meinem Vater Johann und meinem Bruder Stefan. Ihr habt immer an mich geglaubt und euer Möglichstes für mich getan. Das werde ich euch nie vergessen und stets dankbar dafür sein.

Und die Beste kommt zum Schluss: Meine Blume Kristina, ich danke dir für alles. Worte können nicht beschreiben, was ich für dich empfinde.

# Inhaltsverzeichnis

<b>VORWORT</b> .....	<b>III</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>IX</b>
<b>FAHRZEUGVERZEICHNIS</b> .....	<b>XI</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>XII</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2 AUFGABENSTELLUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>3</b>
3.1 ABGASKOMPONENTEN.....	3
3.1.1 Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ).....	4
3.1.2 Kohlenmonoxid (CO).....	4
3.1.3 Kohlenwasserstoffe (HC) .....	4
3.1.4 Partikel und Ruß .....	5
3.1.5 Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) .....	5
3.1.5.1 Thermisches NO (Zeldovich-NO) .....	5
3.1.5.2 Promptes NO .....	5
3.1.5.3 NO aus Brennstoff – Stickstoff.....	6
3.2 STICKOXIDREDUKTION .....	6
3.2.1 <i>Selective Catalytic Reduction</i> .....	6
3.2.1.1 Prozessschritte des SCR-Verfahrens.....	7
3.2.1.2 Dosierung und Erzeugung von Ammoniak.....	8
3.2.1.3 Dosierstrategie .....	10
3.2.1.4 SCR-Reaktion.....	11
3.2.1.5 NH <sub>3</sub> - Reinigung .....	12
3.2.2 <i>Abgasrückführung (AGR)</i> .....	13
3.3 ABGASGESETZGEBUNG FÜR SCHWERE NUTZFAHRZEUGE .....	14
3.3.1 <i>Zusammenfassung der Abgasgesetzgebung</i> .....	14
3.3.2 „ <i>Averaging window principle</i> “ .....	17
3.4 EMISSIONSMESSTECHNIK.....	19
3.4.1 <i>Portable Emission Measurement System (PEMS)</i> .....	19
3.4.2 <i>Eingesetzte Analysatoren</i> .....	21
3.4.2.1 Nichtdispersiver Infrarot-Analysator (NDIR).....	21
3.4.2.2 Nichtdispersiver Ultraviolett-Analysator (NDUV).....	22
3.4.2.3 Flammenionisationsdetektor (FID).....	22
3.4.2.4 Photoakustische Spektroskopie.....	22
3.4.2.5 Massenstrommessung .....	23
<b>4 MESSUNG</b> .....	<b>24</b>
4.1 VERSUCHSFAHRZEUG .....	24
4.2 MESSSTRECKEN.....	27
4.2.1 <i>Route Köflach</i> .....	27
4.2.2 <i>Route Ries</i> .....	28
4.2.3 <i>Stadtroute</i> .....	29
4.3 MESSAUFBAU UND EINGESETZTE MESSTECHNIK .....	30
4.3.1 <i>Messaufbau</i> .....	30
4.3.2 <i>Messtechnik</i> .....	31
4.3.2.1 Semtech .....	31
4.3.2.2 VBOX.....	32
4.3.2.3 CAN-Daten.....	32
4.3.2.4 NO <sub>x</sub> Engine-Out Messung.....	32
4.3.2.5 Soot Sensor .....	32
4.3.3 <i>Messprogramm</i> .....	32
4.4 AUSWERTUNG DER MESSDATEN .....	33
4.4.1 <i>NO-Tailpipe Driftkorrektur</i> .....	33

---

4.4.2	<i>Berechnung und Zeitverschiebung der Emissionsmassen</i> .....	36
4.4.3	<i>Signalzuordnung</i> .....	36
4.4.4	<i>Leistungsberechnung</i> .....	38
4.4.5	<i>Auswertung EMROAD</i> .....	38
4.5	MESSERGEBNISSE.....	38
<b>5</b>	<b>SIMULATION</b> .....	<b>44</b>
5.1	SIMULATIONSTOOL PHEM.....	44
5.1.1	<i>Zyklus</i> .....	45
5.1.2	<i>Fahrzeugdaten</i> .....	45
5.1.3	<i>„CO<sub>2</sub>-Methode“ für Leistungsberechnung</i> .....	45
5.1.4	<i>Kennfelder</i> .....	46
5.1.4.1	<i>Erstellung Emissionskennfeld</i> .....	46
5.1.4.2	<i>Erstellung Temperaturkennfeld</i> .....	47
5.1.5	<i>Abgasnachbehandlungssystem</i> .....	47
5.1.5.1	<i>SCR-Konvertierungskennfeld</i> .....	49
5.2	FAHRZEUG I KENNFELDERSTELLUNG .....	49
5.2.1	<i>Emissionskennfeld</i> .....	49
5.2.2	<i>Temperaturkennfeld</i> .....	49
5.2.3	<i>SCR-Konvertierungskennfeld</i> .....	51
5.3	BASISMODELL .....	53
5.3.1	<i>Prinzip Basismodell</i> .....	53
5.3.2	<i>Simulationsergebnisse</i> .....	54
5.4	NH <sub>3</sub> SPEICHERSTANDMODELL .....	60
5.4.1	<i>Prinzip NO<sub>x</sub> Berechnungsverfahren mit NH<sub>3</sub> Speicherstandmodell</i> .....	60
5.4.2	<i>Notwendige Größen und deren Validierung</i> .....	62
5.4.2.1	<i>NH<sub>3</sub> Speicherstand zu Beginn des Zyklus</i> .....	62
5.4.2.2	<i>„Grenztemperatur“</i> .....	64
5.4.2.3	<i>Einspritzmenge AdBlue</i> .....	66
5.4.2.4	<i>Korrekturfaktor</i> .....	67
5.4.3	<i>Simulationsergebnisse</i> .....	73
5.5	ZUSAMMENFASSUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE VON NIEDRIGLASTZYKLEN .....	79
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>81</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Qualitative Darstellung der dieselmotorischen Schadstoffbildung innerhalb des Zylinders [1]	3
Abbildung 3-2: Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Temperatur [5]	6
Abbildung 3-3: Prozesskette SCR [5]	7
Abbildung 3-4: Verfahrensschritte der NH <sub>3</sub> Erzeugung [5]	8
Abbildung 3-5: Denoxtronic, Firma Bosch [6]	8
Abbildung 3-6: Benötigte Strecke zum Verdampfen eines Tropfens der Harnstofflösung [5]	9
Abbildung 3-7: NH <sub>3</sub> -Speichermenge in Abhängigkeit der Temperatur [5]	9
Abbildung 3-8: Basis Modell der Dosierstrategie nach [7]	10
Abbildung 3-9: Konvertierungsrate über die Temperatur in Abhängigkeit vom NO <sub>2</sub> /NO Verhältnis [5]	12
Abbildung 3-10: Schema einer kombinierten Hoch-/Niederdruck-AGR [8]	13
Abbildung 3-11: Prinzip der Summierung in einem Fenster im Zyklus [10]	17
Abbildung 3-12: Methode der geleisteten Arbeit [9]	17
Abbildung 3-13: Aufbau PEMS [12]	19
Abbildung 3-14: Entnahme für die Rußmessung [12]	20
Abbildung 3-15: Entnahme für gasförmige Komponenten [12]	20
Abbildung 3-16: Nichtdispersiver Infrarot-Analysator [7]	21
Abbildung 3-17: Flammenionisationsdetektor [7]	22
Abbildung 3-18: Messprinzip-Photoakustik [4]	23
Abbildung 4-1: Fahrzeug 1	24
Abbildung 4-2: Schema Abgasnachbehandlung Fahrzeug 1 EURO VI [16]	24
Abbildung 4-3: Vollast- und Schleppkurve Fahrzeug 1	25
Abbildung 4-4: Route Köflach [17]	27
Abbildung 4-5: Route Ries [17]	28
Abbildung 4-6: Stadtroute [17]	29
Abbildung 4-7: Messaufbau Fahrzeug 1	30
Abbildung 4-8: Ausgebauter SCR-Katalysator mit gekennzeichneten Stellen für die Sensoren	31
Abbildung 4-9: Eingebauter SCR-Katalysator mit EFM	31
Abbildung 4-10: Messsystem Semtech DS [13]	31
Abbildung 4-11: NO <sub>x</sub> -Sensor mit Steuerelektronik [1]	32
Abbildung 4-12: NO Drift	34
Abbildung 4-13: NO mit Driftkorrektur	35
Abbildung 4-14: Fahrgeschwindigkeit der einzelnen Messsysteme	37
Abbildung 4-15: CO <sub>2</sub> Zuordnung	38

---

Abbildung 4-16: Ergebnisse NOx	39
Abbildung 4-17: Ergebnisse CO	40
Abbildung 4-18: Ergebnisse HC	40
Abbildung 5-1: Funktionsschema PHEM [20]	44
Abbildung 5-2: Schema zur Leistungsermittlung [22]	46
Abbildung 5-3: Schema Kennfelderstellung [22]	47
Abbildung 5-4: Basis Temperaturkennfeld	50
Abbildung 5-5: Temperatur vor SCR mit Basis-Temperaturkennfeld (Ries NM), blau = Messung, rot = Simulation mit nicht kalibriertem Basiskennfeld	50
Abbildung 5-6: Temperatur vor SCR mit endgültigem Temperaturkennfeld (Ries NM), blau = Messung, rot = Simulation mit kalibriertem Kennfeld	51
Abbildung 5-7: Anzahl der Messpunkte in den Stützstellen	52
Abbildung 5-8: Unbearbeitetes SCR-Kennfeld	52
Abbildung 5-9: SCR-Kennfeld	53
Abbildung 5-10: Prinzip NOx Berechnungsverfahren mit Basismodell	54
Abbildung 5-11: Emissionsmasse NOx in einer ausgewählten ISC-Fahrt	55
Abbildung 5-12: Temperaturverlauf in den ersten 800 Sekunden, Fahrzeug 2 (ISC-Fahrt)	55
Abbildung 5-13: Emissionsmasse NOx in einer ausgewählten Stadtfahrt	56
Abbildung 5-14: Emissionsmasse NOx in einem ausgewählten Stauzyklus am Rollenprüfstand (VK: idling)	57
Abbildung 5-15: Emissionsmasse NOx in einem ausgewählten Stauzyklus am Rollenprüfstand (VK: hot)	57
Abbildung 5-16: Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf einer ISC-Fahrt (Fahrzeug 7)	58
Abbildung 5-17: Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf einer Stadtfahrt (Fahrzeug 7)	59
Abbildung 5-18: Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf eines Stauzyklus am Rollenprüfstand (Fahrzeug 7)	59
Abbildung 5-19: Prinzip NOx Berechnungsverfahren	60
Abbildung 5-20: Prinzip des erweiterten NOx Berechnungsverfahren	61
Abbildung 5-21: Auswirkungen unterschiedlicher Speicherstände zu Beginn eines Zyklus	63
Abbildung 5-22: Emissionsmassen NOx des Fahrzeugs 2 im Stauzyklus bei unterschiedlichen Speicherständen zu Beginn	63
Abbildung 5-23: Dosierung aktiv/inaktiv Fahrzeug 6 während der ersten 1500s einer RDE Fahrt	65
Abbildung 5-24: Dosierung AdBlue Fahrzeug 6 während der ersten 1500s einer RDE Fahrt	67
Abbildung 5-25: Korrekturkurve Variante 1	68
Abbildung 5-26: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: idling), Variante 1	69
Abbildung 5-27: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: hot), Variante 1	69
Abbildung 5-28: Korrekturkurve Variante 2	70
Abbildung 5-29: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: idling), Variante 2	70

Abbildung 5-30: NO <sub>x</sub> TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: hot), Variante 2	71
Abbildung 5-31: Korrekturkurve Variante 3	71
Abbildung 5-32: NO <sub>x</sub> TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: idling), Variante 3	72
Abbildung 5-33: NO <sub>x</sub> TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: hot), Variante 3	72
Abbildung 5-34: NO <sub>x</sub> TP Kumuliert (Durchschnitts Nutzfahrzeug Stauzyklus VK: idling)	73
Abbildung 5-35: Emissionsmasse NO <sub>x</sub> in einer ausgewählten ISC Fahrt, Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren	74
Abbildung 5-36: Emissionsmassen NO <sub>x</sub> Fahrzeug 2, ISC Fahrt	75
Abbildung 5-37: Emissionsmassen NO <sub>x</sub> Fahrzeug 6, ISC Fahrt	76
Abbildung 5-38: Emissionsmasse NO <sub>x</sub> in einer ausgewählten Stadtfahrt, Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren	76
Abbildung 5-39: Emissionsmassen NO <sub>x</sub> Fahrzeug 8, Stadtfahrt	77
Abbildung 5-40: Emissionsmasse NO <sub>x</sub> in einem ausgewählten Stauzyklus (VK: idling), Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren	78
Abbildung 5-41: Emissionsmasse NO <sub>x</sub> in einem ausgewählten Stauzyklus (VK: hot), Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren	78

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$c$	ppm	Konzentration
$c_{ref,z}$	ppm	Referenzkonzentration des Nullgases
$c_{ref,s}$	ppm	Referenzkonzentration des Kalibriergases
$c_{pre,z}$	ppm	Analysator Konzentration des Nullgases vor dem Test
$c_{pre,s}$	ppm	Analysator Konzentration des Kalibriergases vor dem Test
$c_{post,z}$	ppm	Analysator Konzentration des Nullgases nach dem Test
$c_{post,s}$	ppm	Analysator Konzentration des Kalibriergases nach dem Test
$c_{gas}$	ppm	Gaskonzentration
DeNO <sub>x</sub>	-	Konvertierungsrate
$e_{gas}$	g/kWh	Spezifische Emissionsmasse
$E_M$	g/h	Emissionsmasse
$E_K$	ppm	Emissionskonzentration
$I_{Motor}$	kgm <sup>2</sup>	Trägheit des Motors
$I_{Getriebe}$	kgm <sup>2</sup>	Trägheit des Getriebes
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom
$m$	kg	Masse
$M$	g/mol	Molmasse
$n$	mol	Stoffmenge
$n$	min <sup>-1</sup>	Drehzahl
$\dot{n}$	mol/s	Stoffstrom
$n_{norm}$	-	Normierte Drehzahl
$n_{Leer}$	min <sup>-1</sup>	Leerlaufdrehzahl
$n_{Nenn}$	min <sup>-1</sup>	Nenndrehzahl
$P_e$	kW	Momentane effektive Motorleistung
$P_{Nenn}$	kW	Nennleistung
$P_{Norm}$	-	Normierte Leistung
SV	l/s	Raumgeschwindigkeit
$v$	km/h	Geschwindigkeit
$\dot{V}$	l/min	Volumenstrom
$V$	l	Volumen
$W(t_{n,i})$	kWh	Arbeit des i-ten Fensters zum Zeitpunkt n

### Konstanten

$\rho_{Abgas} = 1,293$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Abgas
$M_{NH_3} = 17,03$	g/mol	Molmasse NH <sub>3</sub>
$M_{NO} = 30,006$	g/mol	Molmasse NO
$M_{NO_2} = 46,006$	g/mol	Molmasse NO <sub>2</sub>
$M_{NO_x} = 46,006$	g/mol	Molmasse NO <sub>x</sub>
$M_{Harnstoff} = 60,06$	g/mol	Molmasse Harnstoff
$M_{Abgas} = 28,96$	g/mol	Molmasse Abgas

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	-	Dosierfaktor
$\lambda$	-	Luftverhältnis

**Weitere Indices und Abkürzungen**

AdBlue	Markenname für Harnstoffwasserlösung
AGR	Abgasrückführung
ASC	Anti Slip Catalyst (Anti-Schlupf-Katalysator)
$C_mH_n$	Kohlenwasserstoff
C	Atomarer Kohlenstoff
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CUC	Clean up Catalyst
DOC	Diesel Oxidations Katalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EFM	Exhaust Flow Meter
EO	Engine Out
ExMF	Exhaust Mass Flow
FID	Flammenionisationsdetektor
GT	Grenztemperatur
HC	Kohlenwasserstoff
HNCO	Isocyanensäure
H <sub>2</sub> O	Wasser
ISC	In Service Conformity
NEDC	New European Driving Cycle
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot-Analysator
NDUV	Nichtdispersiver Ultraviolett-Analysator
N <sub>2</sub>	Molekularer Stickstoff
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	Harnstoff
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxid
NORM	Normiert
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
Roh	Rohemission
PEMS	Portable Emission Measurement System
SCR	Selective Catalytic Reduction
SNF	Schwere Nutzfahrzeug
TL	Turbolader
TP	Tailpipe
UV	Ultraviolett
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle

## Fahrzeugverzeichnis

In diesem Abschnitt sind die Bezeichnungen und technischen Daten der Fahrzeuge, die in der Masterarbeit behandelt wurden aufgelistet.

<b>Fahrzeug Nr.:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Hersteller	IVECO	Renault	DAF	MAN
Modell	Daily	MDA2C	LF 250 FA	TGL 12.220
Nennleistung [kW]	132	177	180	162
Nenndrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	3100	2200	2250	2300
Leerlaufdrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	800	700	700	700
Hubraum [ $\text{dm}^3$ ]	3	5,1	6,7	4,58
Katalysatorvolumen [ $\text{dm}^3$ ]	9,42	40	25	40
AGR	Ja	Ja	Ja	Ja
Abgasnorm	EURO 6	EURO VI	EURO VI	EURO VI
Höchstzulässige Gesamtmasse [t]	7,2	11,99	16	11,99

Tabelle 0-1: Technische Daten der Fahrzeuge 1-4

<b>Fahrzeug Nr.:</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Hersteller	MercedesBenz	IVECO	Scania	Volvo
Modell	Atego 1524	Eurocargo 75E21	R450	FL 280
Motorleistung [kW]	175	152	331	210
Nenndrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	2200	2500	1900	2100
Leerlaufdrehzahl [ $\text{min}^{-1}$ ]	600	750	500	560
Hubraum [ $\text{dm}^3$ ]	7,7	4,5	12,7	7,7
Katalysatorvolumen [ $\text{dm}^3$ ]	30	40	60	40
AGR	Ja	Nein	Nein	Ja
Abgasnorm	EURO VI	EURO VI	EURO VI	EURO VI
Höchstzulässige Gesamtmasse [t]	15	7,5	40	16

Tabelle 0-2: Technische Daten der Fahrzeuge 5-8

## **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.

Philipp Michelitsch

Graz, Datum

## Zusammenfassung

Verbrennungsmotoren haben aufgrund der prozessbedingten Emissionen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Umwelt. Um die Schadstoffemissionen zu reglementieren wurden Abgasnormen eingeführt. In der aktuellsten Norm für schwere Nutzfahrzeuge, EURO VI, ist es erstmalig notwendig, die Fahrzeuge auch unter Realbedingungen zu messen. Auch wenn bei der gesetzlich vorgeschriebenen Auswertungsmethode Anteile mit anhaltend niedriger Last nicht berücksichtigt werden, liegt das Augenmerk dieser Arbeit auf diesem Bereich. Durch die niedrigen Abgastemperaturen kann die Abgasnachbehandlung abkühlen und somit ihren optimalen Betriebsbereich verlassen, was zu erhöhten Stickoxidemissionen führen kann. Es ist daher zu erwarten, dass die Gesetzgebung in Zukunft Niederlast und Kaltstarts miteinschließen wird. Für die Beurteilung der realen Kfz Emissionen, z.B. in Stausituationen, ist die Erfassung solcher Situationen in der messung und Simulation natürlich schon heute wichtig.

Die vorliegende Arbeit ist in drei Teile gegliedert: Der erste Teil beinhaltet die theoretischen Grundlagen, die benötigt werden, um die Prinzipien der Stickoxidminderung im SCR-Katalysator kennenzulernen und zu verstehen. Des Weiteren wird die aktuelle normgerechte Auswertung der Emissionen, wie sie vom Gesetzgeber gefordert ist, erklärt.

Der zweite Teil behandelt die Messung und Auswertung eines Versuchsfahrzeuges. Die Messungen wurden mithilfe mobiler Messtechnik (PEMS) durchgeführt und anschließend mit dem EMROAD Tool ausgewertet. Da es sich bei dem Fahrzeug um ein leichtes Nutzfahrzeug handelt, muss es nicht die ISC Grenzwerte, sondern den nach PKW-Gesetz vorgeschriebenen Zertifizierungsprozess (NEDC) erfüllen. Da keine Messung am Rollenprüfstand durchführbar war, wurde der Prüfzyklus unter Prüfbedingungen simuliert. In dieser Simulation konnte der Grenzwert nicht eingehalten werden.

Der letzte Teil beschäftigt sich mit der Simulation der Stickoxide, die während der Messfahrten emittiert werden. Mit den im zweiten Teil gewonnenen Messdaten wurde ein Modell der Abgasnachbehandlung für die Stickoxidreduktion erstellt. Mithilfe eines SCR-Basis-Modells, das von Temperatur und Raumgeschwindigkeit im Katalysator abhängig ist, wurde in der Simulation versucht, die Emissionsmassen möglichst realitätsnah zu berechnen. Im nächsten Schritt wurde ein  $\text{NH}_3$ -Speicherstandmodell entwickelt, um den Einfluss der im SCR-Katalysator gespeicherten  $\text{NH}_3$ -Menge in die Berechnung einfließen zu lassen. Dieser Schritt ist notwendig, da es bei niedrigen Temperaturniveaus dank des gespeicherten  $\text{NH}_3$  zu relativ hohen Konvertierungsraten kommt, obwohl prinzipbedingt die Umwandlung des AdBlue in  $\text{NH}_3$  und somit die Stickoxidkonvertierung unter diesen Bedingungen nicht möglich ist. Das Temperaturniveau zur Umwandlung von AdBlue wird bei Niedriglastzyklen schwer beziehungsweise nicht erreicht. Das Modell hält somit die Konvertierungsraten aufgrund des eingespeicherten  $\text{NH}_3$  für einen gewissen Zeitraum auf einem relativ hohen Wert, der mit Reduktion der  $\text{NH}_3$ -Menge langsam abnimmt.

Die durchgeführten Berechnungen und Simulationen zielten darauf ab, ein realitätsnahes Modell zu erstellen, um die Stickoxidemissionen für ein Durchschnittsfahrzeug berechnen zu können.

Es konnte festgestellt werden, dass in Bereichen mit genügend Last während des Zyklus mithilfe des Basis-Modells eine ausreichende Genauigkeit in der Simulation der Emissionsmassen erreicht werden konnte. Bei niedrigen Lasten kam es stets zu einer drastischen Unterschätzung der Emissionsmassen. In diesen Fällen konnte die Simulation der Emissionsmassen mit dem Speicherstandmodell um ein Vielfaches verbessert werden.

## Abstract

Combustion engines have a non-negligible impact on the environment due to their process-related emissions. In order to regulate pollutant emissions, emission standards have been introduced. In the latest standard for Heavy Duty Vehicles, EURO VI, it is necessary for the first time to measure the vehicles under real conditions. Even if the statutorily required evaluation method does not take into account components with persistently low load, the focus of this master thesis is on this area. Due to the low exhaust gas temperatures, the exhaust aftertreatment can cool down and thus leave its optimal operating range, which can lead to increased nitrogen oxide emissions. It is therefore expected that the legislation will in the future include low load and cold starts. For the assessment of real vehicle emissions, e.g. in congestion situations, the capture of such situations in measurement and simulation is of course already important today.

The present master thesis is divided into three parts: The first part contains the theoretical fundamentals that are needed to get to know and understand the principles of nitrogen oxide reduction in the SCR catalytic converter. Furthermore, the current standard-compliant evaluation of emissions, as required by law, is explained.

The second part deals with the measurement and evaluation of a test vehicle. The measurements were carried out using the Portable Emissions Measurement System (PEMS) and then were evaluated with the EMROAD tool. Since the vehicle is a light-duty utility vehicle, it does not have to fulfil the ISC limit values, but the certification process (NEDC) prescribed by the statute of passenger cars. Since no measurement on the chassis dynamometer was feasible, the test cycle was simulated under test conditions. In this simulation, the limit value could not be met.

The last part deals with the simulation of the nitrogen oxides that are emitted during the test drives. With the measurement data obtained in the second part, a model of the exhaust aftertreatment for nitrogen oxide reduction was created. Using an SCR-based model, which is dependent on temperature and space velocity in the catalyst, the simulation attempted to calculate the emission masses as realistically as possible. In the next step, an  $\text{NH}_3$  storage level model was developed in order to incorporate the influence of the amount of  $\text{NH}_3$  stored in the SCR catalytic converter into the calculation.

This step is necessary because at low temperature levels, thanks to the stored  $\text{NH}_3$ , relatively high conversion rates occur, although in principle it is not possible to convert the AdBlue into  $\text{NH}_3$  and thus to convert nitrogen oxide under these conditions. The temperature level for converting AdBlue is difficult or unattainable during low load cycles. The model thus keeps the conversion rates due to the stored  $\text{NH}_3$  at a relatively high value for a certain period of time, which slowly decreases as the amount of  $\text{NH}_3$  is reduced.

The calculations and simulations performed aimed to produce a realistic model to calculate nitrogen oxide emissions for an average vehicle.

It was found that in areas with adequate load during the cycle, using the basic model, sufficient accuracy in the simulation of the emission masses could be achieved. At low loads, there was always a drastic underestimation of the emission masses. In these cases, the simulation of the emission masses with the storage model could be improved many times over.

# 1 Einleitung

Durch verschiedene Vorfälle in den letzten Jahren ist der Verbrennungsmotor, insbesondere der Dieselmotor, stark in Verruf geraten. Jedoch muss man feststellen, dass es bis zum derzeitigen Zeitpunkt keine sinnvolle Alternative für den Verbrennungsmotor, vor allem auf dem Einsatzgebiet der schweren Nutzfahrzeuge (SNF), gibt. Hier ist der Dieselmotor durch seinen geringen Verbrauch und seine Robustheit das Maß aller Dinge und wird es vermutlich noch mehrere Jahre bleiben. Aus diesem Grund - und der steigenden Anzahl von schweren Nutzfahrzeuge weltweit - wurden die zugelassenen Grenzwerte der Emissionen mehrmals nach unten korrigiert, um die Umweltbelastung, die durch den Einsatz eben dieser entsteht, möglichst gering zu halten. Derzeit ist EURO VI die geltende Abgasnorm, die nur mehr mithilfe von Abgasnachbehandlungen eingehalten werden kann. Im Fokus steht hierbei der SCR-Katalysator, der für die Reduktion der Stickoxide verantwortlich ist und nur unter geeigneten Betriebsbedingungen funktioniert. Vor allem in Stadtgebieten gibt es durch die niedrigen Lasten und die daraus resultierenden niedrigen Temperaturniveaus für den SCR-Katalysator vermehrt Probleme, die zu höherer Stickoxidbelastung führt.

Da es nicht möglich ist, alle sich im Verkehr befindlichen Fahrzeuge zu messen und dementsprechend ihren Einfluss auf die Umwelt zu ermitteln, wird verstärkt auf Simulationswerkzeuge zurückgegriffen. Mit diesen Werkzeugen wird versucht, durch eine geringe Anzahl von Messungen auf die durchschnittlichen Emissionen für eine Fahrzeugflotte zurückzuschließen. Diese durchschnittlichen Emissionen werden als Basisdaten für Verkehrssimulationen herangezogen.

## 2 Aufgabenstellung

In vorangegangenen Forschungsarbeiten kam es in Zyklen mit niedrigen Lasten bei der Simulation der Stickoxide in den meisten Fällen zu einer drastischen Unterschätzung der ausgestoßenen Stickoxid-Emissionsmassen. Aufgrunddessen wurden folgende Ziele für die vorliegende Masterarbeit festgelegt.

Nach der Erarbeitung der theoretischen Hintergründe des SCR-Katalysators erfolgen Messungen eines Versuchsfahrzeugs mit anschließender Auswertung. Anhand dieser Daten und weiteren Messdaten aus früheren Messungen wird ein SCR-Basismodell für die Simulation von Stickoxiden erstellt. Dieses Basismodell soll auf sogenannte Niedriglastzyklen erweitert werden. Diese Erweiterung soll in Richtung des  $\text{NH}_3$ -Speicherstands im SCR-Katalysator und dessen Auswirkung auf die Konvertierungsraten durchgeführt werden. Zeitgleich soll das  $\text{NH}_3$ -Speicherstandmodell so kalibriert werden, dass die Stickoxidemissionen eines Durchschnittsfahrzeuges berechnet werden können. Anschließend daran soll ein Vergleich der Messungen mit dem SCR-Basismodell und dem  $\text{NH}_3$ -Speicherstandmodell getätigt werden.



### 3.1.1 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Kohlendioxid ist ungiftig und ein erwünschtes Produkt der vollständigen Verbrennung. Es handelt sich dabei um ein farb- und geruchloses Gas und obwohl es für den Menschen nicht direkt giftig ist, ergibt sich durch die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration ein Problem in der Erdatmosphäre, da es mitverantwortlich für die Erhöhung der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche ist. [2]

Da CO<sub>2</sub> ein gewolltes Produkt der Verbrennung ist, besteht die einzige Möglichkeit zur Reduktion in der Verminderung des Kraftstoffeinsatzes, beziehungsweise in der Verwendung von erneuerbaren Energien oder weniger Kohlenstoffhaltigen Energieträgern. [2]

### 3.1.2 Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid entsteht typischerweise bei lokalem Luftmangel während einer Verbrennung ist somit ein Produkt der unvollständigen Verbrennung. Es ist ebenfalls farb- und geruchlos und im Gegensatz zu Kohlendioxid giftig für den Menschen, da es eine wesentlich festere Bindung mit Hämoglobin eingeht als Sauerstoff. Aus diesem Grund kommt es zu einer verminderten Sauerstoffsättigung des Blutes und daraus folgend zu einer schlechten beziehungsweise Minderversorgung von Organen mit erhöhtem Sauerstoffbedarf. [2]

Innermotorisch kann CO durch eine vollständige Verbrennung mit Luftüberschuss vermindert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion von CO ist der Einsatz eines Oxidationskatalysators im Abgasstrang, der das entstandene Kohlenmonoxid mit Sauerstoff zu Kohlendioxid oxidiert. Die Reaktionsgleichung für diesen Vorgang ist in Gleichung (3-1) beschrieben. [2]



### 3.1.3 Kohlenwasserstoffe (HC)

Wird von Kohlenwasserstoff - Emissionen gesprochen, so ist damit ein Sammelbegriff für flüchtige organische Substanzen in der organischen Chemie und Automobilindustrie gemeint. Diesel- und Ottokraftstoffe bestehen aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffen, von denen teilweise nach der Verbrennung geringe Anteile im Abgas vorhanden bleiben. Verbrennung nahe der Zündgrenze und Flammenlöschung an der Brennraumwand fördern die Entstehung von Kohlenwasserstoffen. [2]

Durch die große Vielfalt an Kohlenwasserstoffverbindungen gibt es einige, denen krebserregende Eigenschaften nachgesagt werden, und andere, die als nicht gesundheitsschädigend klassifiziert sind. [2]

Die Reduktion im Abgas erfolgt – gleich wie bei Kohlenmonoxid - durch einen Oxidationskatalysator. Die Reaktionsgleichung, die diesen Vorgang beschreibt, ist in Gleichung (3-2) dargestellt. [2]



### 3.1.4 Partikel und Ruß

Der überwiegende Teil der Partikel eines Dieselmotors besteht aus Kohlenstoffteilchen, und zwar dann, wenn zu wenig Sauerstoff für die Oxidation zu CO vorhanden ist. [2]

Die Gefahr, die durch Partikel und Ruß für den Menschen entsteht, ergibt sich aus der geringen Größe der Partikel und ihrer Eigenschaft als Träger für krebserregenden Stoffe zu fungieren. [2]

Innermotorisch können Partikel vermindert werden indem während der Verbrennung hohe Temperaturen und genügend Sauerstoff vorhanden sind. Wie im nächsten Kapitel gezeigt wird, ist dies im Hinblick auf Stickoxidbildung jedoch zu vermeiden. Außerdem können in der Abgasnachbehandlung Partikelfilter eingesetzt werden, die in dieser Arbeit aber nicht näher behandelt werden. [2]

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

Die besten Bedingungen zur Bildung von Stickoxiden sind hohe Temperaturen und Luftüberschuss. Das Maximum der Stickoxidbildung tritt bei einem Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda \sim 1,1$  auf. [2]

Emittiertes NO wird unter Einwirkung von UV-Licht zu NO<sub>2</sub> umgewandelt; bei NO<sub>2</sub> handelt es sich um ein hochgiftiges Reizgas. [2]

Innermotorisch kann die Bildung von NO<sub>x</sub> mittels Abgasrückführung (AGR) vermindert werden. In der Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren haben sich vor allem zwei Systeme etabliert: Einerseits der Stickoxidspeicherkatalysator (NSK), dessen Einsatz jedoch auf PKW begrenzt ist und andererseits die NO<sub>x</sub>-Reduktion mittels selektiver katalytischer Reduktion (engl.: selective catalytic reduction, SCR). Das SCR-Verfahren sowie die Abgasrückführung werden in späteren Kapiteln genauer behandelt, während auf den NSK in dieser Masterarbeit nicht weiter eingegangen wird. [2]

Für eine genaue Erläuterung und Simulation eines NSK wird auf [3] verwiesen.

#### 3.1.5.1 Thermisches NO (Zeldovich-NO)

Die Elementarreaktionen für die Bildung von NO nach Zeldovich sind in Gleichung (3-3) bis Gleichung (3-5) beschrieben. [2]



Aufgrund der hohen Aktivierungsenergie der ersten Reaktion wird dieser Mechanismus „thermisch“ genannt. Die erste Reaktion bestimmt die Geschwindigkeit für den Gesamtmechanismus und führt erst bei sehr hohen Temperaturen zu einer größeren Menge von NO. [2]

#### 3.1.5.2 Promptes NO

Die Entstehung von promptem NO ist mit CH-Radikalen verbunden. Da CH-Radikale in vielfältiger Weise reagieren können, ist die Bestimmung eines Geschwindigkeitskoeffizienten mit Unsicherheiten behaftet. Die Aktivierungsenergie von promptem NO (57 kJ/mol) ist im Vergleich zum thermischen NO (319 kJ/mol) niedrig. Folglich kommt es auch bei tieferen Temperaturen (circa ab 1000 K) zu einer Bildung von NO, die in vielen technischen Anwendungen einen nicht unwesentlichen Anteil zum gesamten NO beitragen kann. [2]

### 3.1.5.3 NO aus Brennstoff – Stickstoff

Die Bildung von NO aus dem im Brennstoff gebundenen Stickstoff ist bei der Verbrennung von Kohle relevant, da diese eine größere Menge an gebundenem Stickstoff enthält. Die Mechanismen sind ähnlich kompliziert wie bei Bildung des prompten NO. [2]

Dieser Mechanismus spielt jedoch bei der motorischen Verbrennung praktisch keine Rolle, weil der im Straßenverkehr eingesetzte Brennstoff keinen Stickstoff enthält. [4]

## 3.2 Stickoxidreduktion

Das vorhergehende Kapitel hat die Entstehung von Stickoxiden behandelt, in diesem Kapitel wird die Reduktion von diesem erläutert.

### 3.2.1 Selective Catalytic Reduction

Wie in Kapitel 3.1.5 bereits erwähnt, ist die selektive katalytische Reduktion eines der etablierten Systeme zur Minderung der NO<sub>x</sub>. Das Verfahren selbst wurde zur Entstickung der Abgase aus Verbrennungsprozessen von stationären Anlagen entwickelt und ist dort seit etwa 30 Jahren erfolgreich im Einsatz. [5]

Das Funktionsprinzip des SCR-Katalysators beruht auf der Zuführung von Ammoniak (NH<sub>3</sub>), das als Reduktionsmittel wirkt, zum Abgas. Das Vorhandensein eines Katalysators ist notwendig, da die emittierten Stickoxide bei der vorherrschenden Temperatur nicht selbstständig in N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> zerfallen (ohne Katalysator nur mit geringer Reaktionsgeschwindigkeit). Das eindosierte NH<sub>3</sub> reagiert hauptsächlich mit den vorhandenen Stickoxiden; dieser Eigenschaft verdankt der Prozess auch den Namen „Selective Catalytic Reduction“, kurz „SCR“. [5]

Die Umwandlung von NO<sub>x</sub> im Katalysator ist unter anderem stark von der vorherrschenden Temperatur abhängig. Bei Temperaturen, unter 150 °C ist die Konvertierungsrate geringer und erst ab einer Temperatur von circa 450 °C beginnt das Reduktionsmittel mit Sauerstoff zu reagieren, dadurch sinkt hier auch die Konvertierungsrate. In Abbildung 3-2 ist erkennbar, dass über einen weiten Temperaturbereich NO<sub>x</sub>-Umsätze von circa 90 % möglich sind. In nachfolgenden Kapiteln wird ersichtlich werden, dass bei modernen EURO VI Nutzfahrzeugen sogar noch höhere NO<sub>x</sub>-Umsätze erreichbar sind. [5]

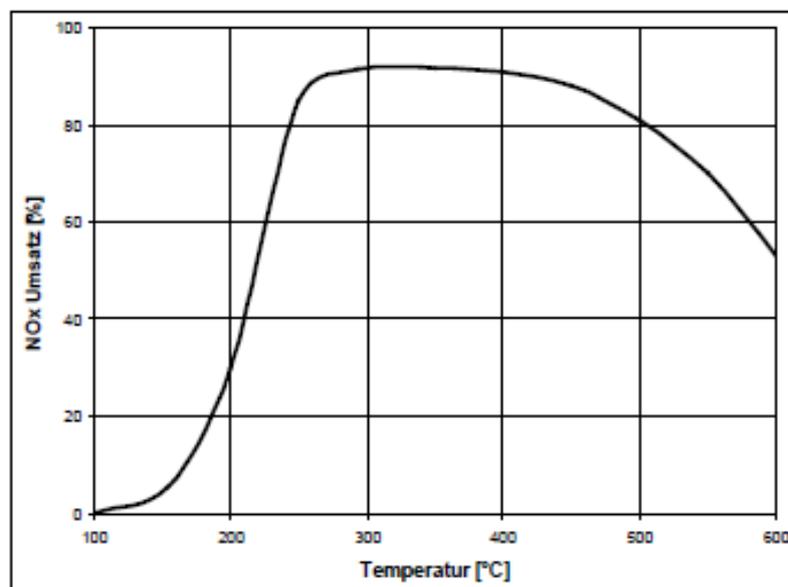


Abbildung 3-2: Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Temperatur [5]

### 3.2.1.1 Prozessschritte des SCR-Verfahrens

In der mobilen Anwendung sind sowohl vor als auch nach der eigentlichen SCR-Reaktion noch weitere, in Abbildung 3-3 dargestellte, Prozessschritte notwendig.

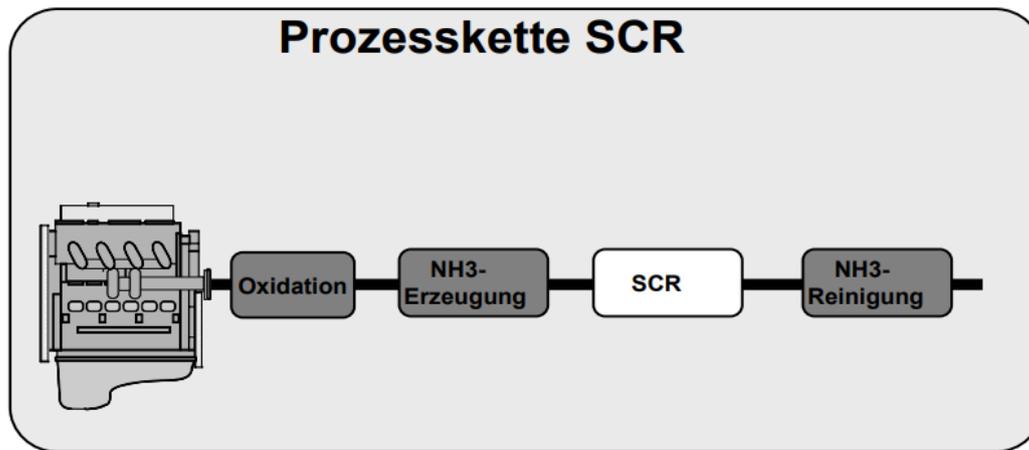


Abbildung 3-3: Prozesskette SCR [5]

Vor der Eindosierung der wässrigen Harnstofflösung (32,5 % Harnstoff in entionisiertem Wasser) und dem eigentlichen SCR-Katalysator befindet sich ein Oxidationskatalysator, der die CO- und HC-Emissionen zu CO<sub>2</sub> und Wasser oxidiert und teilweise NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert. Das Verhältnis von NO zu NO<sub>2</sub> hängt beim Dieselmotor von der Last ab, es wird überwiegend NO (ca. 60 bis 90 %) gebildet und wenig NO<sub>2</sub>. Bei kleiner Motorlast entsteht mehr NO<sub>2</sub>. Durch den Vorgang der Oxidation verändert sich das NO<sub>2</sub> zu NO Verhältnis: Es wird angehoben, im Idealfall auf 50:50, wodurch es einen großen Einfluss auf die NO<sub>x</sub>-Umsatzrate besitzt. Die Oxidation von NO zu NO<sub>2</sub> selbst könnte auch direkt in der SCR-Stufe stattfinden. [1]

Als nächster Schritt folgt die Eindosierung der wässrigen Harnstofflösung mittels einer Dosiereinrichtung, die im Kapitel 3.2.1.2 genauer erklärt wird. Die Harnstofflösung mit dem Handelsnamen „AdBlue“ wurde gewählt, da der Transport von Ammoniak im Fahrzeug aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich ist. Sie wird in einem eigenen Tank im Fahrzeug mitgeführt und über die Dosiereinrichtung in den Abgasstrang befördert. In einer Mischungsstufe zwischen der Dosiereinrichtung und dem SCR-Katalysator wird die Harnstofflösung in NH<sub>3</sub> umgewandelt. Falls zu viel eindosiert wird und der Katalysator das NH<sub>3</sub> nicht mehr adsorbieren kann, kommt es zum sogenannten NH<sub>3</sub>-Schlupf. Dieser Überschuss wird mit einem nachgeschalteten Oxidationskatalysator, dem letzten Prozess in der Kette, abgebaut. Dieser Katalysator ist notwendig da NH<sub>3</sub> toxisch ist. In den weiteren Kapiteln werden die einzelnen Prozessschritte genauer erläutert. [5]

### 3.2.1.2 Dosierung und Erzeugung von Ammoniak

Die benötigten Verfahrensschritte, um von der wässrigen Harnstofflösung das benötigte Ammoniak zu erhalten, sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

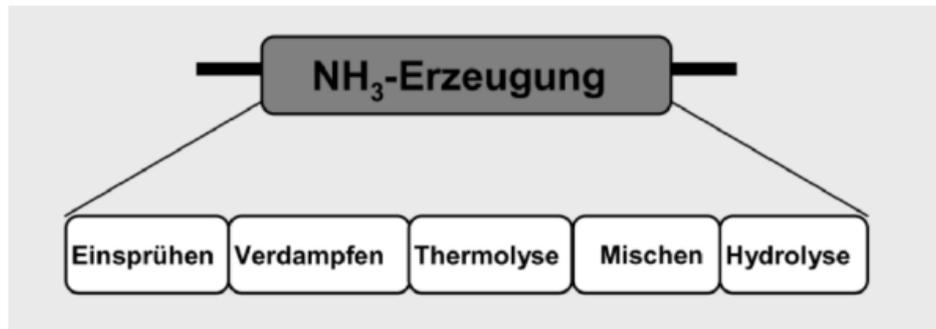


Abbildung 3-4: Verfahrensschritte der NH<sub>3</sub> Erzeugung [5]

Der erste Schritt und damit die Grundlage eines funktionierenden SCR-System ist eine präzise und zuverlässige Dosierung der Harnstofflösung unter allen Betriebsbedingungen. Abbildung 3-5 zeigt eine solche Dosiereinheit mit dem Namen DeNoxtronic der Firma Bosch.

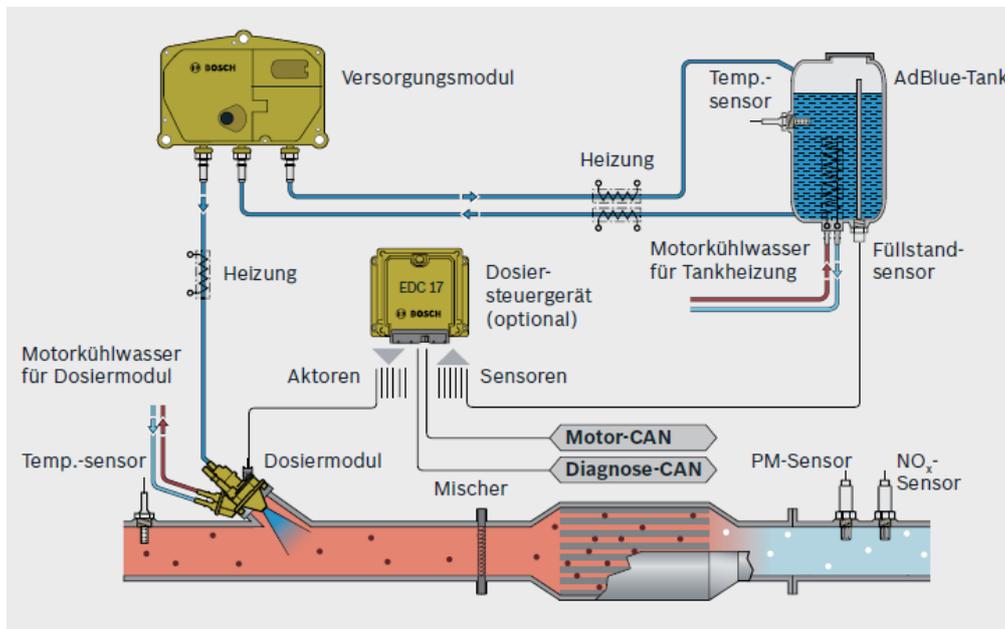


Abbildung 3-5: Denoxtronic, Firma Bosch [6]

Ein Fördermodul saugt die Harnstofflösung mittels einer Pumpe aus dem Tank und bringt sie auf den erforderlichen Betriebsdruck, bevor sie dem Dosiermodul zugeführt wird. Dieses Dosiermodul muss die präzise Menge, die Zerstäubung und die Verteilung im Abgasrohr übernehmen. Die Zerstäubung und auch die Verteilung im Abgasrohr sind wichtige Größen, die die NO<sub>x</sub> Umsatzrate stark beeinflussen.

Wie in Abbildung 3-6 zu sehen ist wirkt sich die Größe der Tröpfchen sehr stark auf die benötigte Strecke zum Verdampfen aus. Zu erkennen ist das ein Tropfen mit einem Durchmesser von 20 µm bei 350 °C eine Flugstrecke von unter einem Meter benötigt hingegen ein Tropfen mit dem doppelten Durchmesser (50 µm) bei gleicher Temperatur eine Strecke von ungefähr zwei Metern benötigt. Bei zu großen Tröpfchen kann es also passieren, dass der Tropfen den SCR-Katalysator oder ein anderes Bauteil erreicht, bevor er verdampft ist. Sollte dies passieren, kann es zu Ablagerungen kommen, die erst wieder oberhalb von 360 °C und mit sehr niedriger Reaktionsgeschwindigkeit abgebaut werden können. Diese Ablagerungen können die Funktionalität des SCR-Katalysators beeinträchtigen. [4], [5], [7]

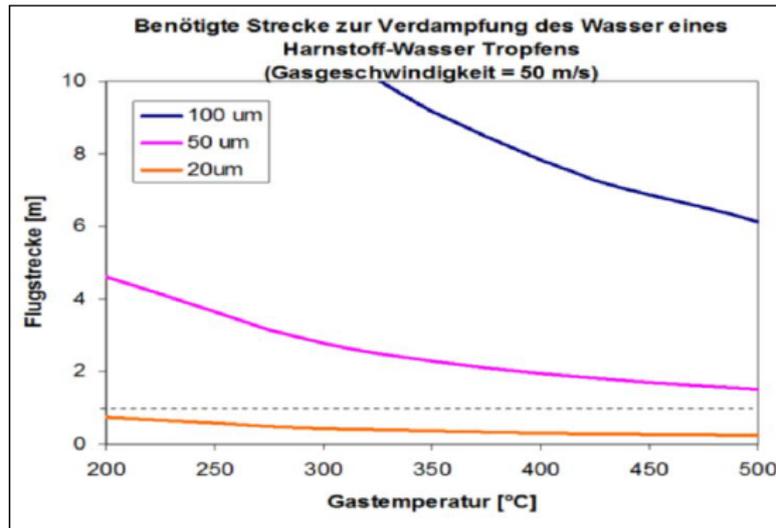


Abbildung 3-6: Benötigte Strecke zum Verdampfen eines Tropfens der Harnstofflösung [5]

Eine wichtige Größe für die Dosierung ist das Dosierverhältnis  $\alpha$ , dargestellt in Gleichung (3-6). Es lässt sich mit dem molaren Verhältnis des doppelten eindosierten Harnstoffes ( $\text{NH}_3$ -Äquivalent) zum emittierten  $\text{NO}_x$  beschreiben. [5]

$$\alpha = \frac{\dot{n}_{\text{NH}_3}}{\dot{n}_{\text{NO}_x}} = \frac{2 * \dot{n}_{\text{Harnstoff}}}{\dot{n}_{\text{NO}_x}} \quad (3-6)$$

Bei übermäßiger Eindosierung, das heißt bei einem Dosierverhältnis größer als 1, wird die notwendige  $\text{NH}_3$ -Menge überschritten und der Überschuss - wenn möglich - im Katalysator gespeichert. Pro Liter Katalysatorvolumen lassen sich etwa 1 g  $\text{NH}_3$  einspeichern, wobei diese Speicherfähigkeit von der Temperatur un auch davon abhängig ist ob es sich um einen Zeolithe- oder einem Vanadium- Katalysator handelt. Die Temperaturabhängigkeit der Speicherfähigkeit des Katalysators nimmt gemäß Abbildung 3-7 mit steigender Temperatur ab, dementsprechend nehmen auch die 1 g  $\text{NH}_3$  pro Liter Katalysatorvolumen ab. Auf mögliche Dosierstrategien wird im nächsten Kapitel eingegangen. [4], [5]

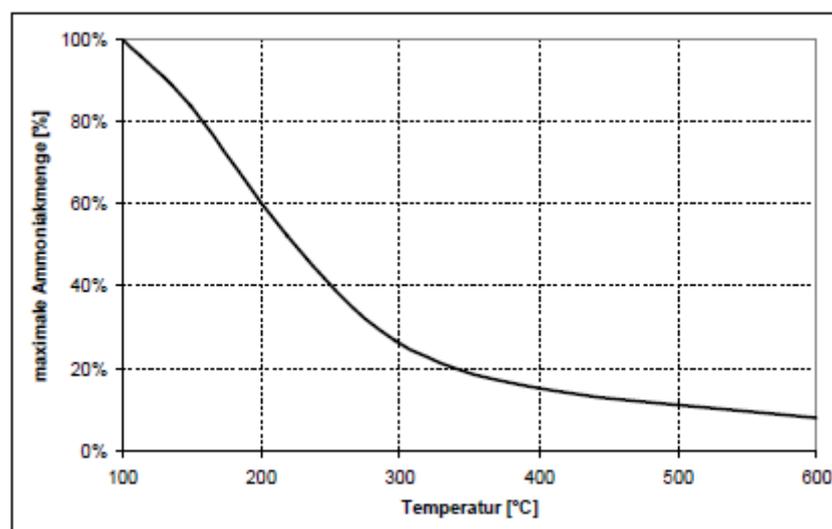


Abbildung 3-7:  $\text{NH}_3$ -Speichermenge in Abhängigkeit der Temperatur [5]

Die Erzeugung beziehungsweise Freisetzung von Ammoniak aus Harnstoff läuft in einem zweistufigen Prozess ab. Diese zwei Stufen werden als „Thermolyse“ und „Hydrolyse“ bezeichnet. Die dementsprechenden Reaktionen werden in den Gleichungen (3-7) und (3-8) beschrieben. [5]



Eine ausreichend hohe Temperatur und eine gleichmäßige Verteilung sind zur Thermolyse und Hydrolyse notwendig. Die Dosierfreigabe erfolgt üblicherweise erst dann, wenn die  $NH_3$ -Erzeugungsstufe heißer als  $200\text{ °C}$  ist. Die Temperatur sollte auch deswegen hoch genug sein, damit es zu keinen festen Ablagerungen im Abgasstrang kommen kann. [5]

Zusammengefasst muss bei der Ammoniak-Bereitstellung auf

- eine möglichst gleichmäßige Verteilung,
- die Vermeidung von Ablagerungen und
- die Vermeidung von Kaltzonen im Mischrohr

geachtet werden, um den Harnstoff optimal nutzen zu können. [5]

### 3.2.1.3 Dosierstrategie

Um den  $NO_x$ -Umsatz zu optimieren und gleichzeitig den  $NH_3$ -Schlupf zu minimieren, sind modellgestützte Berechnungen der optimalen Dosiermenge notwendig. In einem stationären Basismodell ist die notwendige AdBlue-Menge als Funktion von Einspritzmenge und Motordrehzahl hinterlegt. Weiters gibt es verschiedene Korrekturgrößen wie beispielsweise die Motortemperatur und zur Berücksichtigung der Alterung auch die Betriebsstunden des Systems. In einem weiteren Kennfeld ist die stationäre Katalysatortemperatur hinterlegt. Aus der Differenz zwischen dieser Temperatur und der gemessenen Abgastemperatur nach dem Katalysator wird in einem dritten Kennfeld ein Korrekturfaktor für die Dosierung des Reduktionsmittels bei einem Wechsel zwischen zwei stationären Punkten ermittelt. Abbildung 3-8 zeigt das eben erklärte Modell. [7]

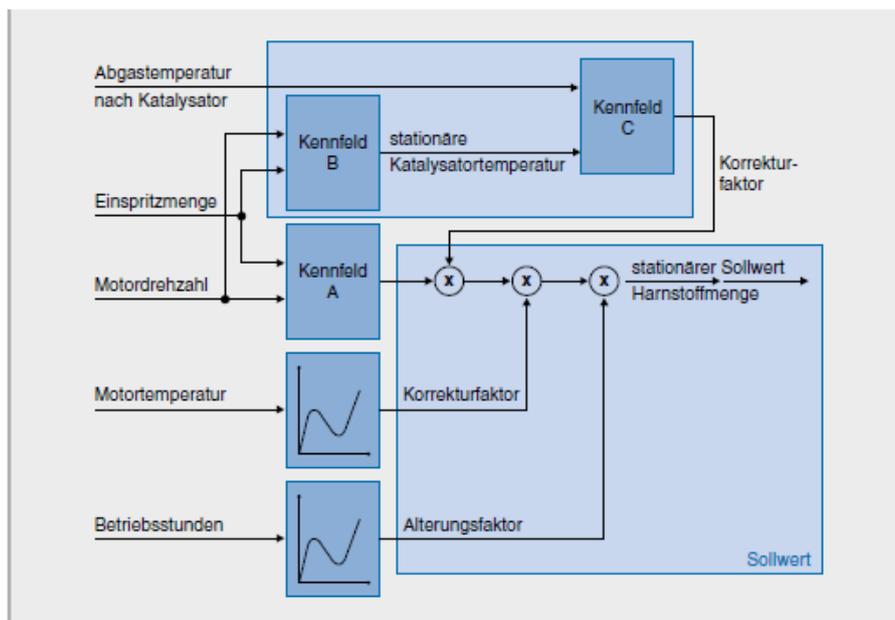


Abbildung 3-8: Basis Modell der Dosierstrategie nach [7]

Das so erstellte Basis-Modell kann um einen Speicherblock erweitert werden, der den Einfluss des  $\text{NH}_3$ -Speichervermögens abbildet. Bei steigender Abgastemperatur nimmt die Speicherfähigkeit ab, siehe Abbildung 3-7, in diesem Fall kann es zu einem  $\text{NH}_3$ -Schlupf kommen. Um diesen unerwünschten Effekt zu reduzieren und im besten Fall zu beheben, werden das  $\text{NO}_x$  vor SCR (Engine Out) und die Katalysatortemperatur mittels Kennfelder und Verzögerungsglieder bestimmt. Die Konvertierungsraten werden in einem Kennfeld als Funktion von Temperatur und gespeichertem  $\text{NH}_3$  abgelegt. Aus dem Produkt des vorhandenen  $\text{NO}_x$  Engine Out und der Konvertierungsrate kann man nun auf die umgesetzte Menge  $\text{NH}_3$  schließen. Aus der Differenz der umgesetzten und zugeführten Menge und der Speichermenge im vorigen Schritt erhält man die momentane gespeicherte Menge  $\text{NH}_3$ . Dieser Wert wird fortlaufend mit einer temperaturabhängigen, festgelegten Schwelle verglichen, um bei Überschreitung der Schwelle die Dosiermenge zu reduzieren beziehungsweise bei Unterschreitung die Dosiermenge zu erhöhen, um die  $\text{NO}_x$ -Konvertierung und den  $\text{NH}_3$ -Schlupf zu optimieren. [7]

### 3.2.1.4 SCR-Reaktion

Im Allgemeinen betrachtet läuft die selektive katalytische Reduktion wie in den drei folgenden Reaktionen dargestellt ab. Unterschieden wird hierbei zwischen der Standard SCR-Reaktion (Gleichung (3-9)), der schnellen SCR-Reaktion (3-10) und der langsamen SCR-Reaktion (1-11). [5]



Neben diesen gewollten Reduktionsreaktionen treten noch weitere, nicht erwünschte Reaktionen auf. Beispielsweise kann es ab etwa 450 °C zur Oxidation von  $\text{NH}_3$  kommen (Gleichung (3-12)). Ebenfalls werden bei hohen Temperaturen vermehrt  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen gebildet (Gleichung (3-13) und Gleichung(3-14)). [4], [5]



Wie bereits in Kapitel 3.2.1 erwähnt, hängt der  $\text{NO}_x$ -Umsatz stark von der Temperatur des Katalysators ab. Neben dieser Temperaturabhängigkeit gibt es noch weitere Faktoren, wie die  $\text{NO}_x$ -Konzentration  $c_{\text{NO}_x}$ , die Raumgeschwindigkeit im Katalysator und das Konzentrationsverhältnis  $c_{\text{NO}_2}/c_{\text{NO}}$ . In Abbildung 3-9 erkennt man, dass bei einem Verhältnis von 1:1 die  $\text{NO}_x$ -Umsatzrate bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen relativ hoch ist und dieses Level über ein breites Temperaturfenster halten kann. Wie in Gleichung (3-9), in der sowohl  $\text{NO}$  als auch  $\text{NO}_2$  vorkommen, zu erkennen ist, ist in diesem Bereich vermehrt die schnelle SCR-Reaktion in Verwendung. Das benötigte Verhältnis wird mittels eines Oxidationskatalysators vor der Dosiereinheit erreicht indem  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  oxidiert wird. Bei einem  $\text{NO}_2$ -Überschuss kommt es genau zu einem gegenteiligen Effekt; in diesem Fall läuft die Reaktion über Gleichung (3-11) ab und - wie oben bereits erwähnt handelt es sich hier um die langsame SCR-Reaktion. Ein weiterer Grund, weshalb dieser Fall zu vermeiden ist, ist der erhöhte  $\text{NH}_3$ -Verbrauch. Ebenfalls ein großer Einflussfaktor ist die gespeicherte Ammoniak-Menge auf der Katalysatoroberfläche da die Wahrscheinlichkeit größer ist das ein  $\text{NO}_x$

Molekül auf ein  $\text{NH}_3$  Molekül trifft und diese miteinander reagieren, auf diesen Einflussfaktor wird in der vorliegenden Arbeit besonders eingegangen. [5]

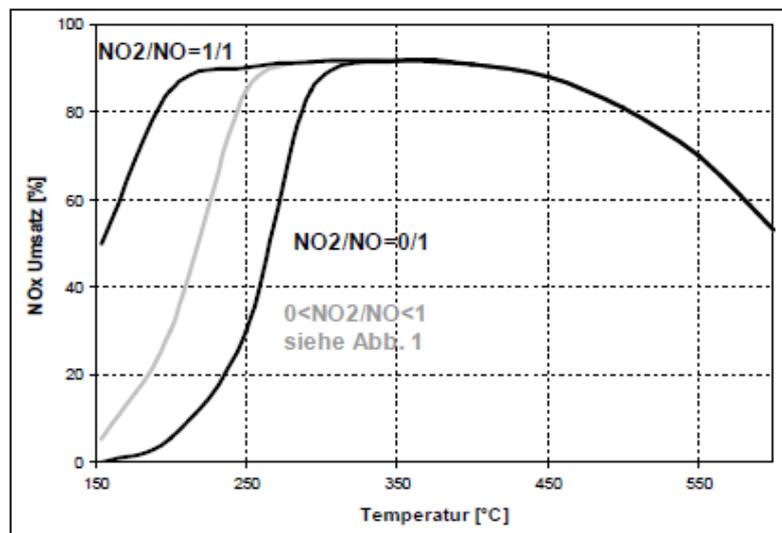


Abbildung 3-9: Konvertierungsrate über die Temperatur in Abhängigkeit vom  $\text{NO}_2/\text{NO}$  Verhältnis [5]

### 3.2.1.5 $\text{NH}_3$ - Reinigung

Um den  $\text{NH}_3$  Schlupf möglichst gering zu halten wird, in den meisten SCR-Anwendungen ein zusätzlicher Oxidationskatalysator nach der SCR-Stufe eingebaut. Ein  $\text{NH}_3$  Schlupf kann durch eine zu hohe Eindosierung von „Ad Blue“ erfolgen, wenn zusätzlich die Speicherfähigkeit des Katalysators überschritten wird. Dieser Schlupf soll mithilfe eines speziellen Oxidationskatalysators verhindert werden. Die vorliegende Reaktion mit Luftsauerstoff setzt in diesem Fall schon bei 150 °C ein. [5]

### 3.2.2 Abgasrückführung (AGR)

Eine wirksame innermotorische Maßnahme zur Reduktion von NO<sub>x</sub> ist die Abgasrückführung. Es gibt mehrere Varianten der AGR. Einerseits gibt es die innere AGR, bei der durch geeignete Ventilsteuerung ein Teil des Abgases im Zylinder gehalten wird. Andererseits existiert auch die äußere AGR, wobei es eine Hochdruck-AGR und eine Niederdruck-AGR gibt. Bei der Hochdruck-AGR erfolgt die Abnahme des Abgases vor der Turbine und die Zuführung hinter dem Ladeluftkühler. Im Falle der Niederdruck-AGR wird das Abgas erst nach der Turbine und dem Partikelfilter entnommen und vor dem Verdichter hinzugefügt. In Abbildung 3-10 ist eine kombinierte Hoch-/Niederdruck-AGR dargestellt. [4], [8]

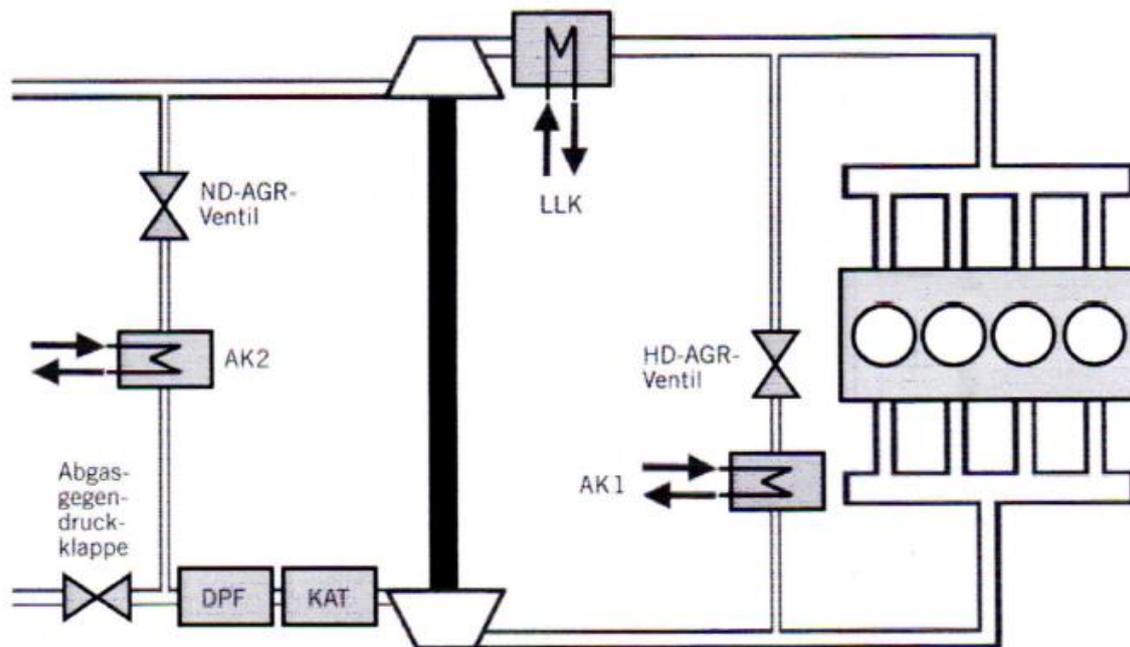


Abbildung 3-10: Schema einer kombinierten Hoch-/Niederdruck-AGR [8]

Der Effekt, durch welchen es zur NO<sub>x</sub>-Reduktion kommt, ergibt sich durch die verringerte Sauerstoffkonzentration der Zylinderladung. Durch diese Verringerung muss die Flamme eine größere Ladungsmasse erfassen, um den Sauerstoffbedarf zu decken. Durch diese erhöhte Masse kommt es zu einer Absenkung der Gastemperatur und in weiterer Folge der Verbrennungsgeschwindigkeit. Durch diese Absenkung des Sauerstoffgehalts kann es bei zu hohen AGR-Raten zu Problemen mit der Emission von Ruß kommen. Dieser Rußerhöhung kann mit einer Erhöhung des Einspritzdrucks entgegengewirkt werden. [8]

Ein weiterer Effekt ist die Veränderung der spezifischen Wärmekapazität, da Kohlendioxid und Wasser im Vergleich zu Luft eine erhöhte Wärmekapazität besitzt. Durch die erhöhten Werte kommt es zu einer Absenkung der Verdichtungs- und Verbrennungstemperatur. [4]

Weiters ist die thermische NO<sub>x</sub>-Bildung proportional zur Sauerstoffkonzentration, wodurch AGR sowohl durch die Minderung der Verbrennungstemperatur als auch der O<sub>2</sub> Konzentration effektiv die NO<sub>x</sub> Bildung senkt.

### 3.3 Abgasgesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge

Zum Erlangen einer allgemeinen Betriebserlaubnis ist seit dem 31.12.2012 die Erfüllung der Abgasnorm EURO 6 notwendig. Ab dem darauffolgenden Jahr, am 31.12.2013 war das Erfüllen der Abgasnorm für alle neu zugelassenen schweren Nutzfahrzeuge verpflichtend. Die dabei geltenden Grenzwerte der Schadstoffe sind in Tabelle 3-1 dargestellt. [9]

	CO [mg/kWh]	THC [mg/kWh]	NOx [mg/kWh]	NH3 ppm	PM mass [mg/kWh]	PM number [#/kWh]
WHSC	1500	130	400	10	10	$8,0 \cdot 10^{11}$
WHTC	4000	160	460	10	10	$6,0 \cdot 10^{11}$

Tabelle 3-1: EURO VI Emissionsgrenzwerte [9]

Seit der EURO VI Abgasnorm besteht die Typprüfung nicht mehr nur aus dem am Motoprüfstand vorgegebenen „World Harmonized Stationary Cycle“ (WHSC) und dem „World Harmonized Transient Cycle“ (WHTC), sondern auch aus einer Prüfung im realen Verkehr (RDE). Da in dieser Masterarbeit hauptsächlich mit RDE Messungen gearbeitet wird und die Messung selbst auch im realen Verkehr stattgefunden hat, werden die Bedingungen und Regeln der RDE Messung laut ISC-Kriterien genauer erläutert; für die restliche Typprüfung wird auf [9] verwiesen.

In der nachfolgenden Aufzählung werden die Bedingungen für eine gültige Überprüfung der Real Drive Emissions erläutert. Es handelt sich hierbei um eine Zusammenfassung der wichtigsten Punkte aus [9] und [10].

#### 3.3.1 Zusammenfassung der Abgasgesetzgebung

- Beladung

Die Beladung muss 10 bis 100 % der Nutzlast des Fahrzeugs entsprechen. Die Zulassungsbehörde kann jede Beladung zwischen 10 bis 100% verlangen.

- Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen müssen folgenden Ansprüchen gerecht werden:

- Der Atmosphärendruck muss größer oder gleich 82,5 kPa sein, das entspricht 0,825 bar.
- Die Umgebungstemperatur muss größer oder gleich 266 K, entspricht -7 °C, und kleiner als eine mittels Gleichung (3-15) errechnete Temperatur sein.

$$T = -0,4514 * (101,3 - pb) + 311 \quad (3-15)$$

Mit T ist dabei die Umgebungstemperatur [K] und mit pb der Atmosphärendruck [kPa] gemeint.

- Kühlmitteltemperatur

Die Messgeräte müssen bereits vor Motorstart in Betrieb genommen werden. Zu diesem Zeitpunkt darf die Kühlmitteltemperatur 30 °C nicht überschreiten. Falls die Umgebungstemperatur höher als 30 °C ist, darf sie diese nicht um mehr als 2 °C übersteigen. Für die gesetzeskonforme Messung werden die Daten erst relevant, wenn die Kühlmitteltemperatur das erste Mal 70 °C überschreitet oder sie sich für 5 Minuten

stabilisiert ( $\pm 2$  °C), je nachdem was vorher eintritt, im spätesten Fall aber 15 Minuten nachdem der Motor gestartet wurde.

- Streckenvoraussetzungen

Die Strecke muss aus einem Stadt-, Überland- und Autobahnteil bestehen. Je nach Gewichtsklasse müssen unterschiedliche Anteile in den jeweiligen Bereichen gefahren werden. Die dafür notwendigen Anteile sind in Tabelle 3-2 dargestellt, wobei es sich hier um die zeitlichen Anteile handelt. Die Toleranz beträgt  $\pm 5$  %.

	Stadt	Überland	Autobahn
N1	34 %	33 %	33 %
N2	45 %	25 %	30 %
N3	20 %	25 %	55 %

Tabelle 3-2: Zeitliche Anteile für eine gesetzeskonforme Messung

Einzelne Anteile werden von der gefahrenen Geschwindigkeit bestimmt, für einen Stadtanteil muss diese zwischen 0 und 50 km/h, für Überland zwischen 50 und 75 km/h und für Autobahn über 75 km/h liegen.

- Testdauer

Während eines Tests muss zwischen vier und sieben Mal jene Arbeit geleistet werden, die in einem WHTC geleistet wird. Die zweite Möglichkeit ist über die CO<sub>2</sub>-Referenzmasse in kg/Zyklus, hier muss die vier- bis siebenfache Masse gebildet werden die während eines WHTC produziert wird.

- Abgasgrenzwerte

Bei der Beurteilung der RDE-Messdaten werden nicht die für WHTC und WHSC gültigen Grenzwerte verwendet, diese müssen erst berechnet werden. Zur Berechnung der gültigen Grenzwerte wird ein sogenannter „conformity factor“ eingeführt, mit dem die Werte aus Tabelle 3-1 multipliziert werden. Dieser Faktor berücksichtigt die Ungenauigkeit der verwendeten Messgeräte bei den RDE-Messungen. Der zurzeit gültige „conformity factor“ beträgt 1,5 für CO, THC und NO<sub>x</sub>, die daraus resultierenden Werte sind in Tabelle 3-3 eingetragen. Verglichen werden diese Werte mit dem 90 % kumulierten Perzentil, die mittels „Averaging window principle“ berechnet werden, welches in Kapitel 3.3.2 kurz erklärt wird.

	ISC-Grenzwerte[g/kWh]
CO	6,00
THC	0,24
NO <sub>x</sub>	0,69

Tabelle 3-3: Grenzwerte bei einem erfüllten ISC-Test

- Driftkorrektur

Ob eine Driftkorrektur durchgeführt werden muss entscheidet sich nach Kontrolle der Analysator-Konzentration des Null- und Kalibriegases. Die Abweichung der Konzentrationen vor und nach dem Test dürfen nicht größer als 2 % des Messbereichs im kleinsten Bereich sein. Die Differenz der Konzentration vor und nach dem Test darf ebenfalls nicht größer als 2 % des Messbereichs im kleinsten Bereich sein. Falls dies nicht der Fall ist, ist eine Driftkorrektur notwendig. Die Berechnung dieser ist mittels Gleichung (3-16) durchzuführen. [9], [11]

$$c_{cor} = c_{ref,z} + (c_{ref,s} - c_{ref,z}) * \left( \frac{2 * c_{gas} - (c_{pre,z} + c_{post,z})}{(c_{pre,s} + c_{post,s}) - (c_{pre,z} + c_{post,z})} \right) \quad (3-16)$$

$c_{ref,z}$	Referenzkonzentration des Nullgases [ppm]
$c_{ref,s}$	Referenzkonzentration des Kalibriegases [ppm]
$c_{pre,z}$	Analysator Konzentration des Nullgases vor dem Test [ppm]
$c_{pre,s}$	Analysator Konzentration des Kalibriegases vor dem Test [ppm]
$c_{post,z}$	Analysator Konzentration des Nullgases nach dem Test [ppm]
$c_{post,s}$	Analysator Konzentration des Kalibriegases nach dem Test [ppm]
$c_{gas}$	Gaskonzentration [ppm]

Die Differenz zwischen den korrigierten und unkorrigierten spezifischen Emissionen muss in einem Bereich von +/- 6 % der unkorrigierten spezifischen Emissionen liegen. Wenn diese Abweichung größer als 6 % ist, wird der Test als ungültig gesetzt. [9]

### 3.3.2 „Averaging window principle“

Das Prinzip des Verfahrens ist die Bildung einzelner „Fenster“ in einem Zyklus. In diesen Fenstern werden die Emissionen und die Leistung aufsummiert und fortlaufend mit der geleisteten Arbeit des WHTC verglichen. Sobald die kumulierte Arbeit des Fensters größer oder gleich der Arbeit des WHTC ist, wird dieses Fenster abgeschlossen. In Abbildung 3-11 ist das Prinzip grafisch dargestellt. Es gibt eine weitere Variante über die CO<sub>2</sub>-Masse die hier nicht näher erläutert wird. Ebenfalls ist dies nur eine Zusammenfassung, für weitere Details wird auf [9] und [10] verwiesen.

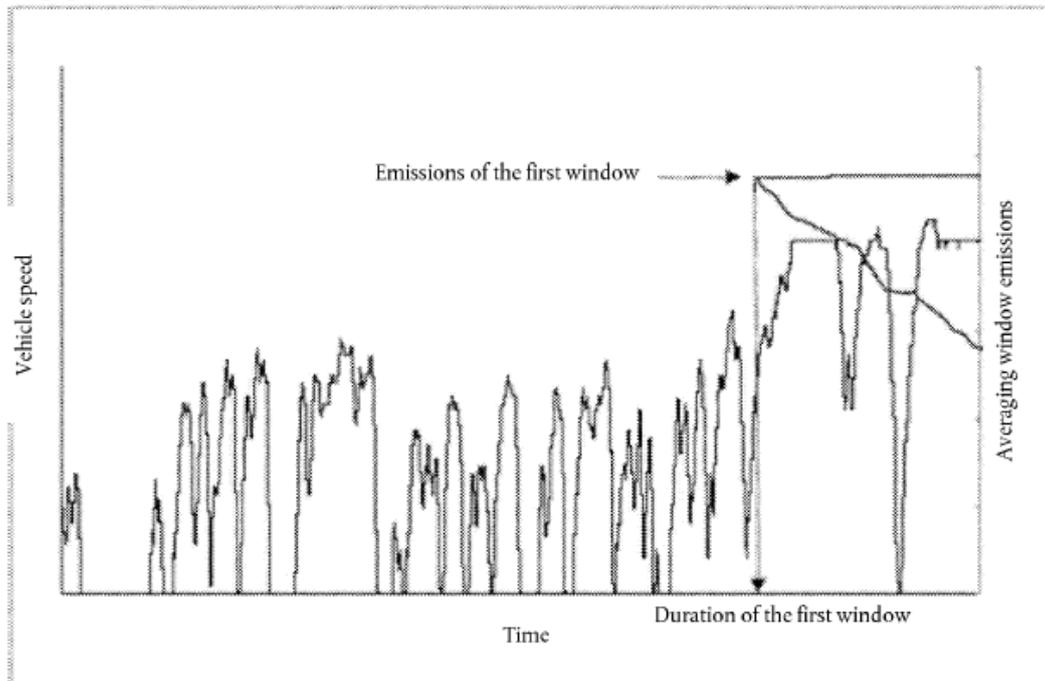


Abbildung 3-11: Prinzip der Summierung in einem Fenster im Zyklus [10]

Die Berechnung der Emissionen pro kWh ist in Abbildung 3-12 beschrieben und wird im folgenden Abschnitt erklärt.

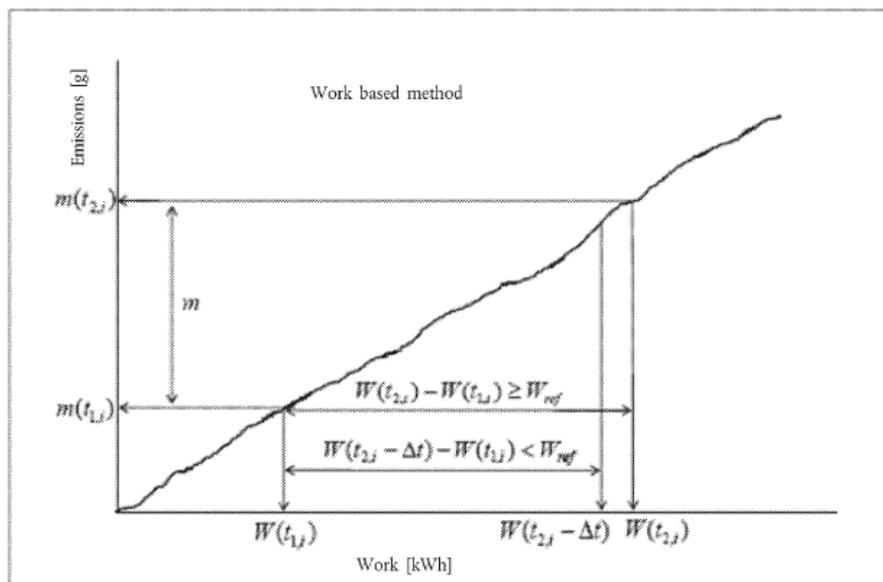


Abbildung 3-12: Methode der geleisteten Arbeit [9]

Für alle gebildeten Fenster werden die spezifischen Emissionen [g/kWh] mittels Gleichung (3-17) berechnet, wobei mit  $m$  die Emissionsmasse in [g] und  $W(t_{2,i})-W(t_{1,i})$  die Arbeit des  $i$ -ten Fensters in [kWh] bezeichnet wird. [9]

$$e_{gas} = \frac{m}{W(t_{2,i}) - W(t_{1,i})} \quad (3-17)$$

Ob ein Fenster, und in weiterer Folge auch der gesamte Zyklus, als gesetzeskonform gezählt wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen muss die durchschnittliche Leistung des Fensters 20 % der maximalen Motorleistung überschreiten, zum anderen müssen diese Bedingung von 50 % der gebildeten Fenster erfüllt werden. Sollte dies nicht der Fall sein, so muss die Auswertung wiederholt werden und die durchschnittliche Leistung des Fensters muss nur mehr eine geringere Leistungsschwelle überschreiten, und zwar um 1 % weniger als bei dem vorhergehenden Schritt. Diese Schwelle wird solange jeweils um 1 % verringert - die minimale Schwelle entspricht 15 % der maximalen Motorleistung - bis 50 % der Fenster die Bedingung erfüllen. Wenn das erreicht ist wird der Test als gesetzeskonform gesetzt. Sollten auch bei der minimalen Schwelle keine 50 % erreicht werden, ist der gesamte Test ungültig. Diese Bedingungen müssen von allen neu zugelassenen SNF bis 1.9.2019 erfüllt werden. Ab dem 1.9.2019 wird die Schwelle auf 10 % der maximalen Leistung herabgesetzt und es gibt keine weiteren Verringerungen wie davor, und in den gültigen Fenstern muss mindestens ein Fenster, das nur Stadtanteile enthält, vorhanden sein. Aus den gesamten mittels Gleichung (3-17) berechneten Werten wird im Abschluss der 90 % Perzentil-Wert ermittelt und mit den Grenzwerten aus Tabelle 3-3 verglichen. [10]

### 3.4 Emissionsmesstechnik

Die Emissionsmesstechnik wird in vielen Bereichen der Fahrzeugentwicklung und -kontrolle eingesetzt. Die Emissionen geben Einblicke in die Verbrennung und sind damit ein wichtiger Teil in der Motorenentwicklung. Des Weiteren wird die Messtechnik benötigt, um das Einhalten der Grenzwerte kontrollieren zu können und um Rohdaten für Simulationsmodelle zu erhalten. Messungen selbst können am Motorenprüfstand, Rollenprüfstand und im realen Betrieb auf der Straße durchgeführt werden. Da im Zuge dieser Masterarbeit nur Emissionen im realen Betrieb gemessen wurden, werden auch nur für diese die theoretischen Grundlagen erläutert. Für Messtechnik am Motoren- und Rollenprüfstand wird auf dementsprechende Fachliteratur verwiesen.

#### 3.4.1 Portable Emission Measurement System (PEMS)

Wie in Kapitel 3.3 bereits erwähnt, ist bei schweren Nutzfahrzeugen, zusätzlich zum Motorenprüfstand, für das Bestehen der Typprüfung eine Emissionsmessung auf der Straße notwendig, die sogenannte RDE-Messung (Real Drive Emission). Das in diesem Fall eingesetzte Messsystem wird PEMS genannt. Es sollte über eine externe Stromquelle mit Energie versorgt werden. Normalerweise wird hierzu ein handelsüblicher Stromgenerator benutzt, damit das Fahrzeug nicht selbst für die benötigte Energie aufkommen muss. Wie in Abbildung 3-13 zu sehen ist, wird das System meist auf der Ladefläche des Nutzfahrzeugs mitgeführt. Bei dem verwendeten Messsystem handelt es sich um ein Semtech DS von Sensors.



Abbildung 3-13: Aufbau PEMS [12]

Die wichtigsten gasförmigen Emissionen  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  und Ruß können mithilfe dieses Messsystems gemessen werden. Für die Messung werden an zwei unterschiedlichen Orten jeweils Teilströme aus dem Abgasstrom entnommen: Einmal für die gasförmigen Komponenten (Abbildung 3-15), einmal für den Ruß (Abbildung 3-14). Anschließend werden diese den Analysatoren unverdünnt zugeführt. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Analysatoren erklärt. Diese Systeme ermitteln die Konzentration der zu messenden Komponenten indem sie die verschiedenen Eigenschaften der Gase ausnutzen. Um von den Konzentrationen [ppm] auf die Massenemissionen [g/s] schließen zu können, muss der Abgasmassenstrom ebenfalls gemessen werden. [12], [13]

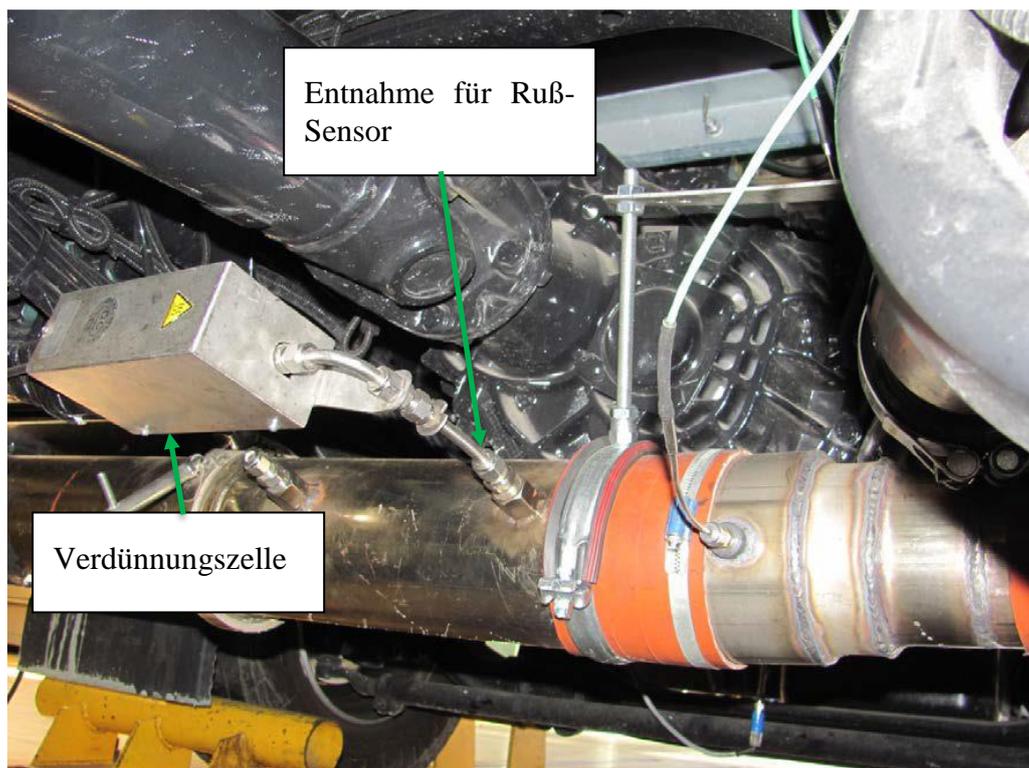


Abbildung 3-14: Entnahme für die Rußmessung [12]

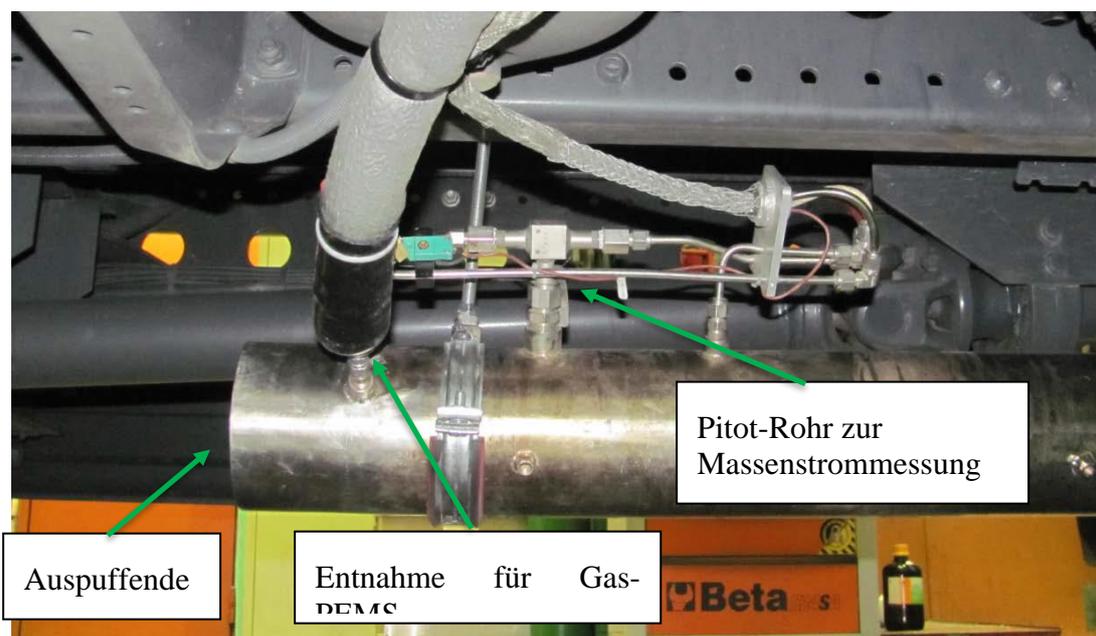


Abbildung 3-15: Entnahme für gasförmige Komponenten [12]

### 3.4.2 Eingesetzte Analysatoren

In den folgenden Kapiteln werden die jeweiligen Prinzipien der einzelnen Analysatoren die im Semtech zum Einsatz kommen erklärt.

#### 3.4.2.1 Nichtdispersiver Infrarot-Analysator (NDIR)

Die Messung von CO und CO<sub>2</sub> erfolgt bevorzugt über einen nichtdispersiven Infrarot-Analysator (NDIR), wie in Abbildung 3-16 dargestellt ist. Das Prinzip, das der Messung zugrunde liegt, ist die Absorption bestimmter Wellenlängen der Infrarot-Strahlung von mehratomigen Gasen, welche für jedes einzelne Gas spezifisch ist. Der NDIR selbst ist aufgebaut aus einer Messzelle (2), einer Referenzzelle (7), einer Lichtquelle (5), dem Blendenrad (8) und dem Detektor (9). Über die Zu-(3) und Ableitungen (1) strömt das zu messende Gas in die Messzelle und verringert, je nach Konzentration von CO oder CO<sub>2</sub>, durch Absorption die Strahlung (6) der Lichtquelle. In der Referenzzelle befindet sich ein Inertgas (z.B. N<sub>2</sub>), welches die Infrarot-Strahlung nicht absorbiert. Im Anschluss treffen die Strahlengänge auf das Blendenrad, wo sie gleichzeitig periodisch unterbrochen oder in den mittels einer Metallmembran getrennten Detektor durchgelassen werden. Sollte es in beiden Zellen zu einer gleich starken Absorption gekommen sein, so gibt es im Detektor eine Temperatur- und Druckschwankung die phasen- und intensitätsgleich sind. Dieser Fall hat keine Auswirkungen auf die Metallmembran zwischen den Kammern. Wenn es zu einer größeren Absorption in der Messzelle durch CO oder CO<sub>2</sub> als in der Referenzzelle kommt, kommt es zu unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichem Druck in den Detektorkammern. Die Folge ist ein Durchbiegen der Metallmembran zwischen den Detektorkammern. Diese Durchbiegung wird über eine elektronische Messkette ausgewertet und ist ein Maß für die Konzentration. Zu beachten ist die starke Querempfindlichkeit des NDIR-Analysator gegen Wasserdampf, deshalb muss das Abgas getrocknet werden, bevor es dem Analysator zugeführt wird. [7], [14]

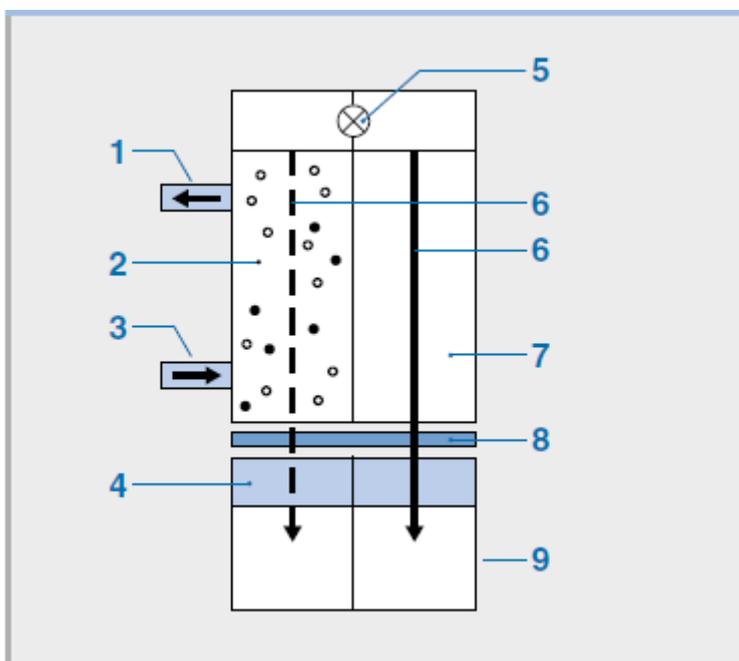


Abbildung 3-16: Nichtdispersiver Infrarot-Analysator [7]

### 3.4.2.2 Nichtdispersiver Ultraviolett-Analysator (NDUV)

Im Wesentlichen entspricht das Messprinzip des nichtdispersivem UV-Analysator jenem des NDIR. Der Unterschied ist, dass der Analysator zwei Strahlungsquellen besitzt, die UV-Strahlung verschiedener Wellenlängen emittieren. Das Messprinzip entspricht dem des NDIR wobei in diesem Fall für NO eine elektrodenlosen Entladungslampe und für NO<sub>2</sub> eine UV-LED zum Einsatz kommt. NDUV-Analysatoren werden vermehrt von PEMS-Herstellern eingesetzt, da auf den Einsatz von Betriebsgasen verzichtet werden kann und NO<sub>2</sub> direkt gemessen wird. Im Vergleich dazu ist bei einem anderen Verfahren (Chemolumineszenzmessung, siehe [14]) zur NO<sub>x</sub>-Messung ein Betriebsgas notwendig. [15]

### 3.4.2.3 Flammenionisationsdetektor (FID)

Das Prinzip des FID ist die temporäre Ionisierung eines Teils der Kohlenstoffradikalen, die sich durch Verbrennung des Messgases (5) in einer Wasserstoffflamme (8) bilden. An einer Sammelelektrode (2) werden diese Radikalen entladen. Der dadurch entstehende Strom wird durch den Verstärker (3) verstärkt und gemessen; er ist direkt proportional dem Kohlenwasserstoffgehalt im Messgas. Mithilfe des FID misst man summarisch alle Kohlenwasserstoffe im Messgas. Zu beachten ist dabei nur, dass es zu keiner Kondensation in der Probenahme und im Analysator kommt. Um dies zu verhindern, müssen die Leitungen und das FID selbst beheizt werden. (190 °C +/-10 °C) [14], [7]

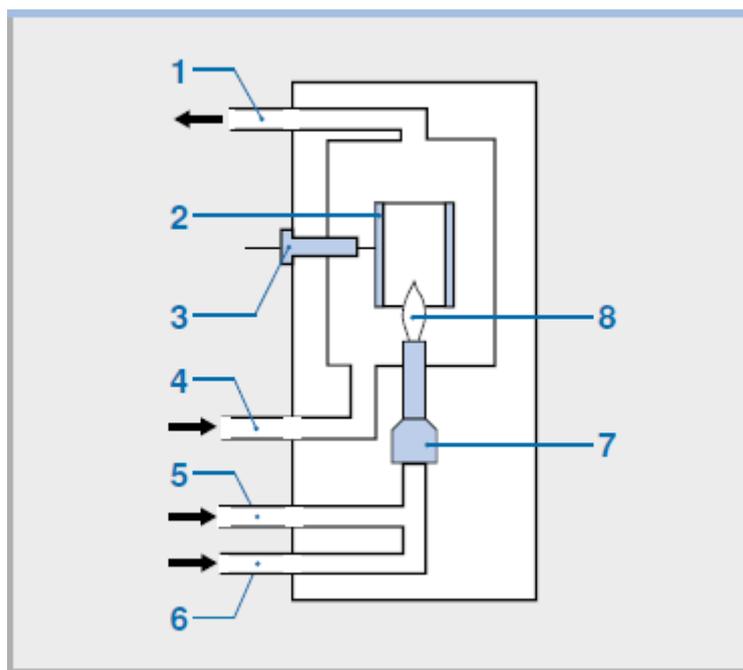


Abbildung 3-17: Flammenionisationsdetektor [7]

### 3.4.2.4 Photoakustische Spektroskopie

Die Messung von Ruß wird mithilfe der photoakustischen Spektroskopie (Abbildung 3-18) durchgeführt. Die Abgasprobe wird mittels eines Laserstrahls beleuchtet. Durch die Absorption der Laserstrahlen erwärmen sich die Rußpartikel. Infolge der Erwärmung und Abkühlung kommt es zur Ausdehnung und Kontraktion des Trägergases. Die daraus resultierenden Druckschwingungen werden von einem Mikrophon detektiert, wobei saubere Luft kein Signal produziert. Das detektierte Signal steigt proportional mit der Rußkonzentration im Messgas. [4]

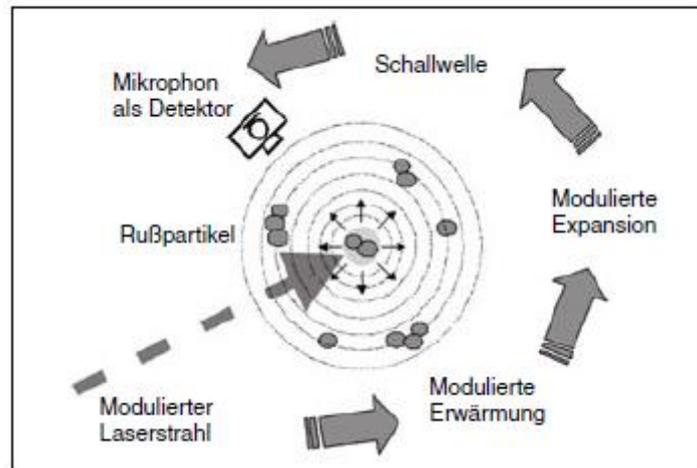


Abbildung 3-18: Messprinzip-Photoakustik [4]

### 3.4.2.5 Massenstrommessung

Da die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Analysatoren nur die Konzentrationen der gasförmigen Komponenten ermitteln ist eine Massenstrommessung erforderlich. Diese wird mittels eines Exhaust Flow Meter (EFM) der Firma Sensors durchgeführt. Das Messprinzip in diesem Fall ist das Staudruckprinzip (Pitot-Rohr). Mithilfe eines eingebauten Temperatursensors und eines Durchflussrechners können auch temperaturabhängige Massenströme berechnet werden. [12]

## 4 Messung

Das vorliegende Kapitel zum Thema „Messung“ ist in drei Teile gegliedert. Als erstes wird das Fahrzeug an dem die RDE Messung durchgeführt wurde, kurz vorgestellt. Im nächsten Schritt werden der Messaufbau, die gefahrenen Messstrecken und das Messprogramm erläutert. Zum Ende wird die Datenauswertung beschrieben und ein Überblick über die erhaltenen Messdaten gegeben.

### 4.1 Versuchsfahrzeug

Bei dem Fahrzeug in Abbildung 4-1, handelt es sich um das Fahrzeug 1 mit EURO 6 der Klasse N1 III (leichtes Nutzfahrzeug), der hauptsächlich im städtischen Verteilerverkehr eingesetzt wird. In diesem Fall ist das Fahrzeug als leichtes Nutzfahrzeug zugelassen, da die Referenzmasse – Leergewicht ohne Aufbau - unter den geforderten 2830 kg liegt. Das gleiche Fahrzeug mit kann aber auch als N2, also als schweres Nutzfahrzeug, zugelassen werden. Die Hardware des Motors ist in beiden Fällen die gleiche.



Abbildung 4-1: Fahrzeug 1

Die Abgasnachbehandlung besteht im Wesentlichen, wie in Abbildung 4-2 dargestellt, aus dem Partikelfilter, Oxidationskatalysator, SCR-Katalysator und dem NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysator (CUC, Clean up Catalyst).

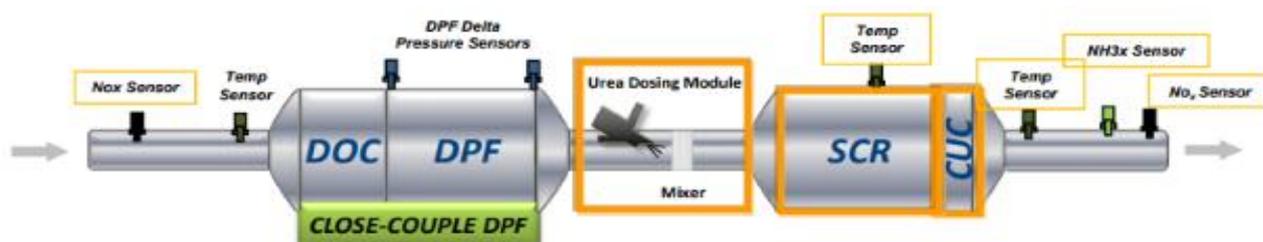


Abbildung 4-2: Schema Abgasnachbehandlung Fahrzeug 1 EURO VI [16]

Das Abgas durchströmt zuerst den DOC, wo es zur Oxidation von CO, HC und Teilen des NO kommt. Wie in Kapitel 3.2.1.4 bereits erwähnt, wird hierdurch das Verhältnis von  $\text{NO}_2/\text{NO}$  angehoben, was sich positiv auf die Konvertierungsrate auswirkt, gefolgt von einem DPF. Bevor das Abgas in den SCR Katalysator kommt, wird es mit dem Reduktionsmittel AdBlue vermischt.

Eine innermotorische Maßnahme zur Reduktion der Stickoxide, die im Fahrzeug 1 eingesetzt wird, ist die AGR, diese Maßnahme wurde in Kapitel 3.2.2 beschrieben.

In der folgenden Abbildung 4-3 ist die Volllast- und Schleppkurve dargestellt; diese Kurven werden auch später bei der Simulation benötigt. In Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3 sind technische Daten, Getriebeübersetzungen und das Volumen des Abgasstrangs eingetragen.

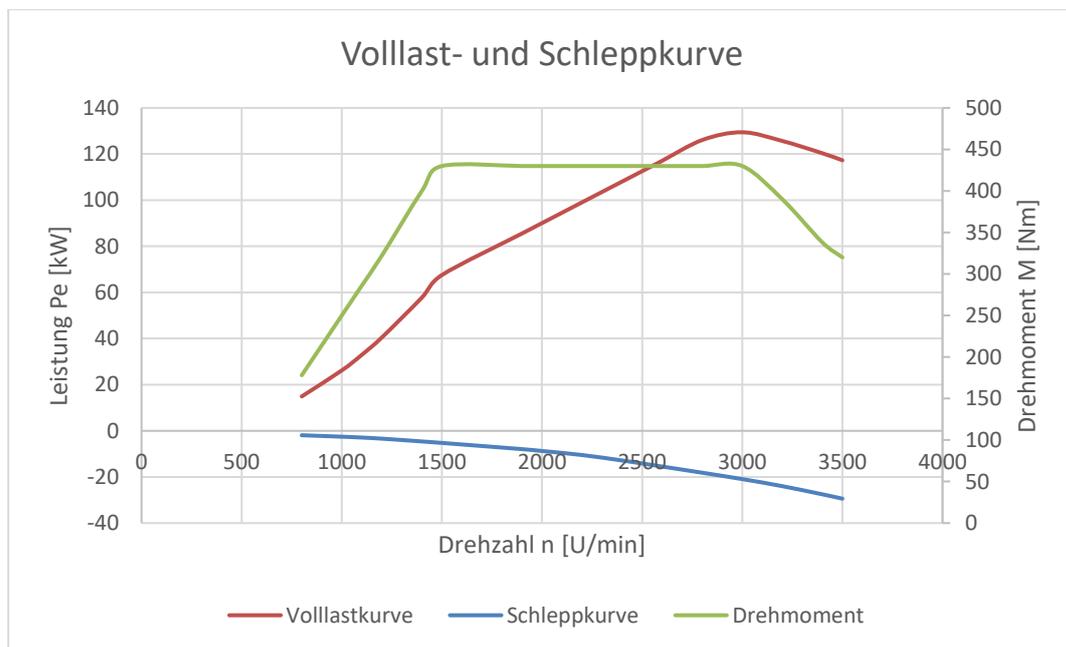


Abbildung 4-3: Volllast- und Schleppkurve Fahrzeug 1

Motor:	F1C
Hubraum:	3,0 L
Nennleistung:	132 kW
AGR	Ja
Abgasnorm:	Euro 6
Nenndrehzahl:	3100 U/min
Leerlaufdrehzahl:	800 U/min
Gesamtmasse:	6200 kg
Leermasse:	4100 kg
Beladung:	2100 kg
Getriebe:	6-Gang Schaltgetriebe, 2840.6 OD
Reifen Antriebsräder:	225/75 R16C
Fahrzeugklasse:	N2

Tabelle 4-1: Technische Daten

	Übersetzung
1.Gang	5,375
2.Gang	3,154
3.Gang	2,041
4.Gang	1,365
5.Gang	1,000
6.Gang	0,791
Rückwärtsgang	4,838
Achsübersetzung	4,44

Tabelle 4-2: Getriebeübersetzung

	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Volumen [dm <sup>3</sup> ]
Rohr (TC-DOC/DPF)	350	85	1.99
DOC/DPF	380	195	11.35
Rohr (DOC/DPF-SCR)	900	76	4.08
SCR	300	200	9.42
EFM	1500	76	6.8
Gesamt			33.65

Tabelle 4-3: Abmessungen Abgasnachbehandlung

## 4.2 Messstrecken

Wie in Tabelle 3-2 beschrieben, benötigt man für unterschiedliche Gewichtsklassen verschiedene Zeitanteile in der gefahrenen Strecke. Im Falle des Fahrzeug 1, das als N2 klassifiziert ist, werden 45 % Stadt-, 25 % Überland- und 30 % Autobahnanteile benötigt. Dementsprechend wurden die zwei f Strecken, Köflach und Ries, gefahren. Da für die Masterarbeit ein Niedriglastzyklus erforderlich war, wurde des Weiteren eine Stadtroute gefahren, um mittels niedriger Lasten ein mögliches Auskühlen der Abgasnachbehandlung zu erzielen. Somit wird, wie in Kapitel 3.2.1.2 erwähnt, die Eindosierung des AdBlue gestoppt und das NH<sub>3</sub>-Speicherverhalten des Fahrzeugs getestet. Vor den jeweiligen Testfahrten wurde eine Aufwärmrunde durchgeführt, um das Fahrzeug auf Betriebstemperatur zu bringen. Dies wäre nach den neuen Gesetzgebungen [10] nicht mehr zulässig, für weitere Untersuchungen ist die Aufwärmrunde aber nicht relevant, da nur Emissionen des betriebswarmen Motors verwendet werden. Aus diesem Grund wird sie auch nicht näher beschrieben.

### 4.2.1 Route Köflach

In der folgenden Abbildung 4-4: Route Köflach Abbildung 4-4 ist die gefahrene Route Köflach dargestellt.

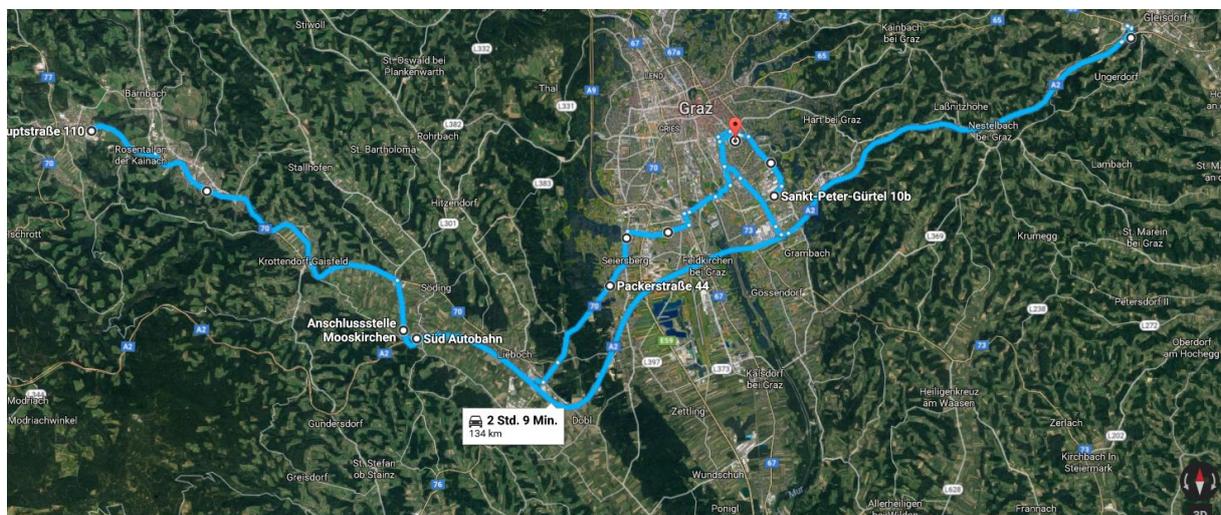


Abbildung 4-4: Route Köflach [17]

Die Herausforderung im Erstellen einer gesetzeskonformen Route besteht in der Einhaltung der einzelnen Anteile der Strecke, da es sich hier nicht um Strecken- sondern Zeitanteile handelt und im Vorhinein die Verkehrslage, vorallem in der Stadt, schwer einzuschätzen ist und sich laufend ändert. Die Gesamtlänge der Köflach Route, Abbildung 4-4, entspricht 134 km. Der Start befindet sich am St. Peter-Gürtel 10B und führt von dort über die St. Peter Hauptstraße durch das Grazer Stadtgebiet in Richtung Puntigam. Von dort aus geht es weiter in Richtung Lieboch auf die Packer Straße/B70, dort angekommen auf die Autobahn A2 in Richtung Klagenfurt. Die Autobahn wird über die Abfahrt Mooskirchen verlassen und es wird wieder auf die Packer Straße/B70, Richtung Köflach, gewechselt. In Köflach wird das erste Mal gewendet und die Route geht über die Auffahrt Mooskirchen zurück auf die Autobahn A2 in Richtung Graz/Wien. Auf der Höhe Gleisdorf West wird das zweite Mal gewendet. Nach erneutem Auffahren auf die Autobahn A2 in Gleisdorf West wird diese über die Abfahrt Graz-Ost wieder verlassen. Von dort führt der Weg über die Münzgrabenstraße zurück auf die TU-Graz Inffeldgasse 25B.

#### 4.2.2 Route Ries

In der folgenden Abbildung 4-5 Abbildung 4-4: Route Köflach ist die gefahrene Route Ries dargestellt.

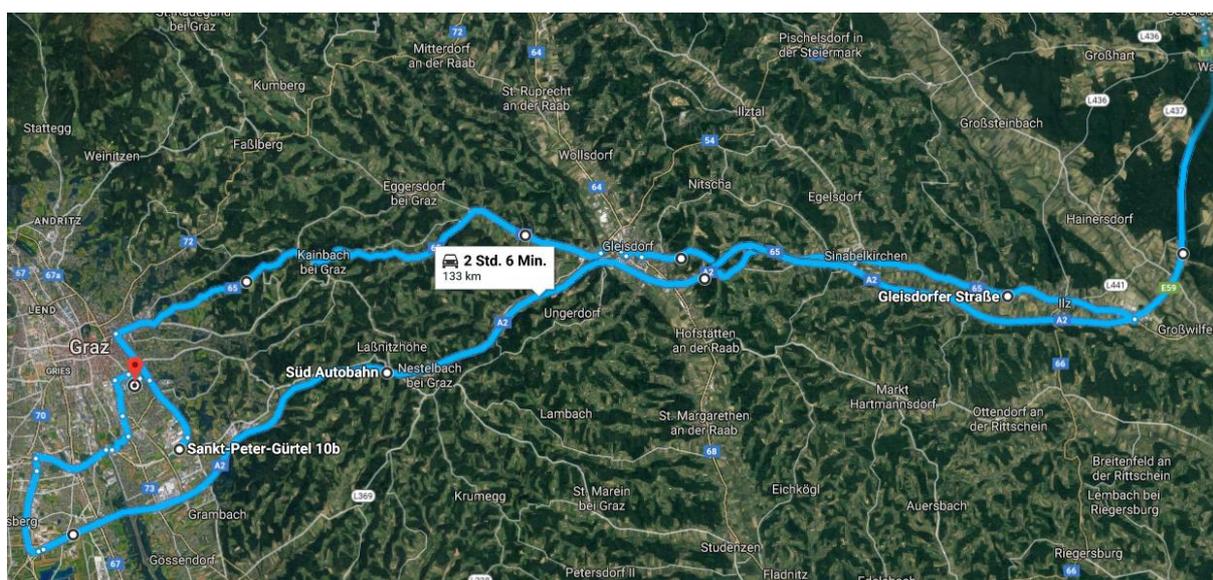


Abbildung 4-5: Route Ries [17]

Die 133 km lange Ries Route, Abbildung 4-5, beginnt ebenfalls am St. Peter-Gürtel 10B und folgt der St. Peter Hauptstraße ins Grazer Stadtgebiet. Über die Plüddemanngasse und Elisabethstraße geht es weiter auf die Riesstraße/B65. Dem Verlauf der Landesstraße/B65 wird bis zur Autobahnauffahrt Fürstenfeld gefolgt, wo es zu einem Wechsel auf die Autobahn A2 in Richtung Wien kommt. Die Autobahn wird über die Abfahrt Bad Waltersdorf verlassen, hier wird gewendet und wieder auf die Autobahn A2, Richtung Graz/Klagenfurt, aufgefahren. Über den Knoten Graz-West geht die Streckenführung weiter über die Autobahn A9 in Richtung Puntigam. Von dort aus geht es zurück über den Südgürtel, Liebenauer Hauptstraße und Münzgrabenstraße zum Zielort, der Inffeldgasse 25B.

### 4.2.3 Stadtroute

In der folgenden Abbildung 4-6 ist die gefahrene Stadtroute dargestellt.



Abbildung 4-6: Stadtroute [17]

Die Intention in der Gestaltung der Stadtroute war die Abgasnachbehandlung so gut wie möglich abzukühlen um einen Dosierungstopp des Reduktionsmittels zu erwirken, sodass die SCR-Anlage auf das eingespeicherte  $\text{NH}_3$  zugreifen muss, um die entstehenden Stickoxide zu reduzieren. Gelingen sollte dies mit Stausituationen im Grazer Stadtgebiet. Die Route selbst startet, wie die anderen Routen, wieder am St. Peter-Gürtel 10B und folgt der St. Peter Hauptstraße in das Stadtgebiet. Über die Plüddemangasse und Elisabethstraße geht es weiter in Richtung Stadtkern über die Glacisstraße in die Wilhelm-Fischer-Allee. Hier beginnt die Runde um den Schloßberg, die solange gefahren wird bis sich die Abgasanlage genügend abgekühlt hat. Die Runde verläuft von der Wilhelm-Fischer-Allee ausgehend über den Burgring, Opernring und Joanneumring über die Radetzkybrücke auf die andere Seite der Mur. Von dort aus führt sie weiter zum Griesplatz, in die Josef-Huber-Gasse bis zur Kreuzung mit dem Eggenberger Gürtel. Diesem Straßenverlauf wird bis zur Höhe Hauptbahnhof gefolgt, wo es über die Keplerstraße, Keplerbrücke, Wickenburggasse und Glacisstraße zurück zum Anfang der Runde geht. Hier wird je nach Temperatur während der Fahrt entschieden, ob es zu einer weiteren Runde kommt oder die Fahrt über die Rechbauerstraße und Petersgasse, zurück zum Zielort Inffeldgasse 25B, abgeschlossen wird.

### 4.3 Messaufbau und eingesetzte Messtechnik

Der Messaufbau und die dabei eingesetzte Messtechnik werden im Folgenden kurz erläutert. Für eine detailliertere Ausarbeitung, wie bei RDE Messungen mithilfe des PEMS Emissionen gemessen werden, wird auf [12] verwiesen.

#### 4.3.1 Messaufbau



Abbildung 4-7: Messaufbau Fahrzeug 1

Wie in Abbildung 4-7 zu sehen ist, wurde das PEMS, rechts im Bild, auf der Ladefläche untergebracht und mithilfe eines Stromgenerators, links im Bild, mit Energie versorgt. Ebenfalls auf der Abbildung zu erkennen sind die Kalibriergasflaschen, das benötigt wird, um die in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Analysatoren zu kalibrieren.

Weiters ist in Abbildung 4-8 der ausgebaute SCR-Katalysator mit der Dosierstrecke zu sehen. Wie aus dem Bild zu entnehmen ist, wurden an den gekennzeichneten Stellen Temperaturfühler und ein NO<sub>x</sub> Engine Out Sensor angebracht. Alle drei hier gemessenen Größen sind relevant für die Erstellung eines NO<sub>x</sub> -Konvertierungskennfeldes. Die Positionen der Temperaturfühler wurden so gewählt, dass jeweils einer vor und einer nach dem Katalysator angebracht wurde, um die Temperatur des Katalysators selbst, durch Gewichtung der angebrachten Temperaturfühler, zu ermitteln. Der NO<sub>x</sub> Engine Out Sensor muss vor der Dosierstelle des Reduktionsmittels angebracht werden, da eine Querempfindlichkeit zum sich bildenden NH<sub>3</sub> besteht. In Abbildung 4-9 ist der SCR-Katalysator mit installierten Sensoren und EFM im eingebauten Zustand dargestellt.



Abbildung 4-8: Ausgebauter SCR-Katalysator mit gekennzeichneten Stellen für die Sensoren



Abbildung 4-9: Eingebauter SCR-Katalysator mit EFM

## 4.3.2 Messtechnik

Zur Durchführung der Messung wurden verschiedene Messgeräte eingesetzt. In den folgenden Kapiteln sollen diese vorgestellt und die Größen, die sie messen, erläutert werden. Für eine detailliertere Erklärung der eingesetzten Messtechnik bei RDE-Messungen wird auf [12] verwiesen.

### 4.3.2.1 Semtech



Abbildung 4-10: Messsystem Semtech DS [13]

Zur Erfassung der gasförmigen Abgaskomponenten wurde das Semtech DS Messsystem der Firma Sensors und das EFM verwendet (Abbildung 4-10). Die Proben werden direkt aus dem unverdünnten Abgas entnommen und über eine beheizte Leitung den einzelnen Analysatoren, siehe Kapitel 3.4.2.1 bis 3.4.2.4, zugeführt. Um die Leitung auf die erforderlichen 190 °C zu bringen, musste das Messsystem zwei Stunden vor der ersten Messung eingeschaltet werden,

um den Aufheizvorgang zu starten. Die Kalibrierung wurde jeweils vor der Messfahrt mittels einer 2-Punkt-Kalibrierung mithilfe von Nullgas und Mischgas durchgeführt. Des Weiteren werden mit dem Semtech DS die GSP-Daten aufgezeichnet.

#### 4.3.2.2 VBOX

Mit Hilfe der VBOX von Racelogic wurde die geodätische Höhe, die genaue Fahrzeugposition und die Fahrgeschwindigkeit über ein GPS-System ermittelt. Die dafür notwendige Antenne wurde am Ende des Fahrzeugs in der Mitte des Daches angebracht. Die GPS Daten der VBOX werden für die Validierung der Semtech-GPS-Daten verwendet. Des Weiteren wurde die Abgastemperatur, die mithilfe zweier Thermoelemente gemessen wurde, siehe Abbildung 4-8, aufgezeichnet.

#### 4.3.2.3 CAN-Daten

Über den CAN-Bus sind verschiedene Daten verfügbar wie zum Beispiel: Motordrehzahl, Fahrgeschwindigkeit, Kühlmitteltemperatur und Drehmoment. Diese Daten werden mit der Analyse Software CANalyser dargestellt und ausgewertet.

In einem vorangegangenen Projekt konnte der Zeitpunkt und die Menge der Eindsosierung des Reduktionsmittels aufgezeichnet werden. Wie in einem späteren Kapitel gezeigt wird, ist dies eine wichtige Information zur Parametrisierung des  $\text{NH}_3$ -Speicherstandsmodell.

#### 4.3.2.4 NO<sub>x</sub> Engine-Out Messung

Um eine Aussage über die Effizienz des SCR-Katalysators und in weiterer Folge auch für die Simulation benötigten Konvertierungsrate zu treffen, ist es notwendig die NO<sub>x</sub> Engine out zu erfassen. Wie bereits in Kapitel 4.3.1 erwähnt, ist es wichtig, dass diese Messstelle vor der Eindsosierung des Reduktionsmittels, erfolgt da der Sensor eine Querempfindlichkeit bezüglich des  $\text{NH}_3$  aufweist. Zu diesem Zweck wurde der Sensor in dem Rohr nach dem DOC/DPF angebracht. In Abbildung 4-11 ist ein solcher NO<sub>x</sub>-Sensor exemplarisch dargestellt.

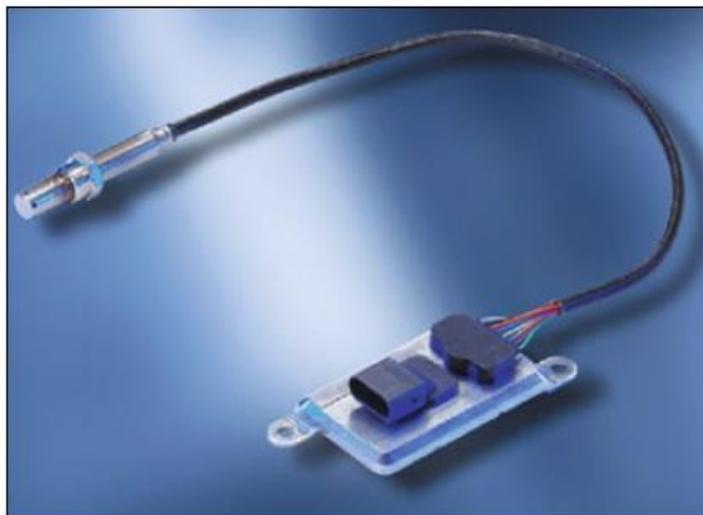


Abbildung 4-11:NO<sub>x</sub>-Sensor mit Steuerelektronik [1]

#### 4.3.2.5 Soot Sensor

Zur Messung der im Abgas enthaltenen Rußpartikeln wurde ein Micro Soot Sensor der Firma AVL verwendet. Das Messprinzip ist in Kapitel 3.4.2.4 erklärt.

### 4.3.3 Messprogramm

Die in Kapitel 4.2 vorgestellten Routen wurden jeweils zweimal gefahren, um verschiedene

Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen abzudecken und um eine größere Anzahl von Messdaten zu erhalten. Die Reihenfolge und das jeweilige Datum der Fahrten ist in Tabelle 4-4 dargestellt. Wie dort zu sehen ist, musste die Route Köflach wiederholt werden, da es in den ersten beiden Fahrten mehrfach über den Zyklus verteilt zu Ausfällen des Nox Engine Out Sensors kam. Ohne diesen Datensatz konnten aus diesem Zyklus keine relevanten Informationen zu den NOx-Konvertierungsraten gewonnen werden. Während der restlichen Fahrten kam es zu keinen Problemen mit dem NOx Engine Out Sensor, aber zu Problemen mit der Messung der NO-Tailpipe. Bei diesen kam es einmal mehr und einmal weniger stark zu Drifts während der Messung. Im Anschluss zur Messung wurde bei der Durchsicht der Rohdaten wurde festgestellt, dass hier eine Driftkorrektur bei allen Messungen notwendig ist. Diese Driftkorrektur wird in einem nachfolgenden Kapitel genauer beschrieben. Die Abkürzungen „VM“ und „NM“ in der Tabelle bedeuten Vormittag und Nachmittag.

<b>Datum</b>	<b>Messroute</b>
10.10.2017	Köflach VM
10.10.2017	Köflach NM
11.10.2017	Köflach VM
11.10.2017	Köflach NM
12.10.2017	Ries VM
12.10.2017	Ries NM
13.10.2017	Stadtroute VM
13.10.2017	Stadtroute NM

Tabelle 4-4: RDE-Messungen

## **4.4 Auswertung der Messdaten**

Dieses Kapitel beinhaltet die Vorgehensweise der Auswertung der Messdaten, exemplarisch an einer Messung erklärt. Für die weiteren Messungen wurde nach dem gleichen Schema vorgegangen.

### **4.4.1 NO-Tailpipe Driftkorrektur**

Vor der eigentlichen Auswertung der Daten musste, wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, eine Driftkorrektur durchgeführt werden. In Abbildung 4-12 ist die Drift während einer Messung dargestellt.

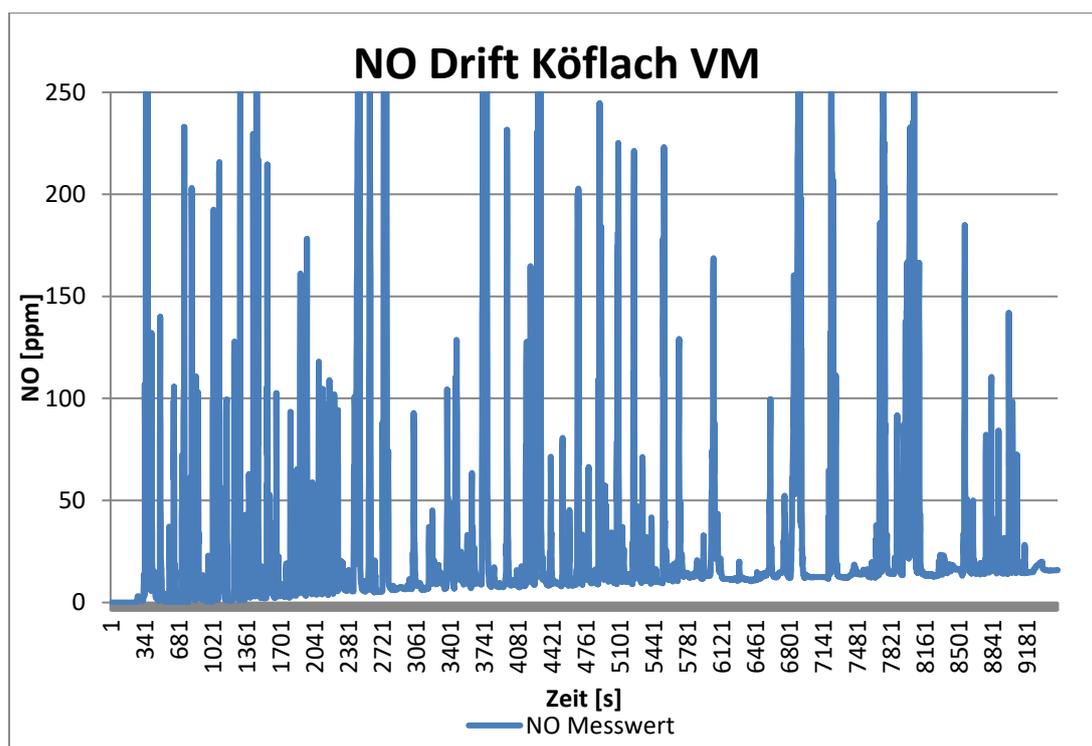


Abbildung 4-12: NO Drift

Um die Driftkorrektur, wie in Gleichung (3-16) dargestellt durchzuführen wäre eine Kalibrierung vor und nach der Messung notwendig gewesen. Da dies aber nicht der Fall war und die Kalibrierung nur vor der Messung durchgeführt wurde, musste auf eine andere Driftkorrektur zurückgegriffen werden.

Durch die Form des Drifts ist eine Korrektur mittels einer einfachen Geradengleichung naheliegend. Für die Berechnung der Steigung wurden der Anfangs- und Endwert herangezogen. Die NO-Emissionen die für die weiteren Untersuchungen herangezogen wurden, wurden durch die Subtraktion der Gerade von den Messwerten ermittelt. In Abbildung 4-13 sind - zusätzlich zu den gemessenen Werten (blau) - die korrigierten Werte (grün) und die Korrekturgerade (rot) eingezeichnet. Anzumerken ist, dass es nicht immer möglich war die Korrektur mit einer Geraden durchzuführen. Bei vereinzelt Zyklen war es notwendig, zwei oder mehr Geraden für unterschiedliche Bereiche zu verwenden.

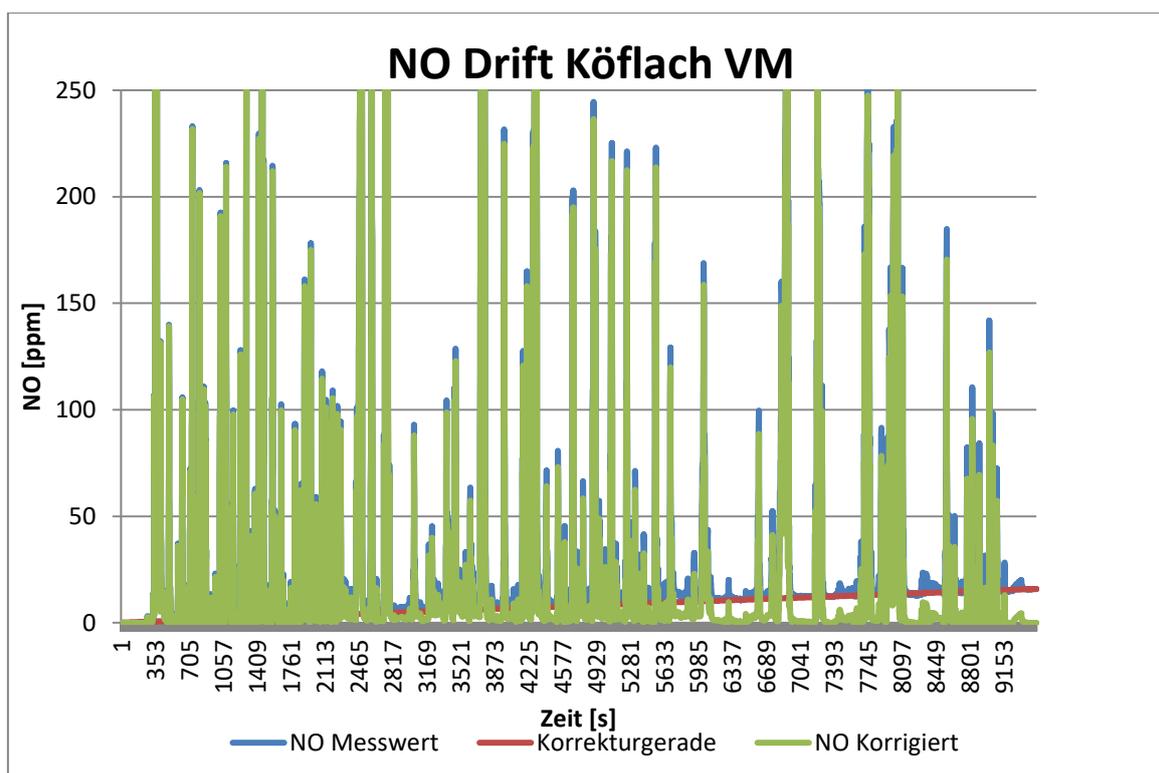


Abbildung 4-13: NO mit Driftkorrektur

Zur Berechnung der Drift der NO-Emissionen und zur Überprüfung, ob der Zyklus noch gesetzeskonform wäre, mussten die spezifischen Emissionen ermittelt werden. Die Umrechnung der Konzentration [ppm] aus den Analysatoren zur Emissionsmasse [g/h] wird mittels Gleichung (4-1) durchgeführt.

$$E_M = E_K * ExMf * \frac{M_{Komp}}{M_{Abgas}} \quad (4-1)$$

$E_M$  Emissionsmasse [g/h]

$E_K$  Emissionskonzentration [ppm]

$ExMf$  Massenstrom [kg/h]

$M_{Komp}$  Molare Masse der Komponente [kg/kmol]

$M_{Abgas}$  Molare Masse des Abgases [kg/kmol]

Die Gleichung (4-2) zeigt die Variante der Gleichung (4-1) für die Emissionsmasse von NO. Die Berechnung ist NO<sub>2</sub> äquivalent aus diesem Grund besteht der Konstante Wert von 1,589 aus dem Verhältnis der molaren Masse von NO<sub>2</sub> zu der molaren Masse des Abgases.

$$NO_{mass} = NO_{roh} * m_{Abgas} * 1,589 * 10^{-3} \quad (4-2)$$

Wie in Tabelle 4-5 zu sehen ist, ist die Abweichung um ein Vielfaches größer als die maximal erlaubten +/- 6%, um als gesetzeskonform anerkannt zu werden. Ebenfalls ist ersichtlich, dass bei NO<sub>2</sub> keine Driftkorrektur durchgeführt wurde, da es nicht erforderlich war.

In den folgenden Auswertungen wird stets mit den korrigierten NO-Werten gearbeitet, außer es wird explizit erwähnt, dass es sich bei den verwendeten Werten um jene aus der Messung handelt.

	NO	NO2	NOx
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Gemessen	0.363	0.130	0.471
Korrigiert	0.292	0.130	0.422
Abweichung	20%	0	11%

Tabelle 4-5: Abweichung Messung-korrigierte Werte

#### 4.4.2 Berechnung und Zeitverschiebung der Emissionsmassen

Der erste Schritt der eigentlichen Datenauswertung bestand aus der Berechnung der Emissionsmassen der gasförmigen Komponenten wie CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und HC und der anschließenden Signalzuordnung eben dieser mithilfe des ERMES Tool. Das bedeutet, dass die Daten, die am Ende des Abgasstrangs gemessen wurden, zum Motorauslass verschoben werden, damit die Emissionsmassen zu den jeweiligen Betriebspunkten richtig zugeordnet werden können. Die Berücksichtigung der Variabilität des Massenstromes ist für diese Zuordnung notwendig. Hierfür wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen eine Methode entwickelt, welche die variablen Transportzeiten auf Basis des Abgasmassenstroms der Volumina und der Temperatur im System bestimmt. Diese Methode stellt eine Verbesserung im Vergleich zur bisher verwendeten konstanten Zeitverschiebung dar, bei der jeder sekundliche Wert unabhängig vom Massenstrom um die gleiche Zeit verschoben wird. Für eine detailliertere Erklärung wird auf [18] verwiesen.

#### 4.4.3 Signalzuordnung

Durch die unterschiedlichen Messsysteme (Kapitel 4.3.2), die in der RDE-Messung verwendet wurden, ist es notwendig die erhaltenen Daten einander zuzuordnen. Dies geschieht manuell in einem Excel-File, in dem alle Ergebnisse der einzelnen Systeme zusammengeführt werden. Die Basis für die Verschiebung stellt die Fahrgeschwindigkeit, die über die CAN-Daten ermittelt wurde, dar. In Abbildung 4-14 ist dies exemplarisch für eine Messung dargestellt. Die Fahrgeschwindigkeit, die durch das Semtech ermittelt wird (rot), wird in „miles per hour“ ausgegeben.

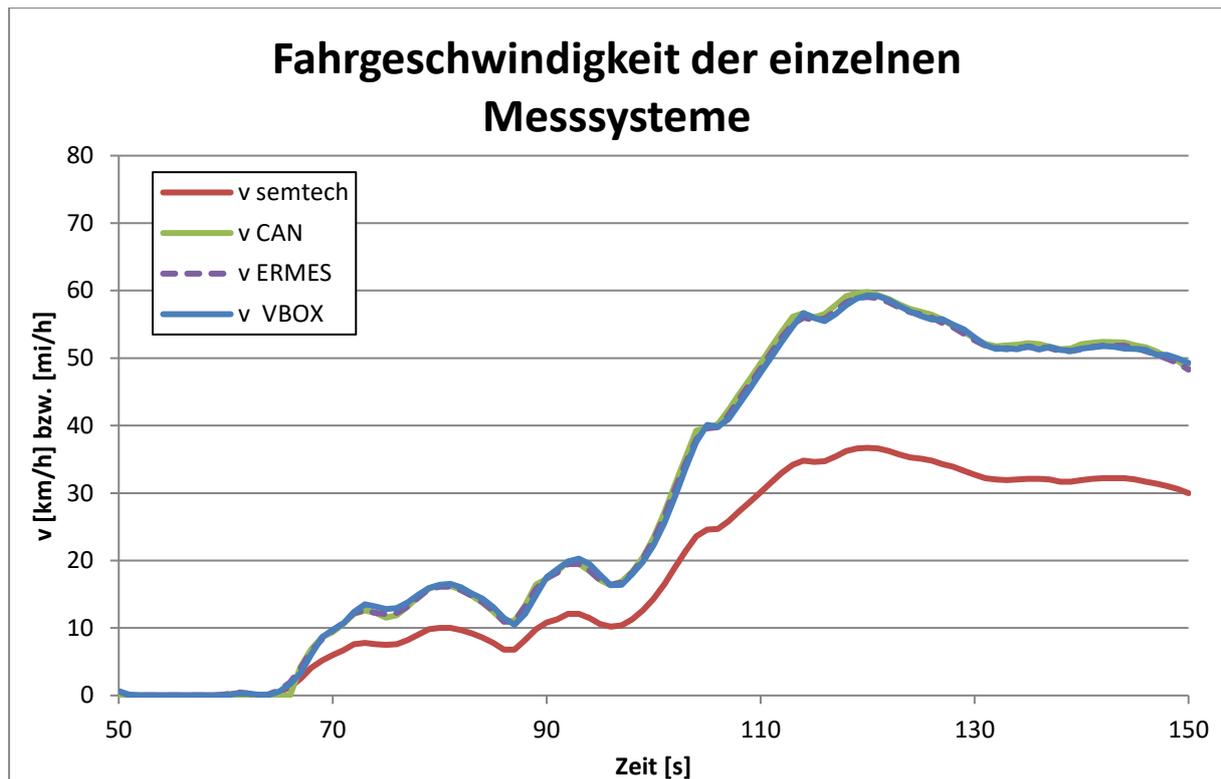
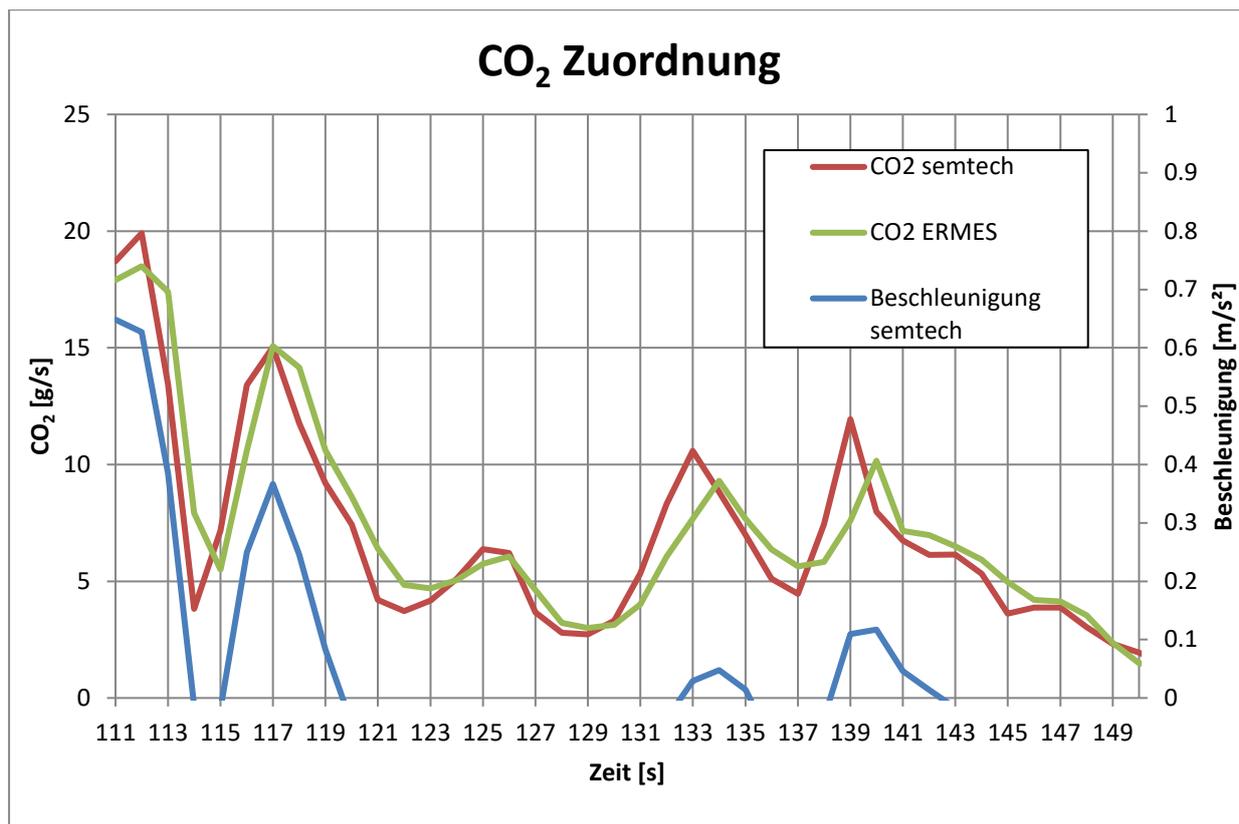


Abbildung 4-14: Fahrgeschwindigkeit der einzelnen Messsysteme

Die restlichen Werte wie Motordrehzahl, Emissionen und Massenstrom werden nach dem gleichen Prinzip geordnet. Dabei werden als Basis immer Werte einer vorhergehenden Zuordnung verwendet.

In Abbildung 4-15 ist zu sehen, dass die Beschleunigung, die aus der Geschwindigkeit und der Zeit berechnet wurde, als Basis für die CO<sub>2</sub>-Emissionen genommen wird. Für die Beschleunigung des Fahrzeugs muss Leistung erbracht werden und somit wird Kraftstoff in den Motor eingespritzt. Somit sollten CO<sub>2</sub>-Spitzen zu Beschleunigungssoitzen passen. Dabei kann nun der Unterschied zwischen konstanter Zeitverschiebung (Semtech) und variabler (ERMES) verglichen werden. Da das CO<sub>2</sub> Semtech (rot) konstant verschoben ist, kommt es bei verschiedenen Lastbereichen zu einem Fehler in der Zuordnung zu den Motorbetriebspunkten.

Abbildung 4-15: CO<sub>2</sub> Zuordnung

Die restlichen Emissionen bei der ERMES Variante werden gleich verschoben wie das CO<sub>2</sub>. Die Umrechnung der jeweiligen Konzentrationen [ppm] in die Emissionsmassen [g/h] ergibt sich durch Gleichung (4-1). Die Gleichung (4-1) für das NO ist im Prinzip die selbe wie die hier angeführte Gleichung, aber bereits mit den eingesetzten Werten und Umrechnungen.

#### 4.4.4 Leistungsberechnung

Grundsätzlich gibt es drei Varianten, um die Leistung bei RDE-Messungen zu bestimmen. Die erste wäre über das CAN-Signal, eine weitere über eine Längsdynamiksimulation oder über die sogenannte „CO<sub>2</sub>-Methode“.

Für die weitere Auswertung und Betrachtung wurde entschieden, die Leistung mittels der „CO<sub>2</sub>-Methode“ zu berechnen. Anschließend wird die somit errechnete Leistung mit der Leistung aus dem CAN-Signal validiert. Im Kapitel 5.1.3 wird die Methode kurz erläutert.

#### 4.4.5 Auswertung EMROAD

Die endgültige, für die Überprüfung der Gesetzeskonformität notwendige Auswertung wurde mithilfe des EMROAD Tool durchgeführt. [19] Das Verfahren, das in diesem Tool angewendet wird, entspricht dem „Averaging window principle“ und wurde bereits in Kapitel 3.3.2 vorgestellt. Die Ergebnisse werden direkt in [g/kWh] angezeigt, sodass ein sofortiger Vergleich mit den Grenzwerten, siehe Tabelle 3-3, möglich ist.

### 4.5 Messergebnisse

Wie bereits beschrieben, wurden die Messdaten auf ihre Gesetzeskonformität überprüft. Diese Überprüfung beinhaltet nicht nur die Grenzwerte bezüglich der Emissionen, sondern auch jene der einzelnen Zeitanteile der Strecke.

In den folgenden Abbildungen sind die einzelnen Ergebnisse der Emissionen anhand der gefahrenen Strecke geordnet und mit dem jeweiligen Grenzwert, durch die rote Linie angedeutet, verglichen.

<b>Auswertung EMROAD 90% Perzentil</b>			
Route	CO	THC	NOx
	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
Köflach VM	0.326	0.007	0.702
Köflach NM	0.225	0.005	1.044
Ries VM	0.323	0.008	1.179
Ries NM	0.325	0.001	1.040
Grenzwert	6.000	0.240	0.690

Tabelle 4-6: Gesamtergebnisse IVECO Daily

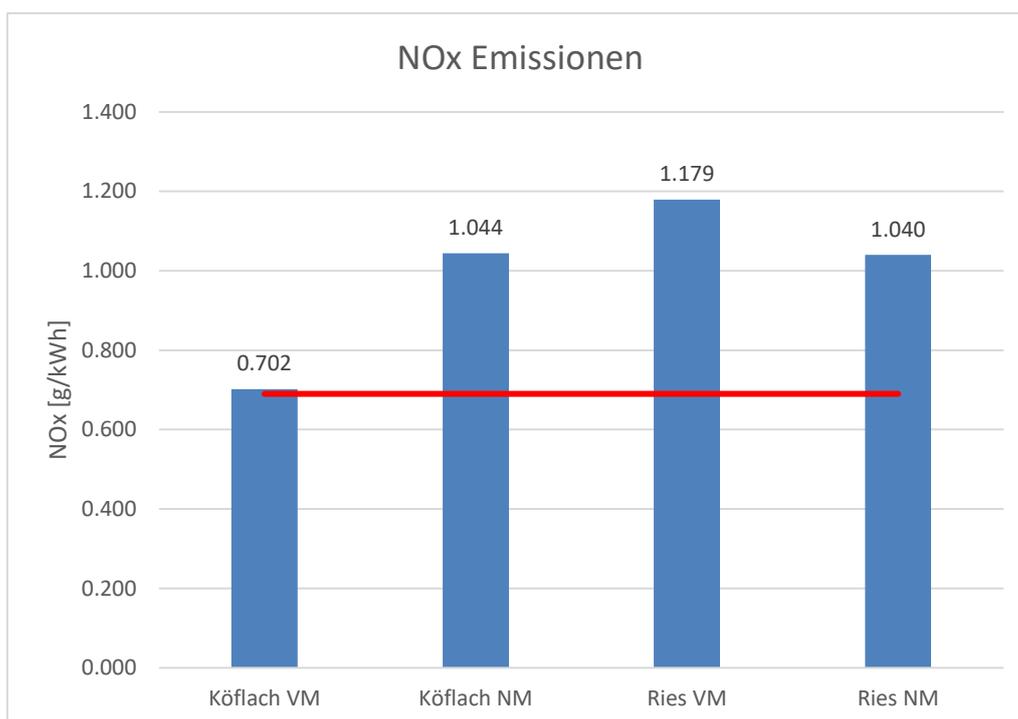


Abbildung 4-16: Ergebnisse NOx

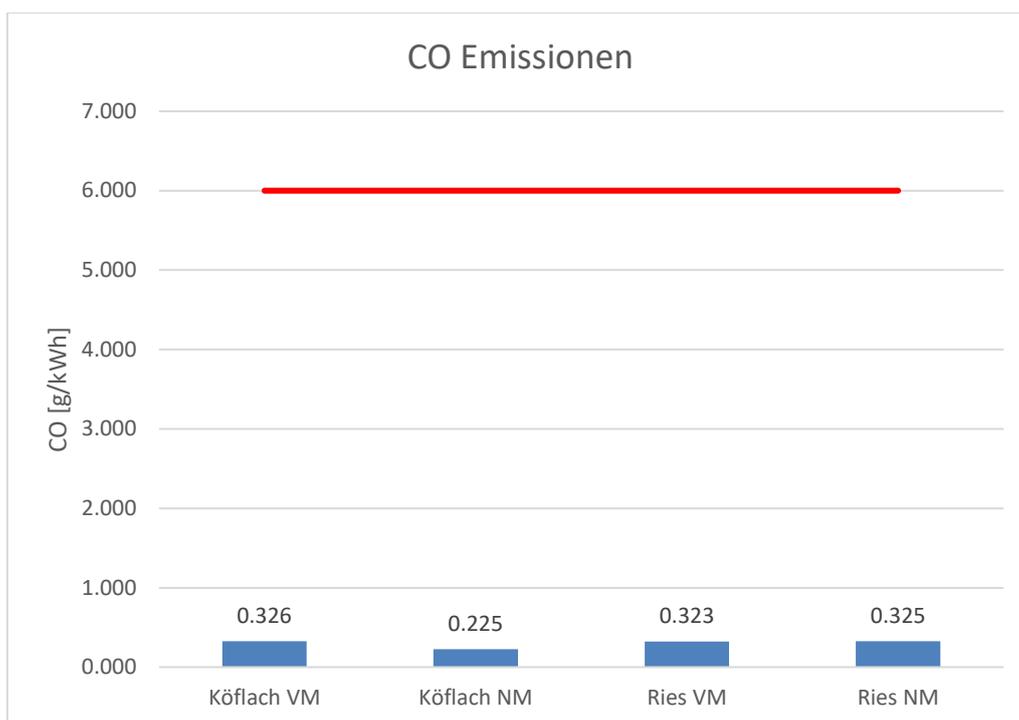


Abbildung 4-17: Ergebnisse CO

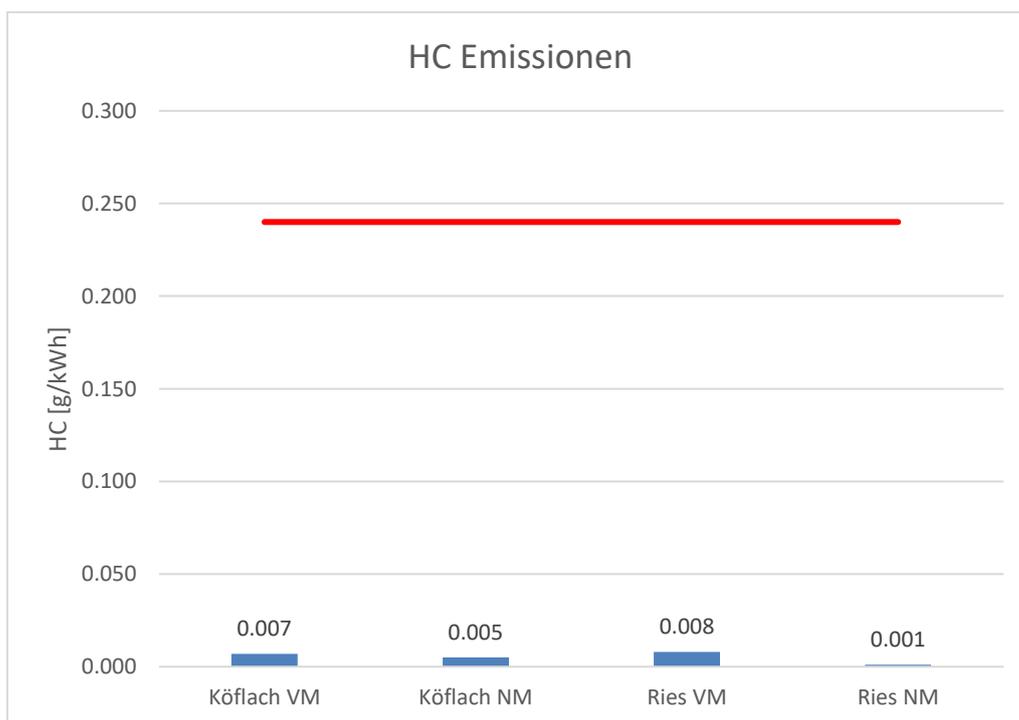


Abbildung 4-18: Ergebnisse HC

In den vorhergehenden Abbildungen erkennt man, dass die CO- und HC-Emissionen wie zu erwarten unter den Grenzwerten liegen. Wobei diese Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge gelten und wie später noch beschrieben wird ist da Fahrzeug 1 als leichtes Nutzfahrzeug zugelassen. Der Grund für die niedrigen Werte ist der Oxidationskatalysator der bei den vorhandenen Bedingungen im Dieselmotor optimal CO und HC oxidieren kann.

Die NO<sub>x</sub> überschreiten den Grenzwert teilweise deutlich wobei wieder gesagt werden muss dass diese Werte für schwere Nutzfahrzeuge definiert sind.

Die Zeitanteile während der einzelnen Routen sind in Tabelle 4-7 dargestellt, verglichen werden diese mit den Zeitanteilen der Gewichtsklasse N2.

<b>Auswertung EMROAD Zeitanteile</b>			
Route	Stadt	Überland	Autobahn
	[%]	[%]	[%]
Köflach VM	46.3	23.8	29.9
Köflach NM	44.4	19.7	35.9
Ries VM	46	21.4	32.6
Ries NM	42.4	22.1	35.4
Richtwert	45	25	30

Tabelle 4-7: Zeitanteile Fahrzeug 1

Wie in Tabelle 4-7 zu erkennen ist, wurde in der Köflach und Ries NM Route die Toleranz von 5 % überschritten, die restlichen Routen wären gültig. Die Typprüfung erfüllen konnte keine der vier Fahrten, da bei allen der NO<sub>x</sub> Ausstoß zu hoch war, siehe Abbildung 4-16. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass dieses Fahrzeug als leichtes Nutzfahrzeug zugelassen ist. Aufgrund dessen und dem Zeitpunkt der Zulassung muss es nicht die ISC-Vorschriften erfüllen, sondern die Grenzwerte des NEDC einhalten. Trotzdem wurde das Fahrzeug 1 getestet wie ein SNF da die Hardware im Fahrzeug die selbe ist und vermutlich nur Änderungen an der Motorapplikation durchgeführt werden. Da es nicht möglich war, das Fahrzeug weder auf dem Rollenprüfstand für PKW's noch auf dem Rollenprüfstand für LKW's zu testen wird der NEDC mittels PHEM simuliert und anschließend ausgewertet. Die zugehörige Simulation wird im Kapitel 5 erläutert. Die relevanten Größen im Zusammenhang mit der Zulassung für leichte Nutzfahrzeuge sind die durchschnittlichen streckenspezifischen Emissionen. In Tabelle 4-8 sind die zugehörigen Ergebnisse dargestellt. Man erkennt, dass auch die Grenzwerte des NEDC nicht eingehalten werden können, wie bereits erwähnt handelt es sich hier um Ergebnisse aus der Simulation. Die dafür notwendigen Kennfelder für Rohemissionen und Konvertierungskennfelder wurden mit den RDE-Messungen erstellt.

Route	NO <sub>x</sub>	CO	NO <sub>x</sub> +HC
	[g/km]	[g/km]	[g/km]
NEDC (Simulation)	0.365	0.127	0.373
Grenzwert	0.125	0.74	0.215

Tabelle 4-8: Simulationsergebnis NEDC Fahrzeug 1

Durch Vergleich der Grenzwerte in Tabelle 4-8: Simulationsergebnis NEDC Fahrzeug 1 mit den Messwerten in Tabelle 4-9 wird ersichtlich, dass bei allen Fahrten die RDE-Messwerte über den Grenzwerten für NO<sub>x</sub> und HC+NO<sub>x</sub> liegen. Zu erkennen ist das bei NO<sub>x</sub>+HC das HC eine untergeordnete Rolle spielt und beinahe die gesamte streckenbasierte Emissionsmasse von NO<sub>x</sub> kommt. Diese Ergebnisse spiegeln die bereits gewonnene Erkenntnis wieder das durch den Oxidationskatalysator die vorhandenen Schadstoffe (CO und HC) optimal konvertiert werden und dadurch nur ein geringer Ausstoß entsteht. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Umgebungstemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Stickoxide hat. Hinsichtlich der Routen selbst können auch nur geringe Unterschiede bezüglich der Emissionen erkannt werden.

Eine Auflistung und Aufschlüsselung der durchschnittlichen Emissionswerte, bezogen auf die Strecke, findet sich in der folgenden Tabelle 4-9. Bei allen Messungen lag die

Kühlmitteltemperatur über 70 °C, somit fanden alle Fahrten bei betriebswarmem Motor statt.

Route	Umgebungs- temperatur	Streckenbasiert						
		CO <sub>2</sub> [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	NO [g/km]	HC + Nox ges [g/km]	Verbrauch [l/100km]
<b>Emissionen Stadt</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	537.7	0.298	0.011	0.497	0.372	0.508	20.461
Köflach NM	19-20.5°C	518.1	0.288	0.008	0.394	0.315	0.402	19.713
Ries VM	7-15.5°C	541.5	0.274	0.008	0.790	0.586	0.798	20.604
Ries NM	20-23°C	510.2	0.306	0.003	0.574	0.463	0.577	19.416
Stadtroute VM	9.5-17.5°C	497.0	0.181	0.003	0.651	0.484	0.654	18.905
Stadtroute NM	19°C	501.2	0.283	0.005	0.631	0.483	0.636	19.072
<b>Emissionen Überland</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	376.1	0.134	0.003	0.332	0.251	0.335	14.305
Köflach NM	19-20.5°C	397.1	0.126	0.003	0.380	0.305	0.383	15.104
Ries VM	7-15.5°C	344.3	0.129	0.003	0.393	0.291	0.396	13.098
Ries NM	20-23°C	334.4	0.145	0.000	0.447	0.352	0.447	12.723
Stadtroute VM	9.5-17.5°C	394.1	0.203	0.008	0.513	0.485	0.521	14.995
Stadtroute NM	19°C	13.2	0.000	0.002	0.015	0.008	0.017	0.501
<b>Emissionen Autobahn</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	408.5	0.114	0.002	0.275	0.161	0.277	15.539
Köflach NM	19-20.5°C	442.8	0.098	0.002	0.376	0.260	0.378	16.840
Ries VM	7-15.5°C	460.3	0.053	0.001	0.552	0.343	0.553	17.504
Ries NM	20-23°C	433.5	0.142	0.000	0.343	0.228	0.343	16.489
Stadtroute VM	9.5-17.5°C							
Stadtroute NM	19°C							
<b>Emissionen Gesamt</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	424.6	0.156	0.004	0.336	0.230	0.340	16.153
Köflach NM	19-20.5°C	446.2	0.140	0.003	0.380	0.281	0.384	16.973
Ries VM	7-15.5°C	444.6	0.112	0.003	0.553	0.373	0.555	16.910
Ries NM	20-23°C	422.4	0.172	0.001	0.411	0.302	0.412	16.069
Stadtroute VM	9.5-17.5°C	495.4	0.182	0.004	0.649	0.484	0.652	18.847
Stadtroute NM	19°C	497.9	0.282	0.005	0.626	0.479	0.631	18.945

Tabelle 4-9: Streckenbasierte Emissionen

Da das Fahrzeug mit der selben Hardware auch als N2 und somit als SNF zugelassen werden könnte, sind in Tabelle 4-10 die arbeitsbasierten Emissionen eingetragen.

Route	Umgebungs- temperatur	Arbeitsbasiert						
		CO2	CO	HC	NOx	NO	HC + Nox ges	Verbrauch
		[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
<b>Emissionen Stadt</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	893.9	0.495	0.018	0.826	0.618	0.845	284.028
Köflach NM	19-20.5°C	866.2	0.482	0.013	0.659	0.527	0.672	275.208
Ries VM	7-15.5°C	851.0	0.431	0.013	1.242	0.921	1.254	270.370
Ries NM	20-23°C	788.4	0.473	0.005	0.887	0.715	0.892	250.493
Stadtroute VM	9.5-17.5°C	806.9	0.294	0.005	1.057	0.786	1.062	256.289
Stadtroute NM	19°C	817.2	0.461	0.008	1.029	0.788	1.037	259.654
<b>Emissionen Überland</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	673.8	0.240	0.005	0.595	0.450	0.600	214.026
Köflach NM	19-20.5°C	670.8	0.213	0.005	0.642	0.515	0.647	213.054
Ries VM	7-15.5°C	666.6	0.250	0.006	0.761	0.563	0.767	211.715
Ries NM	20-23°C	680.6	0.295	0.000	0.910	0.716	0.910	216.193
Stadtroute VM	9.5-17.5°C	565.6	0.291	0.011	0.736	0.696	0.748	179.693
Stadtroute NM	19°C	20.2	0.000	0.003	0.023	0.012	0.026	6.420
<b>Emissionen Autobahn</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	618.3	0.173	0.003	0.416	0.244	0.419	196.377
Köflach NM	19-20.5°C	632.3	0.140	0.003	0.537	0.371	0.540	200.798
Ries VM	7-15.5°C	636.1	0.073	0.001	0.763	0.474	0.764	201.951
Ries NM	20-23°C	651.8	0.214	0.000	0.516	0.343	0.516	207.016
Stadtroute VM	9.5-17.5°C							
Stadtroute NM	19°C							
<b>Emissionen Gesamt</b>								
Köflach VM	7.5-15.5°C	686.6	0.252	0.006	0.543	0.372	0.550	218.086
Köflach NM	19-20.5°C	679.6	0.213	0.005	0.579	0.428	0.585	215.836
Ries VM	7-15.5°C	680.3	0.171	0.005	0.846	0.571	0.849	216.035
Ries NM	20-23°C	684.3	0.279	0.002	0.666	0.489	0.668	217.386
Stadtroute VM	9.5-17.5°C	802.8	0.295	0.006	1.052	0.784	1.056	255.000
Stadtroute NM	19°C	812.2	0.460	0.008	1.021	0.781	1.029	258.086

Tabelle 4-10: Arbeitsbasierte Emissionen

## 5 Simulation

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem Thema Simulation und ist in mehrere Teile gegliedert.

Der erste Teil umfasst die Vorstellung und Arbeitsweise des verwendeten Simulationsprogramms PHEM, welches am Institut für Verbrennungskraftmaschinen entwickelt wurde beziehungsweise stetig weiterentwickelt wird.

Dem folgend wird die Erstellung der benötigten Kennfelder thematisiert, die Erstellung erfolgt exemplarisch für das in Kapitel 4 behandelte Fahrzeug 1.

Abschließend wird die Simulation der einzelnen Emissionen mehrerer schwerer Nutzfahrzeuge behandelt, die einzelnen Fahrzeuge die simuliert worden sind, sind im Fahrzeugverzeichnis eingetragen, das Hauptaugenmerk der Simulation wird auf die vorhandenen Stickoxide gelegt. Hierbei wird vor allem die Erstellung und Validierung des  $\text{NH}_3$ -Speicherstandsmodell behandelt.

### 5.1 Simulationstool PHEM

Die Abkürzung PHEM steht für „Passenger car and Heavy duty Emission Modell“. Dabei handelt es sich um ein kennfeldbasiertes Simulationsprogramm für Emissionen, welches an der Technischen Universität Graz am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik entwickelt wurde und laufend weiterentwickelt wird. Das Funktionsprinzip des Programms basiert auf der Leistungsberechnung über die Fahrzeuglängsdynamik, siehe Abbildung 5-1.

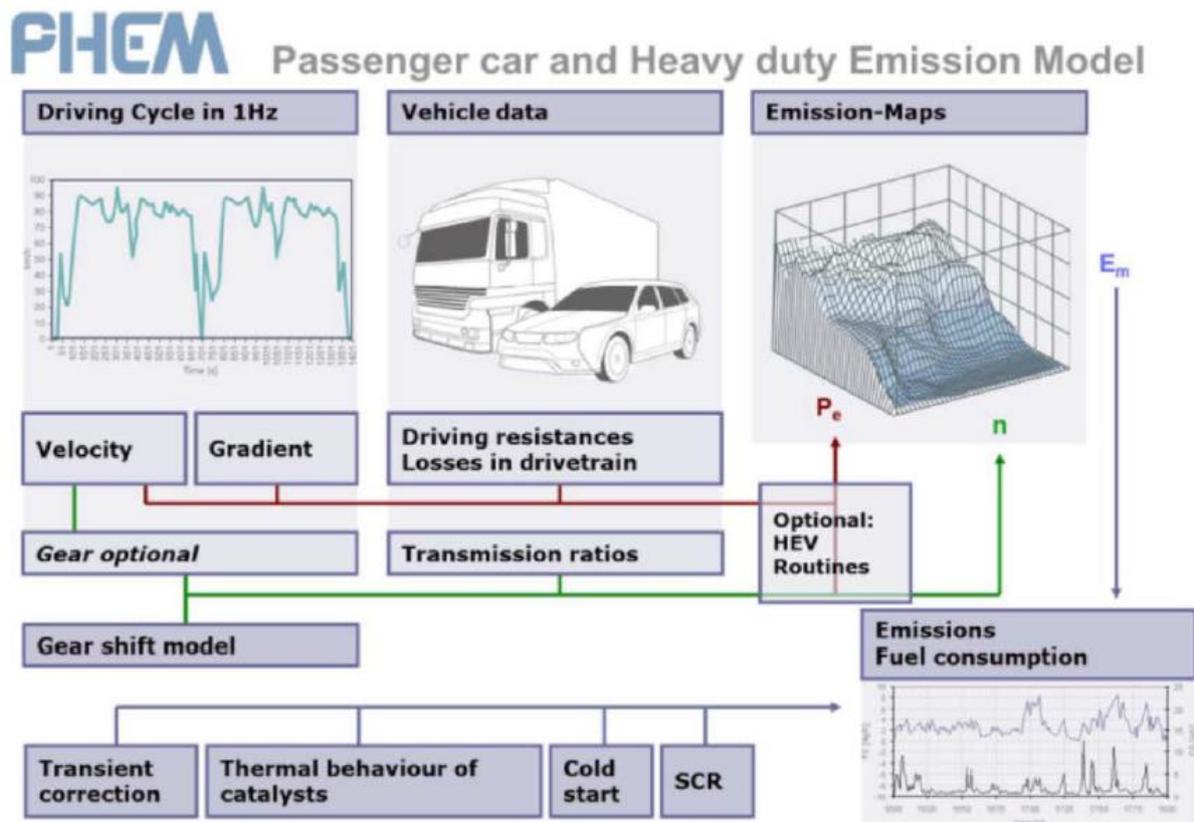


Abbildung 5-1: Funktionsschema PHEM [20]

Mithilfe der daraus berechneten Leistung und der dazugehörigen Motordrehzahl werden anschließend aus einem vorab definierten Emissionskennfeld die zugehörigen Emissionen

ermittelt. Die benötigten Parameter und Kennfelder werden in den folgenden Kapiteln besprochen, eingeteilt nach der Reihenfolge, wie sie direkt in PHEM eingetragen werden.

### 5.1.1 Zyklus

Es gibt zwei Varianten einen um Zyklus vorzugeben. Die erste besteht, wie bereits erwähnt, nur durch Vorgabe der Fahrgeschwindigkeit und der Zeit. Aus dieser Fahrgeschwindigkeit wird mithilfe der Fahrzeuglängsdynamik die benötigte sekundliche Antriebsleistung und über ein definiertes Gangschaltmodell die dazugehörige Motordrehzahl ermittelt. Die erforderlichen Parameter (Fahrwiderstände, Masse des Fahrzeugs, etc.) werden in die Fahrzeugdaten eingetragen. Optional kann die momentane Getriebestufe vorgegeben werden.

Der zweite Ansatz ist jener über die direkte Vorgabe der Antriebsleistung und Motordrehzahl. Dieses Modell benötigt keine Berechnung der Fahrzeuglängsdynamik, hier wird sofort aus den Emissionskennfeldern die jeweilige Emission interpoliert.

### 5.1.2 Fahrzeugdaten

In dieser Eingabedatei sind alle fahrzeugrelevanten Daten einzutragen. Die wichtigsten Daten sind:

- Masse des Fahrzeugs
- Nennleistung
- Leerlaufdrehzahl
- Nenndrehzahl
- Getriebeübersetzungen
- Achsübersetzungen
- Fahrwiderstände
- Leistung der Nebenverbraucher
- Dynamische Reifendurchmesser
- Reduzierte Rad Masse
- Trägheit des Motors
- Trägheit des Getriebes

Ebenfalls muss eine fahrzeugspezifische Schlepp- und Vollastkurve vorgegeben werden, die aber mit einer eigenen Datei in PHEM eingelesen wird.

### 5.1.3 „CO<sub>2</sub>-Methode“ für Leistungsberechnung

Die Grundlage des Verfahrens ist ein Basis-Verbrauchskennfeld, in dem der Verbrauch über Motordrehzahl und Leistung aufgetragen ist. Die Umrechnung des CO<sub>2</sub> aus dem Verbrauch geschieht anhand einer Näherungsformel, siehe Gleichung (5-1). Durch das gemessene CO<sub>2</sub> und der gemessenen Motordrehzahl wird die Leistung, wie in Abbildung 5-2 gezeigt, für jeden Zeitschritt interpoliert. [21]

$$CO_2 = 3,153 * FC \quad (5-1)$$

Ein wichtiger Punkt, der ebenfalls in Abbildung 5-2 dargestellt ist, sind die normierten Werte der Motorleistung und Motordrehzahl im Verbrauchskennfeld. Diese Normierung geschieht, um die Motorleistung und Motordrehzahl für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Leistungen umrechnen und vergleichen zu können. Die Normierung erfolgt anhand der Gleichungen (5-2) und (5-3).

$$P_{norm} = \frac{P_e}{P_{Nenn}} \quad (5-2)$$

$$n_{norm} = \frac{n - n_{Leer}}{n_{Nenn} - n_{Leer}} \quad (5-3)$$

Diese Methode wird im Simulationsprogramm PHEM standardmäßig verwendet und hat sich in den letzten Jahren als vorteilhaft erwiesen.

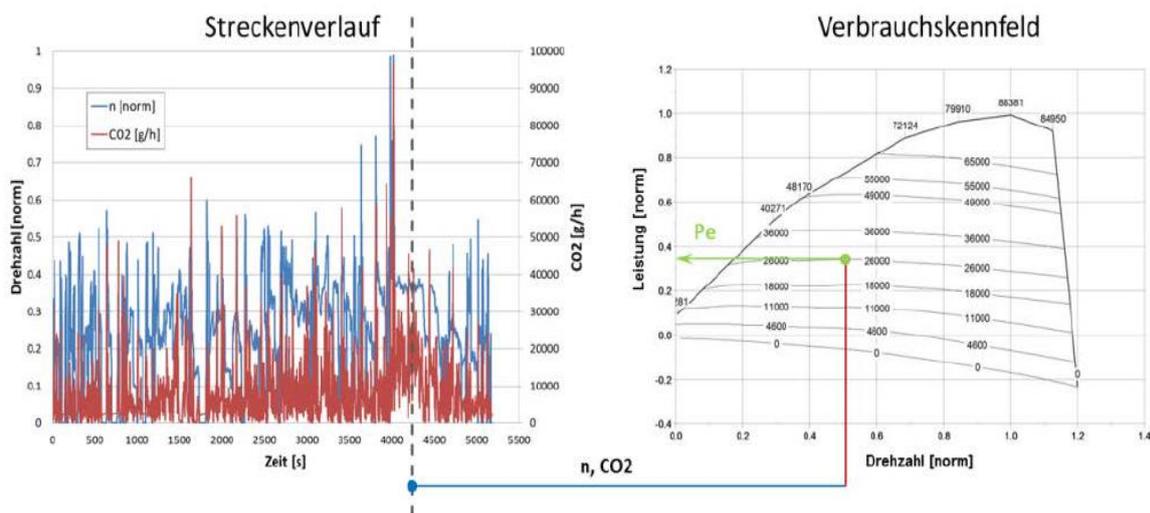


Abbildung 5-2: Schema zur Leistungsermittlung [22]

Das verwendete Verbrauchskennfeld für dieses Fahrzeug basiert auf Daten aus anderen Institutsprojekten.

## 5.1.4 Kennfelder

Die wichtigsten Kennfelder zur Simulation der Emissionen sind Emissionskennfeld und Temperaturkennfeld. In ihnen sind alle nötigen Daten gespeichert, die in der Simulation mittels Leistung und Motordrehzahl herausgelesen werden.

### 5.1.4.1 Erstellung Emissionskennfeld

Die Erstellung des Emissionskennfeldes erfolgt über die Eintragung der sekundlichen Messdaten in ein Raster, bestehend aus der normierten Leistung und der normierten Motordrehzahl. Die Einreasterung selbst wird mithilfe von PHEM durchgeführt. Das Prinzip ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

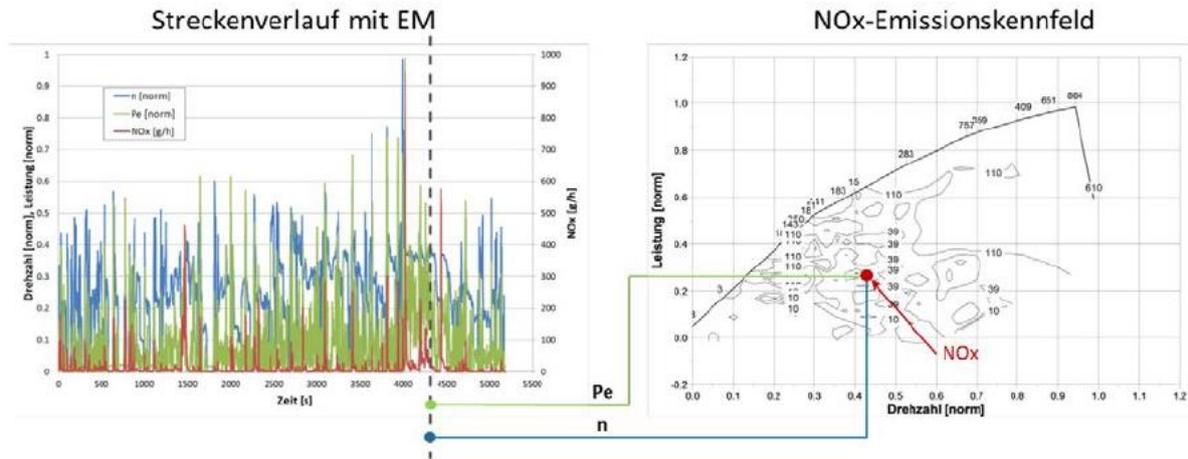


Abbildung 5-3: Schema Kennfelderstellung [22]

### 5.1.4.2 Erstellung Temperaturkennfeld

Die übliche Vorgehensweise zur Erstellung eines Temperaturkennfeldes besteht aus der Messung von Stationärpunkten am Rollenprüfstand bei unterschiedlichen Drehzahlen und Lastpunkten, siehe [12]. Da für die Messung des IVECO Daily keine Messungen am Rollenprüfstand durchgeführt wurden, musste ein Basis-Modell eines ähnlichen Fahrzeugs anhand von Messdaten angepasst werden. Die Anpassung wird in Kapitel 5.2.2 beschrieben.

### 5.1.5 Abgasnachbehandlungssystem

Zur Simulation der Abgasnachbehandlung ist in PHEM ein sogenanntes Exhaust-Simulation-File notwendig. In dieser Datei ist die gesamte Abgasanlage vom Motor und das gesamte Abgasnachbehandlungssystem hinterlegt. Den eingetragenen Katalysatoren sollten Konvertierungskennfelder hinterlegt werden, um die Reduktion der Schadstoffe simulieren zu können. Sowohl der Aufbau der Anlage als auch die Erstellung des Konvertierungskennfeldes sollen in diesem Kapitel kurz besprochen werden.

Die Abgasanlage wird in PHEM mithilfe von einzelnen Modulen aufgebaut. Die Berechnung der einzelnen Temperaturen und des Wärmeverlustes ist 0-dimensional. Für eine detaillierte Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte wird auf [23] verwiesen. Die Module selbst und ihre relevanten Größen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Die Module DOC/DPF und SCR sind in PHEM in ihrem Aufbau identisch und werden deshalb in einem Modul beschrieben.

Modul	Relevante Größen
Turbolader	<ul style="list-style-type: none"> <li>• normierte Masse [kg/kW<sub>rated</sub>]</li> <li>• Wärmekapazität [J/(kg*K)]</li> <li>• Starttemperatur [°C]</li> <li>• laminare od. turbulente Strömung</li> <li>• normierte Wärmedurchgangszahl [<math>m_{0,2}/mm</math> pipe diameter]</li> <li>• normierte Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>/kW<sub>rated</sub>]</li> <li>• Gegendruck [mbar]</li> <li>• Durchmesser Thermoelement [mm]</li> <li>• Dicke des Rußfilms am Thermoelement [mm]</li> <li>• Abkühldaten des Thermoelements (optional)</li> </ul>
Rohr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge [mm]</li> <li>• Wärmekapazität [J/(kg*K)]</li> <li>• Starttemperatur [°C]</li> <li>• Durchmesser [mm]</li> <li>• Wandstärke [mm]</li> <li>• Faktoren für konvektiven Wärmeübergang</li> <li>• Gegendruck [mbar]</li> <li>• Durchmesser Thermoelement [mm]</li> <li>• Dicke des Rußfilms am Thermoelement [mm]</li> <li>• Abkühldaten des Thermoelements (optional)</li> </ul>
Katalysator (DOC/DPF, SCR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• normierte Masse [kg/kW<sub>rated</sub>]</li> <li>• Wärmekapazität [J/(kg*K)]</li> <li>• Starttemperatur [°C]</li> <li>• Faktoren für konvektiven Wärmeübergang</li> <li>• Faktoren für Strahlungswärme</li> <li>• laminare od. turbulente Strömung</li> <li>• normierte Wärmedurchgangszahl [<math>m_{0,2}/mm</math> pipe diameter]</li> <li>• äußere Oberfläche [m<sup>2</sup>]</li> <li>• normierte Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>/kW<sub>rated</sub>]</li> <li>• Gegendruck [mbar]</li> <li>• Durchmesser Thermoelement [mm]</li> <li>• Dicke des Rußfilms am Thermoelement [mm]</li> <li>• Abkühldaten des Thermoelements (optional)</li> </ul>

Tabelle 5-1: Module PHEM

### 5.1.5.1 SCR-Konvertierungskennfeld

Um die Konvertierung und damit die Effizienz des SCR-Katalysators simulieren zu können, wird ein Konvertierungskennfeld für NO<sub>x</sub> benötigt. Die Konvertierungsraten werden anhand der Messdaten, im Speziellen NO<sub>x</sub>-Roh, NO<sub>x</sub>-Tailpipe, Raumgeschwindigkeit und Temperatur, ermittelt und in einer weiteren Eingabedatei über dieselben eingerastert. Die dafür verwendete Temperatur ist die Temperatur vor dem SCR-Katalysator. PHEM simuliert diese und ermittelt somit die Konvertierungsrate. Bei Fahrzeugen bei denen es nicht möglich war, die Temperatur vor dem SCR-Katalysator zu messen, werden die Temperaturen vor und nach dem Behälter, in dem das Abgasnachbehandlungssystem untergebracht ist, gemittelt und für die Kennfelderstellung verwendet. Die Grundlage zur Erstellung eines solchen Kennfelds wird im Folgenden kurz Erläutert.

Der erste Schritt zur Erstellung des Kennfeldes ist die 20-Sekunden-Mittlung der relevanten Größen: NO<sub>x</sub>-Emissionen, Temperatur und Abgasmassenstrom. Diese Mittlung wird durchgeführt, um etwaige Messausreißer zu glätten und Zuordnungsungenauigkeiten auszugleichen.

Die Stützstellen werden mit der Temperatur und Raumgeschwindigkeit, letzteres wird aus dem Abgasmassenstrom mit Gleichung (5-5)

berechnet, gebildet.

$$SV = \frac{\dot{m}}{\rho_{Abgas} * V_{KAT}} \quad (5-4)$$

In den einzelnen Stützstellen werden die jeweiligen Mittelwerte für die NO<sub>x</sub>-Roh- und NO<sub>x</sub>-Tailpipe-Emissionen gebildet. Durch die Mittlung an den Stützstellen kommt es zu einer NO<sub>x</sub>-Gewichtung. Das bedeutet, dass Konvertierungsraten bei hohen absoluten Emissionen stärker gewichtet werden. Abschließend werden die Konvertierungsraten an den Stützstellen mit Gleichung (5-5)

berechnet.

$$DeNO_x = \frac{NO_{xRoh} - NO_{xTP}}{NO_{xRoh}} \quad (5-5)$$

## 5.2 Fahrzeug 1 Kennfelderstellung

Das folgenden Kapitel befasst sich mit der Erstellung der benötigten Kennfelder speziell für das in Kapitel 4.1 beschriebene Nutzfahrzeug.

### 5.2.1 Emissionskennfeld

Das Emissionskennfeld für das Fahrzeug 1 wurde wie in Kapitel 5.1.4.1 beschrieben erstellt.

### 5.2.2 Temperaturkennfeld

Das Temperaturkennfeld ist relevant für die Ermittlung des thermischen Verhaltens bei der Simulation des SCR-Katalysator. Aus diesem Grund wurde das Kennfeld, mit Hilfe eines Basis-Kennfeld, mit allen vorhandenen ISC-Fahrten angepasst. Exemplarisch ist das Temperaturniveau der Fahrt „Ries Nachmittag“ welches mit dem Basis-Kennfeld erstellt wurde in Abbildung 5-5 dargestellt.

Im Basis-Kennfeld, Abbildung 5-4, wurde in mehreren Iterationsritten die Temperatur verändert, um die Temperatur aus der Messung möglichst genau zu treffen. In Abbildung 5-5 sind die Temperaturen vor dem SCR-Katalysator aufgezeichnet, blau entspricht dabei der

Messung und rot der Simulation, die mittels des Basis-Kennfeldes simuliert wurden. Es ist erkennbar, dass das Temperaturniveau in fast allen Kennfeld-Punkten angehoben werden muss, um die gemessenen Temperaturen zu simulieren.

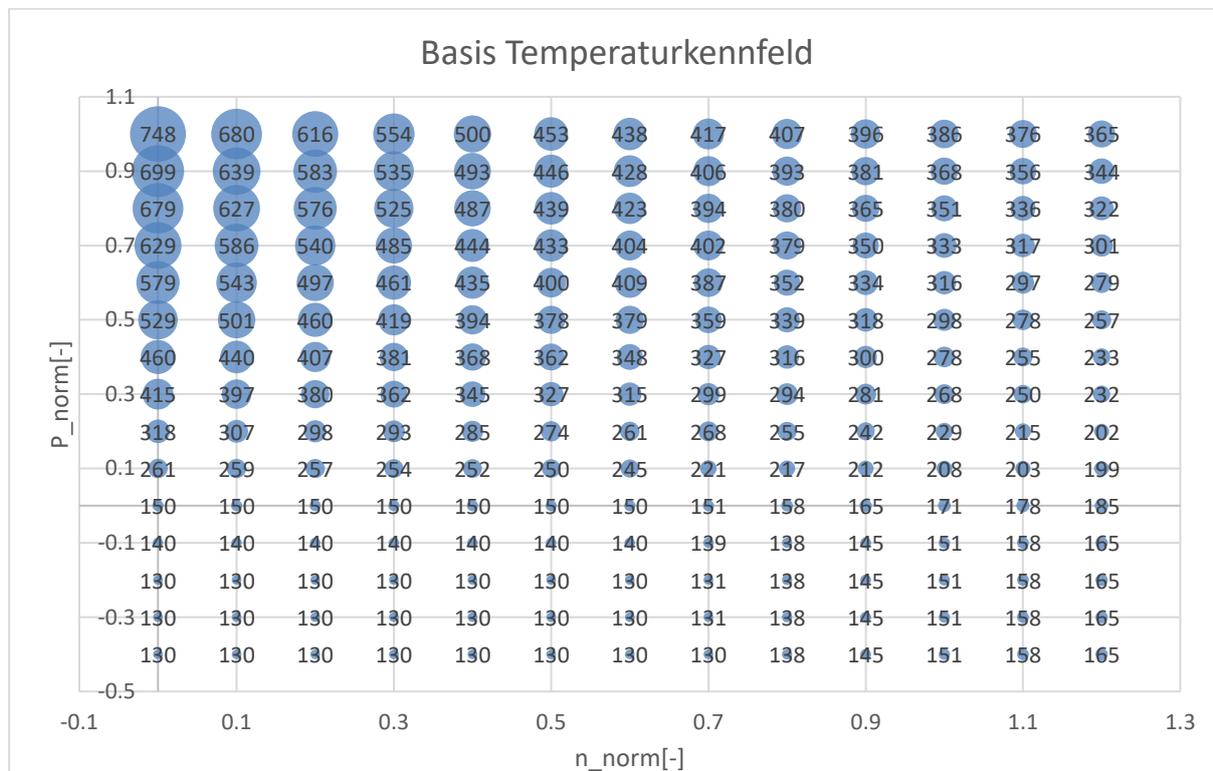


Abbildung 5-4: Basis Temperaturkennfeld

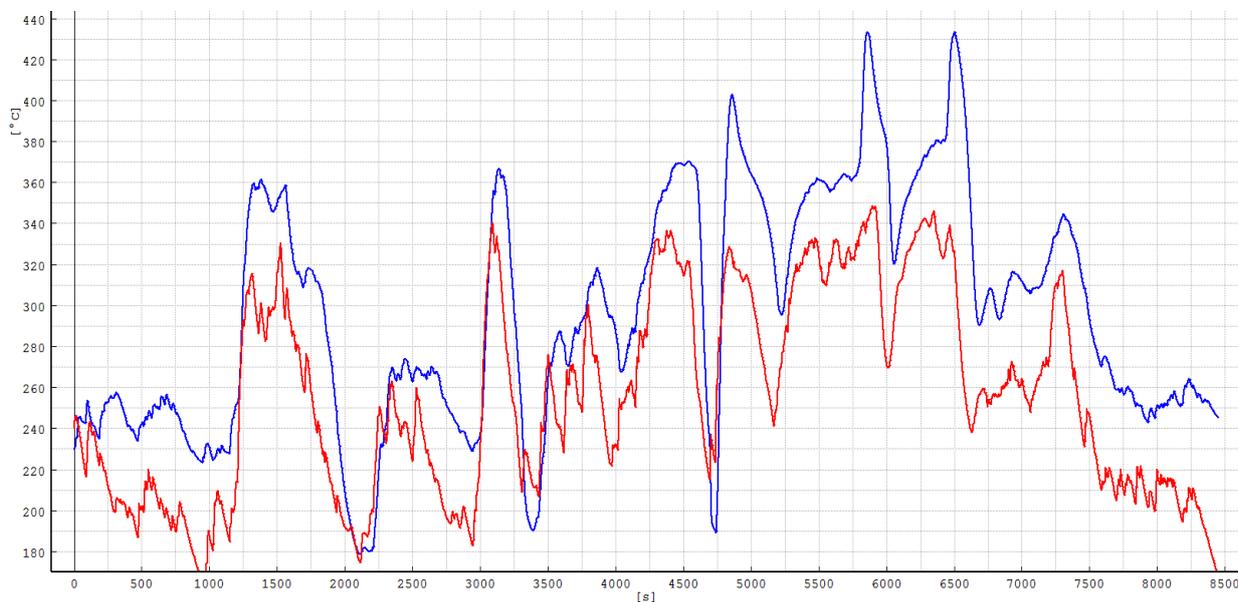


Abbildung 5-5: Temperatur vor SCR mit Basis-Temperaturkennfeld (Ries NM), blau = Messung, rot = Simulation mit nicht kalibriertem Basiskennfeld

In Abbildung 5-6 sind die selben Temperaturen aufgezeichnet, die Farbzugehörigkeit ist wie zuvor, aber in diesem Fall werden sie aus dem endgültigen und in späteren Simulationen weiter verwendeten Temperaturkennfeld simuliert. Zur „Feinabstimmung“ der Temperatursimulation wurden in den unterschiedlichen Modulen der Abgasnachbehandlung vereinzelte Werte angepasst. Man erkennt, dass zu Beginn des Zyklus im Stadtanteil die Temperatur immer zu niedrig simuliert wird, was möglicherweise auf eine Heizstrategie, die

im Fahrzeug hinterlegt ist, zurückzuführen ist. Derartige Strategien können mit der Kennfeldbasierten Methode nicht dargestellt werden. Es wird versucht die Temperatur im Mittel ordentlich zu simulieren.

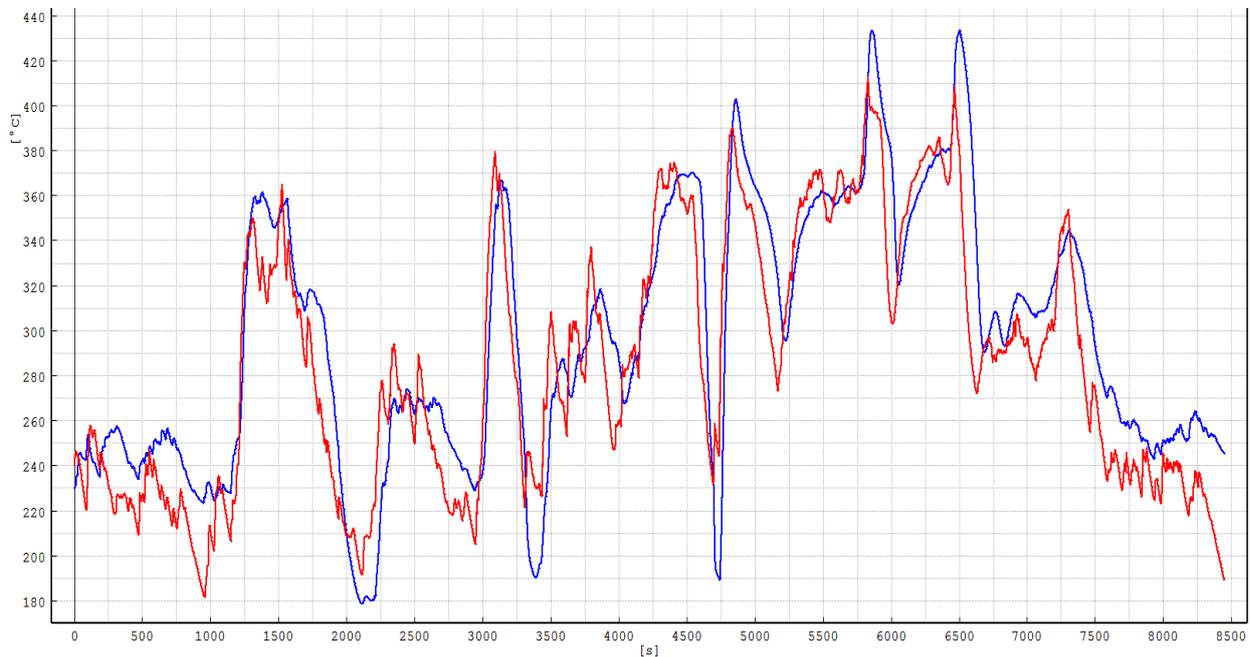


Abbildung 5-6: Temperatur vor SCR mit endgültigem Temperaturkennfeld (Ries NM), blau = Messung, rot = Simulation mit kalibriertem Kennfeld

Der oben beschriebene Vorgang wurde für verschiedenen Zyklen (ISC-Fahrten) durchgeführt und somit ein Durchschnitts-Temperatur-Kennfeld für das Fahrzeug 1 erstellt.

### 5.2.3 SCR-Konvertierungskennfeld

Die Vorgehensweise ist bei allen behandelten Fahrzeugen dieselbe. Der einzige Unterschied zu der in Kapitel 5.1.5.1 beschriebenen Berechnung ist das die übliche 20-Sekunden-Mittelung ersetzt wurde durch eine 5-Sekunden-Mittelung da aufgrund der Breite des Raumgeschwindigkeitsfensters bei Fahrzeug 1 aufgrund des geringeren Katalysatorvolumens und der daraus resultierenden höheren Raumgeschwindigkeit zu wenig Punkte in diesen Stützstellen vorhanden wären.

In Abbildung 5-7 ist ein Teil der gesamten Messpunkte abgebildet.

	RG < 0.5	0.5 < RG < 1	1 < RG < 1.5	1.5 < RG < 2	2 < RG < 2.5	2.5 < RG < 3
Temp < 100	0	0	0	0	0	0
100 < Temp < 120	0	0	0	0	0	0
120 < Temp < 140	0	0	0	0	0	0
140 < Temp < 160	0	0	0	0	0	0
160 < Temp < 180	0	0	29	10	3	1
180 < Temp < 200	0	0	55	27	28	19
200 < Temp < 220	0	10	111	35	22	16
220 < Temp < 240	0	52	205	98	59	37
240 < Temp < 260	0	96	228	168	102	79
260 < Temp < 280	0	14	46	93	50	36
280 < Temp < 300	0	20	41	58	46	38
300 < Temp < 320	0	18	45	46	37	39
320 < Temp < 340	0	5	30	56	35	33
340 < Temp < 360	0	11	13	35	16	24
360 < Temp < 380	0	7	2	11	6	2
380 < Temp < 400	0	0	0	0	0	0
Temp > 400	0	0	0	0	0	0

Abbildung 5-7: Anzahl der Messpunkte in den Stützstellen

In den mit roten Kreisen markierten Stützstellen in Abbildung 5-7 sind zu wenig Punkte vorhanden, diese wurden in der weiteren Berechnung gestrichen und wie ein leeres Fenster gewertet und dementsprechend wie im Anschluss gezeigt aufgefüllt. Dies wurde in allen Stützstellen durchgeführt in denen weniger als fünf Punkte eingetragen waren. Der Grund hierfür ist, dass diese Konvertierungsraten in manchen Fällen von den benachbarten Stützstellen stark abweichen.

In Abbildung 5-8 ist ein Ausschnitt des erstellten Kennfeldes dargestellt. Für die leeren Fenster sind keine Messdaten vorhanden. Diese leeren Stützstellen und die mit zu wenig Punkten wurden im Anschluss mit sinnvollen Werten erweitert. Die Basis für diese Werte sind Erfahrung und Messdaten von anderen Fahrzeugen und Literatur. Das so aufgefüllte Kennfeld ist in Abbildung 5-9 abgebildet. Aufgrund der Darstellbarkeit wurde nur ein Teil aufgezeichnet, die größte Raumgeschwindigkeit ist im gesamten Kennfeld größer als 15 [1/s].

	RG < 0.5	0.5 < RG < 1	1 < RG < 1.5	1.5 < RG < 2	2 < RG < 2.5	2.5 < RG < 3
Temp < 100						
100 < Temp < 120						
120 < Temp < 140						
140 < Temp < 160						
160 < Temp < 180			85%	86%	65%	66%
180 < Temp < 200			83%	82%	87%	73%
200 < Temp < 220		96%	91%	94%	84%	76%
220 < Temp < 240		93%	92%	91%	90%	91%
240 < Temp < 260		96%	92%	93%	94%	93%
260 < Temp < 280		97%	93%	93%	94%	95%
280 < Temp < 300		95%	94%	95%	96%	94%
300 < Temp < 320		92%	94%	96%	94%	94%
320 < Temp < 340		92%	92%	95%	92%	93%
340 < Temp < 360		97%	97%	97%	94%	97%
360 < Temp < 380		97%	96%	94%	97%	97%
380 < Temp < 400						
Temp > 400						

Abbildung 5-8: Unbearbeitetes SCR-Kennfeld

Ein Punkt der in Abbildung 5-8 gut zu sehen ist dass bei den ISC-Fahrten anscheinend zu einer NH<sub>3</sub>-Speicherung kommt da bereits bei niedrigeren Temperaturen als in Kapitel 3.2.1 beschrieben zu einer Konvertierung kommt und dies auch mit relativ „hohen“ Konvertierungsraten passiert. Diese Speicherung ist möglich da die ISC-Fahrten und die dazugehörige Messung erst nach einer „Warm Up“ Phase gestartet wurde welche die Abgasnachbehandlung erwärmt. Dieser Trend wurde in den unteren Bereichen weiter verfolgt wie in Abbildung 5-9 zu sehen ist.

	RG < 0.5	0.5 < RG < 1	1 < RG < 1.5	1.5 < RG < 2	2 < RG < 2.5	2.5 < RG < 3
Temp < 100	84%	84%	84%	85%	85%	70%
100 < Temp < 120	86%	86%	84%	85%	86%	71%
120 < Temp < 140	88%	88%	85%	86%	86%	72%
140 < Temp < 160	90%	90%	85%	86%	86%	73%
160 < Temp < 180	92%	92%	85%	86%	87%	74%
180 < Temp < 200	95%	94%	83%	82%	87%	75%
200 < Temp < 220	97%	96%	91%	94%	84%	76%
220 < Temp < 240	94%	93%	92%	91%	90%	91%
240 < Temp < 260	97%	96%	92%	93%	94%	93%
260 < Temp < 280	98%	97%	93%	93%	94%	95%
280 < Temp < 300	96%	95%	94%	95%	96%	94%
300 < Temp < 320	92%	92%	94%	96%	94%	94%
320 < Temp < 340	93%	92%	92%	95%	92%	93%
340 < Temp < 360	97%	97%	97%	97%	94%	97%
360 < Temp < 380	97%	97%	96%	94%	97%	97%
380 < Temp < 400	99%	98%	97%	95%	98%	98%
Temp > 400	100%	99%	97%	95%	98%	98%

Abbildung 5-9: SCR-Kennfeld

### 5.3 Basismodell

Im folgenden Kapitel wird das Basismodell für die Berechnung der Stickoxide erläutert und die Ergebnisse der Simulationen der einzelnen Fahrzeuge analysiert und den Messungen gegenübergestellt. Das Hauptaugenmerk in diesen Analysen bezieht sich auf die vorhandenen Stickoxide. Es werden sowohl RDE-Fahrten als auch Messungen vom Rollenprüfstand, wenn vorhanden, gezeigt.

#### 5.3.1 Prinzip Basismodell

Abbildung 5-10 zeigt das Prinzip des Basismodells für die Berechnung von NO<sub>x</sub>.

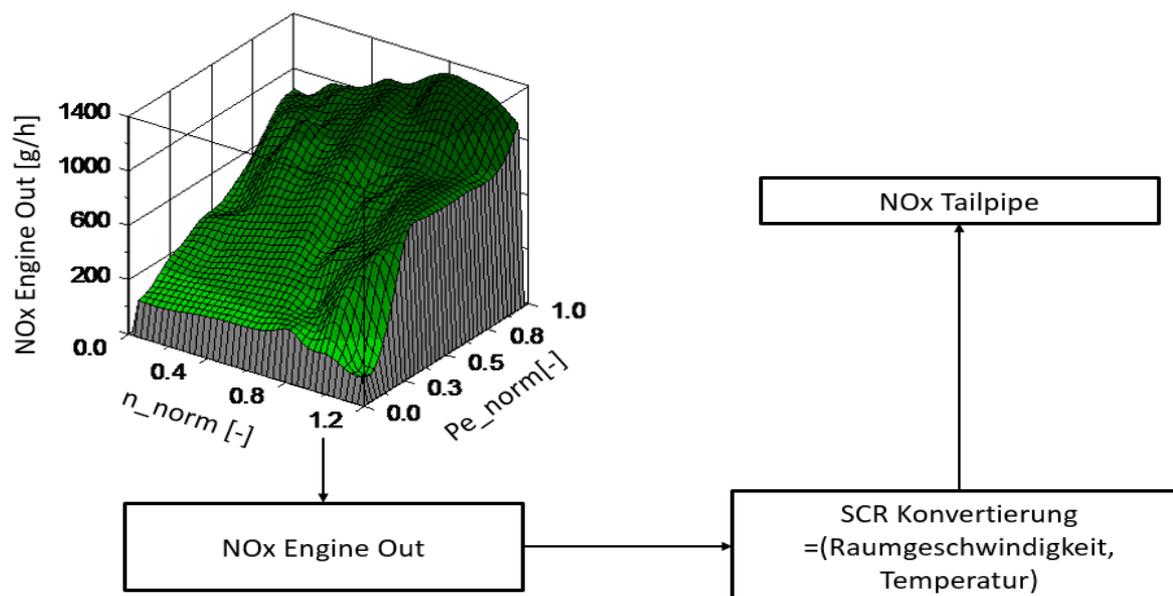
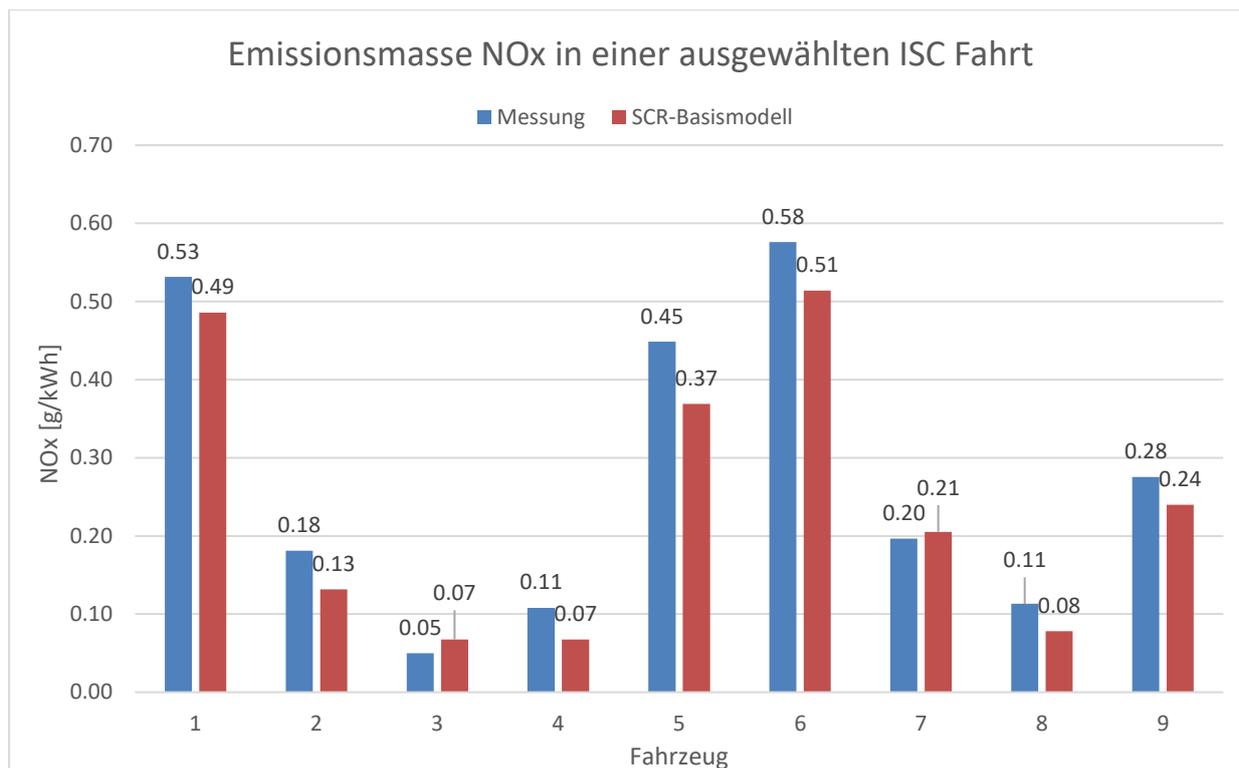


Abbildung 5-10: Prinzip NOx Berechnungsverfahren mit Basismodell

Die Berechnung der NOx-Tailpipe erfolgt sekundlich und kann grob in drei Schritte eingeteilt werden. Der erste ist das vorhandene NOx-Engine-Out für die zu diesem Zeitpunkt vorhanden normierte Leistung und normierte Drehzahl aus dem Emissionskennfeld (Kapitel 5.2.1) zu ermitteln. Parallel dazu wird die Konvertierungsrate mit Hilfe der Temperatur und der Raumgeschwindigkeit aus dem SCR-Konvertierungskennfeld (Kapitel 5.2.3) ausgelesen. Aus diesen beiden Werten wird anschließend das ausgestoßene NOx-Tailpipe berechnet.

### 5.3.2 Simulationsergebnisse

In Abbildung 5-11 sind die Emissionsmassen der Stickoxide aus jeweils einer ISC-Fahrt pro Fahrzeuge dargestellt. Die Balken mit der Bezeichnung „9“ entsprechen dem Durchschnitt der restlichen, im Diagramm dargestellten Fahrzeuge. Bei den weiteren Diagrammen ist dies ebenso der Fall.

Abbildung 5-11: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einer ausgewählten ISC-Fahrt

Man erkennt, dass die Simulation den Ergebnissen aus den gemessenen Zyklen sehr nahekommt und bei den Fahrzeugen die Realität gut widerspiegelt. Da die Konvertierungskennfelder aus den ISC-Fahrten des jeweiligen Fahrzeuges gebildet wurden, war dies zu erwarten.

Die Abweichungen entstehen meist in den Stadtanteilen der jeweiligen Fahrten, wo aufgrund der niedrigeren Temperaturen des Katalysators und des damit verbundenen Stopps der Eindosierung des Reduktionsmittels in der Realität zu Beginn hohe Konvertierungsraten erreicht werden und mit fortlaufender Dauer der Messung die gespeicherte Menge des Reduktionsmittels abnimmt und mit dieser auch die Konvertierungsrate, siehe Kapitel 3.2.1 was in weiterer Folge zu höheren NO<sub>x</sub> Emissionen führt. Beispielhaft ist ein Temperaturverlauf für das Fahrzeug 2 in Abbildung 5-12 zu sehen.

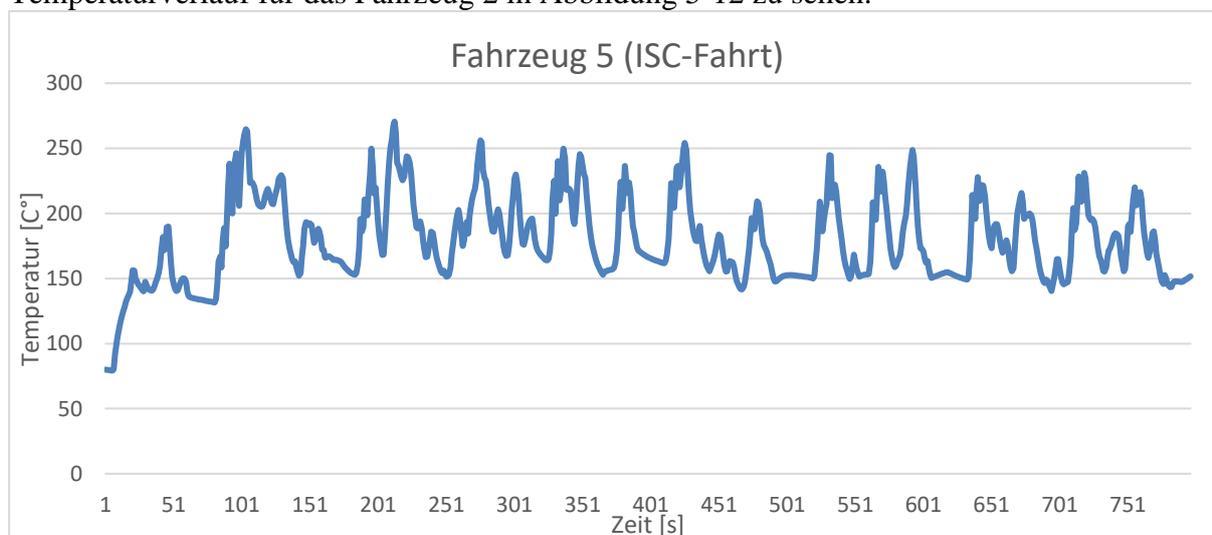


Abbildung 5-12: Temperaturverlauf in den ersten 800 Sekunden, Fahrzeug 2 (ISC-Fahrt)

Diese Änderung kann mit dem Basismodell nicht beschrieben werden, da in diesem Fall die Konvertierungsrate konstant in einer Stützstelle angenommen wird. In einer ISC-Fahrt ist dieser Einfluss nicht ausschlaggebend für die gesamte Messfahrt, da die Messungen nach einem „Warm Up“ erfolgen und die Dauer der Stadtanteile relativ gering ist. Dieser Einfluss wird erst ersichtlich, wenn es zu langen Stadtfahrten und zu sogenannten „Stauzyklen“ kommt. In diesen Fällen kommt es, wie im Anschluss gezeigt, zur permanenten Unterschätzung der Emissionsmassen.

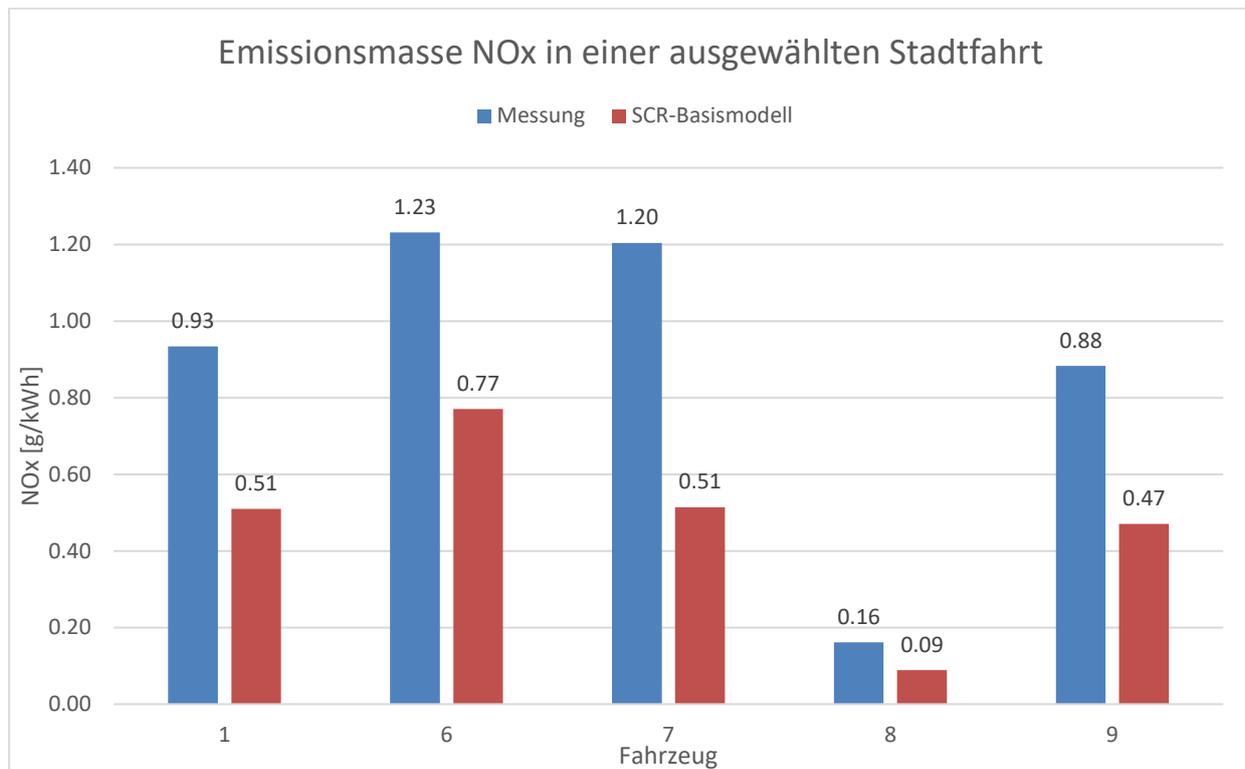


Abbildung 5-13: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einer ausgewählten Stadtfahrt

Abbildung 5-13 stellt die Emissionsmassen der Stickoxide für das jeweilige Fahrzeug in einer Stadtfahrt dar. Nicht alle Fahrzeuge werden dargestellt da nicht für alle Fahrzeuge Stadtfahrten durchgeführt wurden. Zu erkennen ist, dass die Simulation die Realität in vielen Fällen drastisch unterschätzt und einen viel zu geringen Wert für die Emissionsmassen annimmt. Zurückzuführen ist dies auf das bereits beschriebene Problem der konstanten Konvertierungsraten in den einzelnen Stützstellen und der Vernachlässigung der Abnahmen des eingespeicherten Reduktionsmittels. Die Vorkonditionierung erfolgte bei allen Fahrzeugen mittels einer „Warm Up“ Phase vor der Messung.

In den folgenden Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15 ist dieser Effekt noch besser zu erkennen. Diese Abbildungen zeigen die Ergebnisse von Stauzyklen am Rollenprüfstand verschiedener Fahrzeuge. In Abbildung 5-14 erfolgten die Vorkonditionierungen im Leerlauf über eine Dauer von 30 Minuten, in Abbildung 5-15 mit einer Erwärmung der Abgasanlage auf über 200°C. Im weiteren Verlauf des Zyklus wird die notwendige Temperatur des Katalysators unterschritten und eine Erhöhung schwer erreicht, was dazu führt, dass die Eindosierung nicht stattfindet und die Konvertierung nur mithilfe des im Katalysator gespeicherten Reduktionsmittels durchgeführt wird. Dieses Reduktionsmittel wird aber kontinuierlich verbraucht und steht nicht mehr der Konvertierung zu Verfügung, das Ergebnis ist eine Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Tailpipe Emissionen.

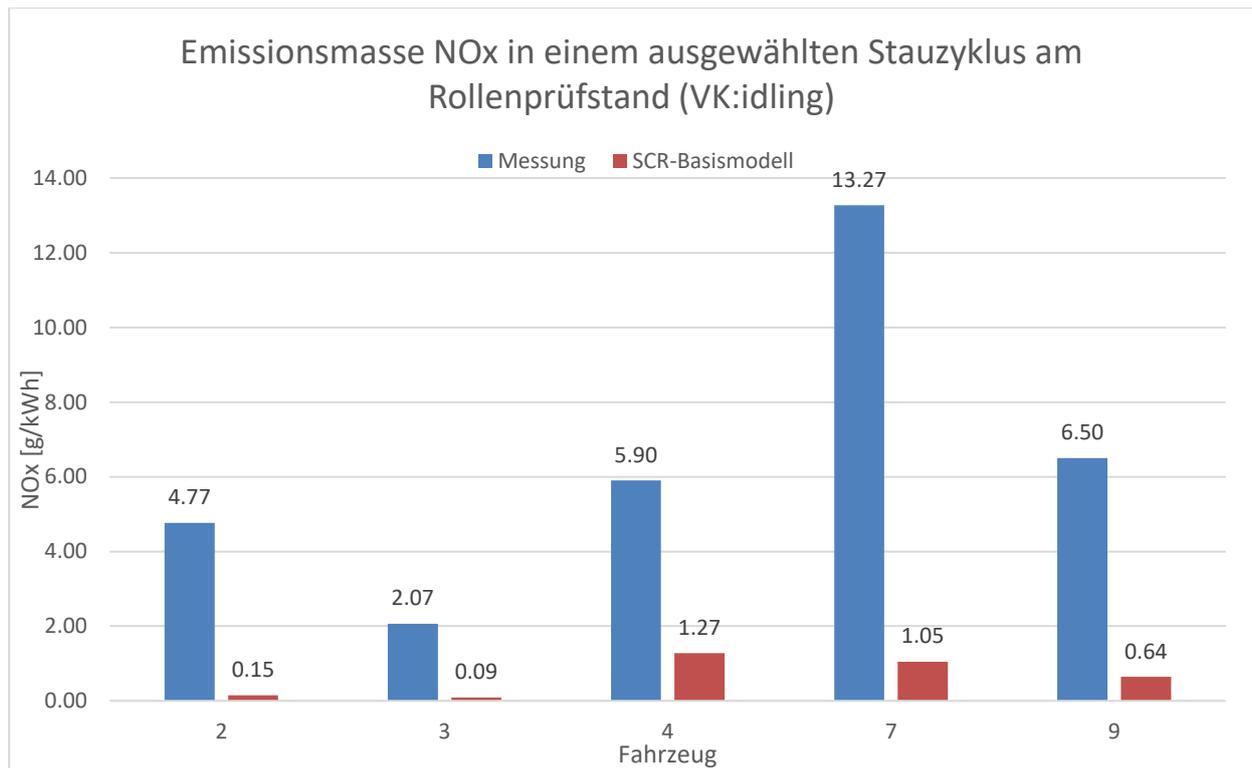


Abbildung 5-14: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einem ausgewählten Stauzyklus am Rollenprüfstand (VK: idling)

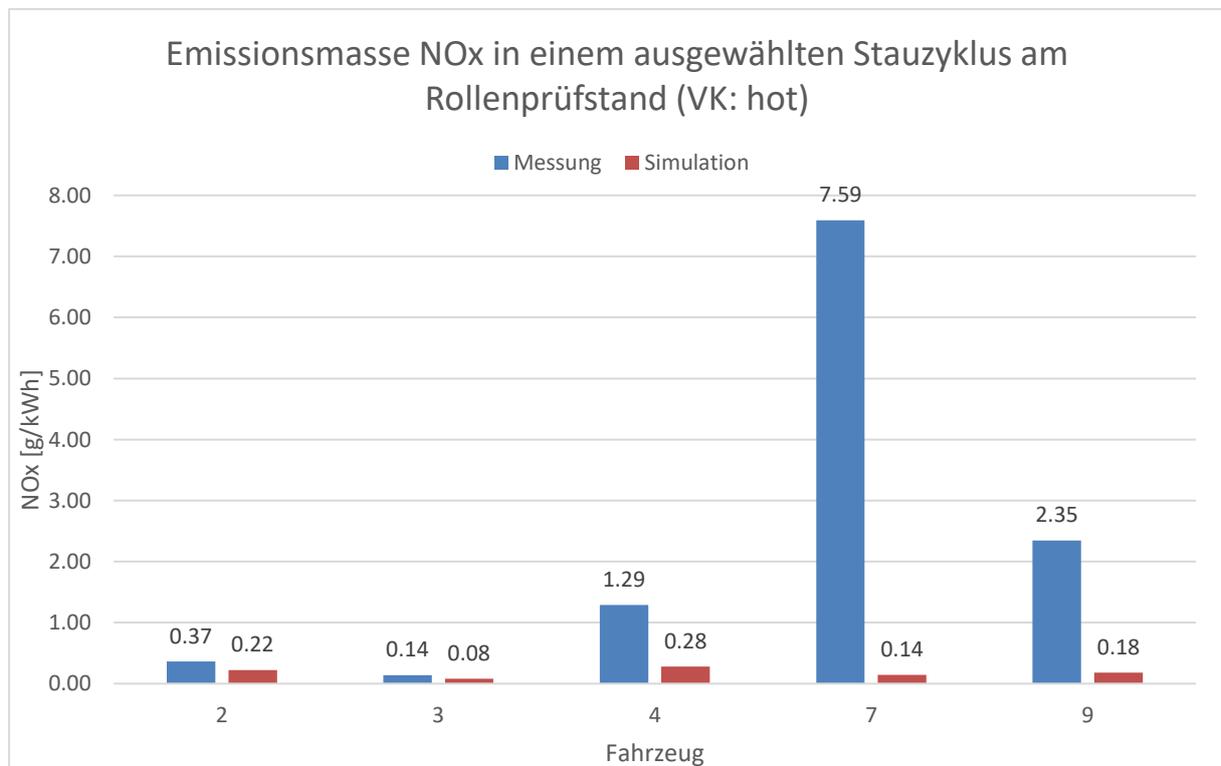


Abbildung 5-15: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einem ausgewählten Stauzyklus am Rollenprüfstand (VK: hot)

Abbildung 5-16 zeigt den Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs 7 während einer ISC-Fahrt.

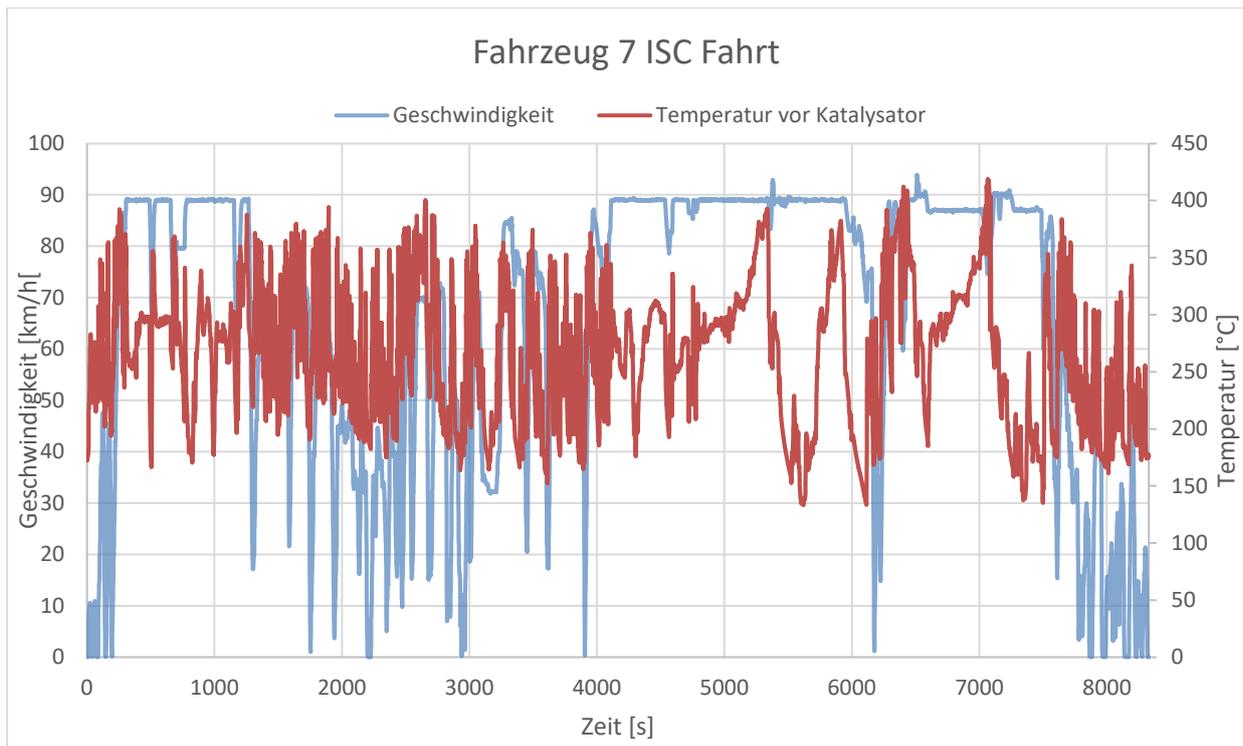


Abbildung 5-16: Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf einer ISC-Fahrt (Fahrzeug 7)

Abbildung 5-18 zeigt den Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs 7 während einer Stadtfahrt.

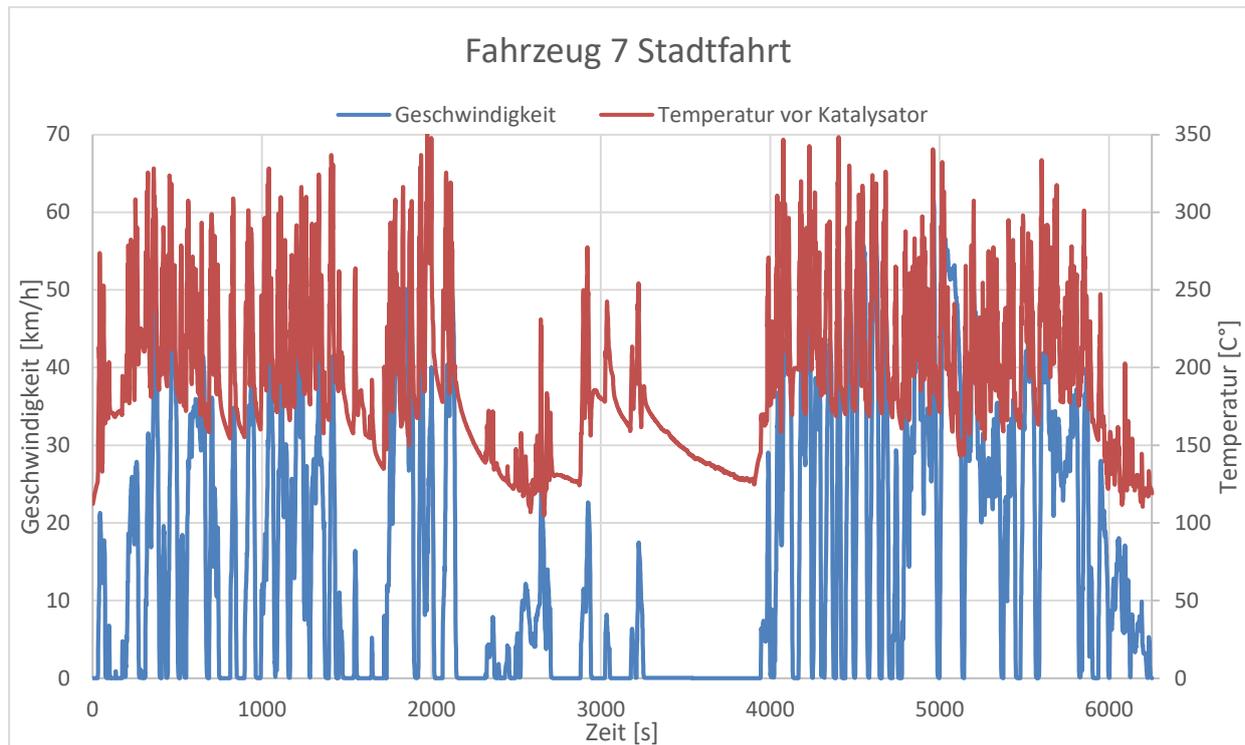


Abbildung 5-17: Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf einer Stadtfahrt (Fahrzeug 7)

Abbildung 5-18 zeigt den Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs 7 während eines Stauzyklus.

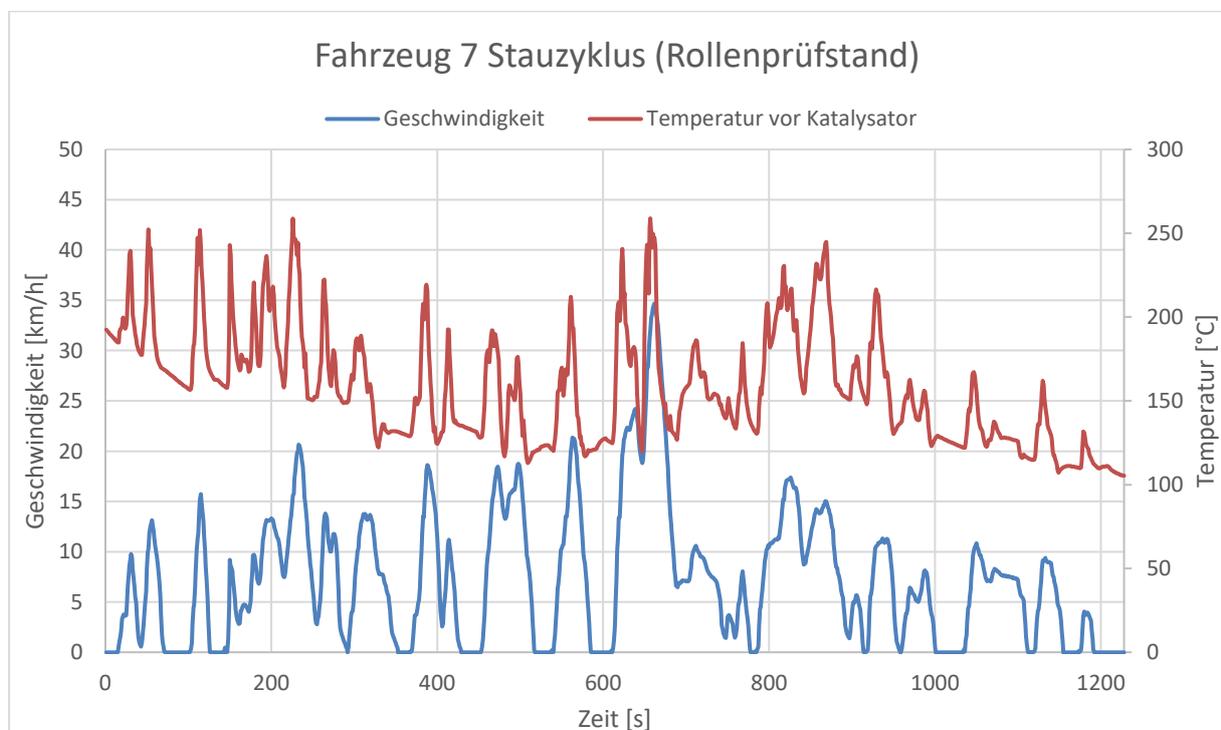


Abbildung 5-18: Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf eines Stauzyklus am Rollenprüfstand (Fahrzeug 7)

Die in den Abbildung 5-16 bis Abbildung 5-18 aufgetragenen Temperaturen wurde vor dem Katalysator gemessen. Anhand des Temperaturverlaufs kann man feststellen, dass die

Temperatur während einer ISC-Fahrt signifikant höher gegenüber einer Stadtfahrt und eines Stauzyklus ist. Die Stadtfahrt wurde nach einer „Warm Up“ Phase gestartet. Ein Teil der gefahrenen Stauzyklen am Rollenprüfstand wurde nach einer Vorkonditionierung, in der die Abgasanlage auf über 200°C gebracht wurde, gestartet. Die Vorkonditionierungen wurden so gewählt, da die Annahme getroffen wurde, dass nach diesen der SCR-Katalysator genug Reduktionsmittel einspeichern konnte, um eine möglichst hohe Konvertierungsrate auch nach dem Stopp der Eindosierung zu erreichen. Wie bereits erwähnt, kann dieses Verhalten mit dem Basismodell nicht nachgebildet werden. Aus diesem Grund soll dieses Verhalten nun mit einem „NH<sub>3</sub> Speicherstandmodell“ abgebildet werden.

## 5.4 NH<sub>3</sub> Speicherstandmodell

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Erstellung eines NH<sub>3</sub> Speicherstandmodells und der Validierung der dafür notwendigen Größen.

### 5.4.1 Prinzip NO<sub>x</sub> Berechnungsverfahren mit NH<sub>3</sub> Speicherstandmodell

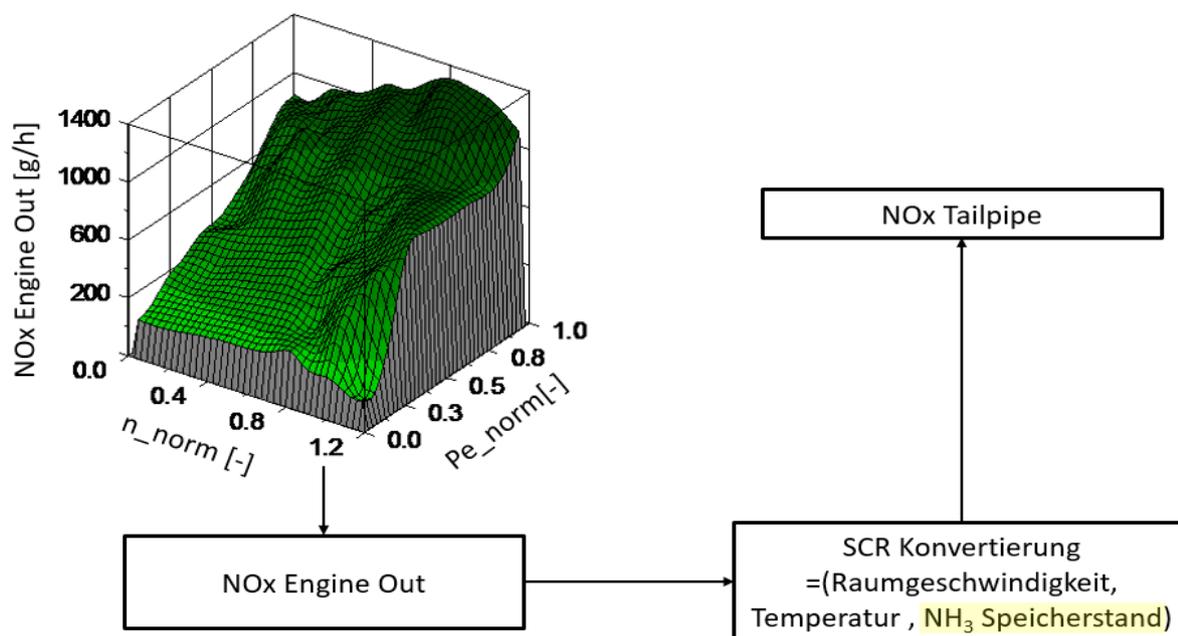


Abbildung 5-19: Prinzip NO<sub>x</sub> Berechnungsverfahren

Abbildung 5-19 zeigt das Prinzip des Basismodells des NO<sub>x</sub> Berechnungsverfahrens erweitert um den NH<sub>3</sub> Speicherstand. Es ist zu erkennen, dass die SCR Konvertierung nun nicht mehr nur von der Raumgeschwindigkeit und der Temperatur abhängig ist, sondern von einer weiteren Größe, dem NH<sub>3</sub> Speicherstand. Diese Größe wiederum wird erst tragend, wenn die Dosierung des Reduktionsmittels stoppt. In diesem Fall nimmt der NH<sub>3</sub> Speicherstand mit jeder Konvertierung der Stickoxide ab und reduziert zugleich die Konvertierungsrate, die mithilfe der Raumgeschwindigkeit und der Temperatur ermittelt wurde. Das Prinzip dieses Berechnungsschrittes wird in Abbildung 5-20 dargestellt.

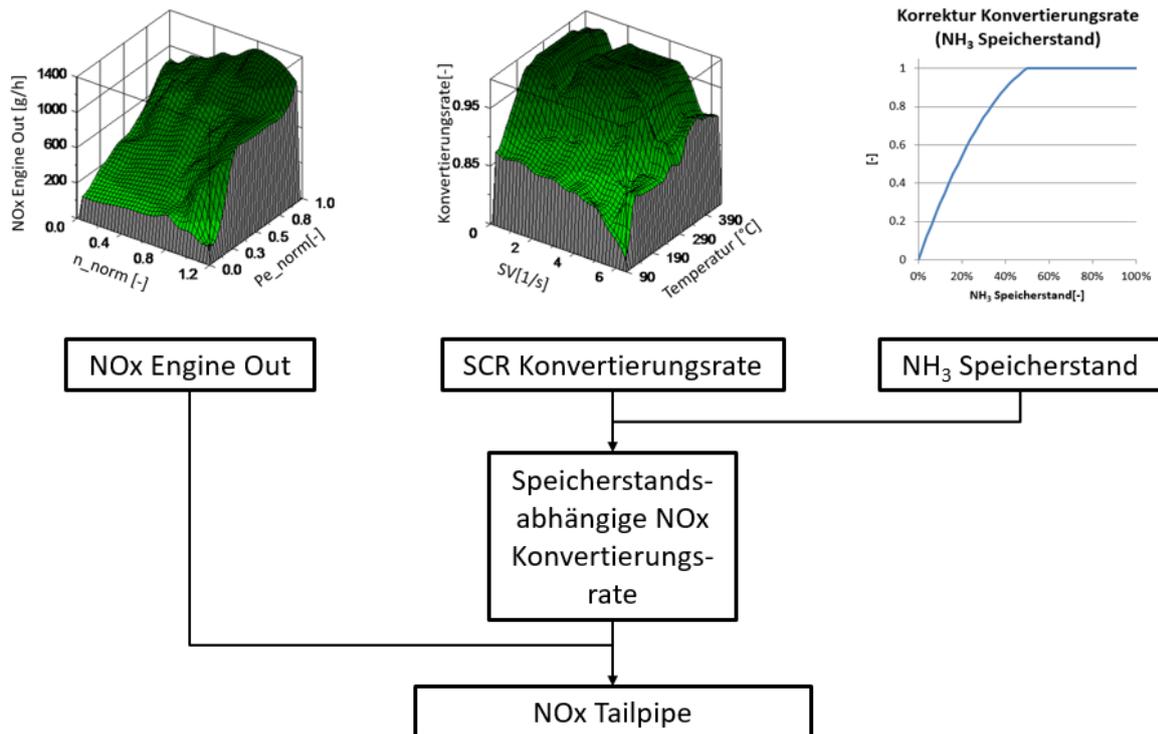


Abbildung 5-20: Prinzip des erweiterten NOx Berechnungsverfahrens

Die ersten Berechnungsschritte erfolgen wie in Kapitel 5.3 beschrieben. Anschließend werden die so ermittelten Daten in ein EXCEL File übertragen, um den nächsten Rechenschritt durchführen zu können. Dieser besteht, wie aus der vorigen Abbildung zu erkennen ist, aus der Korrektur der Konvertierungsrate mittels des NH<sub>3</sub> Speicherstands. Der Speicherstand zum Zeitpunkt n wird mithilfe der Gleichung (5-6) berechnet. Diese Formel wird aber erst dann tragend, wenn die Temperatur unter der Grenztemperatur liegt und die Dosierung des Reduktionsmittels gestoppt wurde.

$$NH_3 \text{ Speicherstand}_n = NH_3 \text{ Speicherstand}_{n-1} - \left( \frac{NO_x \text{ EO}_{n-1} - NO_x \text{ TP}_{n-1}}{M_{NO_x}} \right) * M_{NH_3} \quad (5-6)$$

$NH_3 \text{ Speicherstand}_n$  Speicherstand NH<sub>3</sub> zum Zeitpunkt n [g]

$NH_3 \text{ Speicherstand}_{n-1}$  Speicherstand NH<sub>3</sub> zum Zeitpunkt n-1 [g]

$NO_x \text{ EO}_{n-1}$  NOx Engine Out zum Zeitpunkt n-1 [g]

$NO_x \text{ TP}_{n-1}$  NOx Tailpipe zum Zeitpunkt n-1 [g]

$M_{NO_x}$  Molare Masse Stickoxid [g/mol]

$M_{NH_3}$  Molare Masse Ammoniak [g/mol]

Mithilfe des Speicherstands zum Zeitpunkt n wird aus der Korrekturkurve, Abbildung 5-20 rechts, die Korrektur für die Konvertierungsrate zum Zeitpunkt n ermittelt. Mit dieser Korrektur und der Konvertierungsrate wird nun die speicherstandsabhängige Konvertierungsrate, siehe Gleichung (5-7), berechnet.

$$KVR_{SP.} = KVR * Kor \quad (5-7)$$

$KVR_{SP.}$  Speicherstandsabhängige Konvertierungsrate [-]

$KVR$  Konvertierungsrate [-]

$Kor$  Korrekturfaktor [-]

Darüber hinaus werden weitere Größen für das Modell benötigt, diese werden im folgenden Kapitel erklärt.

## 5.4.2 Notwendige Größen und deren Validierung

Bei der Erstellung des Speicherstandmodells wurden verschiedene Größen benötigt, die im Folgenden kurz aufgelistet sind. Darüber hinaus werden die wichtigsten Größen beschrieben, ihre Werte ermittelt und zugleich validiert. Durch die enge Verknüpfung der einzelnen Größen kann es zu Überschneidungen unter den einzelnen Kapiteln kommen.

- $NH_3$  Speicherstand zu Beginn des Zyklus
- „Grenztemperatur“
- Einspritzmenge AdBlue
- Korrekturfaktor der Konvertierungsrate

### 5.4.2.1 $NH_3$ Speicherstand zu Beginn des Zyklus

Der Speicherstand zu Beginn des Zyklus ist für die Konvertierungsrate eine wichtige Größe im Modell, da anhand des Speicherstands der Korrekturfaktor ermittelt wird. Aus diesem Grund kann beziehungsweise muss, diese Größe je nach Vorkonditionierung angepasst werden, um die realen Bedingungen möglichst genau simulieren zu können.

Die Menge des eingespeicherten Reduktionsmittels ergibt sich aus Gleichung (5-8). Dieser Wert ist gleichzeitig der Startwert für die weitere Berechnung des Speicherstands, siehe Gleichung (5-6).

$$NH_3 \text{ Speicherstand}_0 = V_{Kat} * NH_3 \text{ Speicherfähigkeit} * Speicherstand_{\text{Beginn}} \quad (5-8)$$

$NH_3 \text{ Speicherstand}_0$   $NH_3$  Speicherstand zu Beginn [g]

$V_{Kat}$  Volumen Katalysator [l]

$NH_3 \text{ Speicherfähigkeit}$  Temperaturabhängige Speicherfähigkeit des Katalysators [g/l<sub>KAT</sub>]

$Speicherstand_{\text{Beginn}}$  Gewählter Speicherstand zu Beginn [%]

Der Speicherstand zu Beginn wird in Prozent des maximal möglichen Speicherstands angegeben. Abhängig von der derzeitigen Katalysatortemperatur und des jeweiligen Katalysatorvolumen verändern sich die eingespeicherte Menge des Reduktionsmittels, siehe Kapitel 3.2.1.2 und Abbildung 3-7.

Die Auswirkungen eines unterschiedlichen Speicherstands zu Beginn eines Zyklus zeigen die Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22.

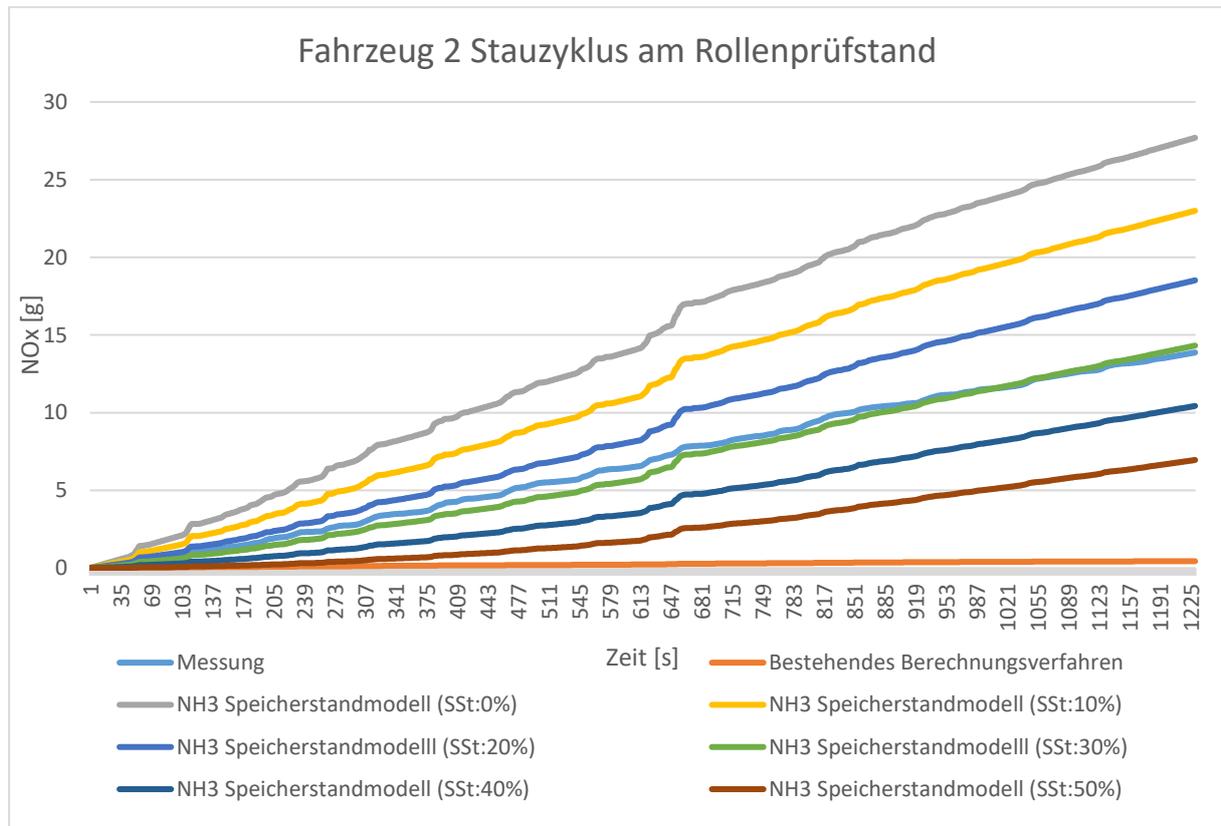


Abbildung 5-21: Auswirkungen unterschiedlicher Speicherstände zu Beginn eines Zyklus

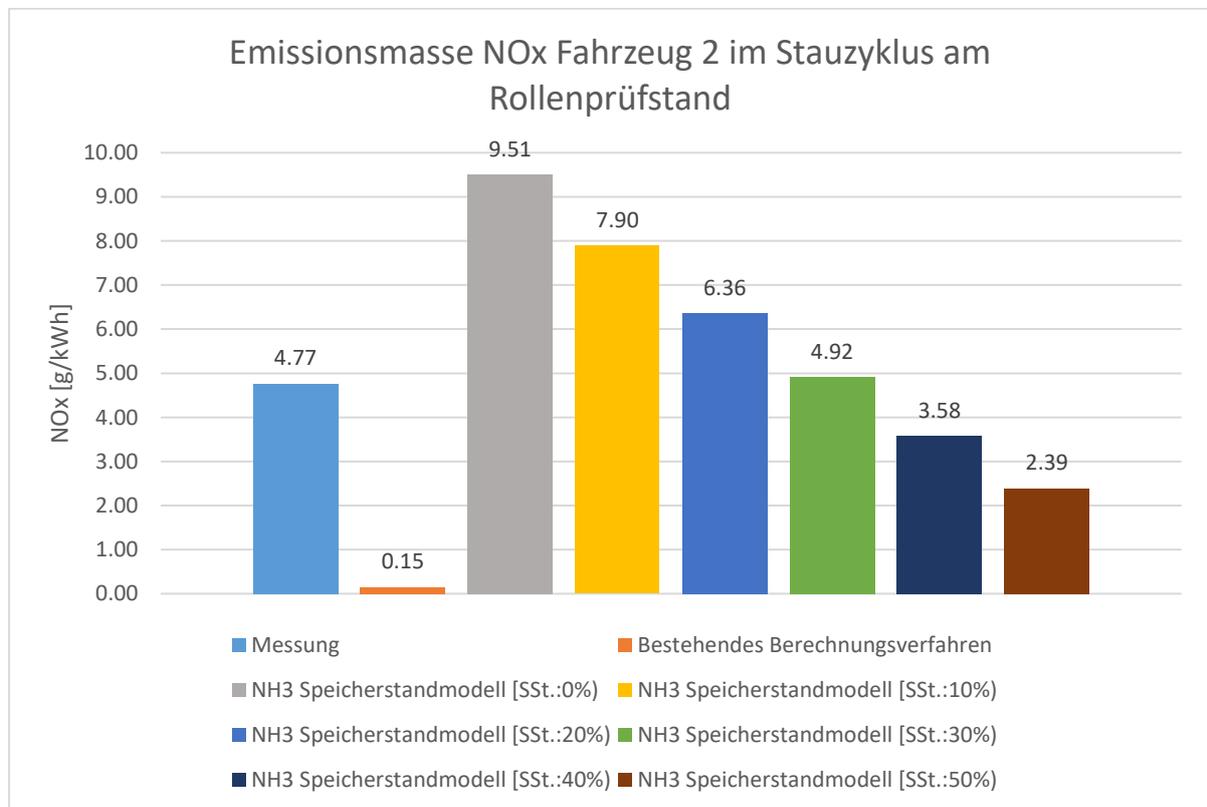


Abbildung 5-22: Emissionsmassen NOx des Fahrzeugs 2 im Stauzyklus bei unterschiedlichen Speicherständen zu Beginn

Für die Berechnung wurde eine „Grenztemperatur“, eine Erklärung dieser folgt in Kapitel 5.4.2.2, von 200 °C gewählt. Die in der Legende verwendete Abkürzung „SSt.“ bedeutet „Startspeicherstand“.

Man erkennt, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Ergebnissen der Emissionsmasse bei unterschiedlichen Startwerten gibt. Darüber hinaus sieht man, dass jede einzelne Variation des Startwertes näher an der Messung ist, also die realen Gegebenheiten besser darstellt, als die Berechnung mit dem Basismodell. Am ehesten wird die Messung mit einem Startwert von 30 % getroffen. Aufgrund der Vorkonditionierung, 30 Minuten im Leerlauf, kann man auch davon ausgehen, dass in diesem Fall nicht mit einem Speicherstand von 50 % gestartet wurde da die Temperatur im Leerlauf unter der Grenztemperatur liegt und bereits hier die eingespeicherte NH<sub>3</sub> Menge reduziert wird. Wie bereits erwähnt und in den vorigen Abbildungen sichtbar gemacht, ist es deshalb nicht möglich, einen fixen Startwert vorzugeben mit dem jede Berechnung durchgeführt werden kann. Dieser Wert sollte individuell an die Vorkonditionierung angepasst werden.

Bei den RDE-Fahrten nach ISC-Kriterien wird anfangs immer von einem Speicherstand von 50 % ausgegangen, da die Temperatur des Katalysators während der „Warm Up“ Phase hoch genug war um eine Speicherung zu ermöglichen. Es wurde die Annahme getroffen, dass die fahrzeuginterne Motorsteuerung den Speicherstand auf 50 % regelt, um kurzzeitig auftretende NOx Spitzen zu kompensieren und den NH<sub>3</sub> Schlupf bei zu hoher Dosierung zu minimieren.

#### 5.4.2.2 „Grenztemperatur“

Als Grenztemperatur wird jene Temperatur bezeichnet die, als Grenze zum Stoppen beziehungsweise Starten der Eindosierung genommen wurde. Das bedeutet, dass unter dieser Temperatur das NH<sub>3</sub>-Speicherstandmodell zu arbeiten beginnt und die Gleichung (5-5) gestartet wird, um den Speicherstand laufend zu aktualisieren und die Konvertierungsrate mithilfe des aus dem Speicherstand definierten Korrekturfaktors zu korrigieren. Über der Grenztemperatur wird im Modell die Eindosierung gestartet und die NH<sub>3</sub> Menge im Katalysator erhöht. Dies geschieht über Gleichung (5-9) bei einem Speicherstand der größer als 40 % ist, und über Gleichung (5-10) bei einem Speicherstand unter 40 %. Diese Variante wurde gewählt um den NH<sub>3</sub>-Speicher möglichst rasch anzuheben damit die Konvertierungsrate möglichst hoch ist. Wenn 50 % des Katalysators „befüllt“ sind wird die Eindosierung im Modell gestoppt und der Speicherstand auf diesem Wert gehalten.

$$NH_3 \text{ Speicherstand}_{n+1} = NH_3 \text{ Speicherstand}_n + NH_3 \text{ Eindosierung (St.>40\%)} * t * M_{NH_3} \quad (5-9)$$

$$NH_3 \text{ Speicherstand}_{n+1} = NH_3 \text{ Speicherstand}_n + NH_3 \text{ Eindosierung (St.<40\%)} * t * M_{NH_3} \quad (5-10)$$

Der Parameter „t“ bestimmt die Zeit, durch die Berechnung in 1Hz Schritten ist dieser Wert stets 1. Die eindosierten NH<sub>3</sub> Mengen werden über die Gleichungen (5-11) und (5-12) berechnet. Abhängig sind diese Werte von der vorgegebenen Einspritzmenge AdBlue, siehe Kapitel 5.4.2.3, und der Motorleistung. Der Wert 0,325 in den Gleichungen bezieht sich auf die Harnstoffmenge im AdBlue, diese liegt bei 32,5%.

$$NH_3 \text{ Eindosierung (St.>40\%)} = \frac{\dot{m}_{AdBlue(St.>40\%)NORM} * 0,325}{M_{Harnstoff} * 3600} * 2 * P_{Nenn} \quad (5-11)$$

$$NH_3 \text{ Eindosierung (St.<40\%)} = \frac{\dot{m}_{AdBlue(St.<40\%)NORM} * 0,325}{M_{Harnstoff} * 3600} * 2 * P_{Nenn} \quad (5-12)$$

$NH_3 \text{ Eindosierung}$	Eindosierte $NH_3$ Menge [mol/s]
$\dot{m}_{AdBlue \text{ NORM}}$	Einspritzmenge AdBlue [g/hNORM]
$M_{Harnstoff}$	Molare Masse des Harnstoff [g/mol]
$P_{Nenn}$	Nennleistung [kW]

Aus den oben erklärten Gründen ist erkennbar, dass die Grenztemperatur eine der wichtigsten Größen des Modells ist. Aus der Literatur werden unterschiedliche Werte diese Temperatur genannt, wobei alle im Bereich um 200 °C, siehe [4], [5] und [7], angeordnet sind. Des Weiteren ist nicht klar, welche Temperatur die einzelnen Fahrzeughersteller als Grenze gesetzt haben. Zur Ermittlung dieser Größe wurden die Messdaten des Fahrzeugs 6 ausgewertet, da es dort über die CAN Daten möglich war, die Eindosierung des AdBlue und die Temperatur vor und nach dem Katalysator aufzuzeichnen.

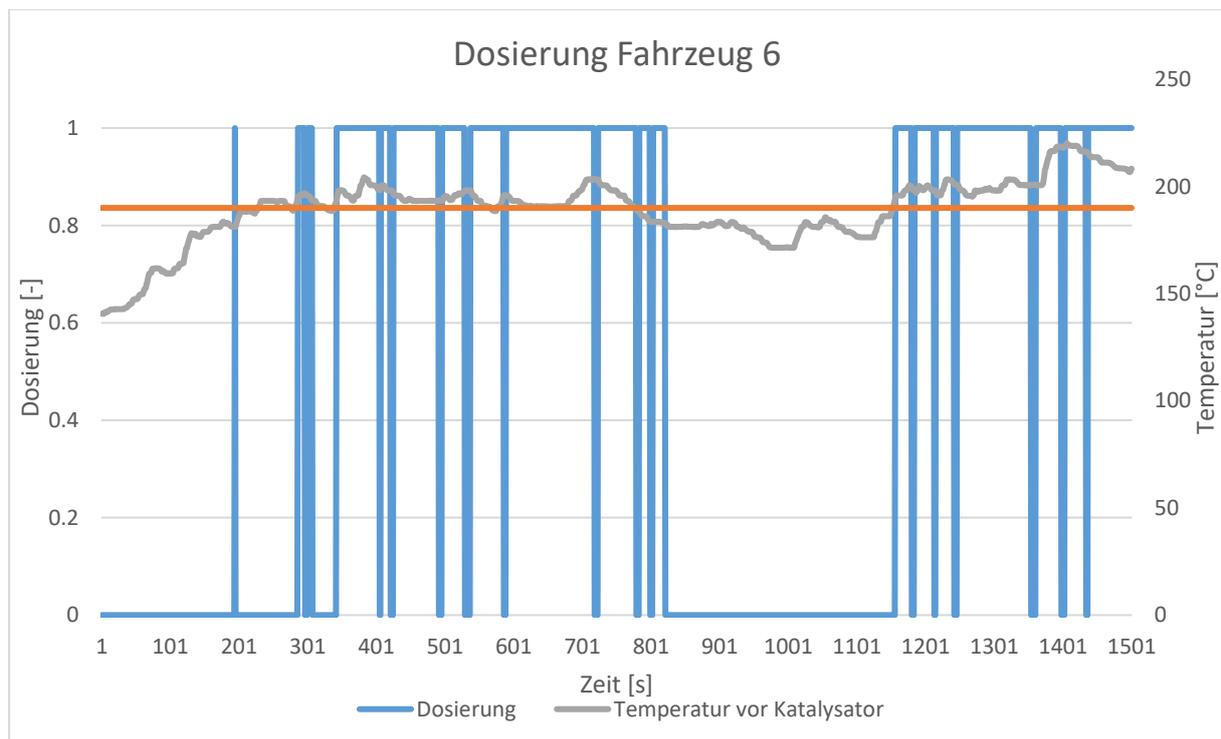


Abbildung 5-23: Dosierung aktiv/inaktiv Fahrzeug 6 während der ersten 1500s einer RDE Fahrt

Abbildung 5-23 zeigt nun diese Dosierung und die Temperatur vor dem Katalysator, wobei die Darstellung der Dosierung sich nur darauf bezieht, ob sie aktiv (1) oder inaktiv ist (0). Anhand der orangefarbenen Linie, die eine Temperatur von 190 °C widerspiegelt, erkennt man, dass das Starten beziehungsweise Stoppen der Dosierung bei circa 190 °C stattfindet. Anhand dieses Wertes wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der die Grenztemperatur mit verschiedenen Werten angenommen und der Einfluss eben dieser auf das Ergebnis ermittelt wurde.

Abweichung der Gesamtemission NOx								
Prozentuelle Abweichungen beziehen sich auf die Messung		Modell (GT:180°C)	Modell (GT:185°C)	Modell (GT:190°C)	Modell (GT:195°C)	Modell (GT:200°C)	Modell (GT:205°C)	Modell (GT:210°C)
Fahrzeug 1	Stadtfahrt	-43.3%	-42.6%	-40.4%	-34.1%	-25.5%	-7.0%	18.4%
	Stadtfahrt	-45.0%	-44.3%	-42.6%	-40.2%	-34.7%	-23.1%	-11.8%
Fahrzeug 2	Stauzyklus	-2.5%	14.2%	98.2%	129.9%	222.7%	282.2%	352.1%
Fahrzeug 3	Stauzyklus	-42.2%	-42.2%	-38.1%	-30.2%	54.1%	210.7%	690.0%
Fahrzeug 4	Stauzyklus	-77.5%	-76.5%	-72.7%	-69.7%	-61.9%	-52.2%	-38.8%
Fahrzeug 6	Stadtfahrt	-47.2%	-20.1%	1.4%	50.9%	128.1%	143.8%	151.2%
Fahrzeug 7	Stauzyklus	-90.3%	-85.0%	-55.9%	-52.4%	-50.1%	-47.7%	-45.1%
	Stadtfahrt	-39.0%	-31.9%	-12.7%	8.4%	42.1%	116.3%	231.2%

Tabelle 5-2: Abweichung der Gesamtemissionen NOx

Die Berechnung für die Erstellung der Tabelle 5-2 wurde mit einem Speicherstand zu Beginn des Zyklus von 50 % durchgeführt. Durch die Vorkonditionierung dieser Zyklen - sie alle wurden mit einer ausreichenden „Warm Up“ Phase gestartet - ist diese Annahme durchaus berechtigt, wobei wieder erwähnt werden muss, dass die fahrzeuginterne Regelstrategie nicht bekannt ist und somit eine Unsicherheit bezüglich der 50% besteht. Bei den in Tabelle 5-2 genannten Stadtfahrten handelt es sich um RDE Fahrten, die Stauzyklen wurde am Rollenprüfstand gefahren. Zyklen wie jener in Abbildung 5-21 - also ohne „Warm Up“ Phase als Vorkonditionierung - wurden nicht in diese Sensitivitätsanalyse eingearbeitet, da hier bereits das Problem eines unbekanntem Speicherstands zu Beginn des Zyklus besteht und diese Größen unmittelbar miteinander verknüpft sind.

Zu erkennen ist, dass die ideale Grenztemperatur für jedes Fahrzeug beziehungsweise für jeden Zyklus zum Teil stark variiert und die Ergebnisse in hohem Maß beeinflussen. Da die Grenztemperatur für spätere Betrachtungen als fixe Größe definiert werden soll und auch im Hinblick auf die Erzeugung eines Modells für ein „Durchschnitts-Nutzfahrzeug“ wurde sie für weitere Berechnungen bei 200 °C festgelegt, da dieser Wert in etwa dem Mittelwert der oben dargestellten Temperaturen entspricht.

### 5.4.2.3 Einspritzmenge AdBlue

Die Einspritzmenge des AdBlue wurde bereits in Gleichung (5-11) und (5-12) erwähnt. Die Größenordnung der Einspritzmenge ist in [6] definiert und beträgt 80-15000 [g/h]. Durch den Zugriff auf die dafür erforderlichen CAN Daten des Fahrzeugs 6 konnte dieser Wert überprüft werden.

In Abbildung 5-24 ist AdBlue Dosierung des Fahrzeug 6 während der ersten 1500 Sekunden einer RDE Fahrt aufgetragen.

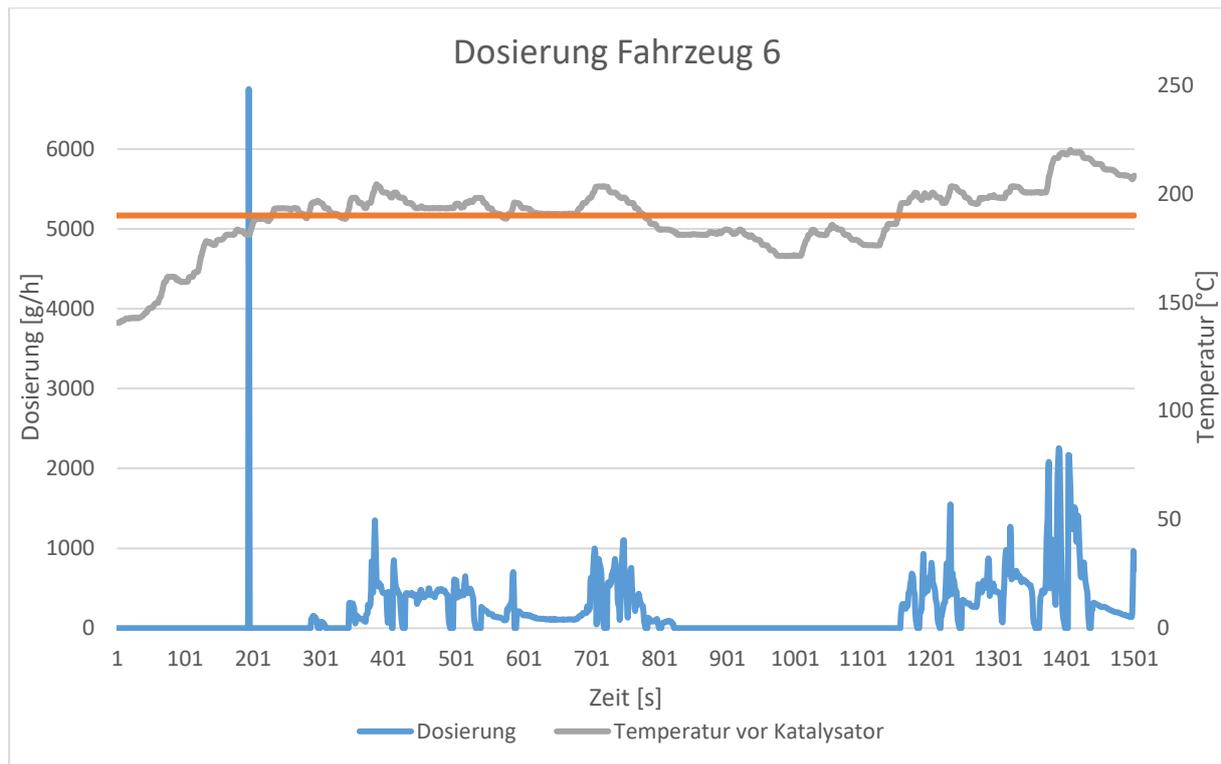


Abbildung 5-24: Dosierung AdBlue Fahrzeug 6 während der ersten 1500s einer RDE Fahrt

Mithilfe dieser Daten wurde festgestellt, dass es zu Beginn der Dosierung, zu einer erhöhten Eindosierung des AdBlue kommt, vermutlich um den Speicherstand des  $\text{NH}_3$  zu erhöhen. Der Wert der erhöhten Eindosierung beträgt circa 6800 [g/h], wobei sie im Mittelwert über den Zyklus 600 [g/h] beträgt. Zu erwähnen ist, dass die eindosierte Menge AdBlue im Bereich des in [6] beschriebenen Dosiermoduls liegt. Aufgrund der Messdaten wurden zwei verschiedene Einspritzmengen für das Modell definiert: Eine für einen Speicherstand kleiner als 40 % und eine für einen Speicherstand über 40 %. Um eine Vergleichbarkeit unter den einzelnen Fahrzeugen herstellen zu können, wurde die Einspritzmenge mithilfe der Motorleistung normiert, siehe Gleichung (5-13). Solange keine große Änderung der Einspritzmenge durchgeführt wird, sind die Auswirkungen auf das Gesamtergebnis gering beziehungsweise nicht vorhanden.

$$\dot{m}_{\text{AdBlue } NORM} = \frac{\dot{m}_{\text{AdBlue}}}{P_{\text{Nenn}}} \quad (5-13)$$

#### 5.4.2.4 Korrekturfaktor

Wie in Abbildung 5-20 dargestellt ist, hängt die speicherstandsabhängige Konvertierungsrate von der Konvertierungsrate und dem Korrekturfaktor, der mithilfe des momentanen Speicherstand ermittelt wird, zusammen. Die erste Annahme, die getroffen wurde, ist, dass der Korrekturfaktor linear mit dem Speicherstand abnimmt, da durch den geringeren Speicherstand die Wahrscheinlichkeit geringer ist, dass ein  $\text{NH}_3$ -Molekül mit einem  $\text{NO}_x$ -Molekül zusammentrifft und reagiert. In Abbildung 5-25 ist dieser Zusammenhang anhand der Korrekturkurve dargestellt.

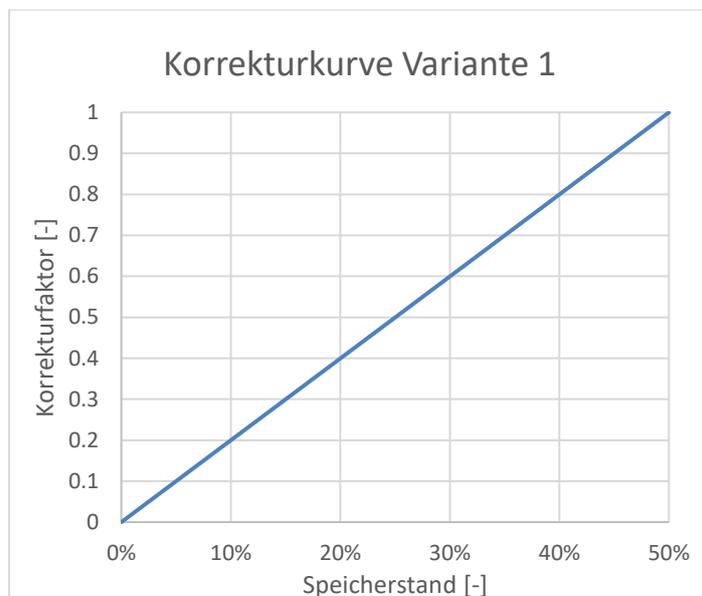


Abbildung 5-25: Korrekturkurve Variante 1

Mithilfe dieser Korrekturkurve und einer Grenztemperatur von 200°C wurden die ersten Berechnungen für das Fahrzeug 2 durchgeführt und mit der Messung verglichen.

Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27 stellen die Ergebnisse dieser Berechnungen dar. Es handelt sich in beiden Fällen um einen Stauzyklus, der am Rollenprüfstand gefahren wurde, wobei einer mit einer Vorkonditionierung von einer halben Stunde Leerlauf und der andere durch Erwärmung der Abgasanlage auf 250 °C gestartet worden ist. Aufgrund dessen ist der Stauzyklus „idling“ mit einem Startspeicherstand von 20 % und der Stauzyklus „hot“ mit 50 % berechnet worden. Der Startspeicherstand von 20% wurde mit einer PHEM Simulation, in der das Fahrzeug eine halbe Stunde im Leerlauf betrieben wird, ermittelt. Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen das Speicherstandsmodell die Messung stark überschätzt, im Falle des Stauzyklus „hot“ um den Faktor sieben. Der Grund für diese massive Überschätzung der Realität wurde auf die lineare Korrekturkurve zurückgeführt. Dort kommt es bereits bei einer geringen Abnahme des Speichers zu einer starken Reduktion des Korrekturfaktors und in weiterer Folge zu einer noch größeren Reduktion der speicherstandsabhängigen Konvertierungsrate und somit einer Erhöhung der NO<sub>x</sub> Emissionen.

Zu den beiden Abbildungen ist noch zu erwähnen, dass die Grenztemperatur mit 200 °C mit hoher Wahrscheinlichkeit nichtzutreffend ist, da bei einer Sensitivitätsanalyse ein Wert von circa 180°C als optimaler Wert für dieses Fahrzeug bestimmt wurde. Wie jedoch in Kapitel 5.4.2.2 bereits erwähnt wurde, soll das Modell für ein Durchschnitts-Nutzfahrzeug erstellt werden. Dieser Sachverhalt tritt auch in den weiteren Betrachtungen auf.

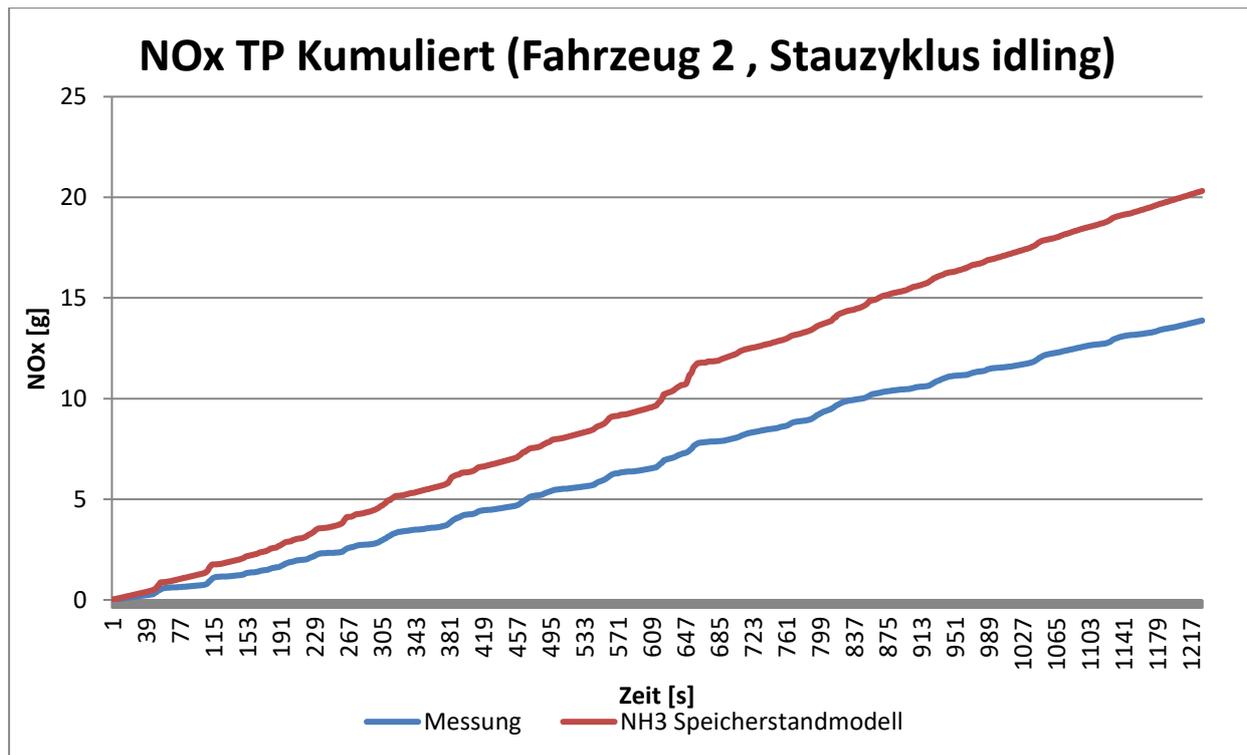


Abbildung 5-26: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: idling), Variante 1

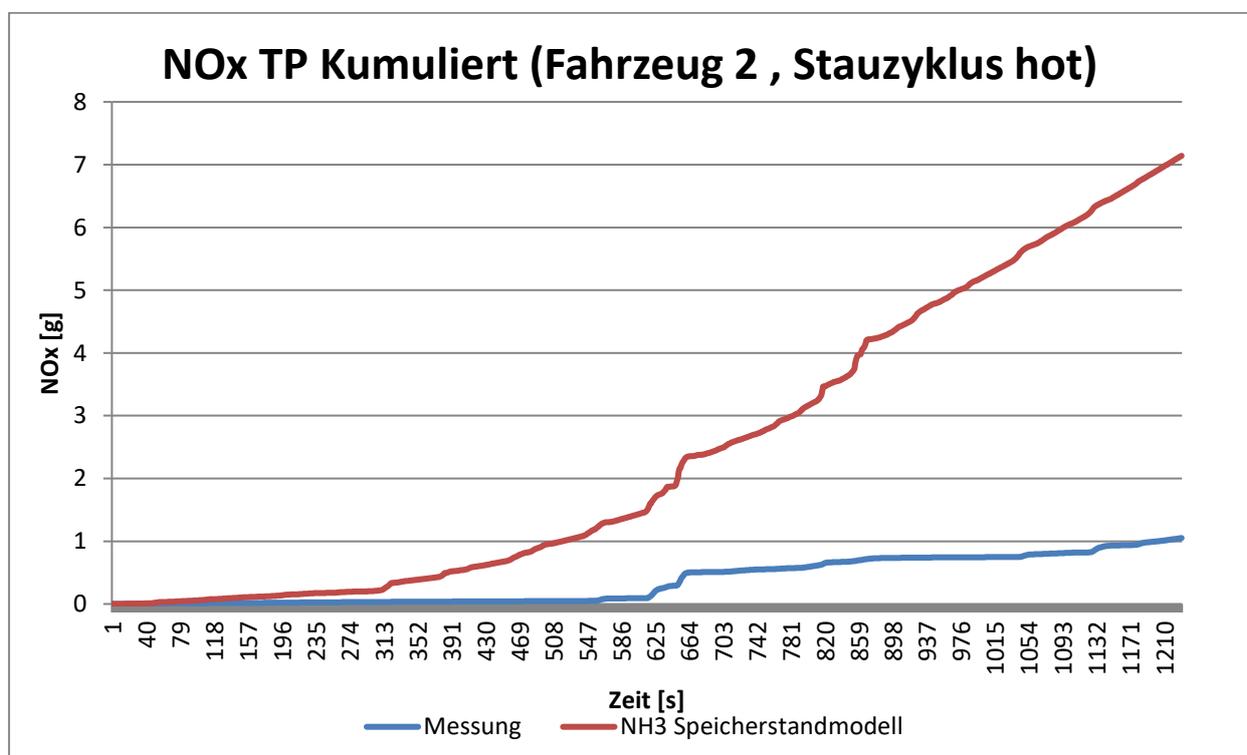


Abbildung 5-27: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: hot), Variante 1

Die oben gesammelten Erkenntnisse führten zur zweiten Variante der Korrekturkurve, wie sie in Abbildung 5-28 dargestellt ist.

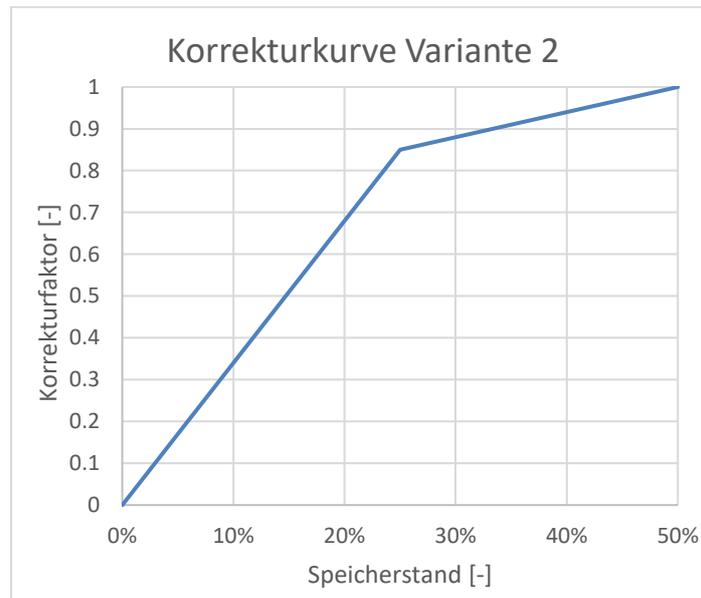


Abbildung 5-28: Korrekturkurve Variante 2

Der ausgehende Grundgedanke zur Erstellung der zweiten Variante war, dass bei kurzem Unterschreiten der Grenztemperatur die Konvertierungsrate nicht so radikal verringert werden soll, da dies bei den geringen Emissionen, die bei EURO VI Fahrzeugen auftreten, zu einer drastischen Überschätzung der Gesamtemissionen führen kann. Mit der neuen Variante wurden die Berechnungen für das Fahrzeug 2 erneut durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30 dargestellt. Gegenübergestellt sind in diesen Abbildungen auch die Ergebnisse aus Variante 1, um deren Ergebnisse miteinander vergleichen zu können.

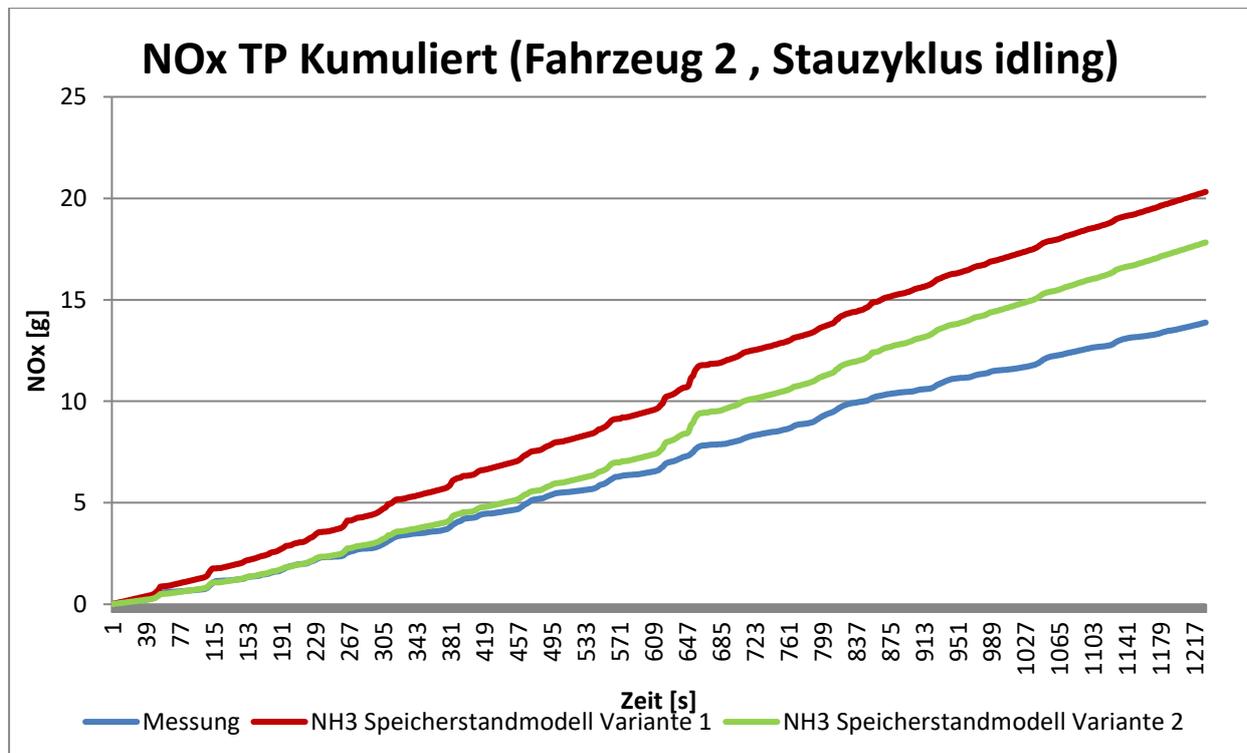


Abbildung 5-29: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: idling), Variante 2

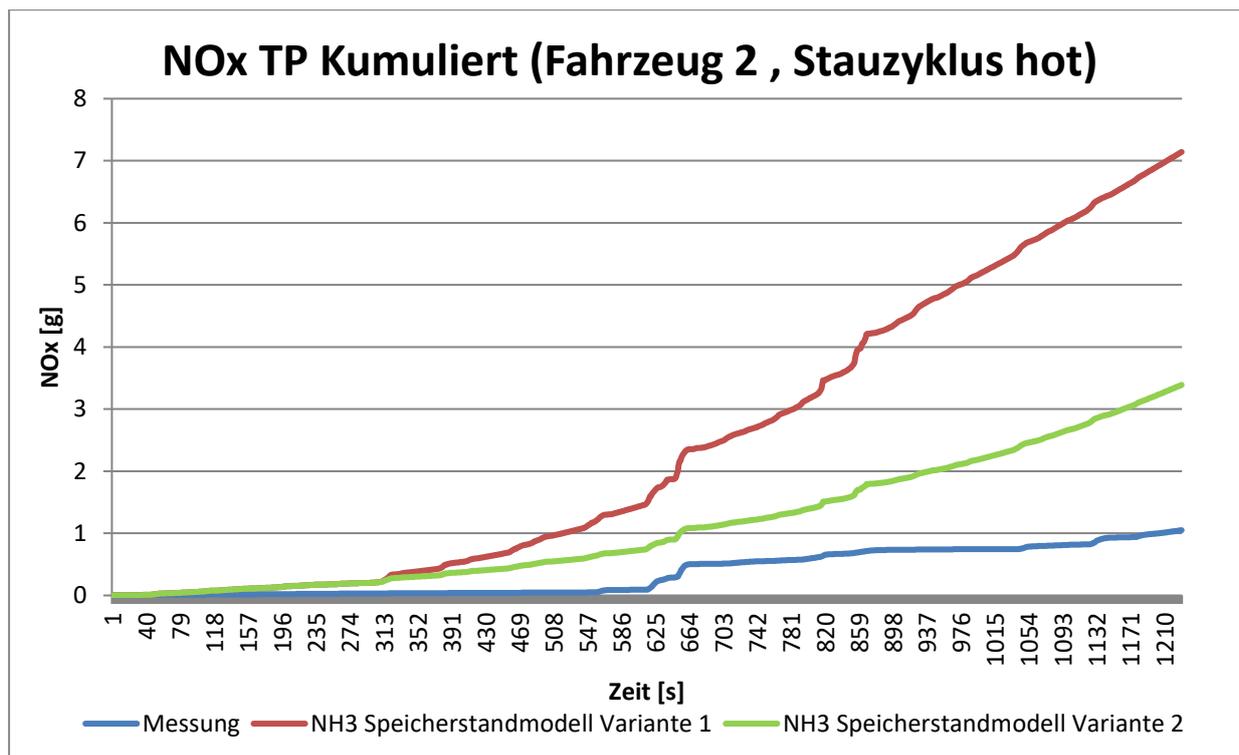


Abbildung 5-30: NOx TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: hot), Variante 2

Der Einfluss der neuen Korrekturkurve ist im ersten Teil der beiden Zyklen gut sichtbar, da aufgrund der bei hohen Speicherständen abgeflachten Korrekturkurve die Steigung der Kumulierten NOx TP der Variante 2 geringer als die der Variante 1 und somit besser der Messung entspricht. Bei Erreichen des zweiten Kurvenabschnitts (Speicherstand von 25 %) ist die Steigung annähernd gleich und die Kurven sind um einen fast konstanten Wert, der durch den ersten Abschnitt definiert wurde, zueinander versetzt.

Nach Durchsicht interner Quellen wurde festgestellt, dass es sich bei dieser Korrekturkurve mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um eine Zusammensetzung aus linearen Teilstücken handelt, sondern um eine Funktion, die am ehesten mit einem Polynom zweiter Ordnung approximiert werden kann. Diese Korrekturkurve ist in Abbildung 5-31 dargestellt.

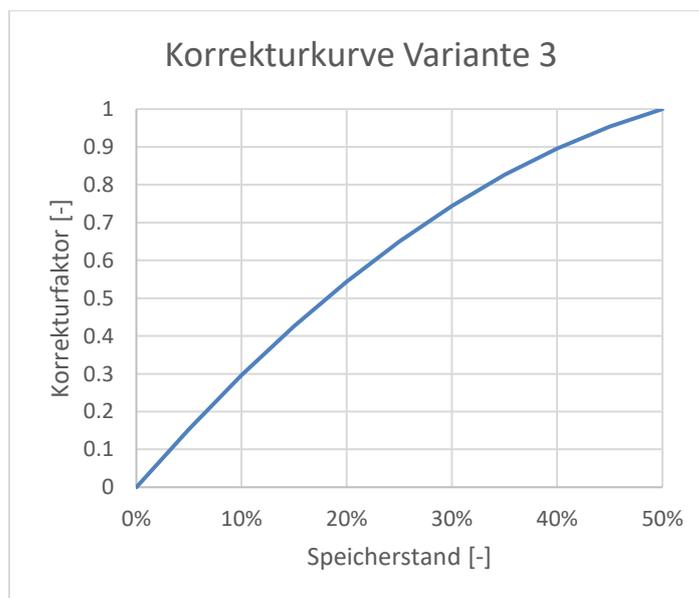


Abbildung 5-31: Korrekturkurve Variante 3

Die Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33 stellen den Verlauf der kumulierten NO<sub>x</sub> mit den einzelnen Varianten dar. Man erkennt das die Variante 2 am besten geeignet ist in diesem Fall den realen Verlauf der NO<sub>x</sub> simulieren zu können.

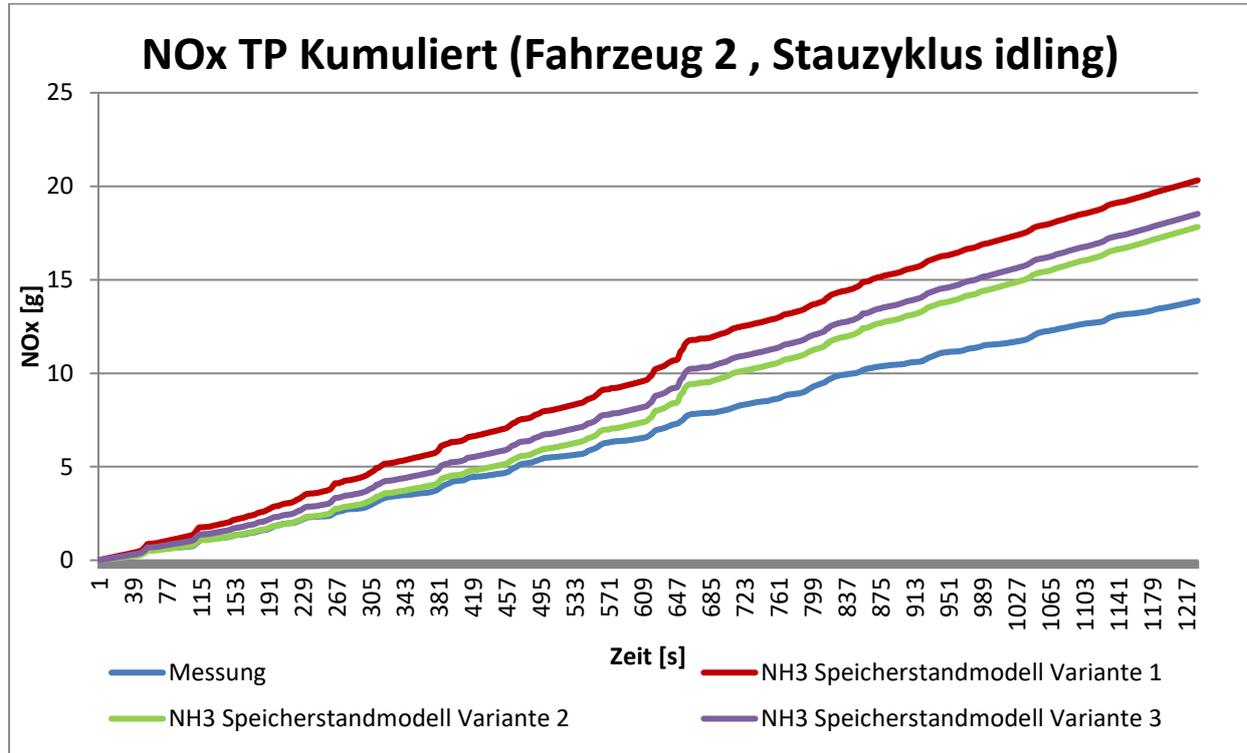


Abbildung 5-32: NO<sub>x</sub> TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: idling), Variante 3

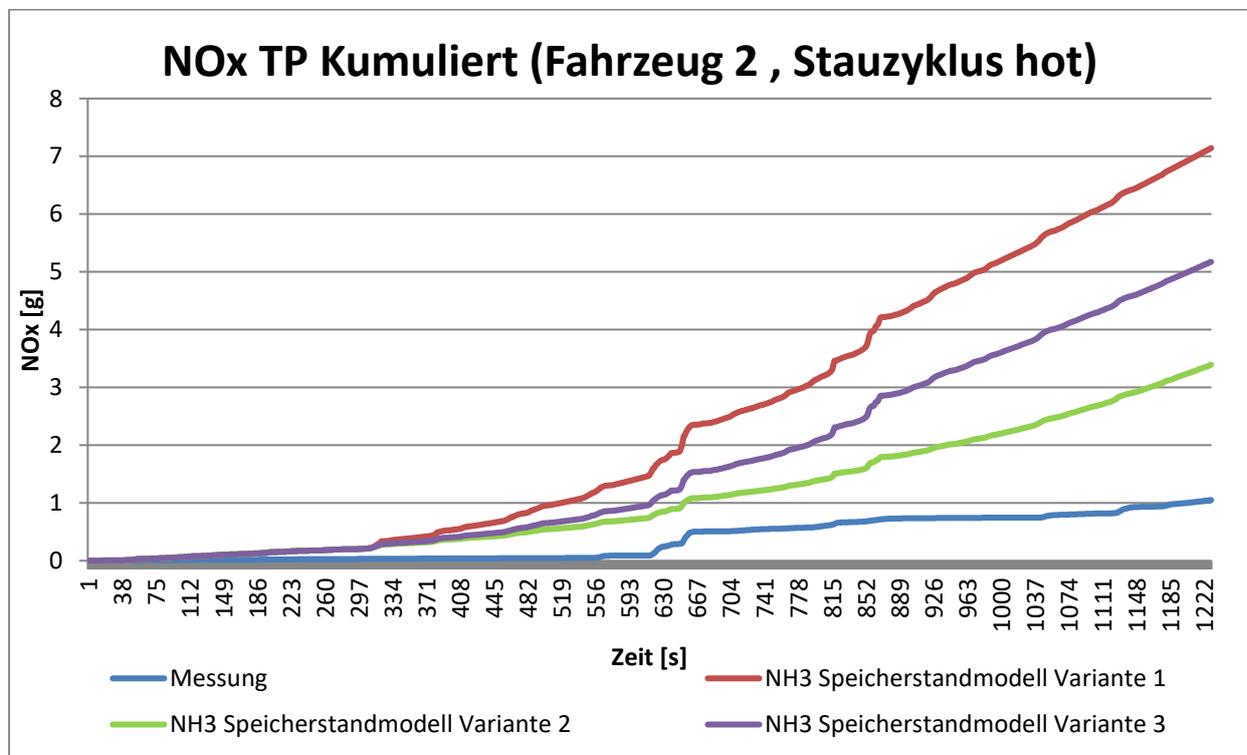


Abbildung 5-33: NO<sub>x</sub> TP Kumuliert (Fahrzeug 2, Stauzyklus VK: hot), Variante 3

In Abbildung 5-34 sind die kumulierten NO<sub>x</sub> TP für alle drei Varianten, die Messung und die Berechnung mithilfe des etablierten Berechnungsverfahrens aufgetragen. Es handelt sich hierbei um ein Durchschnittsfahrzeug, welches aus Fahrzeug 2, 3 und 4 gebildet wurde, für

die anderen Fahrzeuge wurden keine Messungen am Rollenprüfstand durchgeführt. Die Kurve Messung wurde aus den Messwerten der einzelnen Fahrzeuge mittels Mittelwertbildung ermittelt.

Es ist zu erkennen, dass - wie vorhin bereits gezeigt und auch hier zu erwarten war - das Basismodell am schlechtesten die Messung widerspiegelt. Die Variante 1 kann ebenfalls ausgeschlossen werden, da sie bereits bei fahrzeugspezifischen Berechnungen am unpräzisesten war. Am genauesten wird die Messung durch Variante 2 getroffen, wobei der Unterschied zur Variante 3 minimal ist.

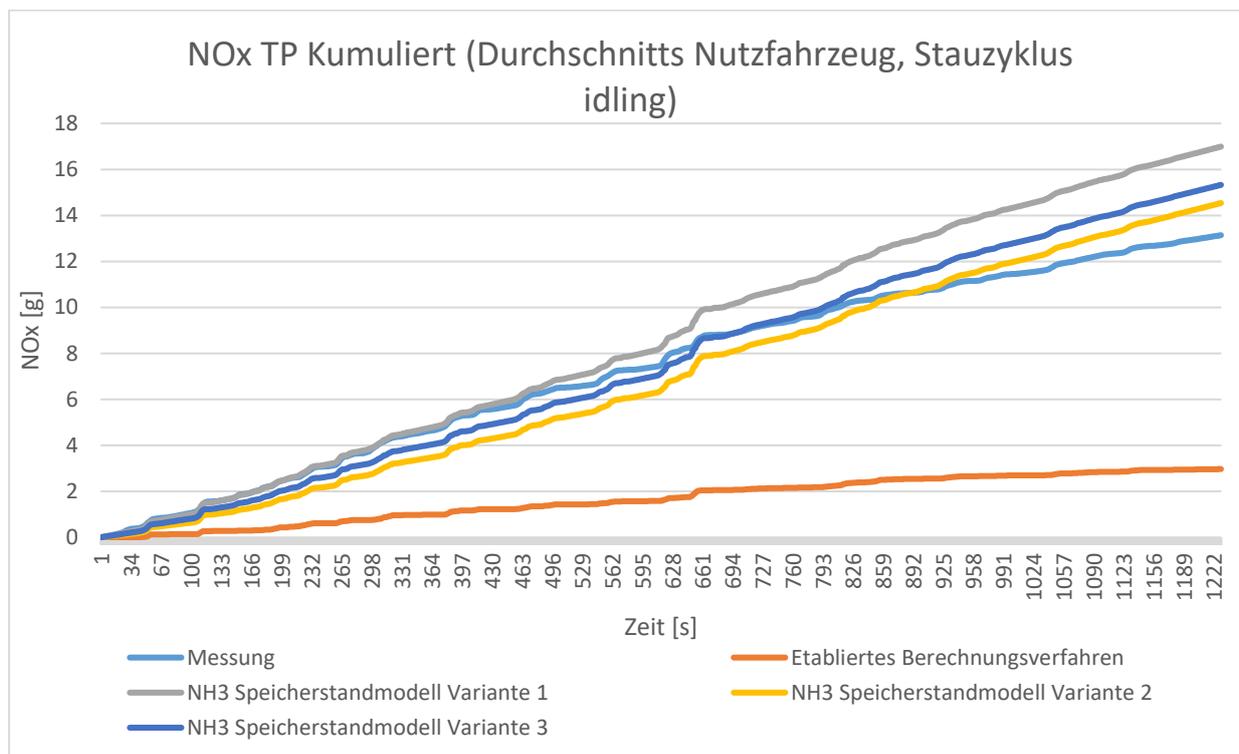


Abbildung 5-34: NOx TP Kumuliert (Durchschnitts Nutzfahrzeug Stauzyklus VK: idling)

Zum Abschluss dieses Unterkapitels ist noch zu sagen, dass die Variante 2 in den meisten Fällen, vor allem bei der für die Berechnung relevanten Grenztemperatur von 200°C die Realität besser wiedergegeben hat. Nur vereinzelt ist Variante 3 besser geeignet. Aus diesem Grund wurde für weitere Berechnungen die Korrekturkurve aus Variante 2 verwendet.

### 5.4.3 Simulationsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse mit dem NH<sub>3</sub>-Speichermodell dargestellt und analysiert. Sie werden auch den Ergebnissen aus dem Basis-Modell und der Messung gegenübergestellt.

Die in Abbildung 5-35 dargestellten Ergebnisse entsprechen den Ergebnissen, die in Abbildung 5-11 aufgetragen sind, erweitert um die Berechnung mithilfe des Speicherstandmodells.

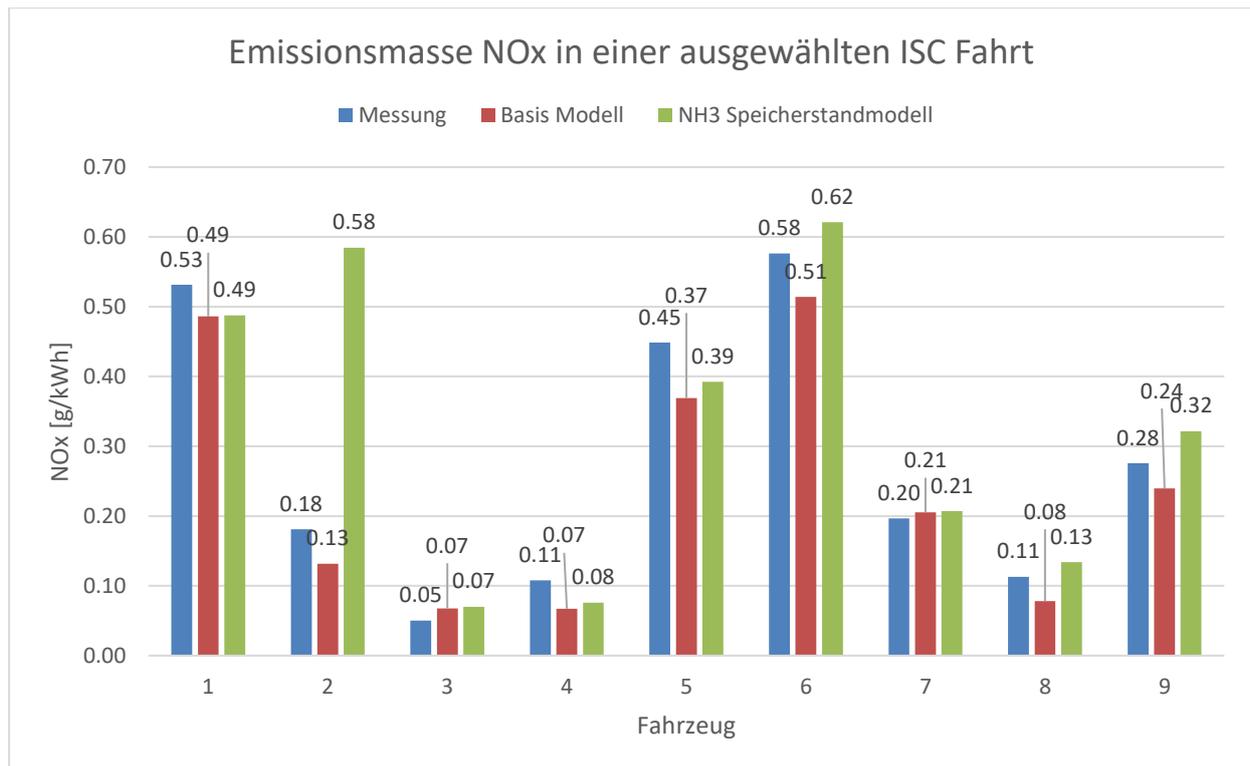


Abbildung 5-35: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einer ausgewählten ISC Fahrt, Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren

Die Berechnung im Speicherstandmodell wurde mit einer Grenztemperatur von 200 °C und der Korrekturkurve Variante 2 durchgeführt. Die Katalysatorvolumina und die Motorleistung wurden fahrzeugspezifisch festgelegt. Aufgrund der gefahrenen Zyklen war zu erwarten, dass es in den meisten Fällen zu keinen großen Änderungen kommt. Auffallend ist die massive Abweichung des Fahrzeug 2 und die geringe Abweichung von Fahrzeug 6.

Im Falle des Fahrzeugs 2 können die Ursachen vielfältiger Art sein. Der erste Grund der einen bedeutenden Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, ist die Grenztemperatur von 200 °C. Wie in Kapitel 5.4.2.4 erwähnt, wurde durch eine Sensitivitätsanalyse festgestellt, dass bei diesem Fahrzeug die Grenztemperatur bei circa 180 °C liegt. In Abbildung 5-36 ist der Einfluss der Grenztemperatur auf die Emissionsmasse dargestellt.

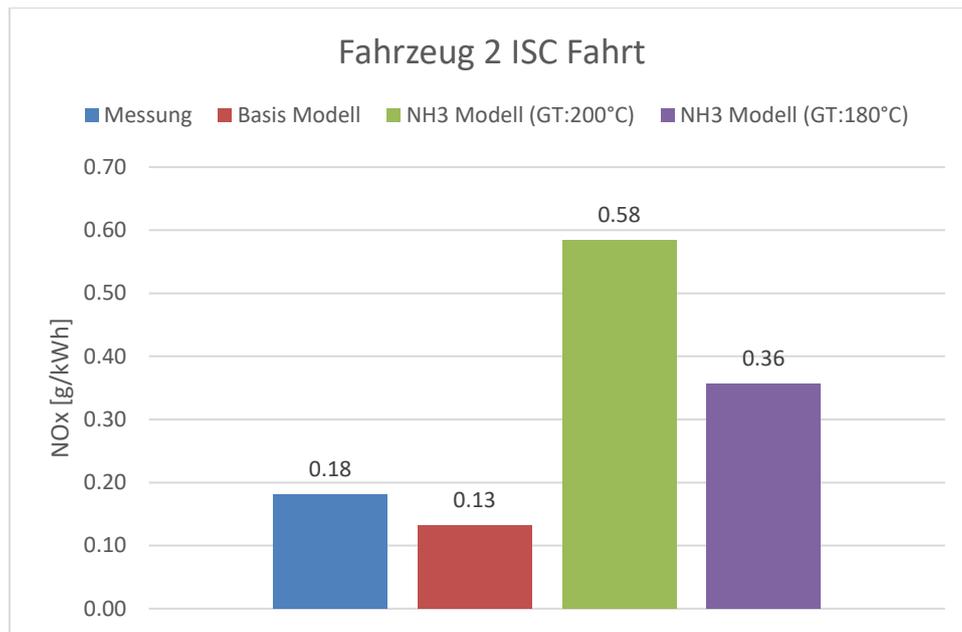


Abbildung 5-36: Emissionsmassen NOx Fahrzeug 2, ISC Fahrt

Man erkennt das durch die Änderung der Grenztemperatur eine signifikante Änderung der Emissionsmasse zustande kommt. Diese Wirkung wurde bereits in Kapitel 5.4.2.2 beschrieben.

Durch diese Änderung wird vermutlich das Speicherstandmodell aktiviert, bevor es in der Realität zum Stopp der Dosierung kommt. Durch den früheren Zugriff auf das Modell und das spätere Stoppen wird der Speicherstand im größeren Maße verringert. Dies führt wiederum zu einem geringeren Korrekturfaktor, der in weiterer Folge die Konvertierungsrate nach unten korrigiert und im Endeffekt zu höheren NOx Emissionen führt. Bei den vorherrschenden geringen Emissionen bei diesem Fahrzeug kommt es dadurch zu einer massiven Überschätzung der NOx Emissionen.

Fahrzeug 6 verhält sich bei den Grenztemperaturen ähnlich wie Fahrzeug 2. Auch hier wurde in der Sensitivitätsanalyse festgestellt, dass der Wert wahrscheinlich geringer ist als 200 °C. Der Effekt ist somit derselbe wie bereits vorab beschrieben. Im Falle des Fahrzeugs 6 ist die in Abbildung 5-35 dargestellte Abweichung direkt auf die Grenztemperatur zurückzuführen. Abbildung 5-37 stellt den Einfluss der Grenztemperatur auf die Berechnung und dem Gesamtergebnis für Fahrzeug 6 dar.

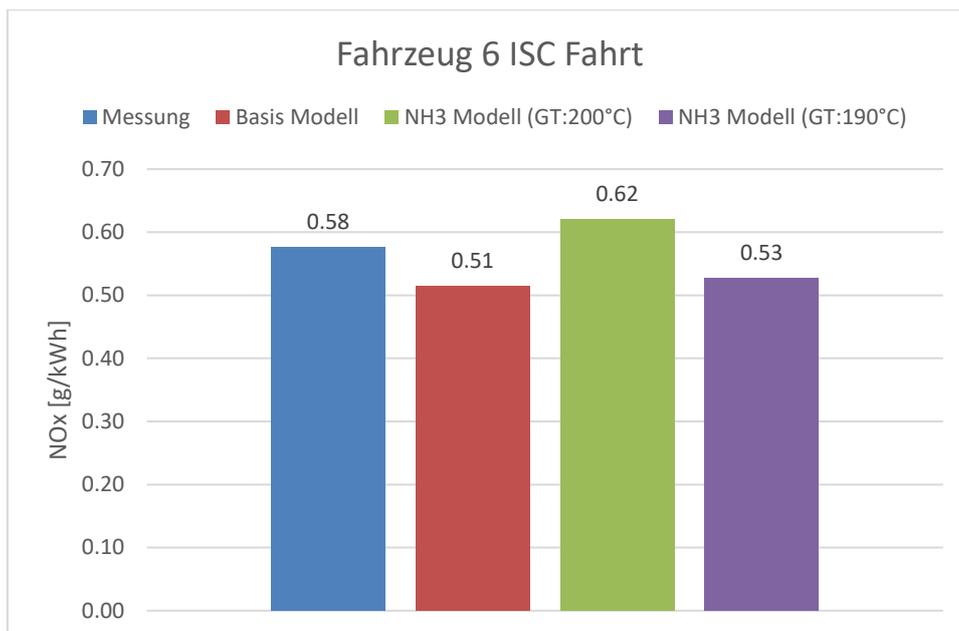


Abbildung 5-37: Emissionsmassen NOx Fahrzeug 6, ISC Fahrt

Wie bereits in Kapitel 5.4.2.2 erklärt, war es bei diesem Fahrzeug möglich, auf die CAN Daten für die Einspritzung und die notwendigen Temperaturen vor und nach dem Katalysator zuzugreifen. Dort konnte festgestellt werden, dass die Grenztemperatur bei circa 190 °C liegt.

In Abbildung 5-38 ist gut sichtbar, dass bei einer Stadtfahrt die Auswirkungen des Speichermodells größer ausfallen als bei einer ISC Fahrt.

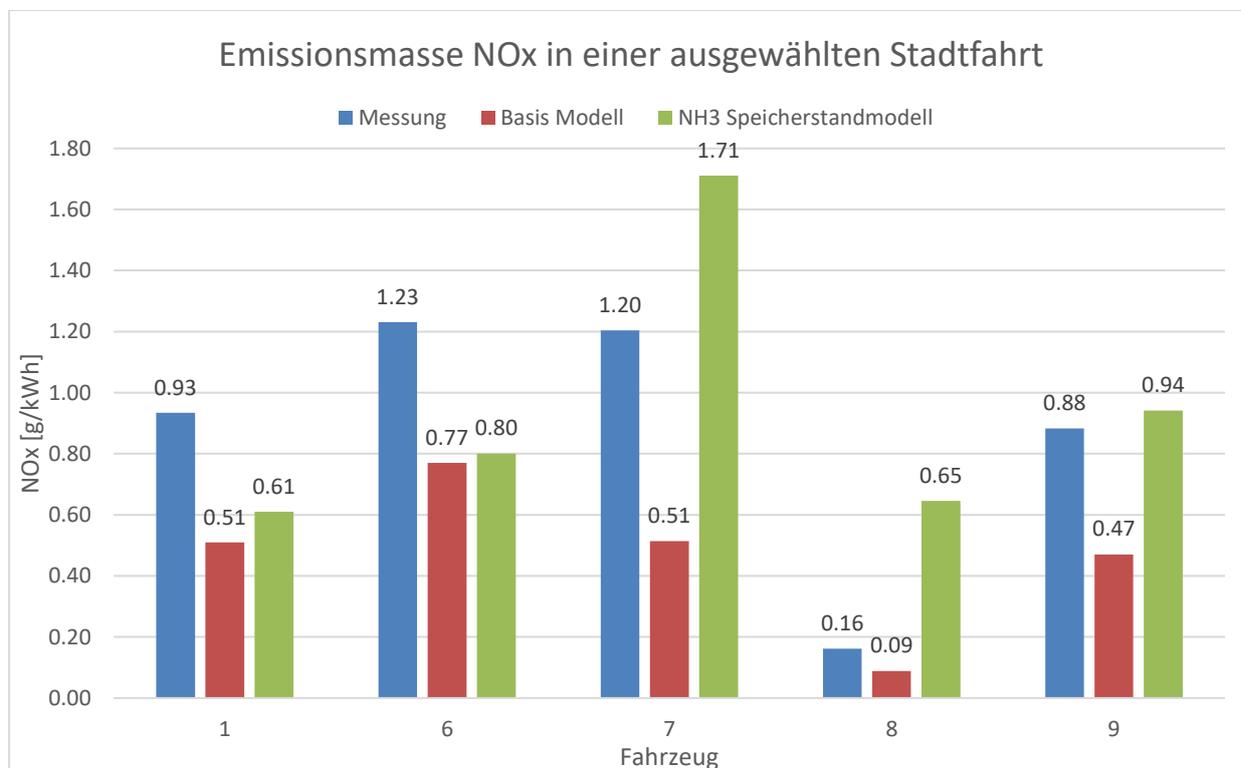


Abbildung 5-38: Emissionsmasse NOx in einer ausgewählten Stadtfahrt, Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren

In den Fällen des Fahrzeugs 1 und 6 die Temperatur nur selten unter die Grenztemperatur fällt, was möglicherweise auf eine Heizstrategie für den SCR Katalysator über die fahrzeuginterne Motorsteuerung zurückzuführen ist.

Für die Stadtfahrt des Fahrzeugs 7 ist die Korrektur der Konvertierungsrate zu stark und führt somit zu hohen Emissionsmassen im Vergleich zur Messung und dem Basismodell. In diesem Fall scheint es, als wäre das Speicherstandmodell in dieser Form nicht geeignet, um die Realität möglichst genau zu treffen. Dies kann wiederum mit der Grenztemperatur oder Korrekturkurve zusammenhängen.

Für das Fahrzeug 8 tritt der gleiche Fall ein, der bereits bei der ISC Fahrt vorhanden war. Durch die zu hoch angesetzte Grenztemperatur wird das NH<sub>3</sub>-Speicherstandmodell zu früh aktiviert. Bei einer Grenztemperatur von 180 °C kann die Messung ziemlich exakt getroffen werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Abbildung 5-39 dargestellt.

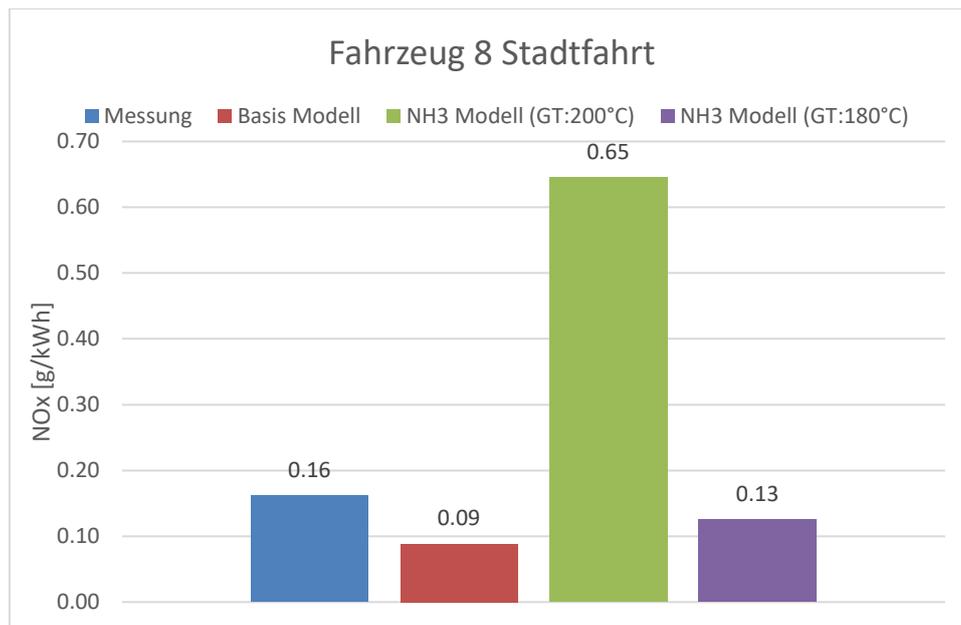


Abbildung 5-39: Emissionsmassen NOx Fahrzeug 8, Stadtfahrt

Im Durchschnitt über alle Zyklen und Fahrzeuge gesehen ist das NH<sub>3</sub>-Speicherstandmodell besser geeignet, um die Realität wiederzugeben, als das Basis Modell, obwohl auch hier noch einzelne Parameter angepasst werden müssen.

Zum Abschluss sind in den Abbildung 5-40 und Abbildung 5-41 Stauzyklen mit jeweils zwei Unterschiedlichen Vorkonditionierungen pro Fahrzeug aufgetragen.

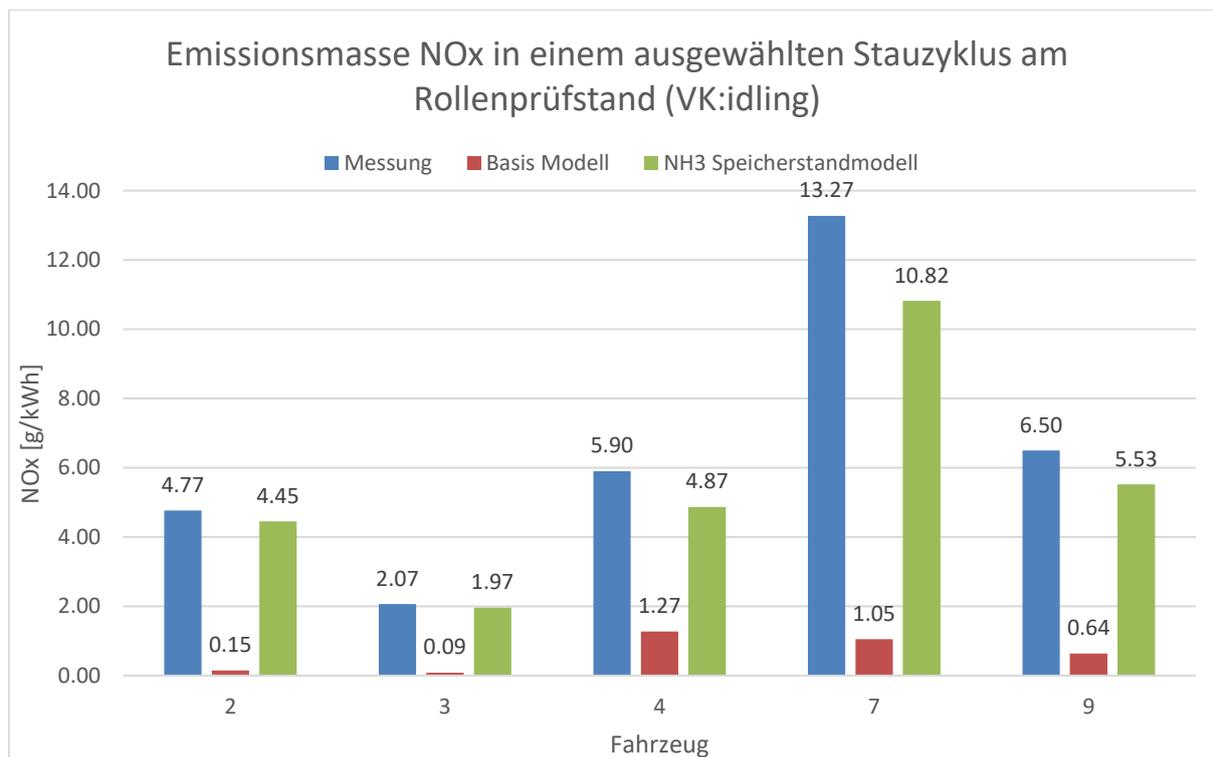


Abbildung 5-40: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einem ausgewählten Stauzyklus (VK: idling), Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren

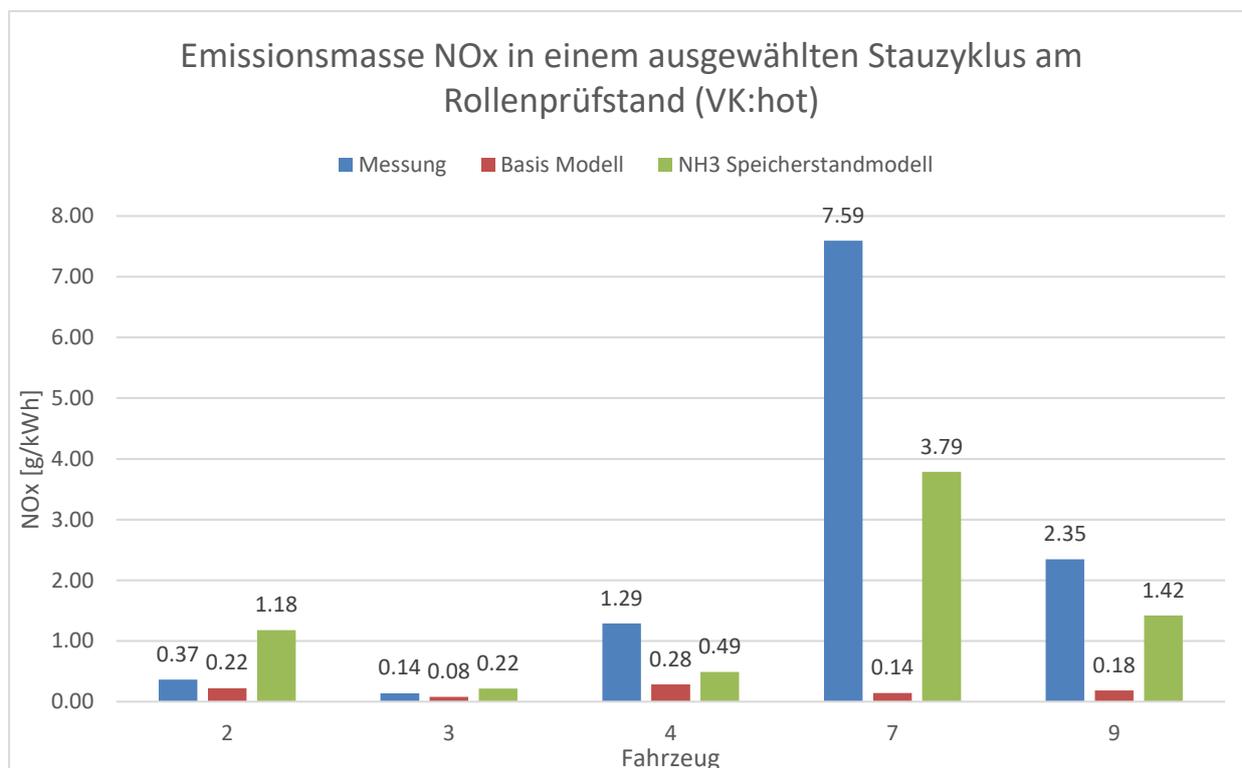


Abbildung 5-41: Emissionsmasse NO<sub>x</sub> in einem ausgewählten Stauzyklus (VK: hot), Vergleich Messung mit beiden Berechnungsverfahren

Die Berechnung der Stauzyklen die im Leerlauf vorkonditioniert sind, wurden mithilfe der Startspeicherstände angepasst. Der Startspeicherstand bei allen Fahrzeugen liegt im Bereich zwischen 10-30 %. Diese Werte wurden gewählt durch eine Simulation der Vorkonditionierung mittels PHEM und einer anschließenden Berechnung des resultierenden

Speicherstandes mit Hilfe des  $\text{NH}_3$  Speicherstandmodell. Es ist ersichtlich, dass in allen Fällen das Speicherstandmodell die Realität besser trifft als das Basis-Modell. Bei der Vorkonditionierung „hot“ handelt es sich um eine Erwärmung der Abgasnachbehandlungsanlage auf 250 °C. Auch in diesem Fall wird die Messung besser wiedergegeben als beim Basis-Modell.

## **5.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse von Niedriglastzyklen**

Aus den Ergebnissen der Messung und Simulation kann geschlossen werden, dass das Basismodell für ISC konforme Fahrten durchaus geeignet ist, da hier über weite Bereiche in einem optimalen Betriebsbereich gefahren wird, der mit der Simulation mithilfe des Basismodells relativ genau wiedergegeben werden kann da die Bedatung des Basismodells mit ISC-Zyklen durchgeführt wurde und in diesen die Konvertierungsrate hoch ist.

Bei den RDE Stadtfahrten und den Stauzyklen am Rollenprüfstand traten die ersten Schwächen des Basismodells auf da in diesen Zyklen das Temperaturniveau des Katalysators niedriger als in den ISC-Fahrten ist und aus es aus diesem Grund zu keiner Dosierung des Reduktionsmittels kommt und die  $\text{NO}_x$ -Emissionen steigen. Dieser Anstieg erfolgt aber nicht schlagartig, sondern mit Abnahme des Reduktionsmittels im SCR-Katalysator. Dieses Verhalten kann mit dem Basismodell nicht abgebildet werden, aus diesem Grund kommt es beim Basismodell in den meisten Fällen zu einer unterschätzung der  $\text{NO}_x$ -Emissionsmasse. Mit Hilfe des  $\text{NH}_3$  Speicherstandmodell kam es zu einer Verbesserung dieser Simulation.

Bei der Erstellung des  $\text{NH}_3$  Speicherstandmodell gaben sich dafür andere Schwierigkeiten auf. Eine der größten Schwierigkeiten besteht in der thermischen Vorgeschichte der Katalysatoren und somit der  $\text{NH}_3$ -Speicherung. Diese Vorgeschichte beeinflusst, wie in der vorliegenden Arbeit zu sehen, den Startspeicherstand und in weiterer Folge das gesamte Ergebnis der Emissionsmassen. Bei den ISC Fahrten ist der Stadtanteil relativ gering im Vergleich zu den Überland- und Autobahnanteilen. Infolge dessen ist die Beeinflussung des Ergebnisses gering. Des Weiteren werden die ISC Fahrten erst nach einer „Warm Up“ Phase gestartet, welche die Einspeicherung des  $\text{NH}_3$  ermöglicht.

Ein weiterer Grund ist die bereits beschriebene „Grenztemperatur“. Diese variiert zwischen den einzelnen Fahrzeugen. Durch den hohen Einfluss bei den Emissionsmassen ist es hier schwierig, dies auf eine durchschnittliche Grenztemperatur zu reduzieren, wobei sich gezeigt hat das mit 200°C ein scheinbar guter Wert gefunden wurde.

Insgesamt ergibt sich eine Verbesserung durch das  $\text{NH}_3$  Speicherstandmodell in den Niedriglastzyklen auch wenn es im Falle der Stadtfahrten vereinzelt Zyklen gab, bei denen das Speicherstandmodell die Emissionsmassen um ein Vielfaches überschätzt.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Konvertierungsraten der Stickoxide aller als schwere Nutzfahrzeuge zugelassenen Fahrzeuge in den ISC konformen Fahrten hoch sind und die NO<sub>x</sub>-Emissionen gering. Zurückzuführen ist dies auf die hohen Temperaturniveaus während der Zyklen und den draus resultierenden optimalen Betriebsbereich für den SCR-Katalysator. In den RDE-Stadtfahrten und Stauzyklen am Rollenprüfstand kann dieses Bild nicht gleich wiedergegeben werden. Hier sind die Temperaturniveaus durchwegs geringer und daraus resultieren schlechtere Konvertierungsraten und höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Simulation mit Hilfe des Basismodells durchaus geeignet ist ISC konforme Zyklen realitätsnah abzubilden. Probleme, in Form einer Unterschätzung der NO<sub>x</sub>-Emissionen, gab es erst wenn es zu Niederlastzyklen, Stadtfahrten beziehungsweise Stauzyklen, kam. In diesen Fällen kam es zu einer signifikanten Verbesserung mit dem NH<sub>3</sub> Speicherstandmodell auch wenn es Schwierigkeiten beim Ermitteln der fahrzeugspezifischen „Grenztemperatur“ und der thermischen Vorgeschichte des Katalysators und der daraus folgenden zyklusspezifischen NH<sub>3</sub> Startspeicherstandswerte gibt. Im Falle der Grenztemperatur konnte mit 200 °C ein guter Mittelwert gefunden werden, dies ist beim NH<sub>3</sub> Startspeicherstand nicht möglich.

Während der Auswertung der Messdaten und dem anschließenden Vergleich mit der Simulation ist aufgefallen, dass zu Beginn der Zyklen, während der Stadtanteile, die Temperatur in vielen Fällen zu niedrig simuliert wird. Möglicherweise ist hier eine Heizstrategie für den Katalysator in der internen Motorsteuerung hinterlegt, um möglichst über dem Temperaturniveau zu liegen welche die Eindosierung stoppt. Für die Erweiterung des Basis-Modells wäre es sinnvoll, in Richtung einer Heizstrategie, die in PHEM hinterlegt wird, zu forschen. Dies hätte auch einen direkten Einfluss auf das NH<sub>3</sub>-Speicherstandmodell, da durch diese Temperaturen das Modell aktiviert beziehungsweise deaktiviert wird.

Auch im Bezug zur Erweiterung der HBEFA-Zyklen um einen „Heavy Stop & Go“, also einen Zyklus mit noch geringerer Durchschnittsgeschwindigkeit als der des in dieser Masterarbeit behandelten Stop & Go-Zyklus, ist die thermische Vorgeschichte wichtig. Allgemein ist für diese Erweiterung die Verwendung des Speicherstandmodells naheliegend, da bereits mit den jetzt behandelten Stop & Go-Zyklen, die eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit als der Heavy Stop & Go besitzt, gezeigt werden konnte, dass das Basis Modell nicht in der Lage ist die Emissionsmassen realitätsnah zu ermitteln.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] R. van Basshuysen und F. Schäfer, Handbuch Verbrennungsmotor, Bad Wimpfen/Hamm: Springer Vieweg, 2014.
- [2] T. Sams, Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil I, Technische Universität Graz, 2010.
- [3] P. Michelitsch und F. Spieler, Messung und Simulation der Abgasemissionen EU6 Diesel PKW mit NSK und SCR-Katalysator, Graz, 2015.
- [4] M. Günter und T. Rüdiger, Grundlagen Verbrennungsmotoren, 7.Auflage Springer Vieweg, 2014.
- [5] S. Hausberger, Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil III SCR, Technische Universität Graz, 2012.
- [6] Robert Bosch GmbH, „Denoxtronic 6-9-Dosiersystem für AdBlue in SCR-Systemen,“ Stuttgart, 2014.
- [7] K. Reif, Abgastechnik für Verbrennungsmotoren, Friedrichshafen: Springer Vieweg, 2015.
- [8] H. Eichlseder, Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung, Technische Universität Graz, 2012.
- [9] Official Journal of the European Union L 167/1, „Comission Regulation (EU) No 582/2011,“ 25 May 2011.
- [10] Official Journal of the European Union L 259/1, „Comission Regulation (EU) 2016/1718,“ 20 September 2016.
- [11] UNITED NATIONS, „Addendum 48: Regulation No. 49 Revision 6,“ 4 March 2013.
- [12] M. Röck, Messung und Simulation der Emissionsfaktoren von EURO VI Nutzfahrzeugen, Graz: IVT- TU Graz, 2017.
- [13] J. Blassnegger, Laborübung Motor und Umwelt,PEMS, Graz: IVT-TU Graz, 2015.
- [14] S. Hausberger, Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I, Graz: IVT-TU Graz, 2017.
- [15] G. Wiegleb, Gasmestechnik in Theorie und Praxis, Dortmund: Springer Vieweg, 2016.
- [16] M. Maritati, „EURO VI Technologies & Strategies,“ IVECO.
- [17] „Google Maps Österreich,“ Google Inc., 8 2 2005. [Online]. Available: <https://www.google.at/maps>. [Zugriff am 24 11 2017].
- [18] K. Weller, M. Rexeis, S. Hausberger und B. Zach, A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements, Graz: IVT-TU Graz, 2016.
- [19] JRC, „EMROAD-Users Guide-Version 5.80“.
- [20] S. Hausberger, M. Rexeis und R. Luz, PHEM USeR Guide for Version 11, Graz: IVT-TU Graz, 2012.
- [21] C. Matzer, S. Hausberger, S. Lipp und M. Rexeis, „A new approach for systematic use of PEMS data in emission simulation,“ IVT-Tu Graz, Graz, 2016.
- [22] R. Klinger, Messung und Simulation von Real World Emissionen beim PKW, Graz: IVT-TU Graz, Mai2016.
- [23] M. Rexeis, Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles, Graz: IVT-TU Graz, 2009.

