



Markus Ramsauer, BSc

Messung und Simulation des Emissionsverhaltens eines Euro 6 Diesel-PKW bei RDE-Fahrten und in Stausituationen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Vorstand
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

Betreuer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

Zweitbetreuer
Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer BSc
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

Graz, November 2017



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

Vorwort

Seit Beginn meiner Tätigkeit als studentischer Mitarbeiter bei der AVL List GmbH war mir klar, dass ich einen meiner Schwerpunkte im Bereich Motor- und Antriebstechnik setzen möchte. Im Zuge des Masterstudiums beeindruckten mich vor allem die Vorlesung „Schadstoffbildung und Emissionsminderung“ und „Umweltauswirkungen des Verkehrs“ sowohl inhaltlich als auch durch deren kompetente und freundliche Vortragende. Im Zuge eines mündlichen Prüfungsgesprächs wurde ich auf das Thema „Messung und Simulation des Emissionsverhaltens eines Euro 6 Diesel-PKWs bei RDE-Fahrten und in Stausituationen“ aufmerksam.

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

Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer für die hervorragende, herzliche Betreuung und Unterstützung während meiner Diplomarbeit bedanken. Zudem möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Silke Lipp recht herzlich für die Unterstützung in diversen Abschnitten meiner Arbeit bedanken.

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

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Helga und Helmut, die mich immer in jeder erdenklichen Lebenssituation unterstützen und mir mein Studium erst ermöglicht haben.

Ein außerordentlicher Dank gilt meiner Freundin, die mir auch in schwierigen Abschnitten meines Werdeganges zur Seite steht und mich in meinen Bestrebungen immer unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	XII
KURZFASSUNG	XIII
ABSTRACT	XIV
1. EINLEITUNG	1
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 EMISSIONSKOMPONENTEN.....	2
2.1.1 Kohlenstoffdioxid (CO_2).....	3
2.1.2 Wasser (H_2O).....	3
2.1.3 Stickstoff (N_2)	3
2.1.4 Kohlenstoffmonoxid (CO)	3
2.1.5 Kohlenwasserstoffe (HC)	3
2.1.6 Stickoxide (NO_x).....	4
2.1.7 Schwefeldioxid (SO_2).....	4
2.1.8 Partikel und Ruß	4
2.1.9 Ammoniak (NH_3).....	5
2.1.10 Distickstoffmonoxid (Lachgas, N_2O).....	5
2.2 SCHADSTOFFREDUKTION DURCH INNERMOTORISCHE MAßNAHMEN.....	6
2.2.1 Interne Abgasrückführung.....	6
2.2.2 Hochdruck-Abgasrückführung (HD -AGR).....	6
2.2.3 Niederdruck-Abgasrückführung (ND -AGR).....	7
2.3 SCHADSTOFFREDUKTION DURCH ABGASNACHBEHANDLUNG.....	8
2.3.1 Dieseloxydationskatalysator (DOC).....	8
2.3.2 Selektive Katalytische Reduktion (SCR).....	8
2.3.3 Diesel-Partikelfilter (DPF)	12
2.3.4 NH_3 -Sperrkatalysator.....	16
2.4 GESETZGEBUNG	16
2.4.1 Abschätzung der Temperaturgrenzschicht	18
2.5 MOBILE EMISSIONSMESSGERÄTE	22
2.5.1 Gas-PEMS.....	22
2.5.2 PN-PEMS.....	24
3. MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN MIT ERGEBNISSEN	26
3.1 FAHRZEUGBESCHREIBUNG	26
3.1.1 PEMS-Aufbau am Versuchsfahrzeug	29
3.2 MESSUNGEN VON STRAßENFAHRTEN.....	30
3.2.1 RDE-Routen	31
3.2.2 Stauzyklus im Stadtverkehr.....	33
3.2.3 Stauzyklen auf der Teststrecke	34
3.2.4 Ausrollversuch.....	37
3.3 ÜBERSICHT DER AUSWERTETOOLS	39
3.4 AUSWERTUNG UND ANALYSE DER RDE-FAHRTEN UND STAUZYKLEN	40
3.4.1 Emissionskennfelder des untersuchten Fahrzeugs	40
3.4.2 Analyse der RDE-Messergebnisse.....	47
3.4.3 Analyse der Stauzyklen-Messungen.....	56
4. SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN UND VERGLEICH MIT MESSUNGEN	64
4.1 SIMULATIONSPROGRAMM PHEM.....	64
4.2 MOTORKENNFELDERSTELLUNG MITTELS PHEM.....	65
4.3 SCR-KENNFELDERSTELLUNG MITTELS PHEM	67
4.4 UNTERSUCHTE SIMULATIONSVARIANTEN SOWIE OPTIMIERUNGSMETHODEN.....	73
4.4.1 Interpolationsmethode.....	76
4.4.2 Kennfeldraasterung.....	76
4.4.3 Systematische Anpassung des Abgasnachbehandlungssystems.....	79

4.5	SIMULATION DER RDE-FAHRTEN UND VALIDIERUNG MIT MESSDATEN.....	86
4.5.1	<i>Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung in PHEM.....</i>	86
4.5.2	<i>Ergebnisse mit Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems in PHEM.....</i>	92
4.5.3	<i>Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Abgasnachbehandlung</i>	95
4.6	SIMULATION DER STAUZYKLEN-FAHRTEN UND VALIDIERUNG MIT MESSDATEN	98
4.6.1	<i>Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung in PHEM.....</i>	98
4.6.2	<i>Ergebnisse mit Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung in PHEM</i>	102
4.6.3	<i>Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Abgasnachbehandlung</i>	106
5.	ABSCHÄTZUNG VON STEUERUNGSMODELLEN FÜR NO_x-REDUKTION UNTER EINDOSIERUNG VON ADBLUE	111
5.1	NH ₃ -SPEICHERUNGSMODELL	111
6.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	114
A)	ANHANG 1	115
B)	ANHANG 2	119
C)	ANHANG 3	128
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	130
	TABELLENVERZEICHNIS	134
	FORMELVERZEICHNIS	135
	LITERATURVERZEICHNIS	136

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A	[m ²]	angeströmte Referenzfläche
A	[m ²]	Querschnittsfläche des durchströmten Rohres
$AGR_{Rate_{Gesamt}}$	[%]	Gesamte AGR-Rate
c_m	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität der thermischen Masse
c_{NO_x}	[ppm]	NO_x -Konzentration
c_w	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
D	[m]	Durchmesser des durchströmten Rohrquerschnitts
D_{Sensor}	[m]	Abstand des Sensors zur Dachvorderkante
F_{R0}	[N]	Konstanter Rollwiderstand
F_{R1}	[Ns/m]	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand
FW	[N]	gesamter Fahrwiderstand
FW_B	[N]	Massenträgheit der Beschleunigung
FW_{Luft}	[N]	Luftwiderstand
FW_{Roll}	[N]	Rollwiderstand
m	[kg]	thermische Masse
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
\dot{m}_{Abgas}	[kg/s]	emittierter Abgasmassenstrom bei PEMS gemessen
$m_{\text{äquivalent}_{rot}}$	[kg]	rotationsäquivalente Masse
\dot{m}_B	[kg/s]	Zugeführter Brennstoffmassenstrom
\dot{m}_{Fr}	[kg/s]	Massenstrom der Frischladung
\dot{m}_{HD-AGR}	[kg/s]	Massenstrom der HD-AGR
M_j	[kg/kmol]	Molare Masse der Komponente j
M_k	[kg/kmol]	Molare Masse der Komponente k
m_{KFZ}	[kg]	Gesamtmasse des Fahrzeuges inkl. Fahrer, Beifahrer und Zusatzbeladung

\dot{m}_{Mes}	[kg/s]	Für Messung entnommener Massenstrom
\dot{m}_{ND-AGR}	[kg/s]	Massenstrom der ND-AGR
\dot{m}_{NO_x}	[g/h]	NO_x -Massenstrom
\dot{m}_{SCR}	[kg/s]	Massenstrom über SCR-Katalysator
MW_{Gesamt}	[g/km] [#/km]	bzw. durchschnittliche Emissionen aller Zyklen
MW_{Zyklus}	[g/km] [#/km]	bzw. durchschnittliche Emissionen des Zyklus
n	[U/min]	Drehzahl
n_{idle}	[U/min]	Leerlaufdrehzahl des Motors
η_k	[Pa.s]	dynamische Viskosität der Komponente k
n_{norm}	[-]	Normierte Motordrehzahl
NO_{x_in}	[g/h]	NO_x -Massenstrom vor SCR
$NO_{x_Konvertierung}$	[-]	NO_x -Konvertierungsrate
NO_{x_out}	[g/h]	NO_x -Massenstrom nach SCR
n_{rated}	[U/min]	Nenn Drehzahl des Motors
p	[Pa]	vorliegender Druck
PN_{Normal}	[#/h]	PN-Emissionen ohne DPF-Regeneration
P_{norm}	[-]	Normierte Motorleistung
$PN_{Regeneration}$	[#/h]	PN-Emissionen während einer DPF-Regeneration
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
P_{rated}	[kW]	Nennleistung des Motors
\dot{Q}_{ht}	[W]	Wärmestrom durch Konvektion
\dot{Q}_{loss}	[W]	Wärmestrom an Umgebung durch Strahlung
R	[J/kg.K]	Gaskonstante
Re	[-]	Reynolds-Zahl
T	[K]	Temperatur des Fluids
T	[K]	Oberflächentemperatur des Körpers

$t_{exh,ht}$	[°C]	Abgastemperatur im Modul
$t_{exh,in}$	[°C]	Abgastemperatur am Einlass der thermischen Masse
$t_{exh,out}$	[°C]	Abgastemperatur am Auslass der thermischen Masse
t_m	[°C]	Temperatur der thermischen Masse
U	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
U_{Gas}	[-]	Gasfaktor zur Beschreibung der Korrelation zwischen Konzentration und Massenstrom
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
V_{SCR}	[m ³]	Volumen des SCR-Katalysators
X_j	[-]	Mol-Verhältnis der Komponente j
X_k	[-]	Mol-Verhältnis der Komponente k

Konstanten

$C_1 = 3,741 \text{ E-16}$	[Wm ²]	Konstante für Planck'sches Strahlungsgesetz
$C_2 = 1,438 \text{ E-2}$	[mK]	Konstante für Planck'sches Strahlungsgesetz
$g = 9,8067$	[m/s ²]	Normfallbeschleunigung
$M_{NH_3} = 17$	[kg/kmol]	Molare Masse von Ammoniak
$M_{NO_2} = 46$	[kg/kmol]	Molare Masse von Stickstoffdioxid

Griechische Formelzeichen

α	[°] bzw. [rad]	Steigungswinkel
η	[kg/m.s] bzw. [Pa.s]	dynamische Viskosität des strömenden Fluids
$a_{n,k}$	[Pa.s/T ⁿ⁻¹]	stoffspezifische Konstante
α_0	[-]	Molares Verhältnis von eingespritztem Ammoniak zu konvertierten Stickoxiden
Δg_{NH_3}	[g]	Ammoniak-Menge

Δg_{NO_2}	[g]	Stickstoffdioxid-Menge
δ_{mol}	[1]	Molverhältnis
δ_T	[m]	Temperaturgrenzschicht
$e_{s\lambda}$	[W/m ³]	Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers
ξ	[%]	Prozentueller Füllstand
λ	[m]	Wellenlänge
ϕ_{kj}	[-]	Mischungsvariable für Komponenten k und j
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Fluids
v	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
v_{Raum}	[1/s]	Raumgeschwindigkeit
ν_x	[m ² /s]	dynamische Viskosität

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
AVL List GmbH	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List Gesellschaft mit beschränkter Haftung
BTX	Benzol, Toluol, Xylol
C	Atomarer Kohlenstoff
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CAN	Controller-Area-Network
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
cpsi	cels per square inch
CVS	Constant Volume Sampling
d.h.	das heißt

DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel-Particulate Filter
ECE-Tool	Emroad-CLEAR-Evaluation-Tool
EFM	Exhaust Flow Meter
engl.	englisch
EO	Engine-Out
EoT	End-of-Tailpipe
EXS	Exhaus System
Gew.-%	Gewichtsprozent
H	atomarerWasserstoff
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HC	Kohlenwasserstoff
HD-AGR	Hochdruck-Abgasrückführung
HNCO	Isocyansäure
LKW	Lastkraftwagen
M.O.V.E.	Mobile Vehicle Evaluation
min	Minute
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
ND-AGR	Niederdruck-Abgasrückführung
NEDC	New European Driving Cycle
[NH ₂] ₂ CO	Harnstoff
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid

NO _x	Stickoxid
NO _x S	NO _x -Sensor
NSK	NO _x -Speicherkatalysator
O	Atomarer Sauerstoff
O ₂	Sauerstoff
OBD	On Board Diagnose
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PHEM	Passenger Car and Heavy duty Emissions Model
PKW	Personenkraftwagen
PN	Particle Number
RDE	Real Driving Emissions
S	Atomarer Schwefel
SCR	Selektive Catalytic Reduction
SO ₂	Schwefeldioxid
TS	Temperatursensor
u.a.	unter anderem
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle
z.B.	zum Beispiel

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Markus Ramsauer

Graz, 6. November 2017

Kurzfassung

In den letzten Jahren und verstärkt in den letzten Monaten wurden vor allem Diesel-Fahrzeuge in der breiten Öffentlichkeit sehr kritisch diskutiert. Dabei stehen vor allem die Stickoxidemissionen unter realen Fahrbedingungen im Licht der Öffentlichkeit. Diesel-Fahrzeuge verschiedener Hersteller weisen unter realen Fahrbedingungen deutlich höhere Emissionen als bei Typprüfzyklen am Rollenprüfstand auf. Seit September 2017 gibt es erstmals gesetzliche Bestimmungen für die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten unter realen Bedingungen. Mit Hilfe von sogenannten PEMS (Portable Emissions Measurement System) können Emissionen neben einem Rollenprüfstand auch bei Straßenfahrten gemessen werden. Anstelle des alten Typprüfzyklus NEDC (New European Driving Cycle), der vor allem für den Motorteillastbereich ausgelegt war, gibt es zudem mit dem WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle) einen neuen, deutlich dynamischeren und höherlastigen Typprüfzyklus.

Der im Zuge dieser Arbeit untersuchte Audi A4 Avant ist ein Diesel-PKW (Diesel-Personenkraftwagen) mit Euro 6b Abgasnorm. Aus diesem Grund wird am Beginn dieser Arbeit auf die theoretischen Grundlagen zu Emissionen und Abgasnachbehandlungssystemen dieses PKW's, sowie auf die neuen RDE-(Real Driving Emissions) Gesetzgebung eingegangen.

Sämtliche Messdaten wurden mit einem PEMS der AVL List GmbH im Zuge von Stauzyklen und RDE-Fahrten, angelehnt an die RDE-Gesetzgebung, erhoben. Auf Basis der erhobenen Messdaten sind Analysen unterschiedlicher fahrzeugspezifischer Eigenschaften, wie AGR-Strategie, Start-Stopp Einfluss auf Emissionsverhalten, etc. analysiert worden. Es kann bereits vorausgegriffen werden, dass eine Start-Stopp Funktion neben der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs eine Reihe von Vorteilen in Bezug auf das Emissionsverhalten bietet.

Mithilfe der Messdaten wurden unterschiedliche Varianten zur Simulation von Emissionskomponenten untersucht. Zudem wurden unterschiedliche Interpolationsmethoden und Kennfeldraasterungen betrachtet.

Weiters wurde das Ammoniak-Speichervermögen von SCR- (Selective Catalytic Reduction) Katalysatoren nachgebildet. Dies ist vor allem für SCR-Betriebspunkte unterhalb von etwa 180 °C relevant, da ab diesem Schwellwert die eingebrachte Harnstofflösung nicht mehr vollständig im Abgasstrang verdampfen kann und nur mehr das gespeicherte Ammoniak zur Stickoxid-Reduktion herangezogen werden kann.

Abstract

In last time, diesel vehicles have been critically discussed in the public, especially the emissions of nitrogen oxides under real driving conditions. Diesel vehicles of different manufacturers have significantly higher emissions under real driving conditions than in the type approval cycle at the chassis dynamometer. Since September 2017, there have been new statutory provisions for compliance with emission limits under real conditions. Using PEMS (Portable Emissions Measurement System), emissions can be measured in addition to a chassis dynamometer on various road trips. Instead of the old test cycle NEDC (New European Driving Cycle), which covers low-load engine operating points only, the WLTC (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle), a more demanding test cycle was introduced.

The test vehicle Audi A4 Avant is a diesel car with Euro 6b exhaust emission standard. For this reason, the theoretical basis for emissions and exhaust gas aftertreatment systems of this passenger car, as well as the new RDE (Real Driving Emissions) legislation, were investigated at the beginning of this work.

The emissions of the traffic jam cycles and RDE-trips were measured with a PEMS from AVL List GmbH. On the basis of the measured data, different vehicle-specific characteristics, e.g. EGR strategy, start-stop influence on emission behavior, etc. have been analyzed. It can already be assumed that a start-stop function, in addition to the reduction in fuel consumption, offers a number of emission behavior advantages.

Different variants for simulation of emission components were investigated using the measured data. In addition, different interpolation methods and characteristic map grids were considered.

Furthermore, the ammonia storage capacity of SCR (Selective Catalytic Reduction) catalysts was simulated. This is relevant for SCR operating points below 180 °C., since injected urea can no longer evaporate under this temperature limit in the exhaust-system branch. Therefore, only the stored ammonia can be used to reduce the nitrogen oxide.

1. Einleitung

In den letzten Jahren gerieten Diesel-Fahrzeuge aufgrund ihrer hohen Stickoxidemissionen im Straßenverkehr stärker in den Fokus der Öffentlichkeit. Besonders bei aktuellen Diskussionen zu Fahrverboten für Fahrzeuge mit zu niedrigen Emissionsstandards steht der Diesel-Verbrennungsmotor unter starker Kritik. Durch Einführung eines deutlich dynamischeren Prüfzyklus (gültig seit September 2017) und der zusätzlichen Emissionsprüfung unter möglichst realen Fahrbedingungen auf öffentlichen Straßen (Real Driving Emissions, kurz: RDE) werden Automobilhersteller gezwungen, das Emissionsverhalten von Fahrzeugen für ein deutlich breiteres Betriebsfenster zu optimieren. Bestimmte Grenzwerte müssen somit auch unter realen Fahrbedingungen eingehalten werden. Dadurch gewinnt sowohl die Messung als auch die Simulation zunehmend an Bedeutung. Vor allem in Bezug auf die neu eingeführte RDE-Gesetzgebung ist das Stickoxid-Emissionsverhalten von Diesel-Fahrzeugen besonders interessant.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Messung und Simulation von Diesel-Schadstoffen. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf Stickoxid-Emissionen gelegt. Theoretische Grundlagen geben zu Beginn einen Überblick über Emissionen sowie über das Abgasnachbehandlungssystem, speziell in Zusammenhang mit dem untersuchten Fahrzeug. Zudem werden unterschiedliche verwendete Messverfahren und -geräte erläutert und näher beschrieben. Weiters werden Auszüge der neu eingeführten RDE-Gesetzgebung erläutert.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Emissionen mit Hilfe eines PEMS (Portable Emissions Measurement System) im realen Fahrbetrieb gemessen. Neben RDE-Fahrten wurden auch Stauzyklen im Stadt-Verkehr sowie „künstliche“ Stauzyklen auf einer Teststrecke durchgeführt. Diese dienen im Besonderen zur Analyse des Auskühlverhaltens vom Abgasnachbehandlungssystem. Diverse Untersuchungen von Messdaten und deren Ergebnisse sind in Kapitel 3 zusammengefasst.

Weiters sind auf Basis der erhobenen Messdaten Simulationen mit und ohne Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems durchgeführt worden. Ergebnisse der einzelnen Simulationsvarianten und deren Vergleich mit Messdaten sind in Kapitel 4 aufbereitet.

Ein weiterer Teil der Arbeit war die Nachbildung eines Ammoniak-Speicherungsmodells, wie es in Steuergeräten für SCR- (Selective Catalytic Reduction) Abgasnachbehandlungssysteme hinterlegt sein könnte. Dieses Modell wurde dann daraufhin getestet, ob damit eine bessere Simulationsgenauigkeit erreicht werden kann. Dies wird in Kapitel 5 beschrieben.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Emissionskomponenten

Für eine ideale vollständige Verbrennung von Diesel-Kraftstoff läuft die chemische Reaktion nach Gleichung (2-1) ab. Hierbei entstehen nur Wasserdampf (H_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und eine in Anbetracht der aktuellen Treibstoffzusammensetzung vernachlässigbare Menge an Schwefeldioxid (SO_2). Nachdem mit dem aktuellen Stand der Technik keine ideale vollständige Verbrennung erzielt werden kann, entstehen Komponenten der unvollständigen Verbrennung, die zum Teil gesundheitsgefährdend sein können, wie z.B. Kohlenmonoxid (CO) oder Kohlenwasserstoffe (HC). Zusätzlich entstehen bei Sauerstoffüberschuss und hohen Temperaturen Stickoxide (NO_x).



Dieses Kapitel befasst sich mit den Komponenten der vollständigen und unvollständigen Verbrennung und deren Eigenschaften. Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die typische Rohabgaszusammensetzung in Gew.-% (Gewichtsprozent) von einem Diesel-Verbrennungsmotor im Teillastbetrieb. Mehr als drei Viertel der Rohemissionen sind Stickstoff (N_2), welcher als Inertgas nicht an der Verbrennung teilnimmt. Sauerstoff (O_2) ist mit 15 % die zweitgrößte Komponente, gefolgt von CO_2 mit 7,1 % und H_2O mit 2,6 %. Schadstoffe machen beim bereits erwähnten Teillastbetrieb nur knapp 0,1 % der gesamten Emissionen aus. Nachdem der Schwerpunkt dieser Arbeit auf einen Diesel-PKW (Diesel-Personenkraftwagen) gesetzt war, wird auf die Rohabgaszusammensetzung von Otto-Motoren nicht näher eingegangen.

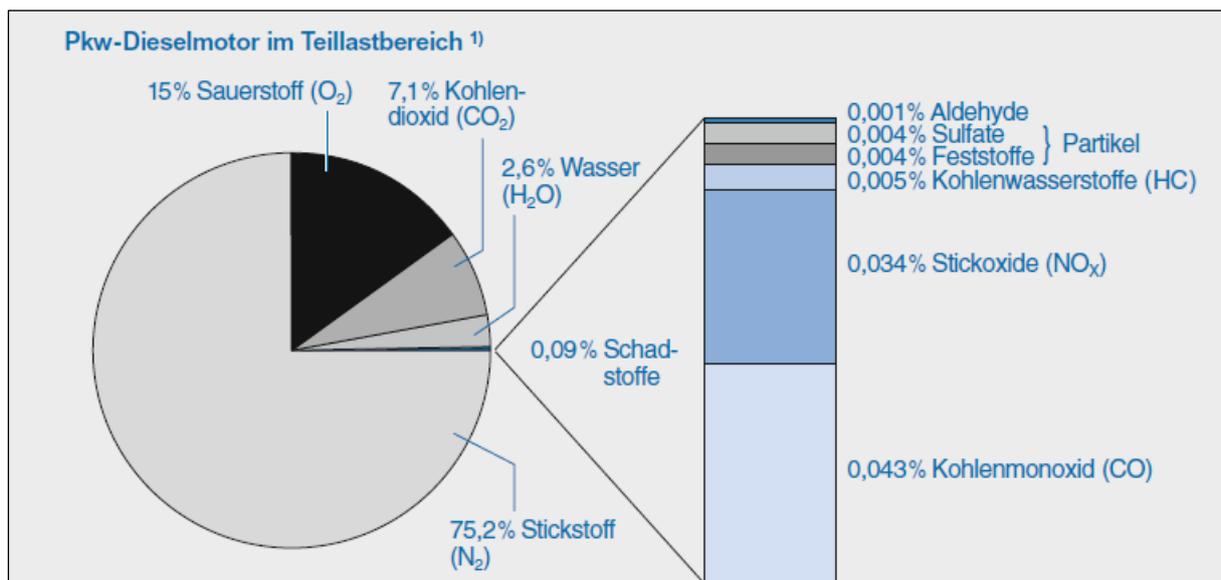


Abbildung 2-1: Rohabgaszusammensetzung beim Diesel-Motor im Teillastbereich [2]

2.1.1 Kohlenstoffdioxid (CO_2)

Kohlenstoffdioxid entsteht hauptsächlich durch den im Treibstoff gebundenen Kohlenstoff, der bei vollständiger Verbrennung zu CO_2 oxidiert. Dieses ungiftige, farblose und geruchlose Gas ist allerdings ein Mitverursacher des Treibhauseffektes und trägt damit auch zum Klimawandel bei, weswegen der CO_2 -Ausstoß von großer Bedeutung ist. Neben dem Großteil der CO_2 -Emissionen durch den im Treibstoff gebundenen Kohlenstoff wird eine deutlich kleinere Menge an CO_2 bei der Bildung von Ammoniak für SCR-Systeme erzeugt (siehe Kapitel 2.3.2.). [1], [2], [3]

2.1.2 Wasser (H_2O)

Bei vollständiger Verbrennung entsteht aus dem im Kraftstoff chemisch gebundenen Wasserstoff und Sauerstoff aus der Luft Wasser. [4]

2.1.3 Stickstoff (N_2)

Stickstoff ist der Hauptbestandteil des Abgases und nimmt als Inertgas nicht an der chemischen Reaktion während der Verbrennung teil. Umgebungsluft beinhaltet ca. 79 % des Inertgases. [2]

2.1.4 Kohlenstoffmonoxid (CO)

Kohlenstoffmonoxid ist ein Produkt der unvollständigen Verbrennung und entsteht vor allem bei Luftmangel, also wenn das stöchiometrische Luftverhältnis λ kleiner als 1 ist. Durch inhomogene Luft-Kraftstoffgemische kann es auch bei einem globalen λ größer als 1 zur Bildung von CO kommen, jedoch in deutlich geringerem Maße. Diese Abgaskomponente ist sowohl farb- als auch geruchlos. Kohlenstoffmonoxid hat eine höhere Affinität zum Hämoglobin als Sauerstoff und reduziert daher die Sauerstoffaufnahmefähigkeit des Blutes und kann bei entsprechender Menge bis zum Erstickungstod führen. CO ist aufgrund der deutlich geringeren Konzentrationen weniger klimarelevant als z.B. CO_2 . Außerdem besitzt CO eine mittlere Lebensdauer von ungefähr zwei Monaten. [2], [5]

2.1.5 Kohlenwasserstoffe (HC)

Kohlenwasserstoffe treten bei unvollständiger Verbrennung auf und sind in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung in unterschiedliche Gruppen zu unterteilen. Bei der dieselmotorischen Verbrennung werden über 1000 unterschiedliche Kohlenwasserstoffverbindungen erzeugt, was durch die Eigenschaft von Kohlenstoff, Ringe und Ketten zu bilden, begründet ist. Der Großteil dieser Verbindungen ist allerdings aus gesundheitlicher Sicht harmlos, wie etwa Methan. Eine große Rolle nehmen zyklische Kohlenwasserstoffe BTX (Benzol, Toluol, Xylol) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, vor allem wegen ihrer als toxisch und kanzerogen geltenden Eigenschaften, ein.

2.1.6 Stickoxide (NO_x)

Stickoxid wird als Sammelbegriff für Verbindungen zwischen Sauerstoff und Stickstoff verwendet. In Verbrennungskraftmaschinen entsteht hauptsächlich NO bei hohen Temperaturen im Brennraum, wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist. Die höchsten NO_x -Emissionen treten ca. bei $\lambda = 1,1$ auf, da zum einen genügend überschüssiger Sauerstoff und zum anderen sehr hohe Temperaturen vorliegen. Als Rohemission tritt hauptsächlich NO auf, welches allerdings im Abgasnachbehandlungssystem und schließlich in der Umgebungsluft unter der Einwirkung von UV-Licht zu NO_2 oxidiert.

Während Stickstoffmonoxid ein farb- und geruchloses Atem- und Reizgift ist, kann man das noch giftigere Stickstoffdioxid an seiner rotbraunen Farbe und an einem stechenden Geruch erkennen. NO_2 kann bei erhöhten Konzentrationen Schleimhautreizungen verursachen. [2], [3], [5]

2.1.7 Schwefeldioxid (SO_2)

SO_2 entsteht bei der Verbrennung von Schwefel. Dieser kann in geringen Mengen im Kraftstoff und im Öl vorkommen. Die Emission von Schwefeldioxid ist nur indirekt gesetzlich begrenzt, nachdem ein maximaler Gehalt in Kraftstoffen und Ölen gesetzlich vorgeschrieben ist, aber eine Reduktion der Emissionen ist aus vielen Gründen erwünscht. SO_2 trägt zur Bildung von saurem Regen bei und kann zur Katalysatorvergiftung und somit zur Reduzierung der Reaktionsfähigkeit führen. [2], [6]

2.1.8 Partikel und Ruß

Partikel waren ursprünglich ein reines Diesel-Motor-Problem, sind allerdings durch direkt-einspritzende Systeme mittlerweile auch für Otto-Motoren relevant. Diese Feststoffe entstehen bei unvollständiger Verbrennung und bestehen hauptsächlich aus aneinandergereihten Kohlenstoffketten, allgemein als Ruß bekannt, deren spezifische Oberflächen groß sind. Partikel werden anhand ihrer Größe in drei unterschiedliche Klassen unterteilt (Nukleations Mode; Akkumulations Mode; Coarse Mode). Humanmedizinisch relevant sind vor allem jene Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als $10 \mu\text{m}$ ist. Besonders gefährlich sind allerdings jene Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $1 \mu\text{m}$, da diese über die Nasenschleimhäute und Bronchien bis in die Aveolen (Lungenbläschen) vordringen und entzündungsähnliche Zustände hervorrufen können. [2], [3], [5]

Der Hauptanteil der Partikel besteht aus Ruß und Schmieröl. Weitere Komponenten können Abbildung 2-2 entnommen werden. [7]

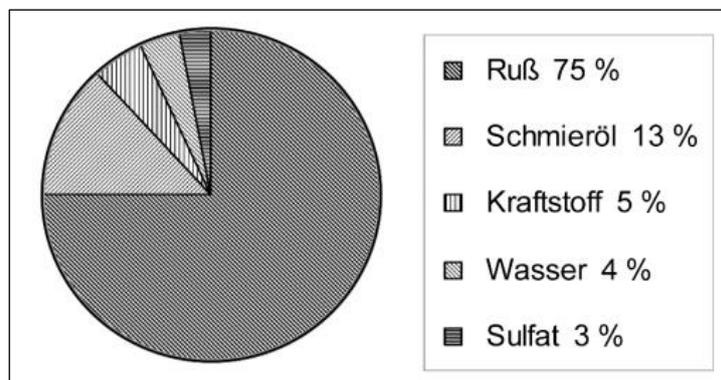


Abbildung 2-2: Beispiele zu chemischer Zusammensetzung von Partikeln [7]

2.1.9 Ammoniak (NH_3)

Ammoniak wird zur Reduktion von Stickoxiden bei der selektiven katalytischen Reduktion benötigt und ist ein farbloses, giftiges, stechend riechendes Gas. Es kann die Lunge und Schleimhäute verätzen, löst sich schnell in Wasser und bildet eine Lauge. Ammoniak ist als Abgaskomponente bei PKW gesetzlich nicht limitiert, die Emissionen werden aber in der Regel trotzdem durch entsprechende Maßnahmen (z.B. NH_3 - Sperrkatalysator nach Diesel-Partikelfilter) stark reduziert. [1]

Ammoniak wird nicht direkt bei der Verbrennung des Kraftstoffes frei, sondern kann z.B. in Form einer Harnstofflösung in den Abgasstrang eingebracht werden.

2.1.10 Distickstoffmonoxid (Lachgas, N_2O)

N_2O gehört als Verbindung zwischen Sauerstoff und Stickstoff auch zu den Stickoxiden und kann bei Verbrennungskraftmaschinen in geringen Mengen vor allem bei der selektiven katalytischen Reduktion frei werden. N_2O ist ein farbloses Gas mit süßlichem Geruch. Es ist bezogen auf den Treibhauseffekt 298-mal so wirksam wie CO_2 und hat daher bei gleicher Masse einen überproportional großen Einfluss auf den Klimawandel. Distickstoffmonoxid kann katalytisch nicht reduziert werden. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf Fachliteratur verwiesen. [2], [3], [4]

2.2 Schadstoffreduktion durch innermotorische Maßnahmen

Berücksichtigt man den aktuellen Stand der Technik, so gibt es eine Vielzahl an innermotorischen Maßnahmen zur Reduzierung unterschiedlicher Schadstoffkomponenten. Die Grundlagen der AGR („Abgasrückführung“) werden in diesem Kapitel erklärt. Dies dient als Basis für weitere Ausführungen in Kapitel 3 und 4.

AGR wird vor allem zur Reduktion von NO_x eingesetzt. Die Rückführung von bereits verbranntem Luft-Kraftstoffgemisch senkt die O_2 – Konzentration und damit die lokale Verbrennungstemperatur. Zudem haben die rückgeführten Abgase, speziell H_2O , eine höhere Wärmekapazität als Frischluft, was die Flammentemperatur ebenfalls senkt. Die geringere O_2 -Konzentration führt auch zu einem langsameren Reaktionsablauf in der NO -Bildung. Außerdem muss das Inertgas zusätzlich mitaufgeheizt werden, was die Verbrennungstemperatur weiter senkt. Zudem ist weniger O_2 für die NO_x -Bildung verfügbar. Dadurch kann die Stickoxidbildung stark gesenkt werden.

Man unterscheidet zwischen interner und externer AGR, die im Folgenden näher beschrieben werden. [2]

2.2.1 Interne Abgasrückführung

Interne AGR kann durch die Ventilsteuerzeiten beeinflusst werden. Die Erhöhung des Restgasanteils wird durch eine frühzeitige Schließung der Auslassventile oder Öffnung der Einlassventile während des Ausschleibvorganges erreicht. [2]

2.2.2 Hochdruck-Abgasrückführung (HD-AGR)

Hochdruck-AGR ist eine externe AGR-Variante, bei der das heiße Abgas vor der Turbine des Abgasturboladers entnommen wird und dem Brennraum als Inertgas erneut zugeführt wird. Das dafür erforderliche Druckgefälle ist für PKW-Anwendungen in den meisten Kennfeldbereichen ausreichend. Zudem besteht die Möglichkeit der Androsselung mit einer entsprechenden Drosselklappe (3).

In Abbildung 2-3 ist der prinzipielle Vorgang der HD-AGR dargestellt. Das verbrannte Luft-Kraftstoffgemisch wird vom Motor (1) über ein AGR-Ventil (7) geführt. Anschließend wird das Abgas entweder über ein Bypass-Ventil (6) ohne Kühlung in das Saugrohr geführt, oder zuerst über einen AGR-Kühler (5) und dann gekühlt in das Saugrohr geführt. [2]

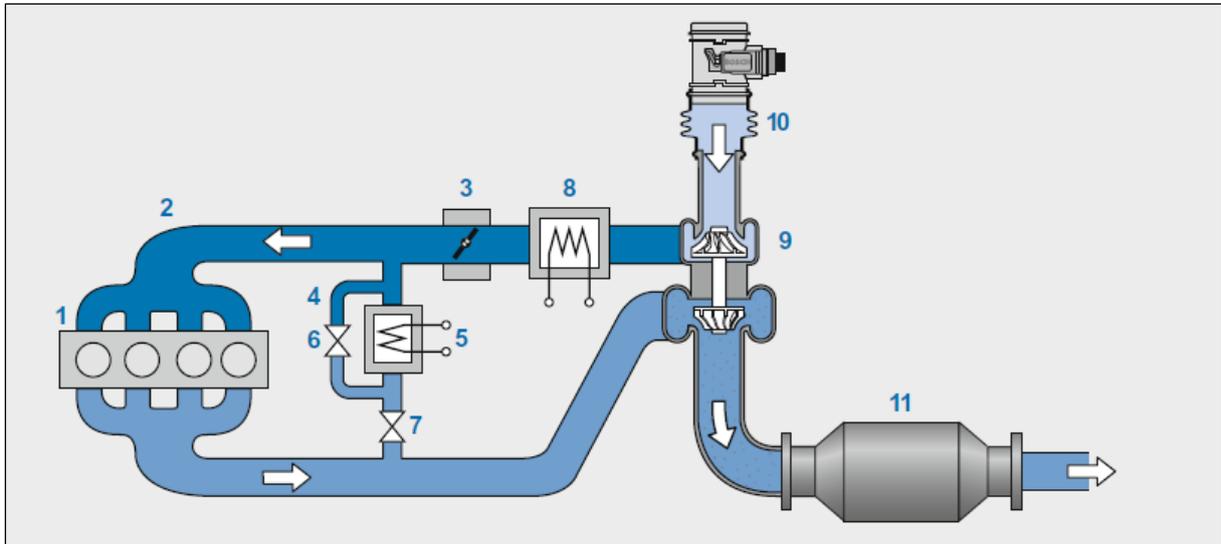


Abbildung 2-3: Prinzip der Hochdruck-AGR [2]

2.2.3 Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR)

Beim Niederdruck-AGR wird das Abgas über die Turbine des Abgasturboladers geführt und je nach Motorsystem auch über Module der Abgasnachbehandlung, wie den Oxidationskatalysator, SCR-Katalysator, etc. Wie in Abbildung 2-4 dargestellt ist, wird das Inertgas anschließend über ein AGR-Ventil (8) durch einen AGR-Kühler (9) geschickt und anschließend wieder dem Abgasturbolader auf der Verdichterseite zugeführt. [2]

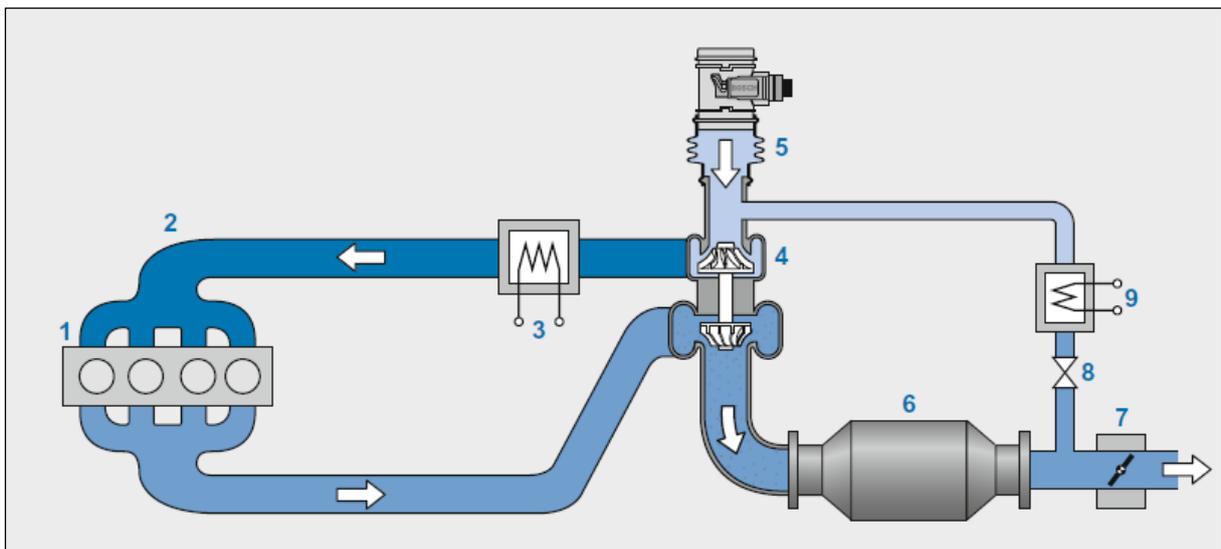


Abbildung 2-4: Prinzip der Hochdruck-AGR [2]

Die Regelung der AGR-Rate wird beim PKW über die Messung der Frischluftmasse erreicht und in vielen Fällen mit einer zusätzlichen λ -Sondenregelung verbessert. [2]

2.3 Schadstoffreduktion durch Abgasnachbehandlung

Die zweite grundlegende Möglichkeit der Reduktion der Schadstoffe ist eine Abgasnachbehandlung. Besonders in Hinblick auf die immer strenger werdende Gesetzgebung (siehe Kapitel 2.4) bezüglich Schadstoffemissionen ist eine umfangreiche Abgasnachbehandlung für alle Fahrzeuge erforderlich. Im Folgenden werden einige der gängigsten Abgasnachbehandlungssysteme bei Diesel-Motoren näher erläutert. Die gängigsten Systeme sind:

- Diesel-Oxidationskatalysator (engl.: „Diesel Oxidation Catalyst“, kurz: DOC)
- Selektive katalytische Reduktion (engl.: „Selective Catalytic Reduction“, kurz: SCR)
- Diesel-Partikelfilter (engl.: „Diesel-Particulate Filter“, kurz: DPF)
- NH_3 - Sperrkatalysator und
- NO_x -Speicherkatalysator (kurz: NSK)

Da der untersuchte Audi A4 Avant keinen NSK besitzt, wird dieser nicht näher beschrieben.

2.3.1 Dieseloxidationskatalysator (DOC)

Der Aufbau eines DOC ist ähnlich wie bei einem Dreiwegekatalysator. Durch ein Beschichtungsverfahren wird auf den Wabenkörper, der aus Keramik oder Metall besteht, eine Oxidmischung aufgebracht. Diese Mischung besteht in der Regel aus Aluminiumoxid, Ceroxid und Zirkonoxid. Die aktive katalytische Schicht aus den Edelmetallen Platin, Palladium und Rhodium befindet sich auf dieser Oxidschicht. Die Konvertierungsrate von DOC ist stark temperaturabhängig und steigt zwischen 170 °C und 200 °C auf über 90 % an. [1] , [2]

Im DOC erfolgt die Oxidation von HC - und CO -Emissionen zu H_2O und CO_2 . Die Verminderung dieser Schadstoffkomponenten wird aufgrund ihrer exothermen Eigenschaften auch für Bereitstellung zusätzlicher Wärme verwendet. Eine weit verbreitete Methode um das Abgasnachbehandlungssystem auf diese Art aufzuwärmen, ist eine möglichst späte Nacheinspritzung in den Brennraum, sodass ein Großteil des Kraftstoffes nicht im Brennraum umgesetzt wird, sondern erst im DOC zur Wärmeerzeugung verwendet wird. Zusätzlich wird im DOC ein Teil des NO zu NO_2 aufoxidiert. Diese Reaktion führt zu einem für DPF und SCR günstigeren Verhältnis der beiden Stickoxidkomponenten, was wiederum zu einer effizienteren chemischen Reaktion im SCR-Katalysator führen kann (siehe Kapitel 2.3.2). [2]

Eine weitere Möglichkeit ist eine direkte Kraftstoffeinspritzung vor dem DOC. Diese Methode weist deutlich geringere Wärmeverluste und eine gänzliche Vermeidung von Ölverdünnung auf. Technisch kann diese Methode durch Verdampfer oder Injektoren umgesetzt werden, wobei mit einem Verdampfer keine zusätzliche Kühlung erforderlich ist und außerdem weniger Kraftstoff für die gleiche Wärmemenge benötigt wird. [8]

2.3.2 Selektive Katalytische Reduktion (SCR)

Die selektive katalytische Reaktion wird zur Verminderung von NO_x eingesetzt. Der Begriff „selektiv“ wird deshalb verwendet, weil der für die chemische Reduktion notwendige Sauerstoff nicht aus dem Restsauerstoff aus dem verbrannten Luft-Kraftstoffgemisch entnommen wird, sondern aus dem an NO_x gebundenen Sauerstoff. Die selektive katalytische Reduktion ist eine aktive Maßnahme zur Reduktion von Stickoxiden. Abbildung 2-5 zeigt eine Prinzip-Skizze eines aktiven SCR-Systems. [1], [5]

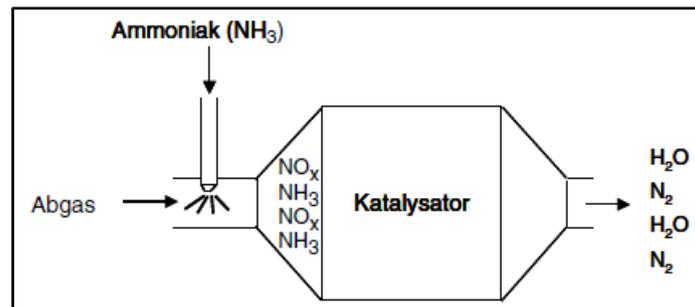


Abbildung 2-5: Prinzip-Skizze für aktives SCR-System [1]

In Abbildung 2-5 ist angedeutet, dass bereits reines Ammoniak eindosiert wird. Dieses wird allerdings in der Regel erst im Zuge einiger chemischer Reaktionen erzeugt. Außerdem sind die Abgaskomponenten, die nicht an der Reaktion im SCR-Katalysator teilnehmen, nicht abgebildet.

Für die Reduktion der Stickoxidkomponenten werden folgenden Prozessschritte durchlaufen:

- Oxidation von NO zu NO₂
- NH₃- Erzeugung
- selektive katalytische Reduktion
- NH₃- Reinigung (falls notwendig)

Die Erzeugung von NH₃ lässt sich wiederum in die Prozessschritte Einsprühen, Verdampfen, Thermolyse, Mischen und Hydrolyse unterteilen. Da der SCR-Katalysator ein Schwerpunkt der Untersuchungen dieser Arbeit ist, werden im Folgenden die einzelnen Prozessschritte mit Hilfe von Abbildung 2-6 näher erläutert. [1], [2]

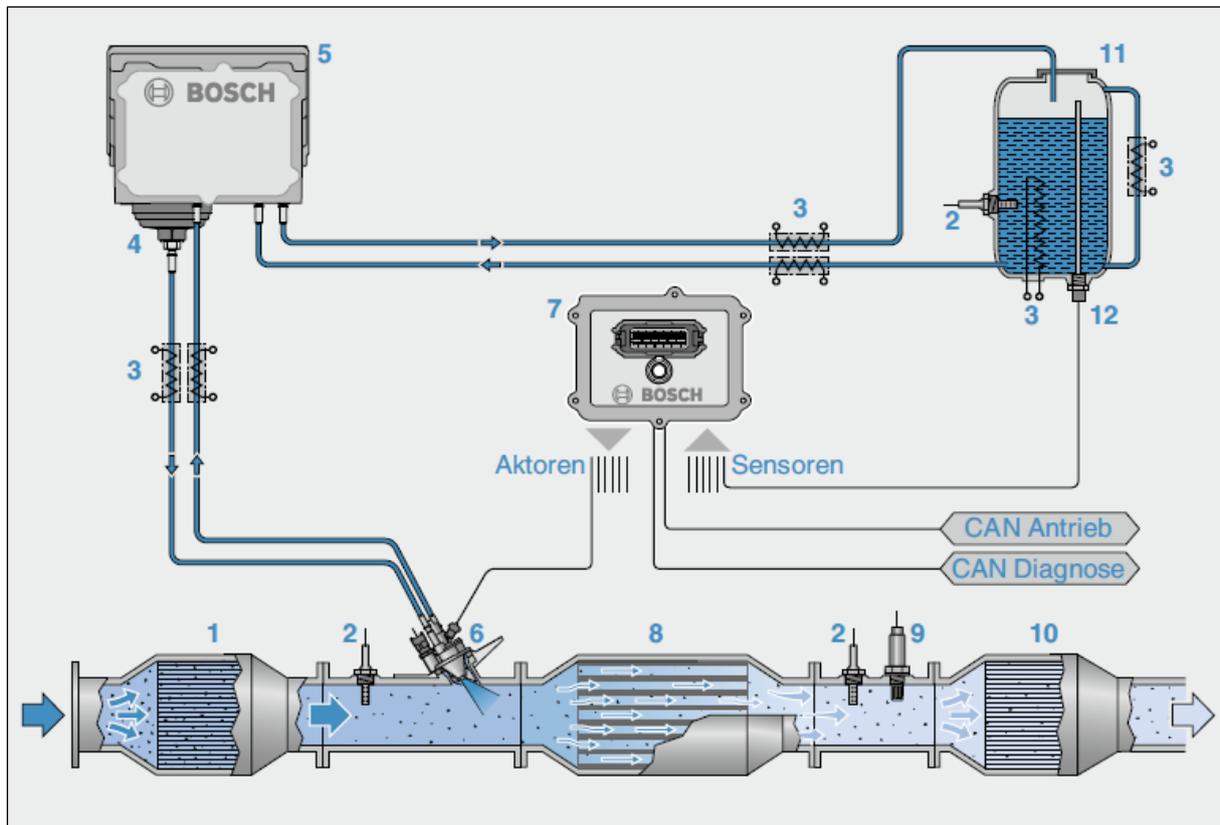


Abbildung 2-6: Modularer Systemaufbau bei einem SCR-Verfahren [2]

Der Wirkungsgrad des SCR-Katalysators hängt unter anderem auch vom Verhältnis zwischen NO und NO_2 ab. Für einen möglichst guten Wirkungsgrad vor allem bei Temperaturen unter 300 °C wird ein Verhältnis der beiden Komponenten von ca. 1:1 benötigt. Als Rohemissionen liegen Stickoxide allerdings zum Großteil in Form von NO vor. Die Aufoxidierung zu NO_2 wird vom Oxidationskatalysator (1) übernommen, wie bereits in Kapitel 2.3.1 erwähnt. Die in einem Zusatztank (11) befindliche Wasser-Harnstoff-Lösung wird über ein Dosiermodul (6) vor dem SCR-Katalysator eingespritzt, wenn die vorliegende Temperatur für den Verdampfungsvorgang, gemessen mit einem Thermoelement (2), ausreichend hoch ist. Die Wasser-Harnstoff-Lösung enthält 32,5 Gew.-% Harnstoff, da bei diesem Prozentsatz ein Eutektikum vorliegt. Der handelsübliche Name für diese Lösung ist „AdBlue“. Die Leitungen von und zum Tank, sowie der Tank selbst sind beheizt (3). Zusätzlich gibt es einen Füllstandssensor (12), der verhindert, dass das Fahrzeug ohne AdBlue in Betrieb genommen werden kann.

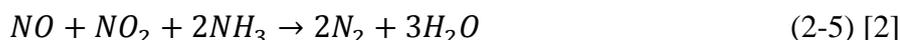
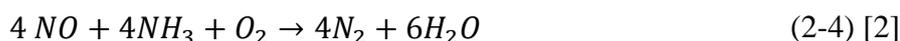
Nach der Einspritzung von AdBlue verdampft der Wasseranteil und es kommt zur sogenannten Thermolyse, dessen chemische Reaktion, bei der neben Ammoniak auch Isocyanensäure als Zwischenprodukt gebildet wird, durch Gleichung (2-2) beschrieben werden kann.



Nach der Thermolyse erfolgt eine weitere Durchmischung bevor es zur sogenannten Hydrolyse kommt, bei der die gebildete Isocyanensäure mit Wasserdampf zu Kohlenstoffdioxid und Ammoniak reagiert, wie in Gleichung (2-3) beschrieben.



Um eine Ausscheidung von AdBlue in flüssiger Form um Ablagerungen aus Nebenprodukten der Isoziansäure zu verhindern, wird in der Regel erst bei Temperaturen vor dem SCR-Katalysator um 180 °C eingespritzt. Der eigentliche Katalysator besitzt einen wabenförmigen Grundkörper, der durch katalytische Substanzen besetzt ist. Diese sind vor allem Vanadiumoxid oder Eisen- bzw. Kupfer-Zeolithe. Die eigentliche Reaktion von Ammoniak mit Stickoxiden kann durch folgende drei Basisfunktionen beschrieben werden:



Diese drei Basisfunktionen unterscheiden sich durch das Verhältnis zwischen NO und NO_2 . Die Reaktion aus Gleichung (2-4) wird als Standard-SCR-Reaktion bezeichnet und findet ohne NO_2 statt. Bei Temperaturen unter 300 °C und bei Vorliegen von NO und NO_2 in gleichen molaren Mengen, läuft vorwiegend die chemische Reaktion aus Gleichung (2-5) ab. Nachdem bei dieser Reaktion die Umsetzung der Stickoxide schneller erfolgt und wenig Ammoniak benötigt wird, ist ein Verhältnis zwischen NO und NO_2 von 1:1 anzustreben. Bei einem Überschuss von NO_2 läuft vorwiegend die chemische Reaktion 2-6 ab. Diese Reaktion weist zwei wesentliche Nachteile auf. Zum einen läuft diese Reaktion deutlich langsamer ab und es wird mehr Ammoniak benötigt, allerdings wird auch eine große Menge an NO_2 reduziert. Aus emissionstechnischen Gründen ist es wichtig, ausreichend AdBlue zuzuführen. Allerdings kann eine Überdosierung des Reduktionsmittels auch zu einem unerwünschten NH_3 -Schlupf führen kann und somit vom Fahrzeug emittiert wird. Bereits ab einer Konzentration von weniger als 15 ppm kann es zu einer starken Geruchsbelästigung kommen. Dies kann durch einen nachgeschalteten Oxidationskatalysator, einem sogenannten NH_3 -Sperrkatalysator, vermieden werden. In diesem wird NH_3 zu N_2 und H_2O oxidiert (siehe Kapitel 2.3.4). Trotzdem muss neben diesem Sperrkatalysator auch die Eindosierungsmenge von NH_3 genau abgestimmt werden, um nicht unnötiger Weise AdBlue zu verbrauchen. Eine wichtige Kenngröße für diese Applikation ist das sogenannte Feed-Verhältnis α . Diese ist definiert als das molare Verhältnis von dosiertem NH_3 zu dem im Rohabgas enthaltenen NO_x . Bei idealen Betriebsbedingungen ist dieses Verhältnis direkt proportional zur NO_x -Reduktionsrate. Theoretisch werden bei $\alpha = 1$ die gesamten Stickoxide konvertiert. Praktisch können bei entsprechenden Temperaturen und Massenströmen die Konvertierungsraten bei PKW zurzeit über 90 % betragen und liegen daher noch unter den Konvertierungsraten von neuen LKW- (Lastkraftwagen) Serien, die bereits Konvertierungen gegen 99 % realisieren. Außerdem ist bei einer langsamen SCR-Reaktion, wie in Gleichung (2-6) beschrieben, ein höheres Feed-Verhältnis erforderlich.

An dieser Stelle sei zudem erwähnt, dass im SCR-Katalysator auch eine gewisse Menge an Ammoniak zwischengespeichert werden kann. Dadurch können auch bei Temperaturen unterhalb der Eindosierungsgrenze noch Stickoxid-Konvertierungen erreicht werden (siehe Kapitel 5.1). [2], [4]

Eine Minimierung der Stickoxide bei gleichzeitiger Senkung des NH_3 -Schlupfes ist beim aktuellen Stand der Technik durch modellgestützte Berechnung der Dosiermenge an

Reduktionsmittel erreichbar. Solche Modelle zielen im Allgemeinen auf die Einstellung eines idealen NH_3 Füllstandes im SCR ab. Sie berücksichtigen unter anderem die gemessene Temperatur bei der Einspritzstelle, die gemessenen oder simulierten NO_x -Rohemissionen, Kennfelder für die NO_x -Konvertierung als Funktion der gespeicherten AdBlue-Menge, der Temperatur und der Raumgeschwindigkeit, um die Bilanz aus zugeführtem, verbrauchtem und als Schlupf durchgehenden NH_3 zu berechnen. Um das NH_3 -Speichervermögen nutzen zu können, muss über eine gewisse Zeit ein α größer als 1 realisiert werden, also mehr Ammoniak eingespritzt werden, als für die chemische Reaktion notwendig ist. Diese Temperaturabhängigkeit des Speichervermögens wird in Kapitel 5.1 zur Modellbildung verwendet und sei daher hier in Abbildung 2-7 grafisch dargestellt. [2], [5]

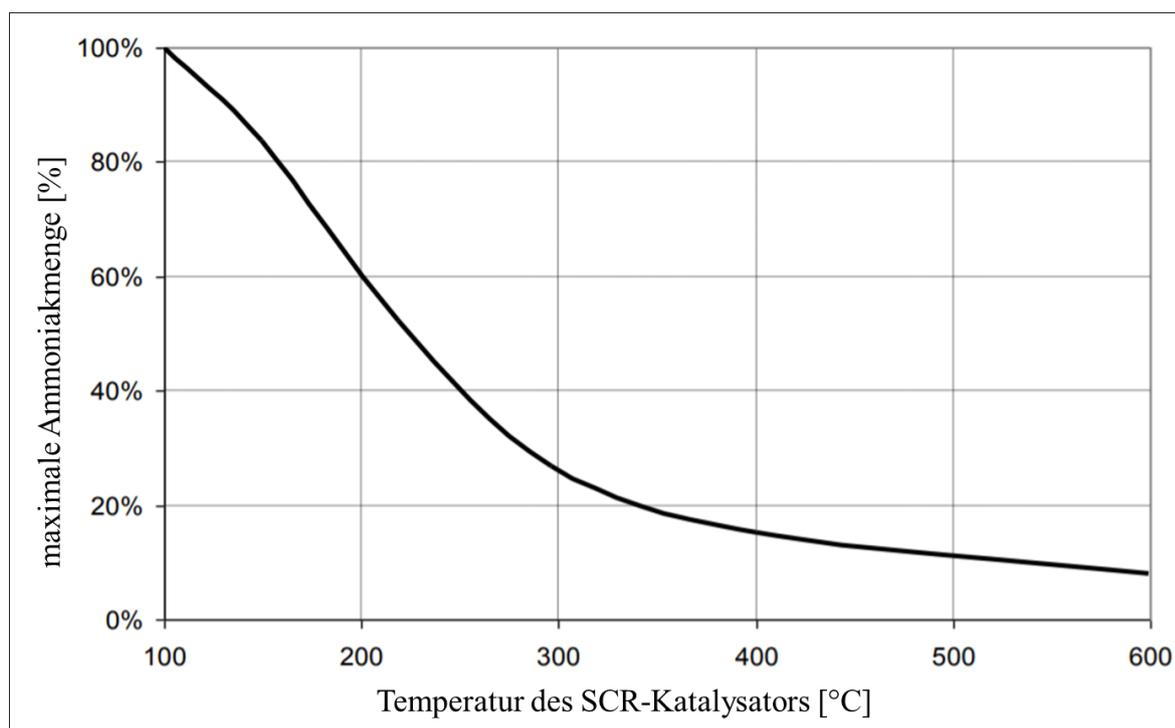


Abbildung 2-7: Temperaturabhängigkeit der NH_3 -Speicherfähigkeit von SCR-Systemen [5]

Es ist zu erkennen, dass die Speicherfähigkeit mit zunehmender Temperatur stark sinkt, was wiederum zu NH_3 -Schlupf führen kann. Außerdem sei in diesem Zusammenhang erwähnt, dass die maximale NH_3 -Speicherfähigkeit von SCR-Katalysatoren ungefähr 1 g/l beträgt. Je nach Katalysatorgröße kann also eine bestimmte Menge an NH_3 gespeichert werden und so auch bei Temperaturen unter 180 °C zur Reduktion von Stickoxiden verwendet werden.

2.3.3 Diesel-Partikelfilter (DPF)

Diesel-Motoren erzeugen, bedingt durch die Kraftstoffdirekteinspritzung eine relativ große Menge an Rußpartikeln, die durch den Einsatz eines DPF im Abgasnachbehandlungsstrang effizient gefiltert werden können. Der beim Versuchsfahrzeug Audi A4 Avant verbaute keramische DPF besteht aus einem Wabenkörper aus Siliziumcarbid und besitzt eine große Anzahl an aneinander liegenden quadratischen Kanälen. Diese sind jeweils abwechselnd am Einlass und am Auslass geschlossen. Dadurch muss das Abgas durch die porösen Keramikwände hindurchströmen. Abbildung 2-8 zeigt den systematischen Aufbau eines Partikelfilters. [2]

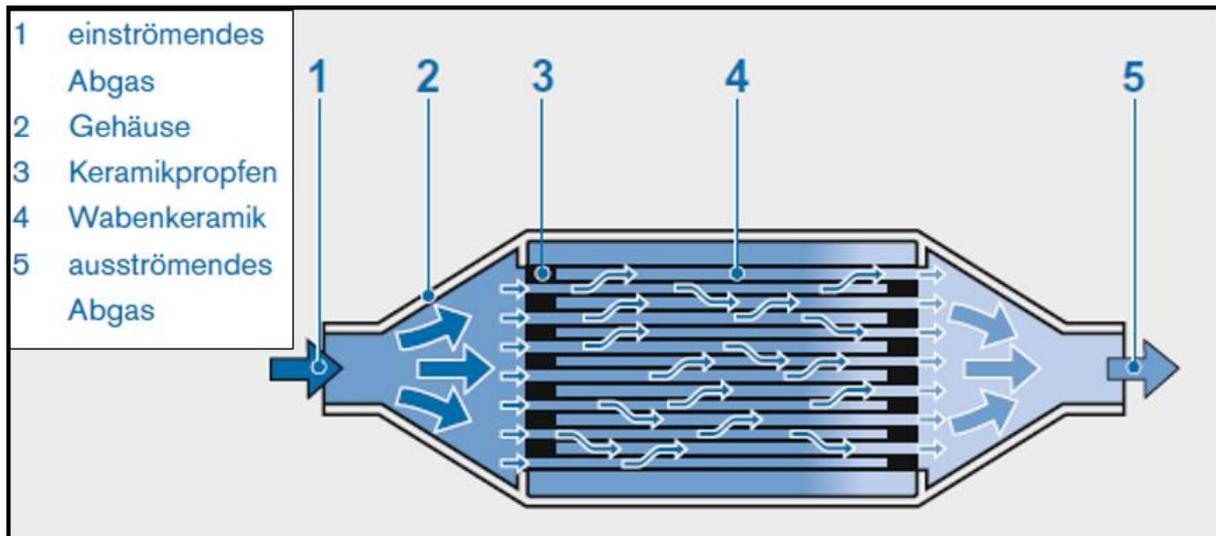


Abbildung 2-8: Systemskizze eines keramischen Partikelfilters [2]

Die Größe der Kanäle wird durch die Anzahl pro Quadratinch (cells per square inch; cpsi) angegeben und beträgt zwischen 100 und 300 cpsi. Bezüglich des Abscheidens der Partikel wird zwischen drei unterschiedlichen Mechanismen unterschieden:

- Bedingt durch Massenträgheit können vor allem große Rußpartikel der Strömung nicht folgen und werden am Strömungshindernis abgeschieden. Dieser Effekt wird als Impaktion bezeichnet.
- Kleinere Partikel, die dem Strömungsverlauf zwar folgen können, deren Partikelbahn allerdings auf oder unter der Grenzpartikelbahn verläuft, werden ebenso abgeschieden. Diesen Vorgang bezeichnet man als Interzeption.
- Durch sogenannte Brown'sche Diffusionsbewegung und Thermophorese werden Nanopartikel abgeschieden.

Abbildung 2-9 gibt einen Überblick über diese drei physikalischen Mechanismen. Für nähere Ausführung sei an dieser Stelle auf [5] und [9] verwiesen.

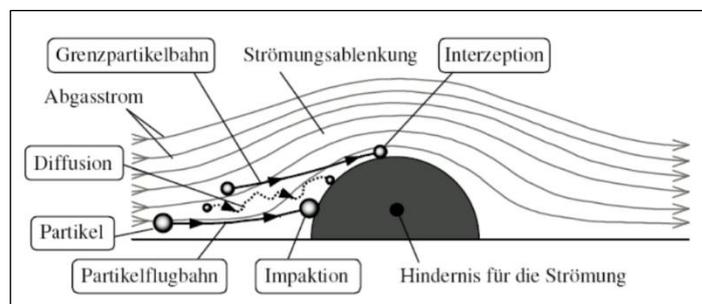


Abbildung 2-9: Partikelfilterabscheidungsmechanismen [9]

Durch die stattfindende Filtration sammeln sich immer mehr Partikel im DPF an und bildet bei Oberflächenfiltern, im Gegensatz zu Tiefenfiltern, einen sogenannten Filterkuchen, wie in Abbildung 2-10 ersichtlich. Durch diesen werden die einzelnen Kanäle befüllt, was zu einem Anstieg des Abgasgedruckes führt. Für weiterführende Informationen zu Tiefenfiltern sei auf [9] verwiesen.

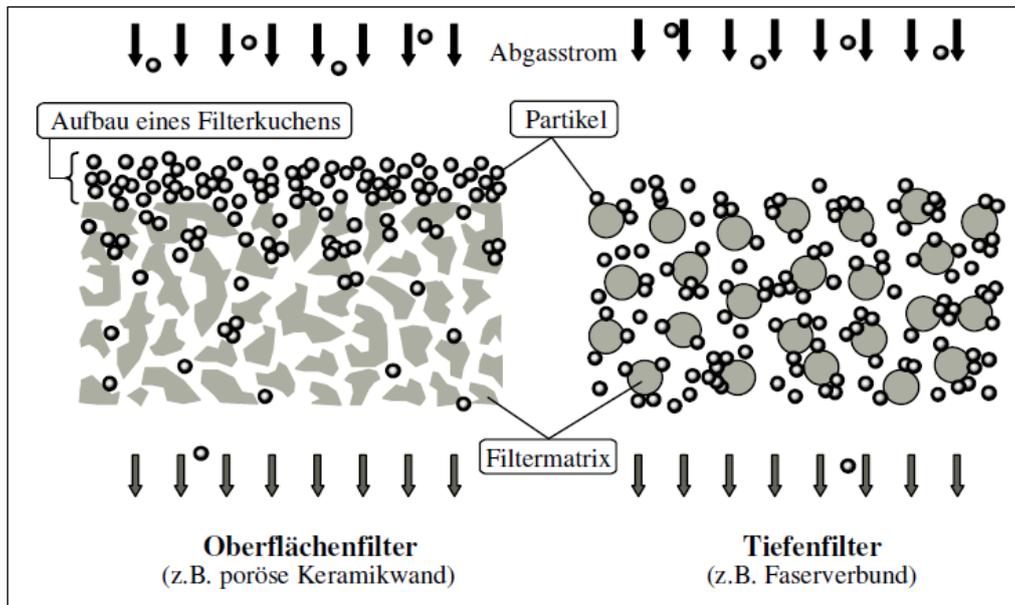


Abbildung 2-10: Abscheidung von Partikeln an Oberflächen- und Tiefenfiltern [9]

Damit dieser keine kritischen, bauteilschädigenden Werte erreichen kann, ist eine regelmäßige Partikelfilterregeneration notwendig. Diese kann im Wesentlichen auf drei unterschiedliche Arten erfolgen.

- Aktive Regeneration durch motorisches Heizen
- Thermische Regeneration infolge hoher Motorleistung
- Regeneration mittels NO_2

Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei Partikelfilterregenerationen festgestellt, wobei eine davon wahrscheinlich durch thermische Regeneration stattgefunden hat und die zweite durch motorisches Heizen eingeleitet wurde. Die dritte grundsätzliche Möglichkeit der Partikelfilterregeneration ist eine Regeneration mittels NO_2 . Diese läuft langsam ab und ist daher aus den Messdaten (höhere CO- und PN-Emissionen) nicht direkt ersichtlich. Abbildung 2-11 zeigt die Kennfeldbereiche, in denen die jeweiligen Filterregenerationsmöglichkeiten vorzufinden sind. [5]

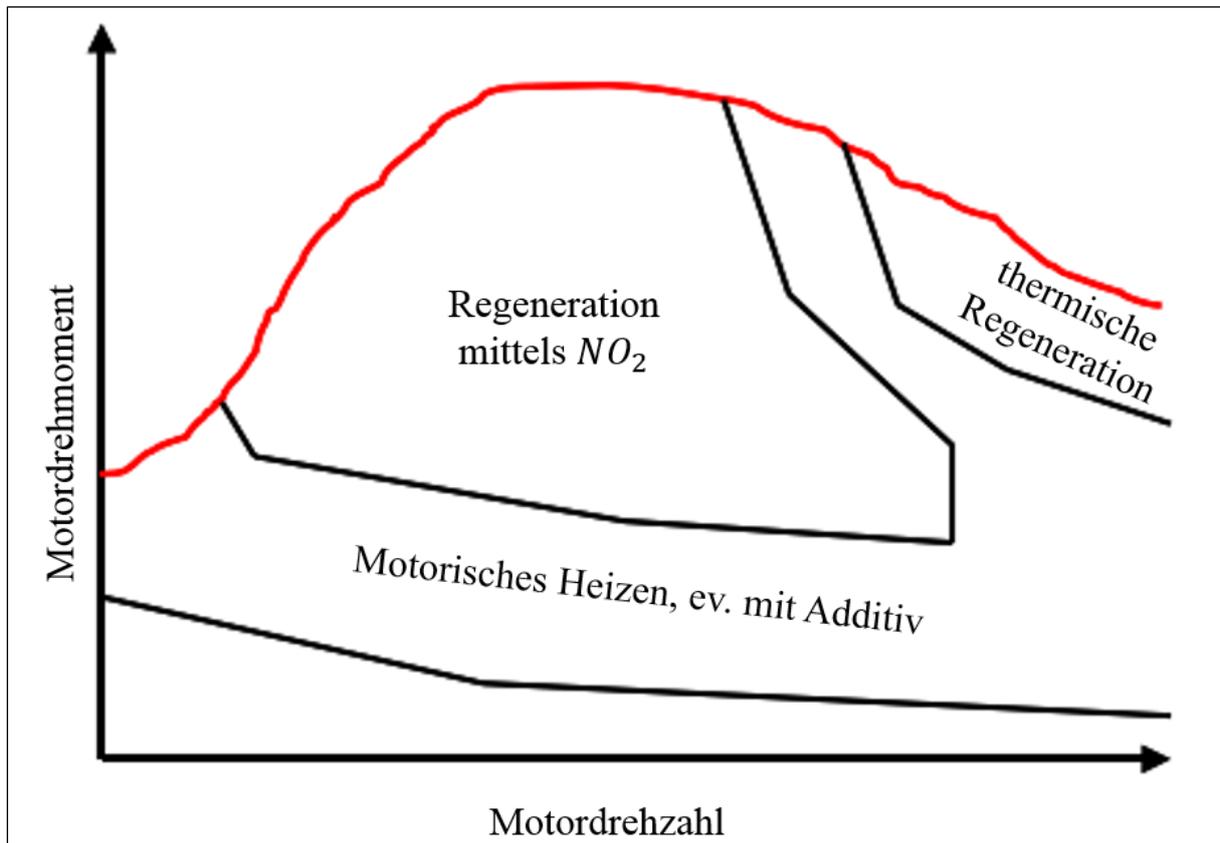


Abbildung 2-11: Schema der Filterregenerationsmöglichkeiten im Motorkennfeld [5]

Für eine Partikelfilterregeneration durch motorisches Heizen kann eine späte Nacheinspritzung in den Brennraum erfolgen, oder durch eine Einspritzung von Kraftstoff direkt vor dem Oxidationskatalysator erfolgen, was thermodynamische Vorteile bedeutet, wie in Kapitel 2.3.3 bereits erwähnt. Um den Abbrand des Filterkuchens gewährleisten zu können, sind Temperaturen über 550 °C im Partikelfilter notwendig. Eine Zwangsregeneration durch motorisches Heizen wird ab einem bestimmten Differenzdruck, gemessen durch zwei Drucksensoren jeweils vor und nach dem DPF, eingeleitet. Zusätzlich zum Differenzdruck gibt es ein in der Motorsteuerung hinterlegtes Beladungsmodell, welches den Beladungszustand des Filters durch die Betriebsdauer und Betriebsparametern des Motors errechnet. Die Dauer zwischen zwei Partikelfilterregenerationen hängt stark von den Ruß-Rohemissionen und der Größe des Filters ab und kann daher stark schwanken (zwischen ca. 300 bis 800 km). Die Dauer der Regeneration kann ebenso schwanken und liegt bei Systemen ohne Additive zwischen 10 und 15 Minuten. [4], [5], [7]

Durch Verwendung von Additiven (in der Regel eine Cerinverbindung) kann die Temperatur für eine Partikelfilterregeneration auf 450 °C gesenkt werden, was vor allem bei einem DPF im Unterboden, bedingt durch das deutlich niedrigere Temperaturniveau im Vergleich zu motornahen DPF-Konzepten, wünschenswert ist. Das im Zuge dieser Arbeit untersuchte Fahrzeug weist bei Partikelfilterregenerationen Temperaturen von deutlich über 600 °C auf und verwendet keine Additive. Bei Partikelfilterregenerationen wird die AGR-Rate deutlich gesenkt, um zum einen die Temperatur während der Verbrennung zu erhöhen und zum anderen mehr Sauerstoff für den Rußabbrand im DPF zur Verfügung stellen zu können. [4], [7]

Ein Teil des Filterkuchens bleibt als Asche im Partikelfilter zurück und kann nicht entfernt werden. Um einen Einbau eines neuen Partikelfilters vermeiden zu können, werden diese heute so ausgelegt, dass eine beträchtliche Menge an Asche gespeichert werden kann, bevor ein

Wechsel oder eine mechanische Reinigung des Partikelfilters notwendig wird. Das im Zuge dieser Arbeit untersuchte Fahrzeug ist auch mit einem solchen Filter ausgestattet. Für weitere, detailliertere Aussagen sei an dieser Stelle auf [4], [5], [7] und [9] verwiesen.

2.3.4 NH_3 -Sperrkatalysator

Der NH_3 -Sperrkatalysator ist ein mit Platin beschichteter Oxidationskatalysator, der hinter dem SCR-Katalysator angebracht wird, um den Ausstoß von Ammoniak zu vermeiden. Durch die Oxidationsreaktion wird Ammoniak in Stickstoff und Wasser nach Gleichung (2-7) umgewandelt. [4]



2.4 Gesetzgebung

Seit September 2017 gilt eine neue Abgasgesetzgebung (Euro 6d-Temp) bei der Typisierung von Fahrzeugen. Weitere Verschärfungen sind für 2020 mit Euro 6d geplant. Daher werden im Folgenden einige der Änderungen in der Gesetzgebung erläutert. Die Gesetzgebung unterscheidet sich zum einen in der Länge und Dynamik des vorgeschriebenen Prüfzyklus. Konkret ist das der NEDC (New European Driving Cycle) für die vergangene Gesetzgebung und der WLTC (Worldwide Harmonized Light-duty Vehicles Test Cycle) für die seit September 2017 gültige Gesetzgebung.

Der NEDC besteht aus einem Stadtanteil und einem Überlandanteil und weist eine Gesamttestlänge von 11 km auf. Die Dauer beläuft sich auf 1180 s. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 33,6 km/h. Die maximale Geschwindigkeit liegt bei 120 km/h. Dieser Zyklus ist im Vergleich zu realen Fahrverhältnissen sehr moderat.

Wie in Abbildung 2-12 ersichtlich ist, dauert der deutlich dynamischere WLTC 1800 s. Die Fahrstrecke beträgt etwa 23 km. Auch die durchschnittliche und maximale Geschwindigkeit wurden auf 46,3 km/h bzw. 131,6 km/h angehoben.

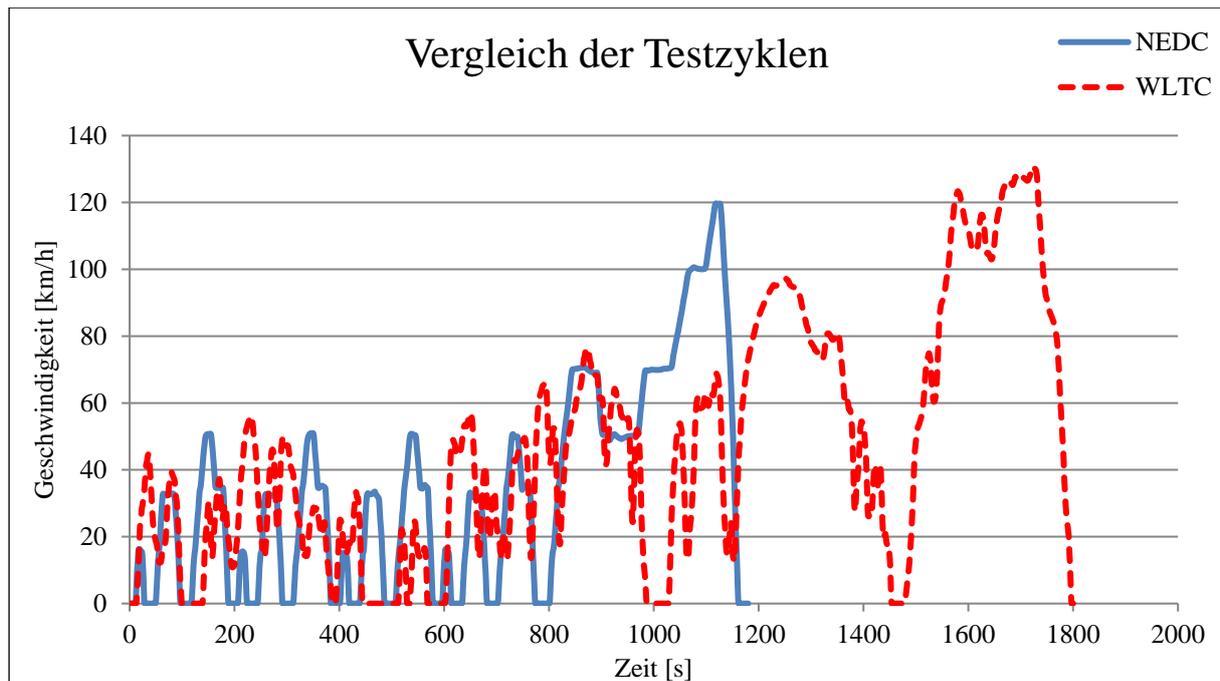


Abbildung 2-12: Geschwindigkeitsverlauf von NEDC und WLTC [10]

Neben dem neuen Testzyklus muss erstmals auch eine gültige RDE-Fahrt absolviert werden. Diese müssen auf der Straße mit einem transportablen Emissionsmessgerät durchgeführt werden. Diese transportablen Messsysteme sind unter dem Namen Portable-Emissions-Measurement-System, kurz PEMS, bekannt. [10], [11]

Es gibt eine Reihe von Faktoren, die zu berücksichtigen sind, wenn eine RDE-Fahrt gültig absolviert werden soll. Diese sind unter anderem:

- Keine übermäßig moderaten oder aggressiven Fahrstile.
- Die Höhendifferenz zwischen Startpunkt und Endpunkt muss weniger als 100 m betragen.
- Die positiv kumulierten Höhenmeter dürfen eine Grenze von 1200 m /100 km nicht überschreiten.
- Jede RDE-Fahrt soll zu 34 % einen Stadtanteil, zu 33 % einen Überlandanteil und zu 33 % einen Autobahnanteil beinhalten. Die %-Anteile sind jeweils auf die zurückgelegte Strecke bezogen. Für jeden dieser drei Teilbereiche sind jeweils Ober- und Untergrenzen in %-Anteilen festgelegt. Außerhalb dieser ist der Zyklus ungültig.
- Beim Stadtanteil darf eine definierte durchschnittliche Mindestfahrzeuggeschwindigkeit nicht unterschritten werden.
- Die maximale Stillstandszeit mit Geschwindigkeiten < 1 km/h ist begrenzt.
- Die Fahrt muss innerhalb der ersten 20 s nach dem Start der Messung begonnen werden (Geschwindigkeit > 1 km/h als Start-Bedingung)
- Die durch den Temperaturfühler (in der Regel am Dach montiert) gemessene Temperatur darf in keinem Zeitschritt höher als 35 °C oder niedriger als -2 °C sein (bis September 2019, danach nicht niedriger als -7 °C), ansonsten ist der Zyklus ungültig.

Obwohl hier nur ein Bruchteil der limitierenden Faktoren für eine gültige RDE-Fahrt aufgelistet ist, wird deutlich, dass die neue Gesetzgebung deutlich mehr Anforderungen in Bezug auf die

Typisierung von Fahrzeugen stellt, als früher. Allerdings ist trotz all dieser Limitierungen der Einfluss des Fahrverhaltens noch immer groß (siehe Kapitel 3.4.2). Neben den zuvor angeführten Kriterien, durch die ein gültiger Zyklus definiert wird, gibt es für Umgebungstemperatur und Höhenlage einen sogenannten „Extended-Bereich“. Dieser Bereich soll Fahrzustände, die eine deutliche Erhöhung der NO_x -Emissionen bedingen können, berücksichtigen. Befindet man sich in einem solchen „Extended-Bereich“, so müssen alle Emissionsmesswerte bis auf CO_2 in diesem Zeitschritt durch einen Faktor von 1,6 dividiert werden.

Das folgende Beispiel soll den Extended-Bereich für die Umgebungstemperatur näher erklären. Der Gesetzgeber schreibt eine Auswertungsfrequenz von mindestens 1 Hz vor. Man generiert also während der Fahrt für jede Sekunde Messdaten. Der Euro 6d-Temp Extended-Bereich für Temperatur liegt zwischen -2 °C und 3 °C und zwischen 30 °C und 35 °C . Befindet sich die gemessene Temperatur des PEMS in diesem Bereich, so muss der Messwert der Schadstoffkomponenten in diesem Zeitschritt durch 1,6 dividiert werden. [11]

Derzeit gibt es Grenzwerte für die Schadstoffkomponenten NO_x und PN bei RDE-Fahrten. Bis September 2020 gilt für NO_x -Emissionen ein CF (Conformity-Factor) von 2,1. Das bedeutet, dass die NO_x -Grenzwerte für den WLTC mit diesem Faktor multipliziert werden. Für Partikelemissionen gilt ein CF von 1,5. Diese seit September 2017 gültige Gesetzgebung wird, wie eingangs erwähnt, voraussichtlich ab 2020 für NO_x weiter verschärft. Konkret soll der CF für NO_x auf 1,5 herabgesetzt werden. Die aktuellen Grenzwerte betragen also bis 2020 für NO_x und Partikelanzahl $0,168\text{ g/km}$ und $9E+11\text{ \#/km}$ und ab 2020 $0,120\text{ g/km}$ für NO_x . [10], [11]

Aufgrund der Tatsache, dass der Umfang dieser Gesetzgebung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird für weitere Details auf [10] und [11] verwiesen.

2.4.1 Abschätzung der Temperaturgrenzschicht

Spätestens seit dem Betrugsskandal eines namhaften Automobilherstellers genießen Emissionsgesetzgebungen, deren Testmethoden etc. große Aufmerksamkeit. Neue Euro 6-Fahrzeuge, die vor dem September 2017 typisiert wurden, halten teilweise aber schon die Emissionsgrenzwerte für die neue RDE-Gesetzgebung ein.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein gesetzlich zulässiger Spielraum in Bezug auf die Umgebungstemperaturermittlung untersucht. Der Gesetzgeber definiert, wie bereits erwähnt, einen Extended-Bereich, in dem Schadstoffe durch einen Faktor dividiert werden. Bezogen auf die Umgebungstemperatur liegt der obere Extended-Bereich zwischen 30 °C und 35 °C . Bestimmend für die Umgebungstemperaturerfassung ist ein Temperatursensor, der in der Regel Bestandteil der Wetterstation ist und am Dach des Fahrzeuges montiert wird.

Es ist allgemein bekannt, dass dunkel lackierte Oberflächen bei Sonneneinstrahlung deutlich höhere Temperaturen entwickeln als hell lackierte Oberflächen. Dies ist grundsätzlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass schwarze Körper die höchste Wärmestrahlung abgeben. Die Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers kann durch das Planck'sche Strahlungsgesetz, wie in Gleichung (2-8) beschrieben, berechnet werden. [12]

$$e_{s\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right]} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (2-8) [12]$$

$e_{s\lambda}$

[W/m³]

Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers

λ	[m]	Wellenlänge
T	[K]	Oberflächentemperatur des Körpers
$C_1 = 3,741 \text{ E-16}$	[Wm ²]	Konstante für Planck'sches Strahlungsgesetz
$C_2 = 1,438 \text{ E-2}$	[mK]	Konstante für Planck'sches Strahlungsgesetz

Verglichen mit einem schwarzen Körper kann das Emissionsspektrum eines nicht schwarzen Körpers maximal gleich groß sein, wie das des schwarzen Körpers. Abbildung 2-13 veranschaulicht das Emissionsspektrum dieser beiden Körper bei einer bestimmten Temperatur in Abhängigkeit der Wellenlänge. Auf weitere Definitionen bezüglich schwarzer und realer Körper und deren Eigenschaften sei auf [12] verwiesen.

Die seit September 2017 gültige RDE-Gesetzgebung erlaubt nun die Positionierung eines Temperatursensors für Messfahrten auf dem Dach des Fahrzeuges. Der Hersteller kann ein Fahrzeug mit beliebiger Lackierung zur Emissionsmessung zur Verfügung stellen. So könnte einmal ein weiß-lackiertes oder ein schwarz-lackiertes Fahrzeug verwendet werden.

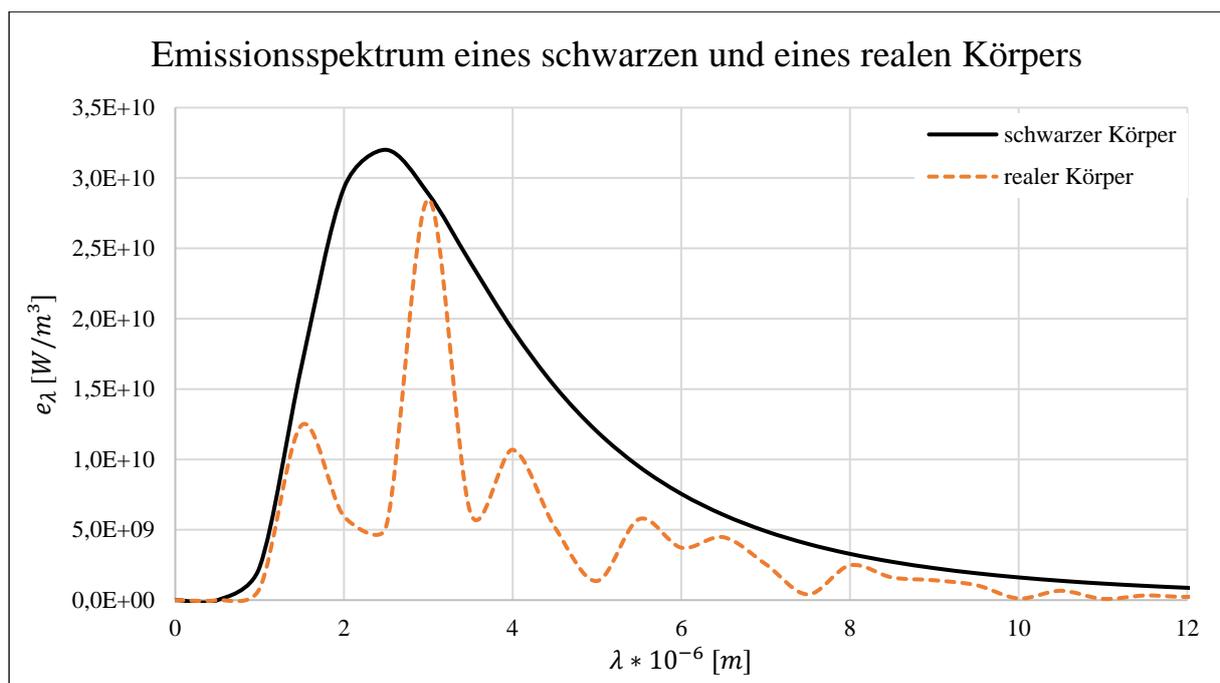


Abbildung 2-13: Emissionsspektrum eines schwarzen und eines realen Körpers, berechnet auf Basis von Gleichung (2-8)

Führt daher ein Automobilhersteller an einem sonnigen, heißen Tag (Temperaturen gegen 30 °C) eine RDE-Messfahrt durch, so können geringe Temperaturunterschiede zwischen weiß und schwarz lackiertem Fahrzeug gemessen werden. Im Extremfall könnte die gemessene Temperatur beim schwarzen Fahrzeug während der gesamten Messfahrt knapp über 30 °C und beim weißen Fahrzeug knapp unter 30 °C liegen. Dadurch, dass man in diesem Fall mit einem Fahrzeug im RDE Extended-Bereich liegt und mit dem anderen nicht, könnten deutliche Unterschiede auftreten. Nimmt man an, dass beide Versuchsfahrzeuge 0,160 g/km NO_x emittiert haben, so könnte sich nach der gesetzlich vorgeschriebenen Korrektur (Division der

NO_x durch 1,6) eine Differenz von 60 mg/km alleine durch die unterschiedliche Lackierung (weißes Fahrzeug: 0,160 g/km; schwarzes Fahrzeug: 160/1,6= 100 g/km) ergeben.

Daher werden im Folgenden der Temperatureinfluss durch Abschätzung der Temperaturgrenzschicht auf einem Fahrzeugdach und der Strahlungseinfluss auf den Temperatursensor abgeschätzt.

Als vereinfachte Annahme wird das Dach als ebene Platte angenommen. Dadurch gilt bei laminarer Strömung für die Temperaturgrenzschicht folgende Gleichung:

$$\delta_T = \sqrt{\frac{\nu_x * D_{Sensor}}{U}} * \frac{5}{\sqrt{Pr}} \quad (2-9) [13]$$

δ_T	[m]	Temperaturgrenzschicht
ν_x	[m ² /s]	kinematische Viskosität
D_{Sensor}	[m]	Abstand des Sensors zur Dachvorderkante
U	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
Pr	[-]	Prandtl-Zahl

Nachdem sich die Prandtl-Zahl für Luft zwischen 0,71 (bei 10 °C) und 0,76 (bei 150 °C) bewegt, wird diese für die Abschätzung der Grenzschicht mit 0,71 als konstant angenommen. Gleiches gilt für die kinematische Viskosität ν_x zur weiteren Abschätzung der Reynolds-Zahl, um sicherzustellen, dass ein laminarer Ansatz für die Grenzschicht verwendet werden kann. Diese wird mit 1,6E-5 m²/s für Luft im untersuchten Temperaturbereich ebenfalls als konstant angenommen. [14]

Abbildung 2-14 zeigt den Verlauf der Temperaturgrenzschicht als Funktion der Fahrgeschwindigkeit für drei unterschiedliche Abstände des Thermoelements zur Fahrzeugdachvorderkante.

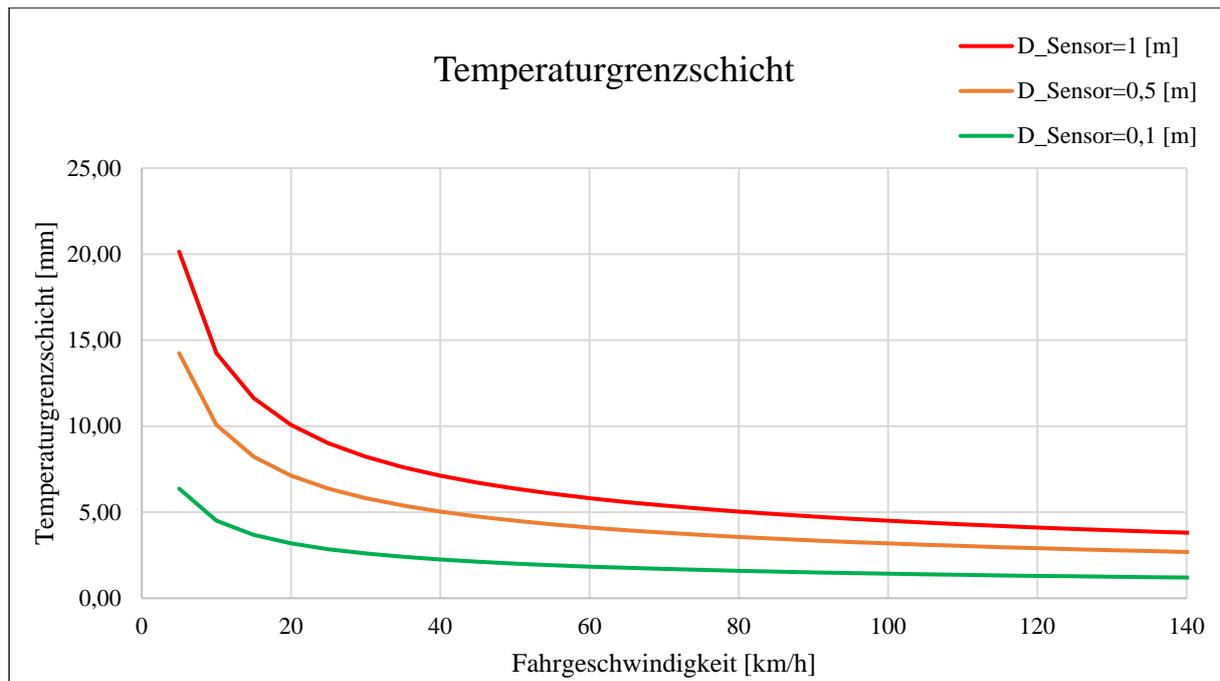


Abbildung 2-14: Laminare Temperaturgrenzschicht

Man sieht, dass die Temperaturgrenzschicht in Abhängigkeit der Position einen Einfluss haben kann. Je näher der Sensor an der Vorderkante montiert wird, umso kleiner ist die Temperaturgrenzschicht, die die Messungen grundsätzlich beeinflussen kann. Wenn der Temperatursensor knapp 0,1 m nach der Vorderkante montiert wird, kann der Temperatureinfluss durch die Fahrzeugoberfläche vernachlässigt werden, da die Temperaturgrenzschicht bereits ab 18 km/h unter 4 mm sinkt. Bei weiterer Abschätzung der Re-Zahl durch Gleichung (2-10) erkennt man zudem, dass diese immer kleiner als die kritische Reynoldszahl für Plattenströmungen ist, wenn der Abstand des Temperatursensors zur Fahrzeugdachvorderkante mit 0,1 m angenommen wird. Aus diesem Grund ist die eingangs getroffene Annahme laminarer Strömung zulässig.

$$Re = \frac{D_{Sensor} * U}{\nu_x} \quad (2-10) [15]$$

ν_x	[m ² /s]	kinematische Viskosität
D_{Sensor}	[m]	Abstand des Sensors zur Dachvorderkante
U	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
Re	[-]	Reynolds-Zahl

Neben der Temperaturgrenzschicht kann Wärmestrahlung einen Einfluss auf die gemessene Temperatur haben. Dieser ist in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Für nähere Informationen sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. [12]

Zusammenfassend kann zum Temperatureinfluss auf den Sensor festgehalten werden, dass dieser, wenn der Sensor möglichst nahe an der Fahrzeugdach-Vorderkante montiert ist, vernachlässigbar in vielen Fahrzuständen vernachlässigbar ist.

2.5 Mobile Emissionsmessgeräte

Neben einer stationären Emissionsmessung auf einem Prüfstand besteht die Möglichkeit Emissionskomponenten auch mobil mit einem PEMS zu messen. Ein solches Messgerät wurde im Zuge dieser Arbeit für die Erhebung von Messdaten verwendet und wird daher im Folgenden beschrieben. Messungen mit einer CVS- (Constant Volume Sampling) Anlage waren nicht Bestandteil des Messprogrammes. Für nähere Informationen bezüglich CVS-Anlagen und deren Messmethoden sei auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

Das verwendete PEMS stammt von der AVL List GmbH, nennt sich AVL M.O.V.E. und wird unterschieden in ein Gas-PEMS und ein PN- (Particle Number) PEMS.

2.5.1 Gas-PEMS

Das Gas-PEMS ermöglicht Emissionen am Auspuffende mit einer Frequenz von 10 Hz zu messen und aufzuzeichnen. Prinzipiell kann man mit diesem System NO , NO_2 , CO_2 , CO und HC messen, wie in [16] beschrieben. Allerdings wurde kein FID (Flammenionisationsdetektor) eingesetzt. Die RDE-Gesetzgebung schreibt auch kein Messen des HCs bei einer RDE-Fahrt vor. Einen schematischen Aufbau des Gas-PEMS und dessen Messprinzip zeigt Abbildung 2-15. [17], [18]

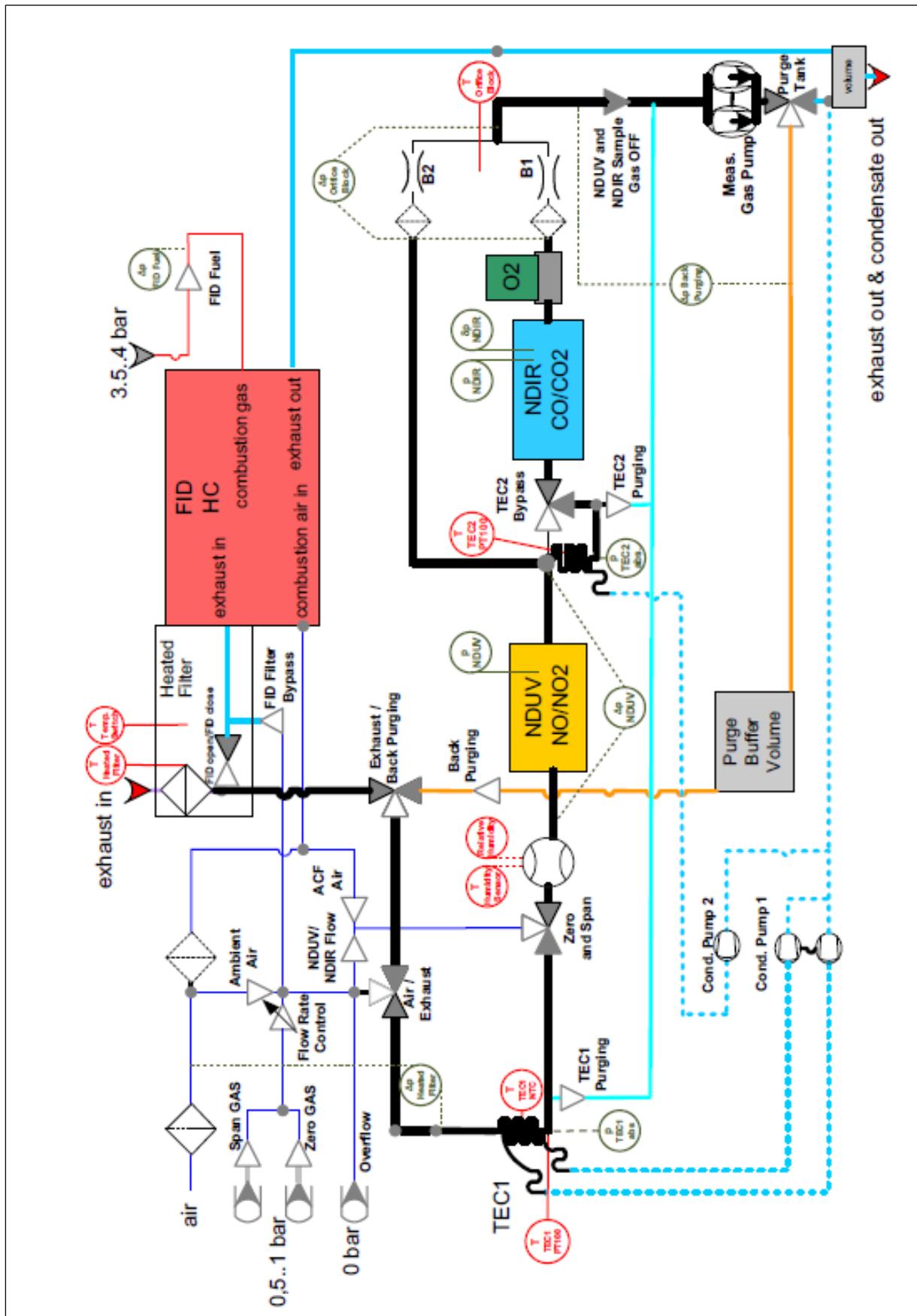


Abbildung 2-15: Systembeschreibung und Messprinzipien AVL Gas PEMS [17]

Ein konstanter Volumenstrom von 2 l/min wird durch eine beheizte Entnahmeleitung unverdünnt entnommen. Im Weiteren werden durch einen beheizten Filter Partikel abgeschieden. Danach gelangt das Abgas zum Messgerät. Ein erster Kühler (TEC1) bringt das Abgas auf 25 °C, um teilweise Wasser aus dem Abgas abzuscheiden. Die Entnahme von Wasser aus dem Abgas ist für die darauffolgende Messung von NO , NO_2 und CO_2 unabdinglich. Vorhandenes Wasser in den Analysatoren ist zu vermeiden, damit bessere Messqualität gewährleistet werden kann (Querempfindlichkeit der Analysatoren gegenüber Wasser). Somit wird nur sogenanntes „halbtrockenes“ Abgas für die eigentliche Messung verwendet. Da allerdings die gemessenen Emissionen wieder auf die eigentliche feuchte Abgaszusammensetzung Auskunft geben müssen, muss der abgeschiedene Massenstrom in der Auswertung berücksichtigt werden. Für weitere Details sei an dieser Stelle auf [17] verwiesen.

Der erste Analysator misst NO und NO_2 separat. In einem weiteren Schritt wird das Abgas durch einen zweiten Kühler auf 5 °C abgekühlt und das durch Kondensation frei gewordene Wasser wird wieder durch eine Pumpe abgeschieden. Mit einem Nichtdispersiven-Infrarotanalysator (NDIR-Analysator) werden die Emissionskomponenten CO und CO_2 gemessen und mit einem NDUV (Nichtdispersiver-Ultraviolett-Analysator) bzw. DUV-RAS (Dispersive-Ultraviolette-Resonanz-Absorptions-Spektroskopie) werden die Emissionskomponenten NO_2 und NO gemessen. Abschließend wird der Sauerstoffgehalt im Abgas bestimmt, welcher für gesetzeskonforme Auswertungen erforderlich ist. Sowohl die Analysatoren als auch der Sauerstoffsensoren messen die Volumenkonzentration der Emissionskomponente im Abgas. [1], [17]

Für eine detaillierte Beschreibung diverser Analysatoren wird an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. [3], [16], [17], [19], [20], [21]

2.5.2 PN-PEMS

Mit dem PN-PEMS können die Partikelanzahl-Emissionen ermittelt werden. Dieses Messgerät entnimmt dafür kontinuierlich einen Volumenstrom von 0,5 l/min aus dem Abgas. Auch für dieses Messgerät ist die Entnahmeleitung beheizt, um Kondensation zu vermeiden. Das Messgerät selbst besitzt zwei Luftpfade, wobei sich in einem Luftpfad das Abgas und im anderen Luftpfad getrocknete und gefilterte Luft befindet. Diese getrocknete und gefilterte Luft wird zur Verdünnung der Probe verwendet. Das Messprinzip des PN-PEMS ist in Abbildung 2-16 schematisch dargestellt. Zuerst durchläuft das verdünnte Abgas ein unipolares Diffusionsladegerät (1), in dem die Partikel aufgeladen werden. Diese Aufladung wird durch den Effekt der Koronaentladung realisiert. Durch die Hochspannung beim Diffusionsladegerät wird ein elektrostatisches Feld erzeugt. In der Nähe des Koronadrahtes reicht die hohe Feldstärke aus, sodass sogar Luft elektrisch leitend gemacht wird. Elektronen, die innerhalb der dünnen Schicht an der Oberfläche positioniert sind, werden stark beschleunigt, was zu Kollisionen innerhalb der Luftmoleküle führt. Durch die hohe Energie der Elektronen können diese ein Elektron aus den Luftmolekülen herausschießen, wodurch positiv geladene Ionen und freie Elektronen entstehen.

Das Rohr ist negativ gegenüber dem Koronadraht geladen, weswegen sich die Elektronen schnell in Richtung des Drahtes bewegen. Wenn nun Partikel in den Bereich zwischen Draht und Rohr befördert werden, werden diese durch Diffusionsladung aufgeladen. Solche Ladungen treten auf, wenn Partikelteilchen mit Ionen kollidieren. Danach haftet das Ion an dem Teilchen, wodurch ein messbarer Ladestrom (2) abgegriffen werden kann.

Dem Diffusionsladegerät ist ein gepulster elektrostatischer Abscheider (3) nachgeschaltet. Dieser Abscheider erzeugt eine Ladungsmodulation. Mit Hilfe eines Faraday-Käfig-Elektrometers (4) können die Ladungen schließlich kompensiert werden und es fließt ein

sogenannter Kompensationsstrom. Dieser Kompensationsstrom ist proportional zur Ladung der einzelnen Partikel und der so zustande kommende Ausschlag am Elektrometer entspricht der Anzahl an Partikeln. [22]

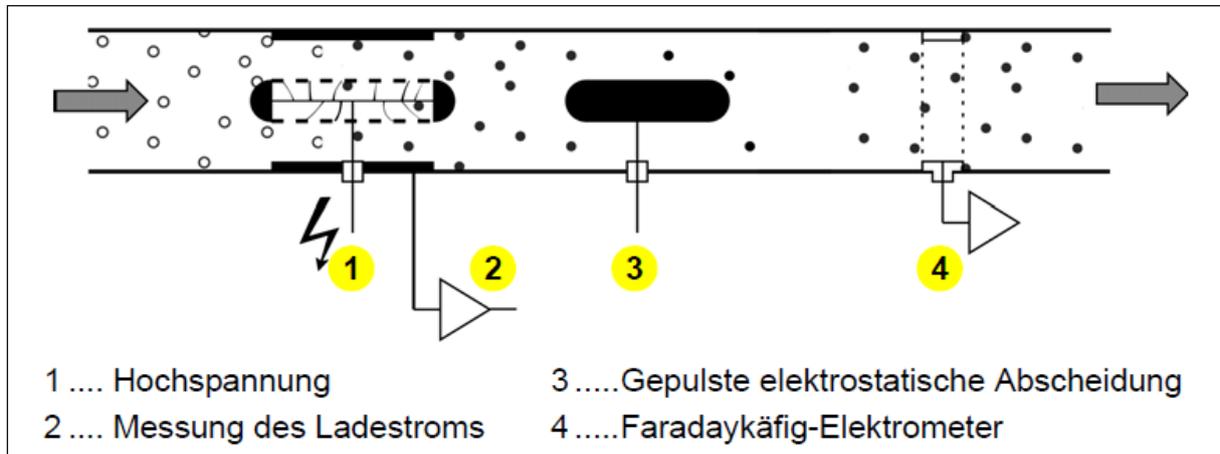


Abbildung 2-16: Messprinzip des PN-PEMS [22]

3. Messtechnische Untersuchungen mit Ergebnissen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das vermessene Euro 6b Fahrzeug. Weiters wird der Messaufbau am Fahrzeug erklärt und die Messergebnisse der Messfahrten präsentiert.

3.1 Fahrzeugbeschreibung

Das im Zuge dieser Arbeit untersuchte Fahrzeug ist ein Audi A4 Avant mit Vorderradantrieb. Das Fahrzeug ist für die Emissionsklasse Euro 6b zugelassen. Der Hubraum des Vierzylindermotors beträgt 2 l. Die maximale Leistung liegt mit 90 kW bei einer Nenndrehzahl von 3.500 U/min. Das Abgasnachbehandlungssystem setzt sich aus einem Diesel-Oxidationskatalysator, einem SCR-Katalysator und einem Diesel-Partikelfilter zusammen. Alle Abgasnachbehandlungssysteme sind motornah eingebaut.

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Fahrzeugdaten.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Fahrzeugdaten

Hubraum	1968 [cm ³]
Anzahl der Zylinder	4 [-]
Aufgeladen	Ja
Nenndrehzahl	3500 [U/min]
Leerlaufdrehzahl	860 [U/min]
DIN-Leermasse	1445 [kg]
Kilometerstand bei Messserienstart	170 [km]
Aufbau	Kombilimousine
Antriebsart	Vorderradantrieb
Getriebe	Manuelles Sechs-Gang Schaltgetriebe
Kraftstoff	Diesel
Abgasklasse	Euro 6b
Baujahr	2017
Abgasnachbehandlung	DOC + SCR + DPF
AGR-System	HD-AGR ungekühlt ND-AGR gekühlt
CO ₂ -Emissionen laut Zulassungsschein bezogen auf den NEDC	99 [g/km]

Parametern die Abtastrate deutlich sinkt. Auf die Darstellung des Kühlsystems und der verbauten Lambda-Sonde wird an dieser Stelle verzichtet.

Der NO_x -Sensor vor dem SCR-Katalysator wurde verwendet, um Stickoxid-Rohemissionen messen zu können. Diese Messdaten sind für die Erstellung der SCR-Kennfelder notwendig (siehe Kapitel 4.3). Es ist zudem zu beachten, dass an unterschiedlichen Stellen des in Abbildung 3-1 gezeigten Systems unterschiedliche Massenströme auftreten. Zu Beginn wird Frischladung angesaugt und über den Verdichter dem Brennraum zugeführt. Im Motor wird der für den entsprechenden Lastpunkt notwendige Kraftstoff eingespritzt. Nach dem Motor kann ein Teil-Massenstrom als HD-AGR ungekühlt bzw. gekühlt über ein HD-AGR-Ventil rückgeführt werden. Der restliche Massenstrom wird über das Abgasnachbehandlungssystem, also über den DOC, SCR und DPF geleitet. Vor dem SCR wird AdBlue eidosiert, was wiederum den Massenstrom an dieser Stelle geringfügig erhöht.

Nach dem DPF kann wieder ein Teil des Massenstromes über ein ND-AGR-Ventil vor den Verdichter gekühlt zurückgeführt werden. Der vom PEMS gemessene Abgasmassenstrom entspricht also bei diesem Fahrzeug in einigen Lastpunkten nicht dem Massenstrom über den SCR-Katalysator. Der Massenstrom durch den SCR-Katalysator kann nach Gleichung (3-1) berechnet werden, da bei diesem Fahrzeug der ND-AGR-Massenstrom, wie bereits erwähnt, ausgelesen werden konnte.

$$\dot{m}_{SCR} = \dot{m}_{Abgas} + \dot{m}_{ND-AGR} \quad (3-1)$$

\dot{m}_{SCR}	[kg/s]	Massenstrom über SCR-Katalysator
\dot{m}_{Abgas}	[kg/s]	emittierter Abgasmassenstrom bei PEMS gemessen
\dot{m}_{ND-AGR}	[kg/s]	Massenstrom der ND-AGR

Beide AGR-Varianten werden, wie in Kapitel 2.2 erläutert, für die innermotorische Reduktion der Stickoxide angewandt, wobei die ND-AGR einen deutlich höheren Massenstrom aufweist. Neben dem höheren Massenstrom an Inertgas weist die ND-AGR zudem deutlich niedrigere Temperaturen auf, da diese über das Abgassystem geführt wird und insgesamt deutlich stärker gekühlt wird (fließt über AGR-Kühler und Ladeluftkühler).

Nachdem alle in Abbildung 3-1 gezeigten Temperatursensoren und der NO_x -Sensor über die OBD-Schnittstelle ausgelesen werden konnten, mussten keine zusätzlichen Sensoren im Abgasnachbehandlungssystem eingebaut werden. Wie bereits erwähnt, konnte auch der AGR-Massenstrom ausgelesen werden.

Erwähnenswert ist außerdem, dass der Audi A4 Avant keinen Stickoxid-Sensor nach dem SCR-Katalysator besitzt. Berücksichtigt man die Tatsache, dass die OBD-Gesetzgebung die ständige Plausibilisierung von emissionsrelevanten Bauteilen vorschreibt, kann man darauf schließen, dass zumindest die Funktionalität des SCR über die Temperatursensoren plausibilisiert wird. Die genaue Plausibilisierungsstrategie konnte beim Hersteller nicht in Erfahrung gebracht werden.

3.1.1 PEMS-Aufbau am Versuchsfahrzeug

Abbildung 3-2 zeigt den Aufbau des Gas-PEMS am Versuchsfahrzeug. Es wurde ein zusätzliches Rohrsystem für die PEMS-Messung angebracht. In diesem Rohrsystem wird über ein Exhaust Flow Meter (EFM) der Abgasmassenstrom gemessen. Nach diesem wird ein Teilmassenstrom entnommen und über eine beheizte Leitung zum Gas-PEMS geleitet. Zusätzlich ist die Leitung bei der Entnahmestelle vor der beheizten Leitung isoliert.

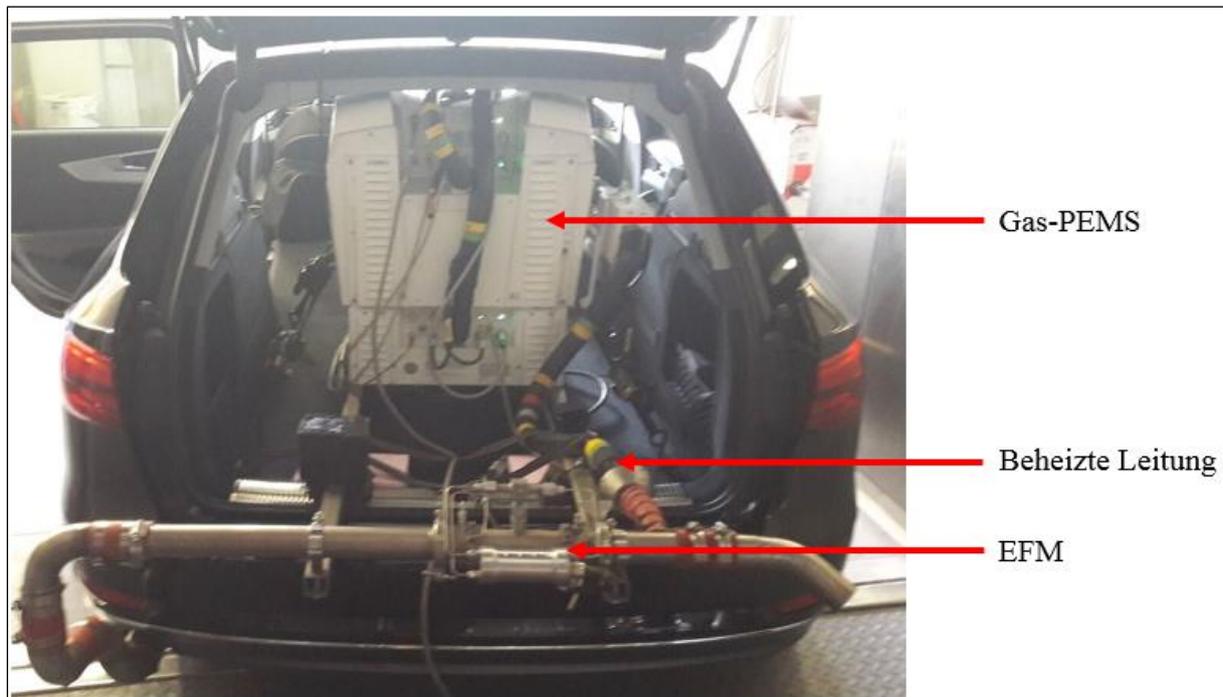


Abbildung 3-2: Aufbau des Gas-PEMS im Versuchsfahrzeug

Für eine PEMS-Messung sind neben dem Gas- und PN-PEMS weitere Messgeräte notwendig. Die System Control ist die Recheneinheit und speichert alle Messwerte und zusätzliche Positionsdaten sowie Daten von der Wetterstation (Umgebungsdruck, Umgebungsfeuchte und Umgebungstemperatur). Die Wetterstation mit dem Temperatursensor sowie der GPS-Empfänger wurden, wie bereits in Kapitel 2.4 näher behandelt, am Fahrzeugdach montiert.

Zusätzlich gehört zum PEMS noch das EFM. Das EFM wird benötigt, um von den gemessenen Schadstoffkonzentrationen auf die Schadstoffmassenströme rückrechnen zu können. Die Batterie wird über einen Spannungsregler/Gleichrichter geladen. Batterien sind deswegen notwendig, da das PEMS auf der Straße energieautark betrieben werden muss.

Weitere Messdaten wurden über ein Windows-basiertes Diagnosesystem für Fahrzeuge des VW-Konzerns (mit einem genormten OBD-Stecker aus dem Fahrzeug-CAN-Bus (Fahrzeug-Controller-Area-Network-Bus)) ausgelesen. Diese zusätzlichen Messdaten waren diverse Temperaturen, die NO_x -Konzentration vor SCR, AGR-Massenströme, die Motordrehzahl und die Fahrgeschwindigkeit.

3.2 Messungen von Straßenfahrten

Im Zuge dieser Arbeit wurden nur Messfahrten auf der Straße und auf einer Teststrecke durchgeführt. Rollenprüfstandsuntersuchungen waren nicht Umfang des Messprogramms. Neben RDE-Fahrten wurde ein Stauzyklus unter realen Bedingungen sowie auch künstliche Stauzyklen auf der Teststrecke der AVL List GmbH durchgeführt. Mit Ausnahme eines künstlichen Stauzyklus (Stauzyklus mit der Bezeichnung AVL_TS_3) wurden alle Messfahrten ohne Start-Stopp-Funktion absolviert, da nicht sichergestellt werden konnte, dass eine Verbindung mit dem Fahrzeug-CAN-Bus nach erneuten Motorstarts störungsfrei möglich war. Bei allen Zyklen war die Klimaanlage auf eine Innenraumtemperatur von 22 °C eingestellt sowie der Radio und das Abblendlicht eingeschaltet.

Die insgesamt neun RDE-Fahrten wurden mit unterschiedlichen Gesamtmassen (Fahrzeugmasse, PEMS, Fahrer, Beifahrer und Zusatzbeladung) durchgeführt. Fünf RDE-Fahrten, sowie alle Stauzyklen, wurden ohne Zusatzbeladung aber mit Beifahrer durchgeführt. Berücksichtigt man die gemessene Fahrzeugmasse (Fahrzeug mit eingebautem PEMS) von 1707 kg und setzt für jeden Insassen ein Körpergewicht von 75 kg voraus, so ergibt sich für diese fünf Fahrten ein Gesamtgewicht von 1857 kg.

Drei RDE-Fahrten wurden ohne Beifahrer und ohne Zusatzbeladung durchgeführt, weshalb sich eine Gesamtmasse für diese Fahrten von 1782 kg ergibt. Eine RDE-Fahrt wurde mit Beifahrer und einer Zusatzbeladung durchgeführt, die Gesamtmasse beläuft sich dabei auf 2047 kg. Neben dem Gesamtgewicht wurde auch der Fahrstil variiert. Beim Fahrstil wird zwischen ökonomisch, normal und aggressiv unterschieden. Der Fahrstil bezieht sich in diesen Zusammenhang auf die Schadstoffemissionen. D.h. aggressiv bedeutet, dass möglichst früh geschaltet wird und unter voller Gaspedalstellung das „langsame“ Ansprechverhalten des Turboladers ausgenutzt wird, um durch Betriebspunkte an der Vollastkurve möglichst hohe Stickoxide zu emittieren. Dem entgegengesetzt wird versucht, beim ECO-Fahrstil möglichst wenige Schadstoffe zu emittieren.

Zusätzlich zu den Emissionsmessfahrten wurde ein Ausrollversuch durchgeführt, um die Fahrwiderstände mit eingebautem PEMS ermitteln zu können.

Bei den ersten drei RDE-Messfahrten konnten aufgrund eines Problems der Auslesesoftware nur beschränkt Daten aus dem Fahrzeug-CAN-Bus aufgezeichnet werden. Daher sind bei den ersten drei Messfahrten keine NO_x -Rohemissionen, Temperaturen vor dem SCR-Katalysator und AGR-Massenströme bekannt.

Die beiden Tabellen auf Seite 115 und 116 geben einen zusammenfassenden Überblick der einzelnen Messzyklen. Die RDE-Fahrten wurden, wie in Kapitel 3.2.1 näher beschrieben ist, auf zwei unterschiedlichen Strecken absolviert. Die Bezeichnung der einzelnen Messfahrten setzt sich aus dem Namen der Route (Ries bzw. Arzberg) und der Nummer der x.ten-Messfahrt zusammen (z.B. erste Fahrt auf der Ries-Route = Ries_1).

3.2.1 RDE-Routen

Riesroute:

Diese Route beginnt in Graz in der Inffeldgasse. Über Kainbach fährt man nach Gleisdorf und weiter nach Sinabelkirchen. Von dort aus fährt man über die Autobahn A2 zurück nach Graz. In Abbildung 3-3 ist die Riesroute dargestellt. Gelbe und orange Streckenabschnitte kennzeichnen Bereiche mit niedriger Seehöhe während violette und rote Streckenabschnitte Bereiche höherer Lagen kennzeichnen.

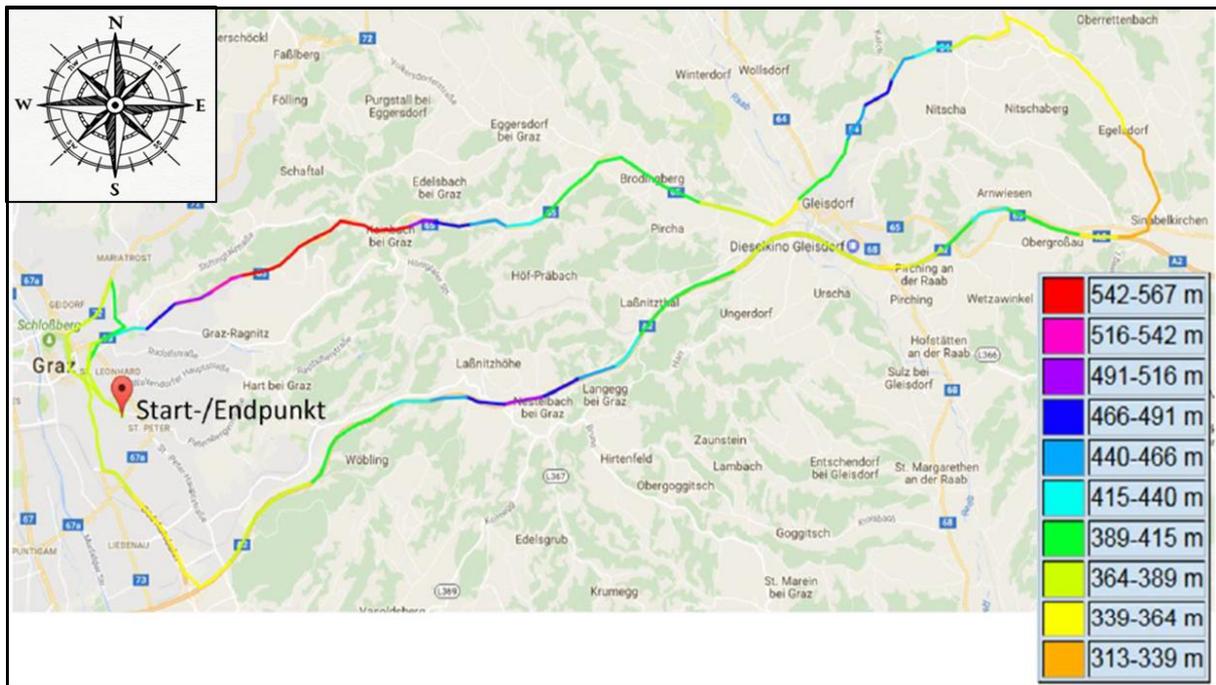


Abbildung 3-3: Riesroute [23]

Arzbergroute:

Die zweite im Zuge dieser Arbeit gefahrene RDE-Strecke führt, ausgehend von der Inffeldgasse in Graz über Schillingsdorf nach Kumberg und anschließend weiter nach Arzberg und über Schrems nach Frohnleiten. Um den erforderlichen Autobahnanteil abdecken zu können, wird in Frohnleiten auf die A9 Richtung Graz aufgefahren. Auf dieser fährt man durch den Plabutschunnel und dann über die A2 wieder zurück nach Graz zum Startpunkt. In Abbildung 3-4 ist die Strecke ersichtlich.

Durch die unterschiedlichen RDE-Routen kann überprüft werden, wie stark der Einfluss der Teststrecke auf Emissionswerte sein kann. Die Streckenauswahl kann einen relativ großen Einfluss auf das Emissionsverhalten haben. Bei der Arzbergroute werden deutlich mehr Höhenmeter absolviert. Tabelle 3-3 fasst die Eckdaten der beiden RDE-Routen zusammen.

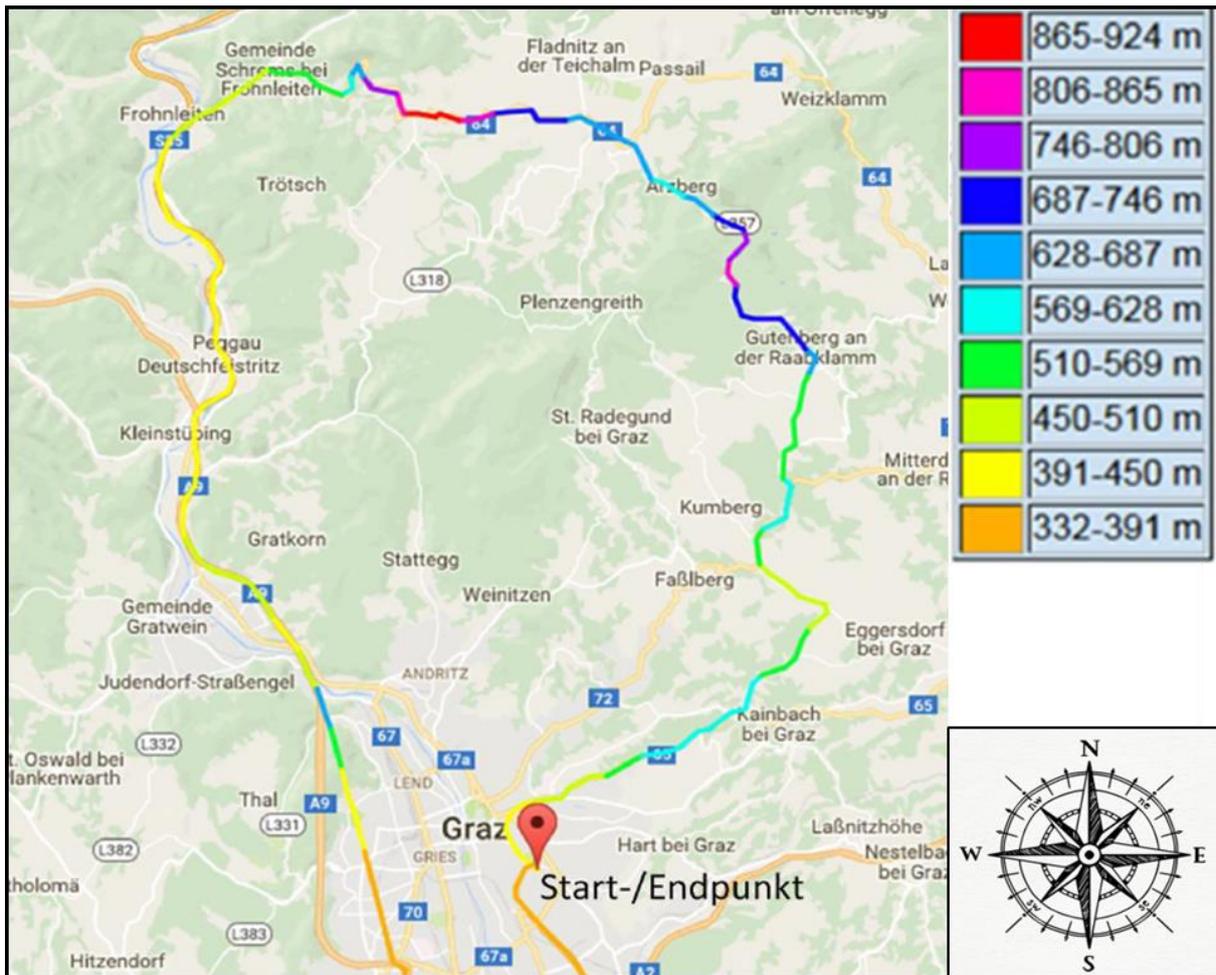


Abbildung 3-4: Arzbergroute [23]

Tabelle 3-3: Eckdaten der RDE-Routen [24]

Eigenschaft	RDE-Route	
	Arzberg	Ries
Gesamtdistanz	107 [km]	83,5 [km]
Maximale Seehöhe	930 [m]	580 [m]
Minimale Seehöhe	360 [m]	300 [m]
Maximale Steigung	11,8 [%]	11,3 [%]
absolvierte Höhenmeter pro zurückgelegter Strecke	3126 [m/100 km]	2067 [m/100km]

3.2.2 Stauzyklus im Stadtverkehr

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist das Verhalten des Abgassystems bei Stauzyklen und im Besonderen das Auskühlverhalten des SCR-Katalysators. Die Emissionen und andere Parameter des Versuchsfahrzeuges mussten somit während einer Staufahrt gemessen werden. Durch Kooperation mit der Holding Graz GmbH konnten fünf Stau-Hot-Spots in Graz ermittelt werden [25]¹. Diese sind:

- Puntigamer Straße
- Straßganger Straße (auf der Höhe der Anton Paar GmbH); Rückstaubereich bis zur Kärntnerstraße
- Wienerstraße, auf Höhe Exerzierplatz (kontrolliertes Auflaufen durch Ampelschaltungsstrategie; bewusste Steuerungsmaßnahme)
- Äußere Münzgrabenstraße (ab Fröhlichgasse)
- St. Peter Hauptstraße

Neben den geographischen Stauzonen kann zudem festgehalten werden, dass der erste und letzte Schultag in Graz besonders hohe verkehrstechnische Auslastung vorweisen. Der Freitag vor Mariä Himmelfahrt weist, basierend auf Beobachtungen der letzten sieben Jahre, das stärkste Verkehrsaufkommen im Sommer auf.

Bedingt durch zeitlich beschränkte Messmöglichkeiten muss ein günstiger Zeitpunkt für Stau-Messfahrten wochentags gefunden werden. Durch langjährige Beobachtungen seitens der Holding Graz GmbH ist ersichtlich, dass das Verkehrsaufkommen in Graz unter der Woche besonders Freitag-Nachmittag (14:00-17:00 Uhr) überdurchschnittlich hoch ist.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Streckenführung für den Stauzyklus so gewählt, dass sie einen der genannten Stau-Hot-Spots, im Konkreten die Puntigamer Straße, beinhaltet. Die genaue Streckenführung kann Abbildung 3-5 entnommen werden. Zudem wurde die Messfahrt an einem Freitag-Nachmittag durchgeführt, um möglichst hohes Verkehrsaufkommen zu erreichen. Dieser Stauzyklus wird im Folgenden als „Puntigam“ bezeichnet. Da nur ein Stadt-Stauzyklus absolviert wurde, wird auf Nummerierungen, wie bei den RDE-Messfahrten, an dieser Stelle verzichtet.

¹ Die angeführten Stau-Hot-Spots wurden bei einem mündlichen Gespräch mit dem Leiter Bernd Cagran des Referates für Verkehrssteuerung und Straßenbeleuchtung in Erfahrung gebracht. Aktuell gibt es noch keine Veröffentlichungen dieser Auflistung. Daher wird auf das Referat für Verkehrssteuerung und Straßenbeleuchtung verwiesen.

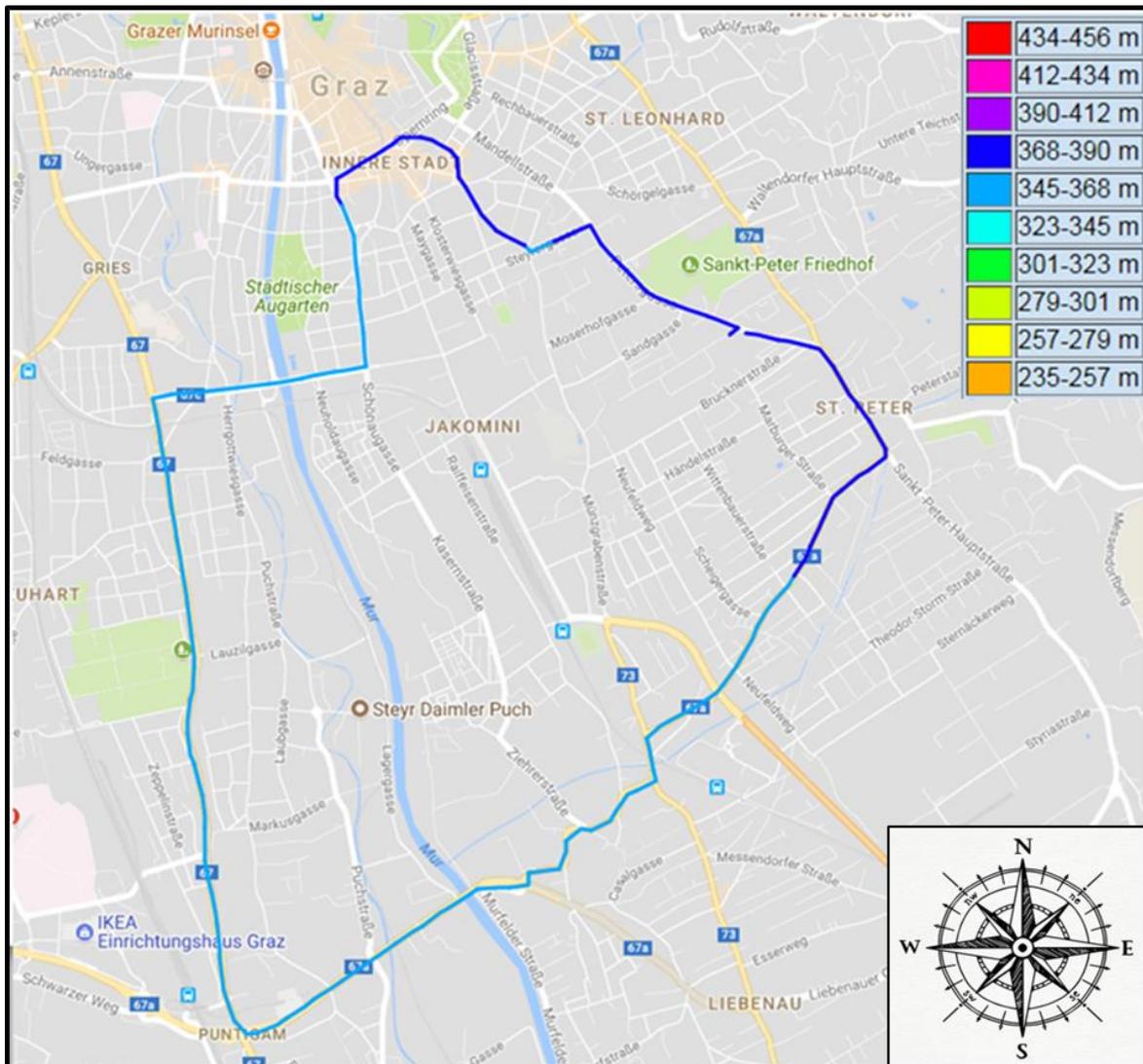


Abbildung 3-5: Streckenverlauf der Puntigamroute [23]

Durch die Auswertung der Messdaten konnte festgestellt werden, dass die mittlere Fahrgeschwindigkeit von 18 km/h deutlich über den mittleren Geschwindigkeiten durchschnittlicher Stauzyklen liegt, wie [26] entnommen werden kann. Um nun Stausituationen unabhängig vom Verkehrsaufkommen nachstellen zu können, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu behindern, ist eine Teststrecke erforderlich.

3.2.3 Stauzyklen auf der Teststrecke

Dankenswerter Weise konnte im Zuge dieser Arbeit die Teststrecke der AVL List GmbH für die Messungen der Stauzyklen verwendet werden. Bezüglich des Fahrverhaltens während einer Stausituation wurden zwei unterschiedliche Szenarien erarbeitet. Beide Szenarien setzen sich aus Fahr- und Stillstandsanteilen zusammen. Die dargestellten Geschwindigkeitsverläufe in Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 sollen einen Überblick über Stau-Szenarien geben. Die erarbeiteten Stauzyklen wurden später noch an Streckengegebenheiten angepasst.

Beim ersten Szenario, zu sehen in Abbildung 3-6, geht man von einer konstanten Stillstandszeit aus. Zudem wird für die Fahranteile jeweils immer eine konstante Geschwindigkeit angenommen, mit der eine definierte Strecke (50 m) zurückgelegt wird. Sowohl für positive als auch für negative Beschleunigung wird ein konstanter Wert von ca. 1 m/s^2 vorausgesetzt.

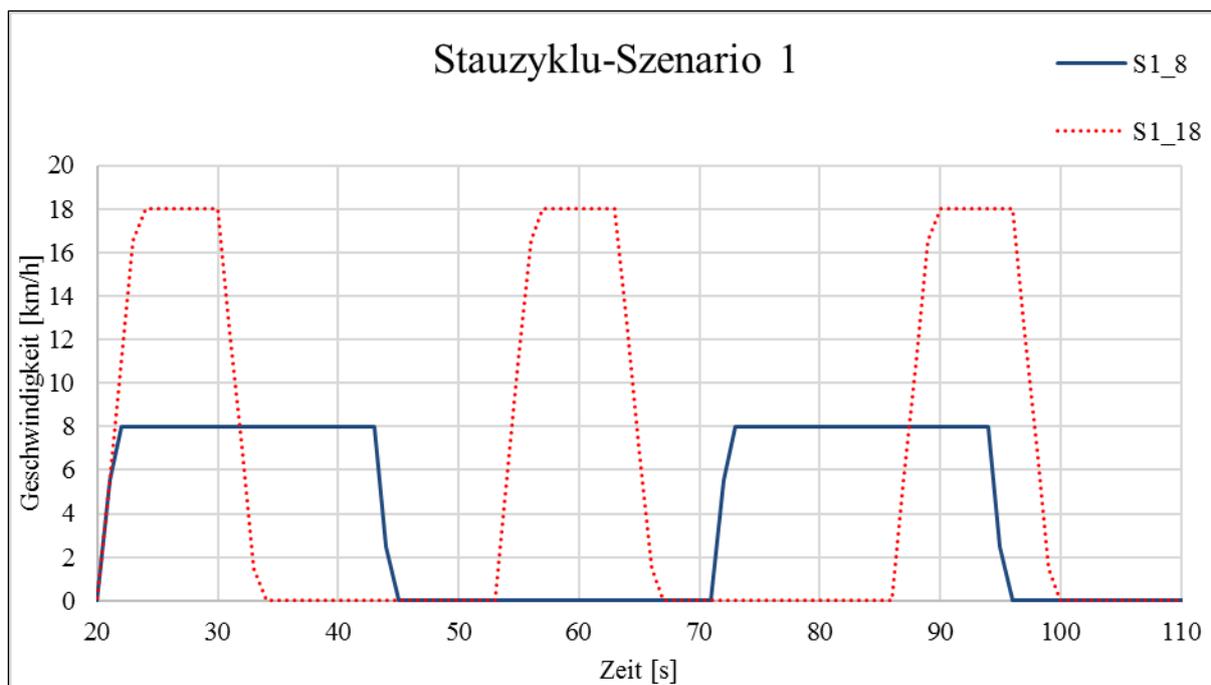


Abbildung 3-6: Stauzyklus-Szenario 1

Beim zweiten Szenario ist der Beginn jedes Fahranteils für unterschiedliche Geschwindigkeiten immer gleich, wie in Abbildung 3-7 zu sehen ist. Dadurch ergeben sich unterschiedlich lange Stillstandszeiten. Für Beschleunigungen wurden ebenfalls 1 m/s^2 vorausgesetzt.

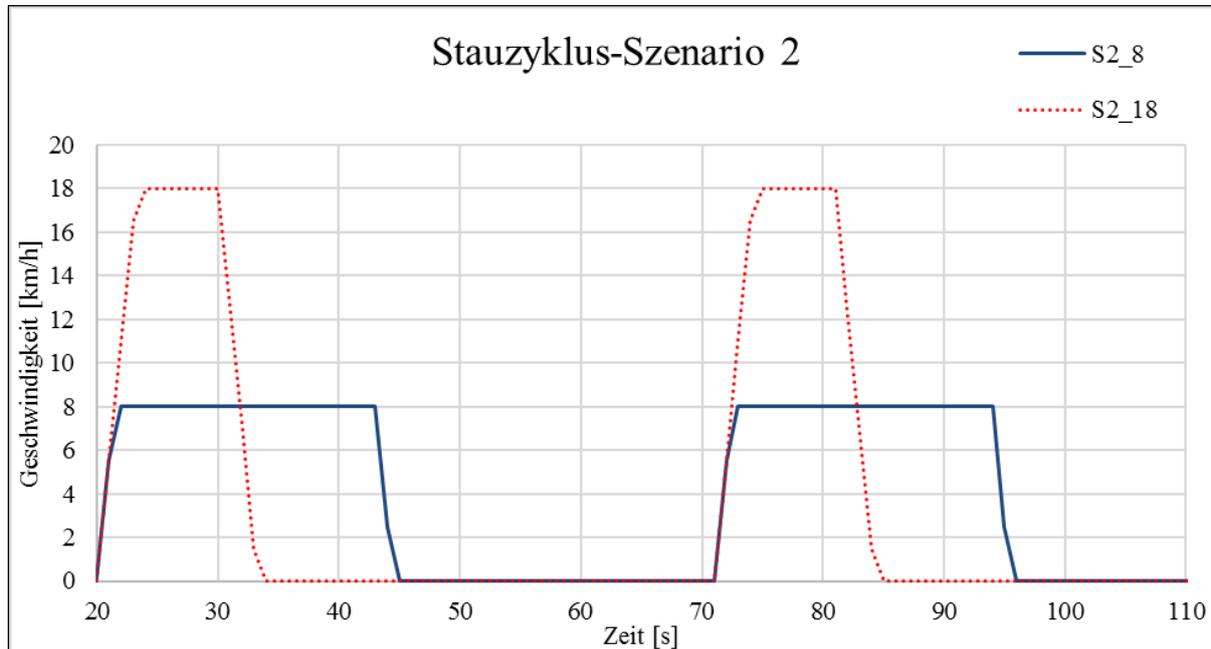


Abbildung 3-7: Stauzyklus-Szenario 2

Die für die künstlichen Stau-Szenarien erstellten Geschwindigkeitsprofile (Stillstandszeit pro Stopp und zurückgelegte Strecke zwischen zwei Stopps) stammen aus einer vorangegangenen Analyse eines CADC (Common Artemis Driving Cycle) urban, Stadt-Stauzyklus „Puntigam“ und eines HBEFA Stauzyklus. Dabei wurden nachfolgende Parameter analysiert: Gesamtzykluslänge, Anzahl der Stopps, maximale und durchschnittliche Fahrdauer, durchschnittlich zurückgelegte Strecke zwischen Stopps, Stillstandszeiten.

Abbildung 3-8 zeigt den Verlauf der Teststrecke für die künstlichen Stauzyklen. Wie bereits erwähnt, wurden die vorher gezeigten Stauzyklen noch leicht für das Fahrzeug und für die Teststrecke adaptiert. Für die Stopp-Zeiten wurde Szenario 1 gewählt, also eine von der Fahrgeschwindigkeit unabhängige Stillstandszeit von 20 s. Bedingt durch Fahrgeschwindigkeit des Versuchsfahrzeuges bei Standgas im ersten Gang wurde die Minimalgeschwindigkeit im Stau von 6 auf 8 km/h angehoben. Aus Sicherheitsgründen darf man erst nach Ende jeder Kurve stehen bleiben. Die definierte Distanz von 50 m pro Fahreinheit kann somit nur bedingt eingehalten werden (eine längere Fahreinheit über die gesamte Kurvenlänge von ca. 120 m, restliche Fahreinheiten mit ca. 50 m). Vor jeder Stauzyklenmessung wurde das Fahrzeug vorkonditioniert um möglichst für alle Zyklen gleiche Startbedingungen im Abgassystem erreichen zu können. In dieser Aufwärmphase werden drei große Runden, in Abbildung 3-8 mit roten Pfeilen markiert, mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. 64 km/h gefahren. Anschließend wird die entsprechende künstliche Stauvariante auf einer kleineren Runde (in Abbildung 3-8 mit weißen Pfeilen markiert) absolviert.



Abbildung 3-8: AVL-Teststrecke mit zwei unterschiedlichen Runden. [27]

Die drei absolvierten Stauvarianten sind in

Tabelle 3-4 mit der Bezeichnung AVL_TS und einer fortlaufenden Nummer zusammengefasst. TS steht dabei für Teststrecke, die Nummer für die jeweilige Variante des Stauzyklus. Diese unterscheiden sich zum einen in ihren maximalen Geschwindigkeiten und zum anderen in der Verwendung der Start-Stopp Funktion. Start-Stopp Funktion bedeutet, dass der Motor im Leerlauf abgestellt und beim erneuten Anfahren wieder gestartet wird.

Tabelle 3-4: Zusammenfassung der künstlichen Stauzyklen

Zyklus	maximale Geschwindigkeit [km/h]	Start-Stopp Funktion	Dauer des Stau-Szenario [s]
AVL_TS_1	18	ausgeschaltet	1890
AVL_TS_2	8	ausgeschaltet	1906
AVL_TS_3	8	eingeschaltet	1720

Ziel dieser Stauzyklen ist die Untersuchung des Auskühlverhaltens des Abgasnachbehandlungssystems im Allgemeinen und im Speziellen die Untersuchung des Auskühlverhaltens des SCR-Katalysators und die damit einhergehende Erhöhung der NO_x -Emissionen. Zusätzlich wird der Einfluss der Start-Stopp Funktion auf den Kraftstoffverbrauch, auf das Auskühlverhalten des Abgasnachbehandlungssystems und auf die Stickoxidemissionen untersucht.

3.2.4 Ausrollversuch

Der Ausrollversuch dient zur Ermittlung der Fahrwiderstandswerte des Versuchsfahrzeuges. Der Fahrwiderstand eines Fahrzeuges setzt sich aus Rollwiderstand, Luftwiderstand, Steigungswiderstand und dem Beschleunigungswiderstand zusammen. Der Ausrollversuch wird grundsätzlich auf einer ebenen Fahrbahn bei Windstille durchgeführt. Zuerst wird das Fahrzeug auf eine gewisse Geschwindigkeit beschleunigt, anschließend ausgekuppelt und ausgerollt. Während dem Ausrollvorgang wirkt am Versuchsfahrzeug ein Gleichgewicht der äußeren Kräfte, wie durch Gleichung (3-2) beschrieben ist. Aus diesem Kräftegleichgewicht werden die einzelnen Widerstandskoeffizienten ermittelt. Die Einflüsse von Rollwiderstand, Luftwiderstand und Massenträgheit sind in den Gleichungen (3-3) bis (3-7) beschrieben. Diese basieren auf [28] und [29].

$$FW = (F_{R0} + F_{R1} * v) + c_w * \frac{\rho_L}{2} * A * v^2 + m_{KFZ} * g * \sin(\alpha) = m * a \quad (3-2)$$

$$FW_{Roll} = (F_{R0} + F_{R1} * v) \quad (3-3)$$

$$FW_{Luft} = c_w * \frac{\rho_L}{2} * A * v^2 \quad (3-4)$$

$$FW_B = m * a \quad (3-5)$$

$$m_{\text{äquivalent_rot}} \approx \frac{3}{100} * m_{KFZ} \quad (3-6)$$

$$m = m_{\text{äquivalent_rot}} + m_{KFZ} \quad (3-7)$$

FW	[N]	gesamter Fahrwiderstand
FW_{Roll}	[N]	Rollwiderstand
FW_{Luft}	[N]	Luftwiderstand
FW_B	[N]	Trägheitskraft der Beschleunigung
F_{R0}	[N]	Konstanter Rollwiderstand
F_{R1}	[Ns/m]	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstand
v	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
c_w	[-]	Luftwiderstandsbeiwert
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte
A	[m ²]	angeströmte Fahrzeugreferenzfläche
m_{KFZ}	[kg]	Gesamtmasse des Fahrzeuges inkl. Fahrer, Beifahrer und Zusatzbeladung
$m_{\text{äquivalent_rot}}$	[kg]	rotationsäquivalente Masse
m	[kg]	Summe aus m_{KFZ} und $m_{\text{äquivalent_rot}}$
$g = 9,8067$	[m/s ²]	Normfallbeschleunigung
α	[°] bzw. [rad]	Steigungswinkel

Durch den Ausroller des Versuchsfahrzeugs konnten die Fahrwiderstände bestimmt werden, die dann auch für die später beschriebenen Simulationen verwendet wurden. Der Ausroller sowie die Ermittlung der Fahrwiderstände aus den Ausrolldaten waren nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3.3 Übersicht der Auswertetools

Die Auswertung der Messzyklen erfolgt mit Hilfe des sogenannten ERMES-Tools, welches im Folgenden kurz beschrieben ist.

ERMES-Tool

Das ERMES-Tool errechnet Emissionsmassenströme aus gemessenen Emissionskonzentrationen, Massenstrom und einem sogenannten U_{Gas} -Faktor. Die Einheit der Emissionsmassen kann gewählt werden, standardmäßig erfolgt die Ausgabe in [g/h].

Die Berechnung der Emissionsmassen ist für alle Abgaskomponenten ähnlich und unterscheidet sich nur durch den U_{Gas} -Faktor. Gleichung (3-8) zeigt die schematische Berechnung des Emissionsmassenstroms für Stickoxide. [30]

$$\dot{m}_{NO_x} = \dot{m}_{Abgas} * \frac{c_{NO_x}}{1\ 000\ 000} * U_{Gas_NO_x} \quad (3-8) [30]$$

$$U_{Gas} = \frac{\text{Molanzahl Gaskomponente}}{\text{Molanzahl Abgas}} \quad (3-9) [30]$$

\dot{m}_{NO_x}	[g/h]	NO_x -Massenstrom
\dot{m}_{Abgas}	[g/h]	emittierter Abgasmassenstrom bei PEMS gemessen
c_{NO_x}	[ppm]	NO_x -Konzentration
U_{Gas}	[-]	Gasfaktor zur Beschreibung der Korrelation zwischen Konzentration und Massenstrom

Tabelle 3-5 gibt einen Überblick über unterschiedliche U_{Gas} -Faktoren emissionsrelevanter Komponenten. Für NO wird der gleiche U_{Gas} -Faktor wie für NO_2 verwendet, da NO als NO_2 äquivalent gerechnet wird und beide Komponenten unter NO_x zusammengefasst werden (Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: U_{Gas} -Faktoren unterschiedlicher Emissionskomponenten [30]

Emissionskomponente	U_{Gas} -Faktor
CO	0,966 [-]
CO_2	1,517 [-]
NO_x	1,586 [-]

Als Eingangsgröße für das ERMES-Tool wird ein Textfile u.a. mit diversen Konzentrationen benötigt. Dieses wird vom PEMS-System nach Beendigung jeder Messfahrt exportiert. Anschließend erfolgt die Auswertung mit dem ERMES-Tool.

Wie bereits erwähnt, wurden aus dem Fahrzeug-CAN-Bus ebenfalls Messdaten aufgezeichnet, die für jede Fahrt mit den PEMS-Daten über die Fahrgeschwindigkeit synchronisiert wurden. Die gemessenen NO_x -Rohemissionen (ausgelesen über den Fahrzeug-CAN-Bus) werden manuell zeitlich konstant verschoben, da die gemessenen Rohemissionen einen zeitlichen

Versatz zur auftretenden Motorleistung haben. Für die PEMS-Messdaten wird die Zeitverschiebung bereits vom ERMES-Tool durchgeführt. Diese Zeitverschiebung ist vor allem für die SCR-Kennfelderstellung (siehe Kapitel 4.3) von Bedeutung.

ECE-Tool (Emroad-CLEAR-Evaluation-Tool)

Die Überprüfung der Gültigkeit der einzelnen RDE-Zyklen in Zusammenhang mit den gesetzlichen Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 2.4) erfolgt mit dem ECE-Tool. Weiters kann mit dem Tool auch eine Gewichtung der Emissionen in Abhängigkeit des Fahrstils nach Emroad oder CLEAR (im RDE-Gesetz als Power-Binning-Methode bezeichnet) durchgeführt werden. Für Details sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Als Eingangsdaten für dieses Programm können neben den PEMS-Daten (Emissionskomponenten, GPS-Daten, etc.) auch Daten aus dem Fahrzeug-CAN-Bus wie z.B. die Motordrehzahl vorgegeben werden. Anhand dieser Eingangsdaten werden alle gesetzlich vorgeschriebenen Rahmenbedingungen für eine gültige RDE-Fahrt überprüft.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass das GPS-Signal bei Tunnel-Fahrten ausfällt, dies führt zum einen dazu, dass die Geschwindigkeit vom PEMS in diesen Abschnitten nicht aufgezeichnet werden kann. Weiters kann auch keine Aussage über die Seehöhe getroffen werden. Falls möglich, ist es daher vorteilhaft bei RDE-Routen, die durch einen Tunnel führen, die Geschwindigkeit über den Fahrzeug-CAN-Bus abzugreifen.

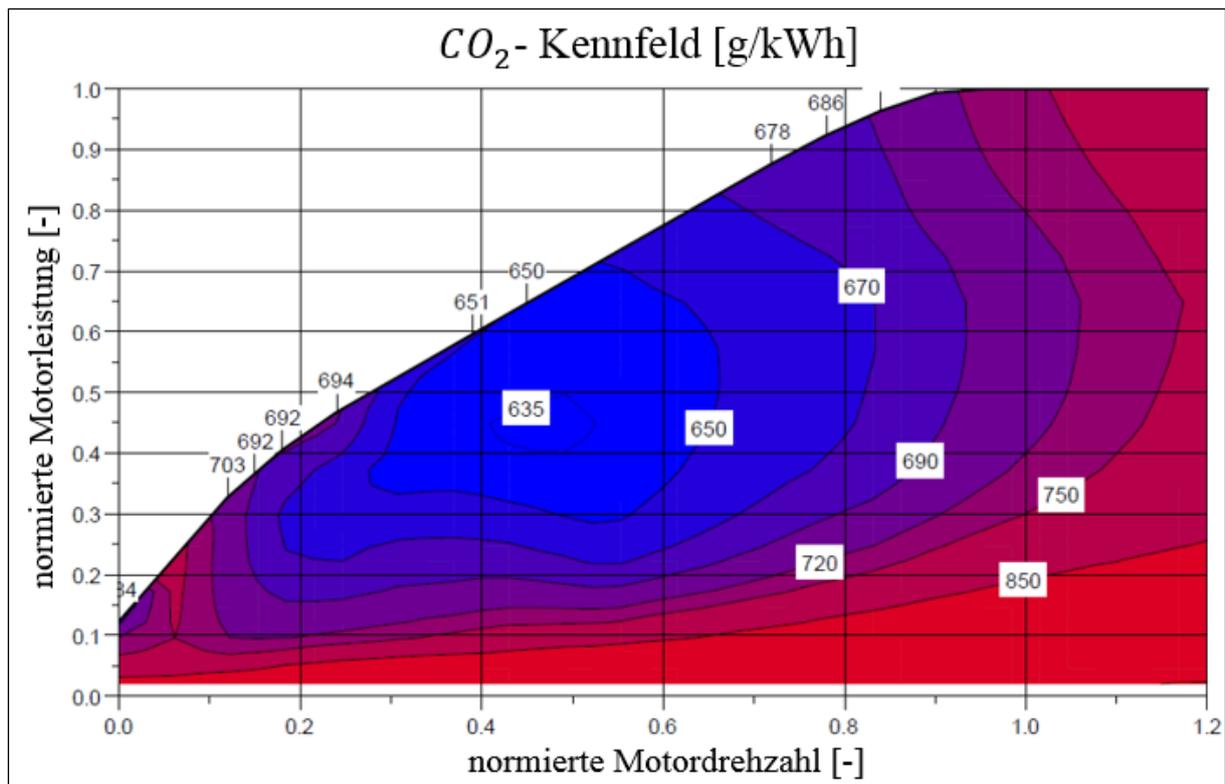
3.4 Auswertung und Analyse der RDE-Fahrten und Stauzyklen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Messfahrten dargestellt und analysiert. Bei RDE-Daten wird der Einfluss des Fahrstils und der Streckenwahl untersucht. Zudem werden die RDE-Randbedingungen überprüft um eine Aussage treffen zu können, ob die Fahrt RDE konform gewesen wäre. Bei den Stauzyklen steht die Untersuchung des Auskühlverhaltens im Vordergrund.

3.4.1 Emissionskennfelder des untersuchten Fahrzeugs

Die unter diesem Kapitel gezeigten Emissionskennfelder basieren auf den Messdaten. Die Erstellung der Kennfelder ist in Kapitel 4.2 im Detail erklärt.

Abbildung 3-9 zeigt ein generisches CO_2 -Kennfeld, das für ein Fahrzeug mit ähnlicher Technologie wie das untersuchte Fahrzeug kalibriert ist. Es ist erkennbar, dass das leistungsbezogene Verbrauchsoptimum im mittleren Drehzahlbereich und bei mittleren bis hohen Leistungen, bei ca. 70 % der maximalen Motorleistung liegt. Weiters ist zu erkennen, dass mit sinkender Leistung die spezifischen CO_2 -Emissionen definitionsbedingt stark ansteigen.

Abbildung 3-9: Leistungsbezogenes generisches CO₂-Kennfeld

Die normierte Motorleistung und -drehzahl wird nach Gleichung (3-10) und (3-11) ermittelt. Spezifische Emissionen werden durch die aktuelle Motorleistung dividiert, wie in Gleichung (3-12) dargestellt.

$$\text{normierte Motorleistung} = \frac{\text{aktuelle Motorleistung}}{\text{maximale Motorleistung}} \quad (3-10)$$

$$\text{normierte Motordrehzahl} = \frac{\text{aktuelle Motordrehzahl} - \text{Leerlaufmotordrehzahl}}{\text{Nennmotordrehzahl} - \text{Leerlaufmotordrehzahl}} \quad (3-11)$$

$$\text{spez. Emissionsmassenstrom} = \frac{\text{aktueller Emissionsmassenstrom}}{\text{aktuelle Motorleistung}} \quad (3-12)$$

Eine Betrachtung der CO₂-Kennfelddaten mit Absolutwerten verdeutlicht, dass die CO₂-Emissionen in weiten Bereichen linear mit der Motorleistung bei einer Motordrehzahl steigen. Dieser lineare Zusammenhang ist allgemein als Willanslinien bekannt. Aus Abbildung 3-10 ist neben der Kennfeldebenheit ersichtlich, dass der absolute Verbrauch sein Maximum bei maximaler Motorleistung und -drehzahl aufweist.

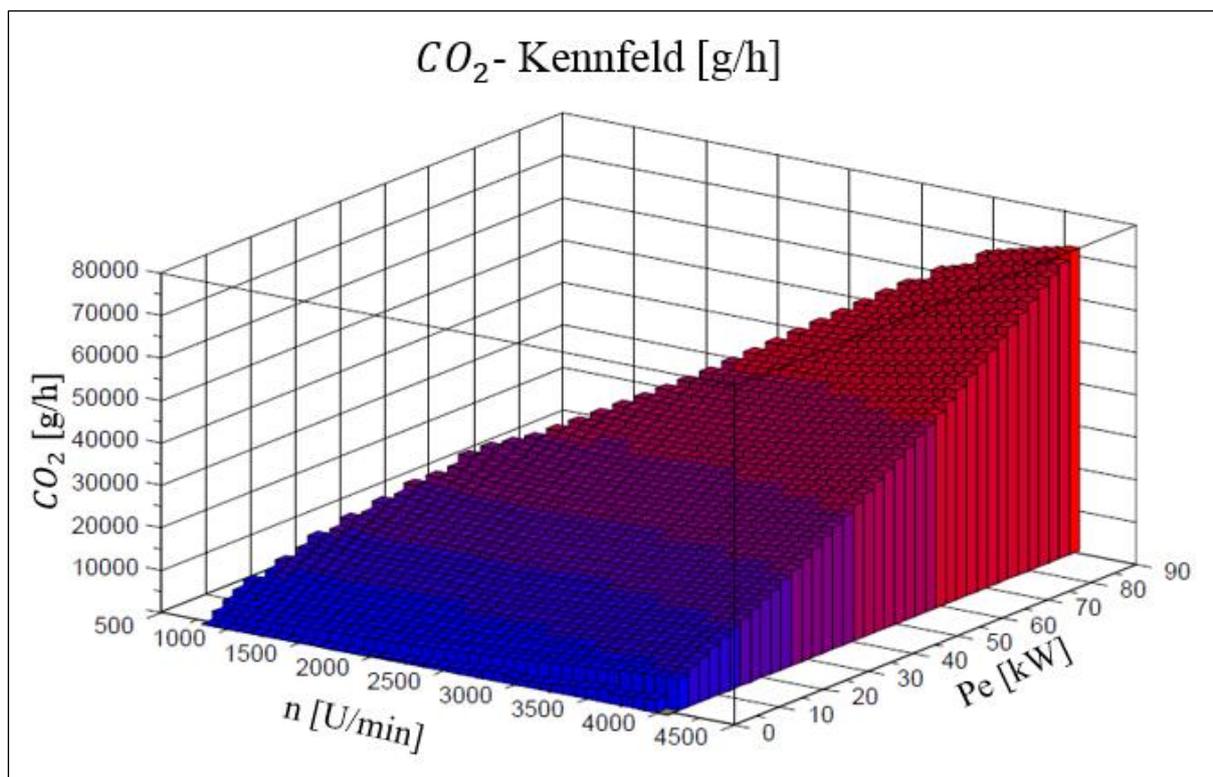


Abbildung 3-10: generisches CO₂-Kennfeld mit Absolutwerten

Anders als bei Kohlendioxid kann bei Kohlenmonoxid kein leistungsbezogenes Optimum festgestellt werden (siehe Abbildung 3-11). Das CO-Kennfeld hat in Bereichen niedriger Last hohe Gradienten. Es wird vermutet, dass diese aufgrund unvollständiger Verbrennung durch niedrige Temperaturen entstehen. Auch in der Fachliteratur sind hohe CO-Emissionen im unteren Leistungs- und Drehzahlbereich dokumentiert. [1]

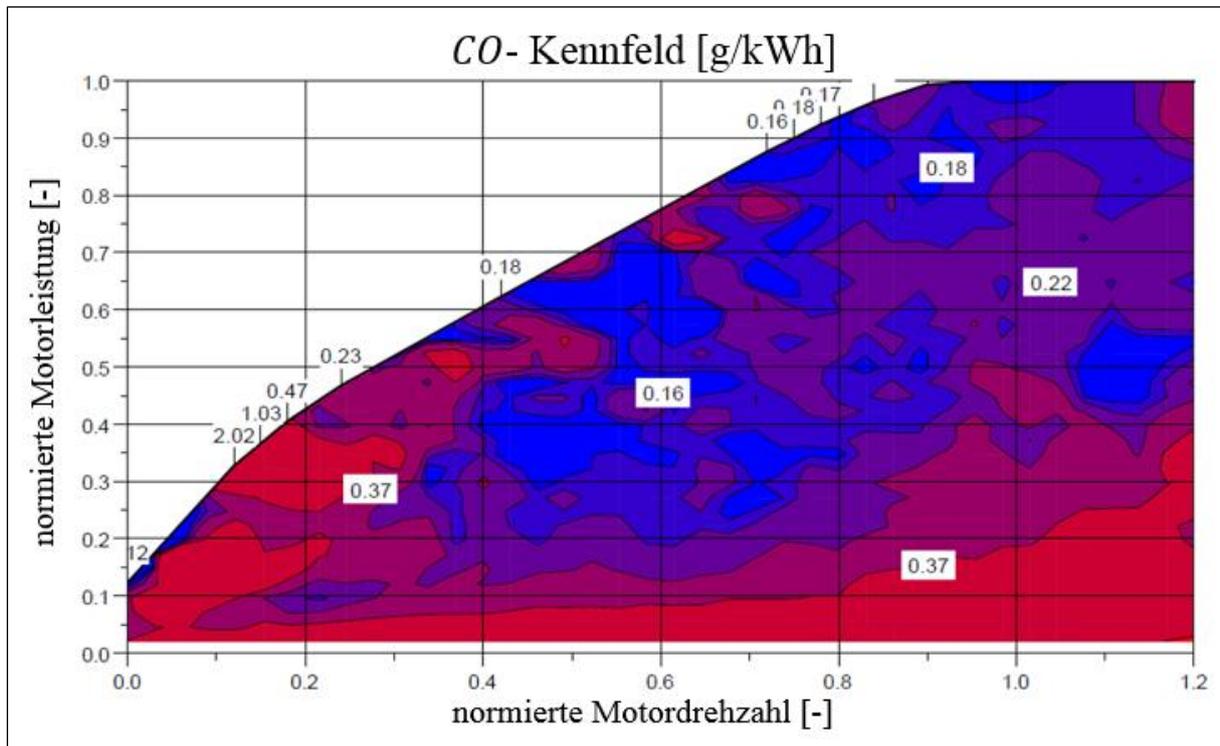


Abbildung 3-11: spezifisches CO-Kennfeld vom Audi A4 Avant, erstellt aus allen vorhandenen Messdaten

Durch deutliche Wirkungsgradsteigerungen von Oxidationskatalysatoren ist Kohlenmonoxid beim aktuellen Stand der Technik bei Diesel-Fahrzeugen keine problematische Emissionskomponente. Eine größere Herausforderung für aktuelle Diesel-Fahrzeuge stellen die Stickoxide dar. Neben Abgasnachbehandlungssystemen mit hohen Konvertierungsraten sind innermotorische Maßnahmen zur Senkung der Stickoxide unabdinglich, um aktuellen Gesetzesanforderungen gerecht zu werden. Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, ist AGR eine sehr effektive Methode zur Senkung der Stickoxid-Rohemissionen.

Abbildung 3-13 zeigt die Verteilung der NO_x -Rohemissionen im Motorkennfeld. Vergleicht man dieses Kennfeld mit den jeweiligen AGR-Raten (Abbildung 3-12), so erkennt man, dass mit zunehmender AGR-Rate die NO_x -Rohemissionen stark sinken. Nennenswerte AGR-Raten werden allerdings nur in begrenzten Lastbereichen angewandt. Wie [31] entnommen werden kann, wird bei niedrigen Temperaturen die AGR-Rate von vielen Automobilherstellern zurückgenommen, um ein stabiles Brennverhalten gewährleisten zu können und um Schäden an AGR-relevanten Bauteilen und zum Teil auch an Partikelfiltersystemen zu vermeiden. Bei höheren Lasten wird mehr Sauerstoff benötigt, um genügend Kraftstoff im Brennraum umsetzen zu können. Daher werden bei höheren Lastpunkten AGR-Raten gesenkt, wie in Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13 zu sehen ist. Zudem sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass beim untersuchten Fahrzeug der ND-AGR-Anteil deutlich höher ist als der des HD-AGR (siehe Abbildung A-1).

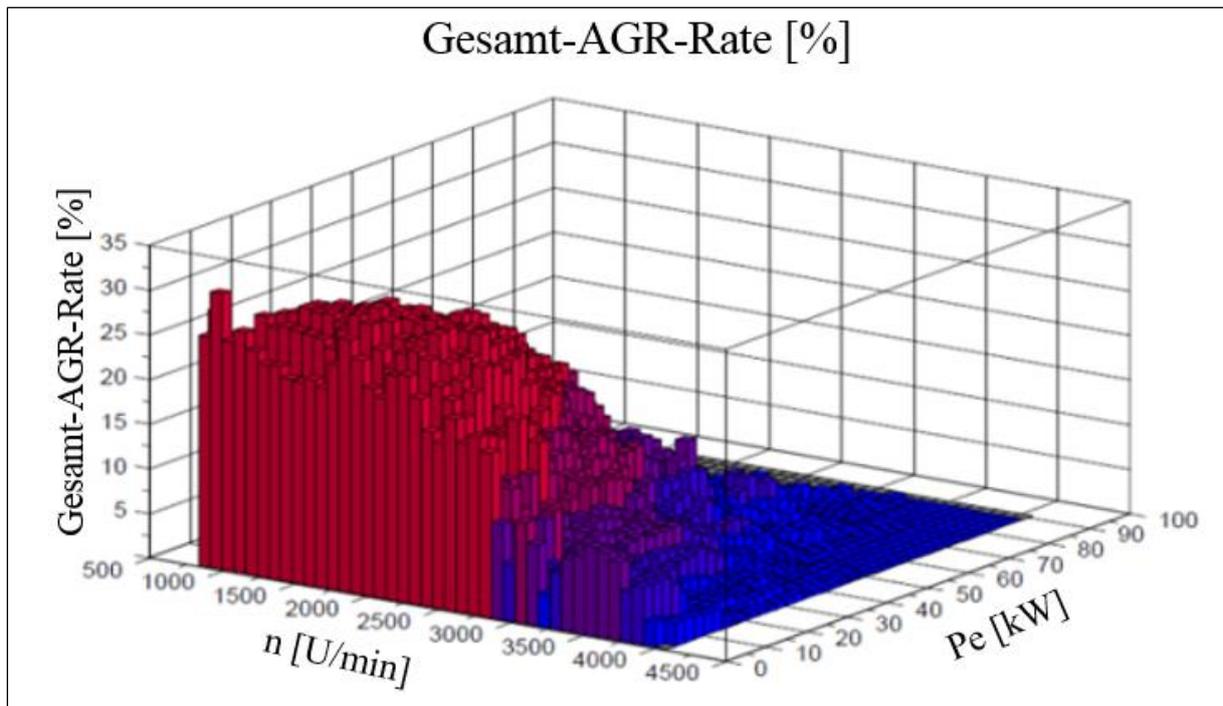


Abbildung 3-12: Gesamt-AGR-Rate, erstellt aus allen vorhandenen Messdaten

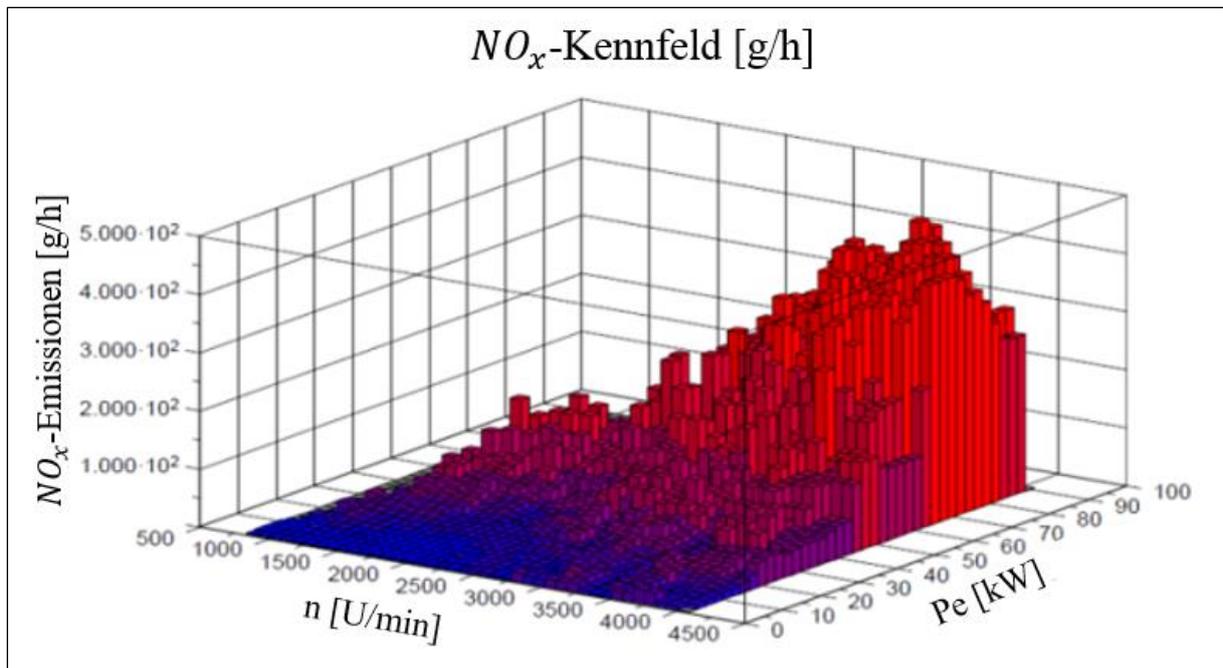


Abbildung 3-13: NO_x -Rohemissionskennfeld mit Absolutwerten, erstellt aus allen vorhandenen Messdaten

Die in Abbildung 3-12 gezeigte Gesamt-AGR-Rate ist nach Gleichung (3-13) berechnet. Internes AGR wird hier nicht berücksichtigt.

$$AGR_{RateGesamt} = \frac{\dot{m}_{HD-AGR} + \dot{m}_{ND-AGR}}{\dot{m}_{HD-AGR} + \dot{m}_{ND-AGR} + \dot{m}_{Abgas}} * 100 \quad (3-13)$$

$AGR_{RateGesamt}$	[%]	Gesamte AGR-Rate
\dot{m}_{HD-AGR}	[kg/s]	Massenstrom der HD-AGR
\dot{m}_{ND-AGR}	[kg/s]	Massenstrom der ND-AGR
\dot{m}_{Abgas}	[kg/s]	emittierter Abgasmassenstrom bei PEMS gemessen

Unter den insgesamt 13 Messfahrten sind zwei Dieselpartikelfilterregenerationen zu verzeichnen. Die Partikelemissionen hängen nicht direkt mit der Motordrehzahl und der Motorleistung zusammen und sind daher nur bedingt in einem Kennfeld darstellbar. Im Folgenden wird auf die beiden Partikelfilterregenerationen näher eingegangen.

Der erste Regenerationszyklus (Ries_3) wurde, was den Fahrstil betrifft, normal gefahren, wie Tabelle A-1 entnommen werden kann. Neben diesem normalen Fahrstil ist auch das Fahrzeuggesamtgewicht mit 1782 kg relativ niedrig. Das Temperaturniveau des Abgassystems bei dieser Messfahrt sollte daher im durchschnittlichen Bereich liegen. In Abbildung 3-14 ist allerdings ein deutlicher Temperaturanstieg auf bis zu ca. 700 °C zu erkennen. Zudem kann man erkennen, dass die Partikelanzahl einen extrem starken Ausschlag vorweist. Da sich weder die Geschwindigkeit, noch die Steigung in diesem Streckenabschnitt nennenswert ändert, wird von einer Dieselpartikelfilterregeneration ausgegangen. Zudem kann durch den abrupten, starken Temperaturanstieg von motorischem Heizen (siehe Kapitel 2.3.3), also von einer Zwangsregeneration, ausgegangen werden. Während der gesamte Filterkuchen abbrennt, sinkt der Differenzdruck beim DPF und die Partikelanzahlemissionen steigen stark an, wie in Abbildung 3-14 ersichtlich ist. Der Partikelfilter weist direkt nach einer Regeneration zwar niedrigere Filterungsraten auf, diese steigen allerdings rasch wieder mit der Befüllung des DPF an.

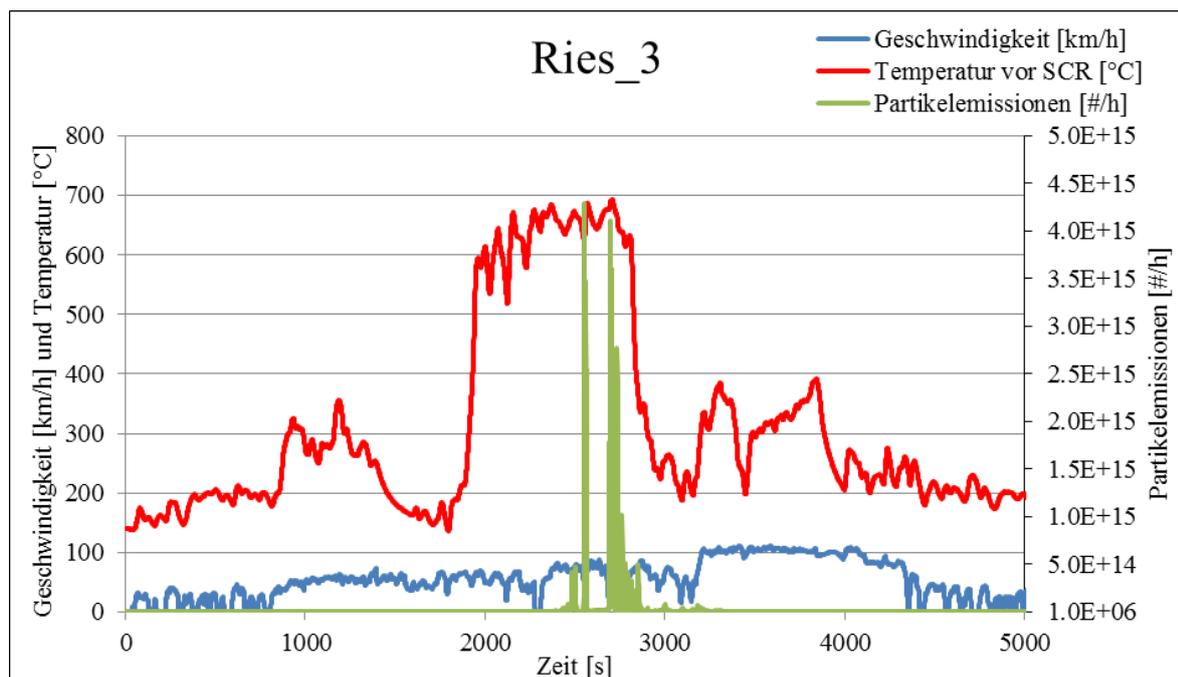


Abbildung 3-14: DPF-Regeneration bei Ries_3

Die zweite Partikelfilterregeneration im Zyklus Arzberg_3 weist allgemein ein höheres Temperaturniveau vor dem SCR-Katalysator auf. Dies ist vor allem durch das höhere Fahrzeuggesamtgewicht zu begründen. Zudem ist anzumerken, dass bei ähnlichem Fahrstil und gleichem Fahrzeuggesamtgewicht die gemessenen Temperaturen vor dem SCR-Katalysator bei der Arzbergroute um durchschnittlich 15 °C höher als bei der Riesroute sind. Aus energetischer Betrachtung ist eine Regeneration also bei einem solchen Zyklus durchaus günstig. In Abbildung 3-15 scheint die Partikelfilterregeneration, zu erkennen durch die hohen Partikelemissionen, erst nach einem Temperaturabfall stattzufinden. Dies könnte zum Teil durch die Position des Temperatursensors erklärbar sein. Wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist, befindet sich das Thermoelement vor dem SCR-Katalysator und vor dem DPF. Die freiwerdende Wärme im DOC wird somit vom Sensor gemessen. Der Temperaturanstieg durch Rußabbrand im DPF wird allerdings nicht erfasst.

Die zurückgelegte Strecke zwischen zwei DPF-Regenerationen hängt von vielen Faktoren, wie dem Fahrstil, Fahrzeugbeladungszustand, Alterungszustand, etc., ab. Der Kilometerstand des Versuchsfahrzeuges betrug bei Lieferung 170 km. Es wurde angenommen, dass innerhalb dieser ersten Kilometer keine DPF-Regeneration stattgefunden hat. Unter dieser Voraussetzung kann der Kilometerstand bei Beginn der ersten Partikelfilterregeneration mit 488 km beziffert werden. Die zurückgelegte Strecke zwischen dem Ende der ersten und dem Beginn der zweiten Regeneration ist mit 365 km deutlich kürzer, ist aber trotzdem innerhalb der literarischen Grenzwerte, wie Kapitel 2.3.3 zu entnehmen ist. Aufgrund der deutlich kürzeren Strecke im Vergleich zur ersten Partikelfilterregeneration und des höheren Temperaturniveaus im Vergleich zu einer Arzbergfahrt mit gleichem Fahrstil und Zusatzbeladung wird eine thermische Partikelfilterregeneration (siehe Kapitel 2.3.3) vermutet.

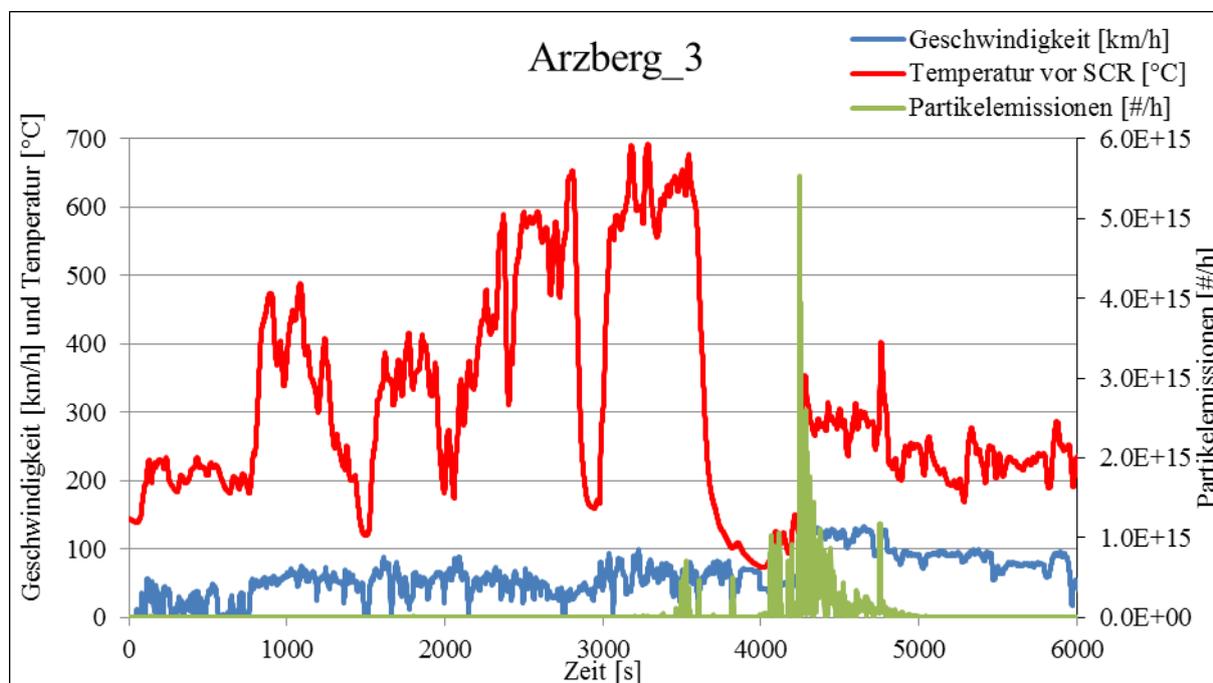


Abbildung 3-15: DPF-Regeneration bei Arzberg_3

Die Länge der aufgetretenen DPF-Regenerationen beträgt 839 s und 1575 s.

3.4.2 Analyse der RDE-Messergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen RDE-Messfahrten näher untersucht. Neben den mittleren Emissionsergebnissen wird auch die Gültigkeit der einzelnen Messzyklen untersucht.

Durch unterschiedliche Beladungen des Versuchsfahrzeuges und unterschiedliche Fahrstile ergeben sich u.a. unterschiedliche CO_2 -Emissionen. Diese sind, wenn man das durch die chemische Reaktion im SCR-Katalysator entstehende CO_2 vernachlässigt, direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch, wenn man eine vollständige Verbrennung voraussetzt. Da in der Praxis de facto keine vollständige Verbrennung auftritt, müssten auch Produkte der unvollständigen Verbrennung, wie z.B. CO zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches berücksichtigt werden. Wie bereits vorher gezeigt, ist der Anteil solcher Schadstoffe im Abgas sehr gering, weshalb auch diese für eine vereinfachte Betrachtung vernachlässigt werden können. Bei genauer Betrachtung von Abbildung 3-16 in Kombination mit den Tabellen im Anhang (Tabelle A-1 und Tabelle A-2) fällt auf, dass ein aggressives Fahrverhalten bei deutlich geringerer Beladung zu höherem Verbrauch führen kann. Konkret sind die CO_2 -Emissionen bei Arzberg_3 um 3 % höher, während das Gesamtgewicht des Fahrzeuges um 14 % niedriger ist. Trotzdem kann festgehalten werden, dass die CO_2 -Emissionen nur sehr gering zwischen den einzelnen RDE-Zyklen schwanken. Bei gleicher Gewichtung aller Zyklen ergibt sich ein Mittelwert von 141 g/km mit einer Standardabweichung von 8 g/km. Dieser Mittelwert liegt deutlich über dem im Zuge des NEDC ermittelten Wertes von 99 g/km (siehe Tabelle 3-1). Dies ist wahrscheinlich auf die deutlich dynamischeren RDE-Fahrten und den zusätzlichen Einfluss der Fahrbahnsteigung zurückzuführen.

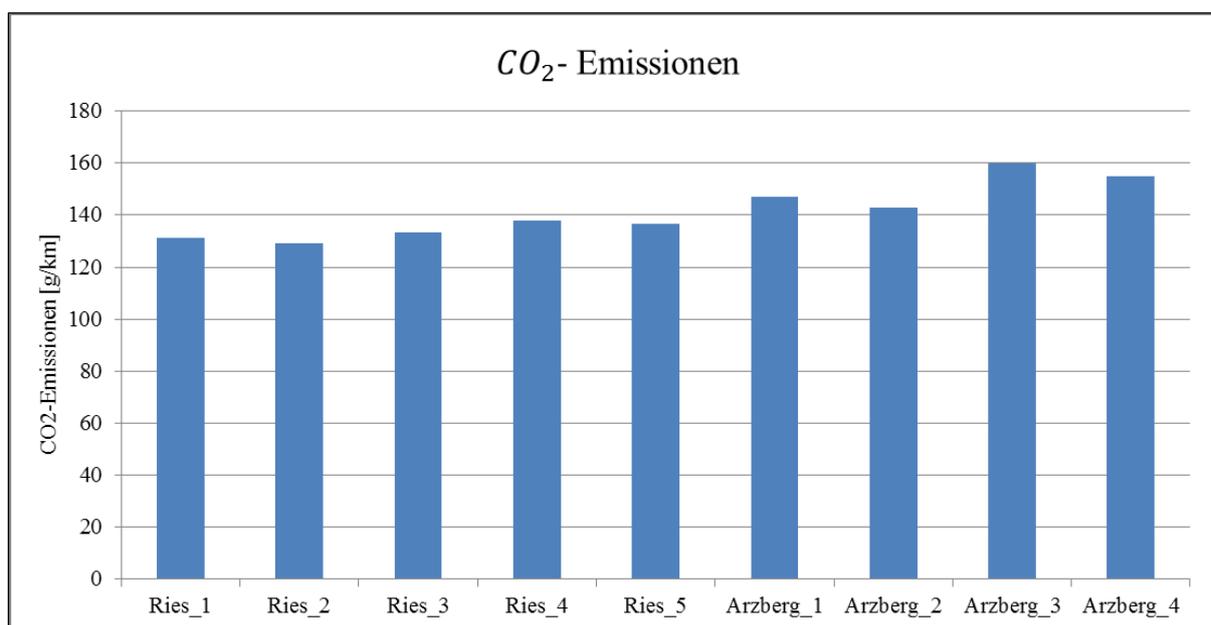


Abbildung 3-16: Durchschnittliche CO_2 -Emissionen bei RDE-Fahrten

Vollständigkeitshalber sei hier noch erwähnt, dass das CO_2 in den RDE-Fahrtengesetzlich nicht limitiert ist, es sehr wohl aber Flottendurchschnittswerte für den Rollenzklus gibt. Die versucht der Hersteller einzuhalten, da ansonsten Strafzahlungen drohen.

Die nächste Abbildung zeigt die CO-Emissionen. Diese schwanken bei den 9 RDE-Zyklen deutlich stärker als das gezeigte CO_2 , überschreiten jedoch nicht den gesetzlichen Grenzwert für NEDC bzw. WLTC von 500 mg/km.

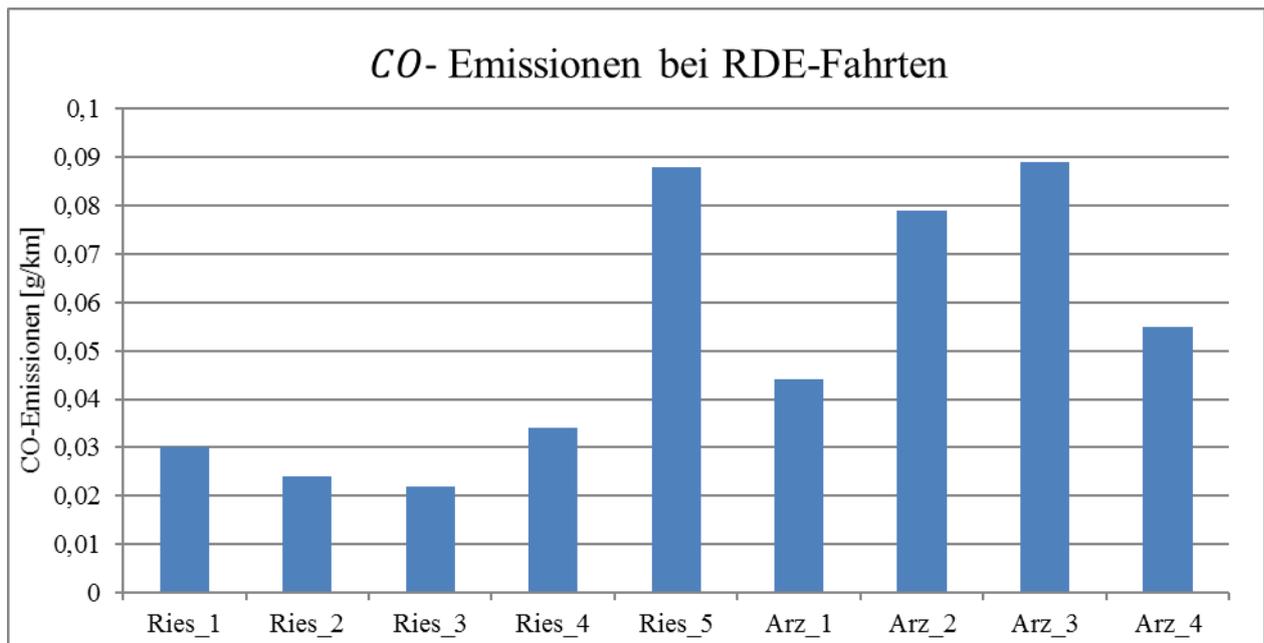


Abbildung 3-17: CO-Emissionen vom Audi A4 Avant bei RDE-Fahrten

Die aktuell gültigen Grenzwerte für Stickoxide betragen 80 mg/km im Typprüfzyklus. Unter Berücksichtigung der aktuellen RDE-Gesetzgebung ist ein Konformitätsfaktor von 2,1 und somit ein Grenzwert von 168 mg/km mit einer RDE_Fahrt bei der Typisierung nach neuem Emissionsstandard EURO 6d-Temp einzuhalten. Obwohl das untersuchte Fahrzeug nicht für EURO 6d-Temp zugelassen ist, hält es in sieben von neun RDE-Fahrten die Grenzwerte mit Berücksichtigung des Konformitätsfaktors schon ein. Einzig bei den aggressiven Arzberg-Fahrten (3 und 4) werden die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte nicht eingehalten.

Weiters liegt bei vier RDE-Fahrten der Emissionswert unter 80 mg/km. Der Einfluss der Zusatzbeladung kann bei Betrachtung der aggressiven Zyklen veranschaulicht werden. Eine Differenz der Fahrzeugmasse von 245 kg führt zu einer Erhöhung der Stickoxide um 113 mg/km. Durch mehr Beladung betreibt man den Motor bei gleichem Fahrstil und gleicher Strecke näher an der Vollastkurve. In diesen Bereichen sind wie in Abbildung 3-12 gezeigt, die Stickoxidemissionen deutlich höher.

Der Einfluss des Fahrstils kann bei der Betrachtung der zweiten und dritten Arzberg-Fahrt veranschaulicht werden. Obwohl die Fahrzeuggesamtmasse bei der dritten Arzberg-Fahrt um 75 kg niedriger ist, sind die NO_x -Emissionen gegenüber dem „normal“ gefahrenen Zyklus Arzberg_2 um 155 mg/km höher. Der genaue Einfluss des aggressiven Fahrstils kann u.a. aufgrund der unterschiedlichen Beladungen nicht exakt erläutert werden. Deutlich ist jedoch, dass der Fahrstil, und damit der Testfahrer, einen enorm großen Einfluss auf die gemessenen Emissionen hat.

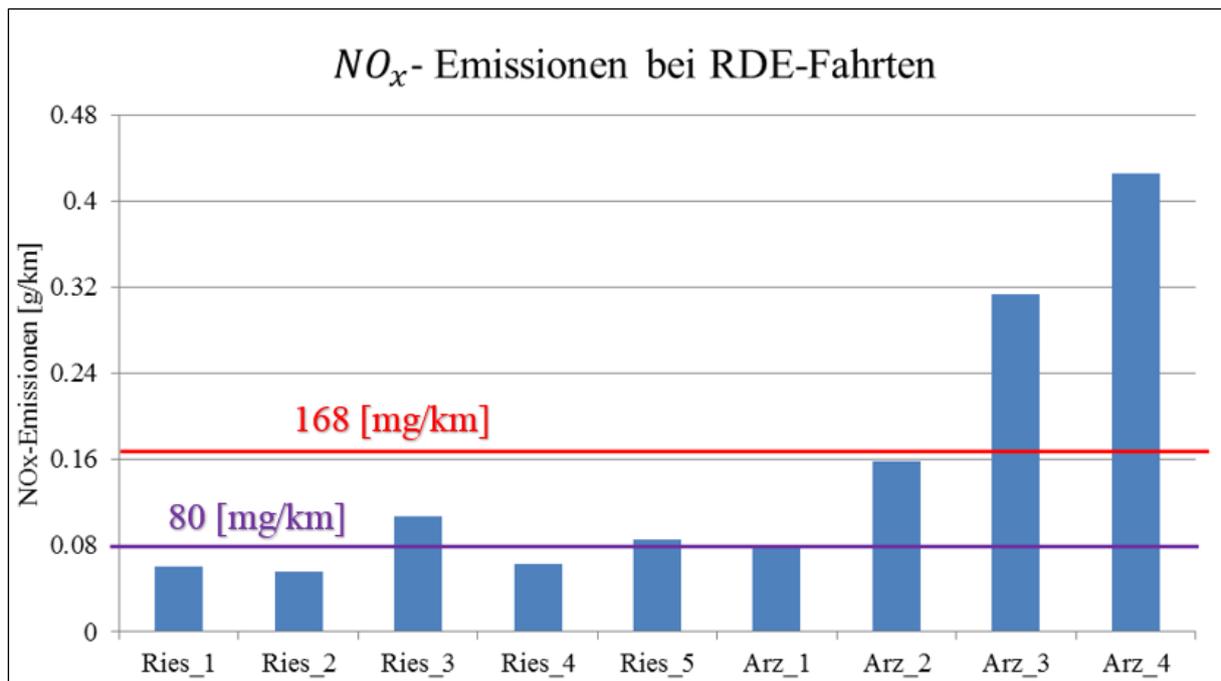


Abbildung 3-18: NO_x-Emissionen vom Audi A4 Avant bei RDE-Fahrten

Als weitere gesetzlich limitierte Emissionskomponente werden im Folgenden die gemessenen Partikelanzahlemissionen näher erläutert. Unter den insgesamt 13 Messfahrten sind zwei Dieselpartikelfilterregenerationen zu verzeichnen.

Der erste Regenerationszyklus (Ries_3) wurde, was den Fahrstil betrifft, normal gefahren, wie Tabelle A-1 entnommen werden kann. Neben diesem normalen Fahrstil ist auch das Fahrzeuggesamtgewicht mit 1782 kg relativ niedrig. Das Temperaturniveau des Abgassystems bei dieser Messfahrt sollte daher im durchschnittlichen Bereich liegen. In Abbildung 3-14 ist allerdings ein deutlicher Temperaturanstieg auf bis zu ca. 700 °C zu erkennen. Zudem kann man erkennen, dass die Partikelanzahl einen extrem starken Ausschlag vorweist. Da sich weder die Geschwindigkeit, noch die Steigung in diesem Streckenabschnitt nennenswert ändert, wird von einer Dieselpartikelfilterregeneration ausgegangen. Zudem kann durch den abrupten, starken Temperaturanstieg von motorischem Heizen (siehe Kapitel 2.3.3), also von einer Zwangsregeneration, ausgegangen werden. Während der gesamte Filterkuchen abbrennt, sinkt der Differenzdruck beim DPF und die Partikelanzahlemissionen steigen stark an, wie in Abbildung 3-14 ersichtlich ist. Der Partikelfilter weist direkt nach einer Regeneration zwar niedrigere Filterungsraten auf, diese steigen allerdings rasch wieder mit der Befüllung des DPFs an.

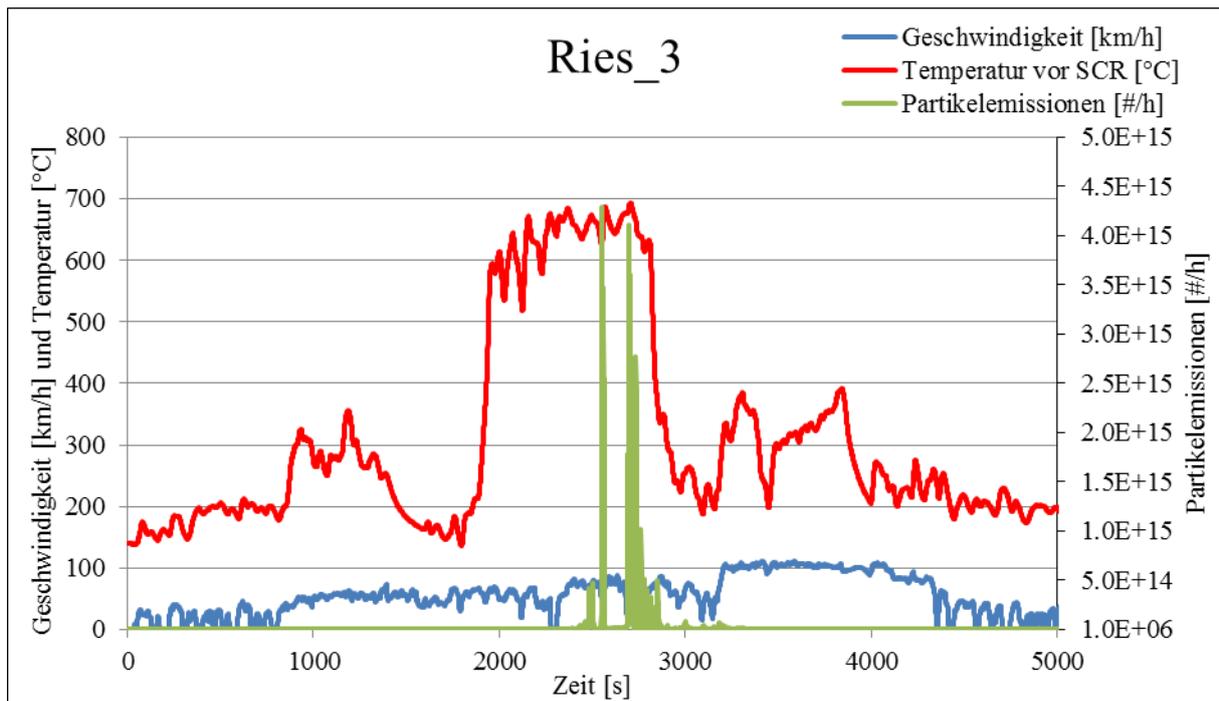


Abbildung 3-19: DPF-Regeneration bei Ries_3

Die zweite Partikelfilterregeneration im Zyklus Arzberg_3 weist allgemein ein höheres Temperaturniveau vor dem SCR-Katalysator auf. Dies ist vor allem durch das höhere Fahrzeuggesamtgewicht zu begründen. Zudem ist anzumerken, dass bei ähnlichem Fahrstil und gleichem Fahrzeuggesamtgewicht die gemessenen Temperaturen vor dem SCR-Katalysator bei der Arzbergroute um durchschnittlich 15 °C höher als bei der Riesroute sind. Aus energetischer Betrachtung ist eine Regeneration also bei einem solchen Zyklus durchaus günstig. In Abbildung 3-15 scheint die Partikelfilterregeneration, zu erkennen durch die hohen Partikelemissionen, erst nach einem Temperaturabfall stattzufinden. Dies könnte zum Teil durch die Position des Temperatursensors erklärbar sein. Wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist, befindet sich das Thermoelement vor dem SCR-Katalysator und vor dem DPF. Die Wärme im DOC sowie die im Brennraum freiwerdende Wärme wird somit vom Sensor gemessen. Der Temperaturanstieg durch Rußabbrand im DPF wird allerdings nicht erfasst.

Die zurückgelegte Strecke zwischen zwei DPF-Regenerationen hängt von vielen Faktoren, wie dem Fahrstil, Fahrzeugbeladungszustand, Alterungszustand, etc. ab. Der Kilometerstand des Versuchsfahrzeuges betrug bei Anlieferung 170 km. Es wurde angenommen, dass innerhalb dieser ersten Kilometer keine DPF-Regeneration stattgefunden hat. Unter dieser Voraussetzung kann der Kilometerstand bei Beginn der ersten Partikelfilterregeneration mit 488 km beziffert werden. Die zurückgelegte Strecke zwischen dem Ende der ersten und dem Beginn der zweiten Regeneration ist mit 365 km deutlich kürzer, ist aber trotzdem innerhalb der literarischen Grenzwerte, wie Kapitel 2.3.3 zu entnehmen ist. Aufgrund der deutlich kürzeren Strecke im Vergleich zur ersten Partikelfilterregeneration und des höheren Temperaturniveaus im Vergleich zu einer Arzbergfahrt mit gleichem Fahrstil und Zusatzbeladung, aber ohne Partikelfilterregeneration, wird eine Partikelfilterregeneration durch späte Nacheinspritzung (siehe Kapitel 2.3.3) vermutet.

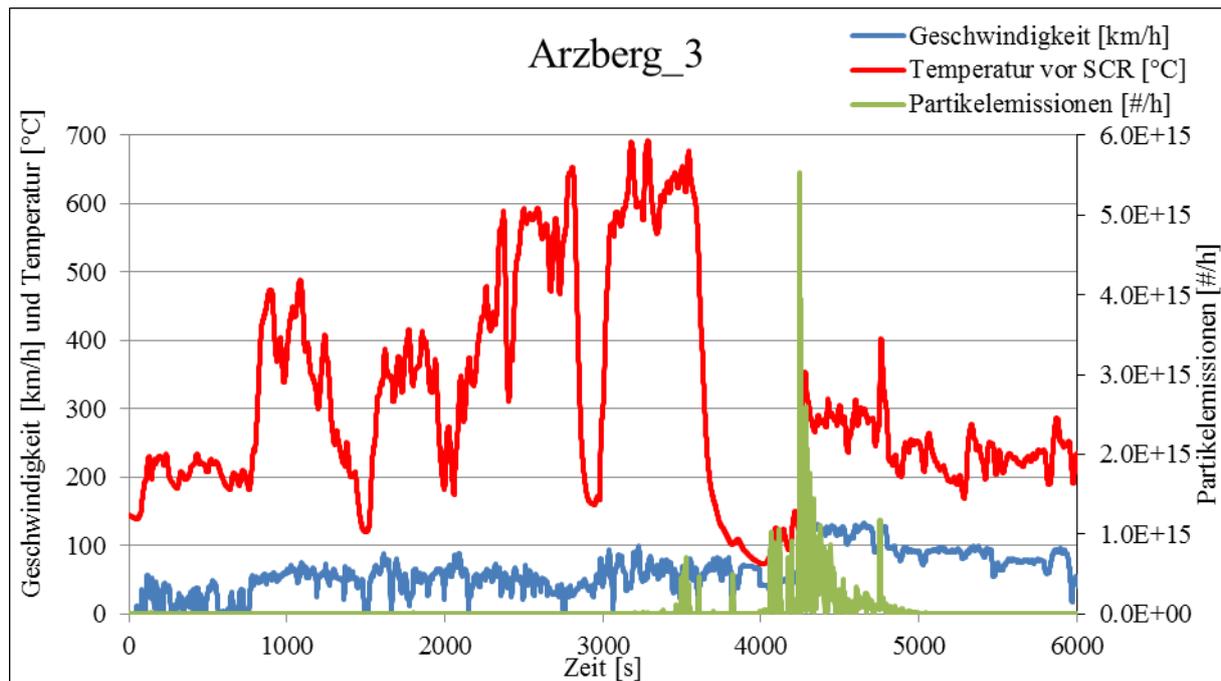


Abbildung 3-20: DPF-Regeneration bei Arzberg_3

Die zeitliche Dauer der aufgetretenen DPF-Regenerationen beträgt 839 s (Ries_3) und 1575 s (Arzberg_3). Der Zusammenhang zwischen den Partikelemissionen im Filterbetrieb und während einer Regeneration kann, basierend auf den erläuterten Messdaten, nach Gleichung (3-14) beschrieben werden. Basis für diese Gleichung sind Untersuchungen mit vorher gezeigten Messdaten. Die in Gleichung (3-14) angeführte Proportionalitätskonstante repräsentiert das Verhältnis der mittleren Partikelanzahlemissionen während einer Partikelfilterregeneration und während dem Filterbetrieb jeweils in [#h].

Alle für Gleichung (3-14) erforderlichen Messdaten sind in Tabelle A-3 zusammengefasst.

$$PN_{Regeneration} = PN_{Normal} * 627,88 \quad (3-14)$$

$PN_{Regeneration}$ [#h] PN-Emissionen während einer DPF-Regeneration

PN_{Normal} [#h] PN-Emissionen ohne DPF-Regeneration

Bei der Partikelanzahl ist somit ein deutlicher Anstieg bei einer vorliegen Partikelfilterregeneration zu verzeichnen. Die beiden Partikelfilterregenerationen haben jeweils nach einer zurückgelegten Strecke von 488 km und 365 km begonnen und haben 839 s und 1575 s ange dauert.

Die in Abbildung 3-21 dargestellten Partikelemissionen aller RDE-Fahrten sind logarithmisch skaliert. Der gesetzliche Grenzwert von $6E+11$ [#h/km] wird nur bei dem zweiten Regenerationszyklus überschritten (Arzberg_3). Auch in Bezug auf die Partikelemissionen weist das Versuchsfahrzeug somit gute Emissionswerte auf.

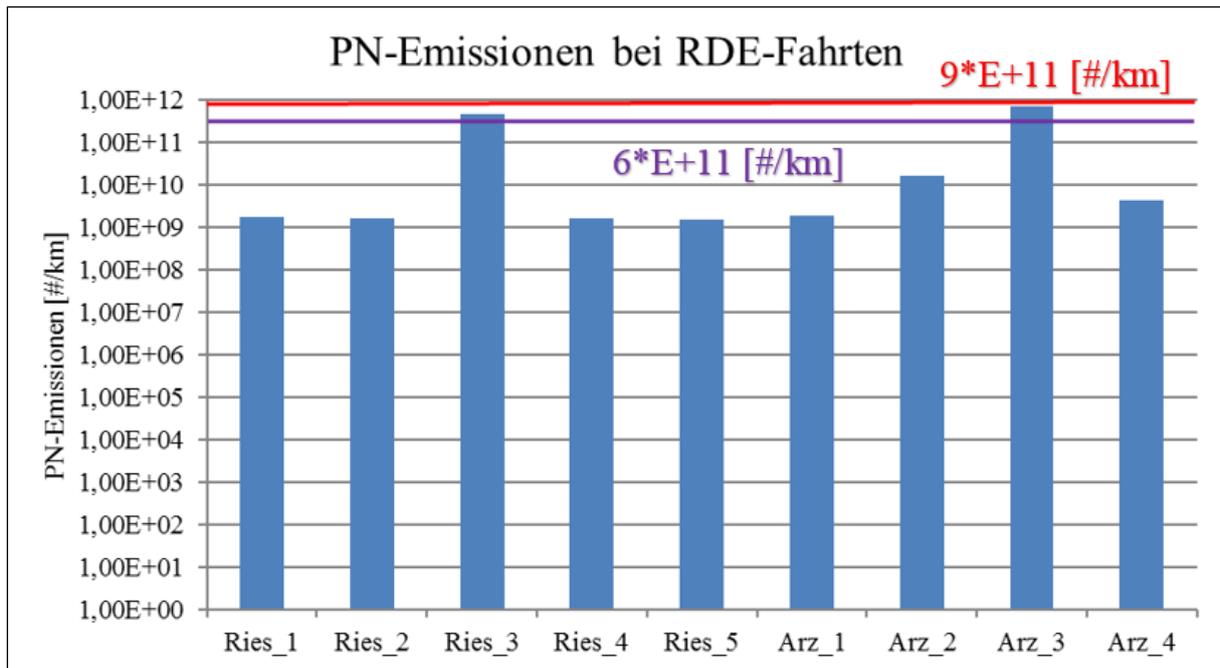


Abbildung 3-21: PN-Emissionen vom Audi A4 Avant bei RDE-Fahrten

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der untersuchte Audi A4 Avant in vielen Bereichen die seit September 2017 gültigen RDE-Standards schon erfüllt, obwohl dieses Fahrzeug nach der vorherigen Abgasnorm EURO 6b typisiert ist.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben ist, wird die Gültigkeit der einzelnen RDE-Fahrten mit Hilfe des ECE-Tools überprüft. Bedingt durch unterschiedliche Randbedingungen sind fünf der neun RDE-Fahrten aus gesetzlicher Sicht für eine Typisierung ungültig. Die Beurteilung erfolgte nach den allgemeinen Tripparametern, eine weitere Überprüfung und somit Gewichtung der Emissionen nach der Power-Binning-Methode bzw. nach Emroad wurde nicht durchgeführt. Da diese Arbeit das Emissionsverhalten eines Diesel-Fahrzeuges unter Realbedingungen untersuchen soll, ist es für spätere simulative Untersuchungen belanglos, ob die RDE-Fahrt nach den RDE-Tripparametern gültig ist. In Tabelle 3-6 sind die ungültigen Zyklen mit den Ursachen zusammengefasst.

Tabelle 3-6: Übersicht der ungültigen RDE-Zyklen (die Gültigkeitsüberprüfung nach EMROAD würde weitere Zyklen ungültig bewerten)

Zyklus	RDE-Zyklus ungültig wegen:
Ries_1	Überschreitung maximaler Umgebungstemperatur
Ries_4	Zu lange Stillstandszeit im Stadtanteil
Arzberg_1	Zu lange Stillstandszeit im Stadtanteil
Arzberg_2	Zu hohe mittlere Geschwindigkeit im Stadtanteil
Arzberg_4	Zu lange maximale Stillstandszeit im Stadtanteil Überschreitung maximaler Umgebungstemperatur

Ungültige RDE-Fahrten müssen bei Typisierung eines Fahrzeugs wiederholt werden. Tabelle 3-7 fasst die Extremwerte der untersuchten Emissionskomponenten unter Berücksichtigung der Gültigkeit von RDE-Fahrten zusammen. Wie bereits erwähnt, erfolgte keine Gewichtung der Emissionen nach der Power-Binning-Methode bzw. Emroad.

Gründe für diese starken Schwankungen der Messergebnisse zwischen einzelnen RDE-Fahrten sind u.a. unterschiedliche Umgebungstemperaturen, unterschiedliche Routen (Ries und Arzberg), unterschiedliche Testfahrer/unterschiedliches Fahrverhalten, Verkehrsaufkommen, Gesamtgewicht des Versuchsfahrzeuges, etc. Der deutlich höhere Unterschied bei den Partikelemissionen ist durch die Regeneration in diesem Zyklus charakteristisch.

Tabelle 3-7: Maximale Emissionsunterschiede zwischen gültigen RDE-Zyklen (Gültigkeitstests nach EMROAD nicht berücksichtigt, diese würde weitere Tests ungültig setzen)

Emissionskomponente	Minimum	Maximum	Verhältnis Maximum zu Minimum
<i>CO</i>	22 [mg/km]	89 [mg/km]	4,05 [-]
<i>NO_x</i>	56 [mg/km]	313 [mg/km]	5,59 [-]
<i>PN</i>	1,58E+09 [# /km]	7,17E+11 [# /km]	452,54 [-]

Leerlaufuntersuchung

Um vor allem das *NO_x*-Rohemissionsverhalten im Leerlauf analysieren zu können, sind in Abbildung 3-22 die Stillstandszeiten der aller RDE-Routen zusammengefasst. Die ersten drei Sekunden aller Stillstandsphasen sind entfernt, um einen stationären Betriebspunkt im Leerlauf sicherstellen zu können. Die dargestellten *NO_x*-Konzentrationen wurden, wie in Abbildung 3-1 dargestellt ist, vor dem Oxidationskatalysator und somit auch vor dem SCR-Katalysator gemessen.

Es ist zu erkennen, dass zwei unterschiedliche AGR-Strategien bei Leerlaufbetrieb umgesetzt sind. Bei der ersten Variante wird ein HD-AGR-Massenstrom in den Brennraum zurückgeführt, während bei der zweiten Variante deutlich mehr Massenstrom in Form von ND-AGR rückgeführt wird. Wie man in Abbildung 3-22 sehen kann, schwankt die Stickoxidkonzentration zwischen diesen beiden Strategien stark. Es kann festgestellt werden, dass im Leerlauf mit zunehmendem AGR-Massenstrom die *NO_x*-Konzentration stark sinkt.

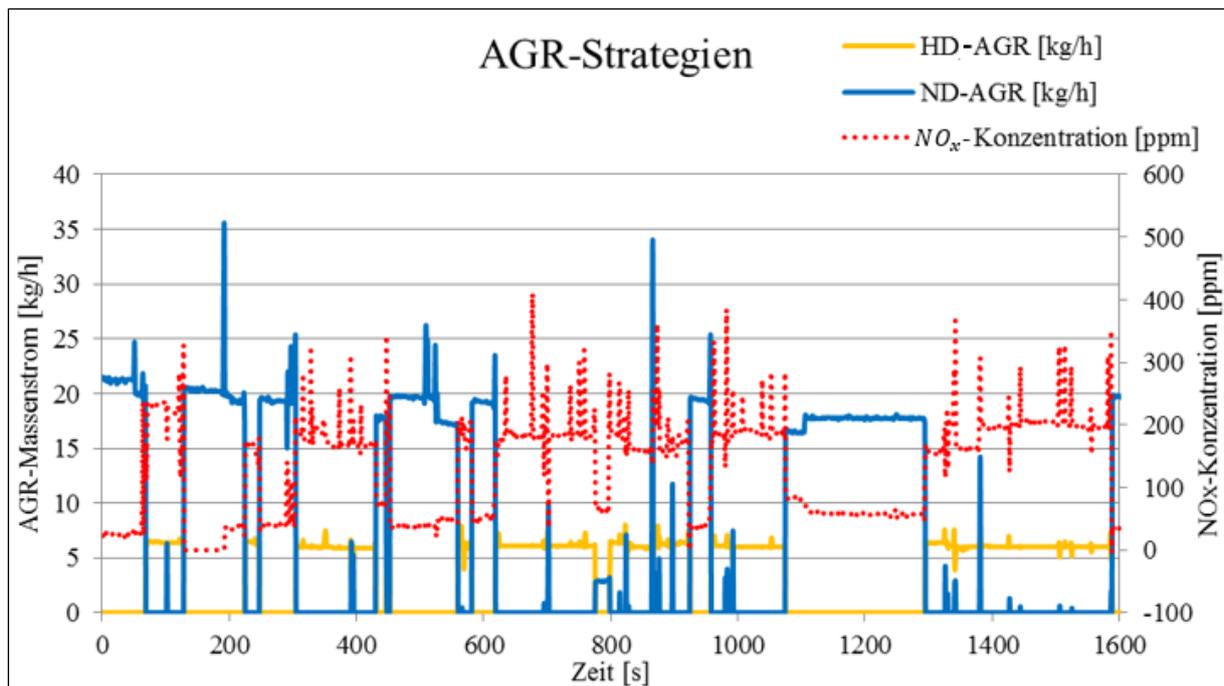


Abbildung 3-22: Unterschiedliche AGR-Strategien im Stillstand bei RDE-Fahrten

Mit Hilfe von Gleichung (3-8) wird aus der Stickoxidkonzentration und dem gemessenen Massenstrom der Emissionsmassenstrom errechnet. Die entsprechenden U_{gas} -Faktoren sind in Tabelle 3-5 hinterlegt. In Abbildung 3-23 sind die Stickoxid-Emissionsmassenströme dargestellt, wobei sich die beiden Varianten durch den ND-AGR Massenstrom unterscheiden.

Bei Messfahrten mit PEMS ist der ND-AGR Massenstrom in der Regel nicht zu eruiieren, sondern nur der Massenstrom nach dem Abgasnachbehandlungssystem End-of-Tailpipe, durch Messung mit einem EFM (siehe Abbildung 3-1), bekannt. Da die Berücksichtigung des ND-AGR nur geringen Einfluss auf den Emissionsmassenstrom hat (Aussage gilt nur für Leerlauf), wie in Abbildung 3-23 gezeigt, ist die Ermittlung des NO_x -Rohemissionsmassenstroms vor dem SCR-Katalysator mit der gemessenen NO_x -Konzentration vor SCR und dem gemessenen Massenstrom des PEMS zumindest für Leerlaufemissionen eine gute Näherung. Weitere Vor- und Nachteile beider NO_x -Massenstromvarianten (mit und ohne ND-AGR) werden in Kapitel 4.5 und 4.6 näher erläutert.

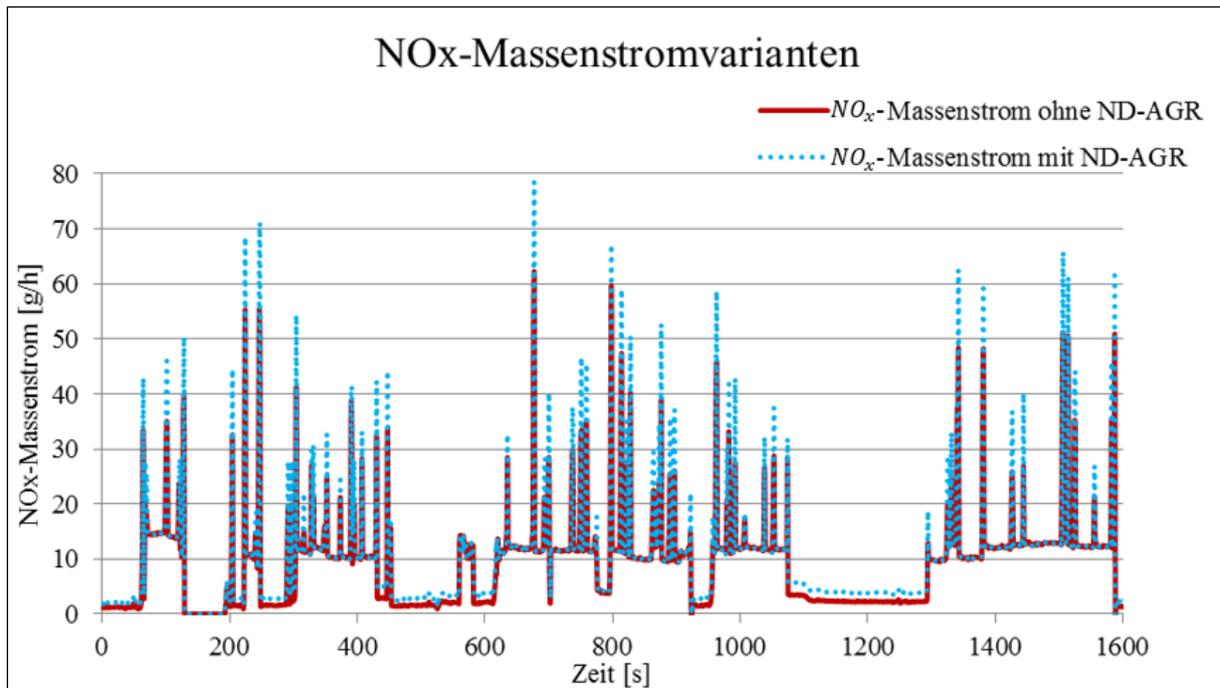


Abbildung 3-23: Unterschiedliche NO_x -Rohemissionsmassenstrom-Varianten aus Messdaten

Zudem konnte beim untersuchten Audi A4 Avant festgestellt werden, dass bei Kühlmitteltemperatur unter $70\text{ }^\circ\text{C}$ (Kriterium für einen kalten Motor nach RDE-Gesetz) ausschließlich ND-AGR eingesetzt wird. Durch höheren Abgasmassenstrom wird ein schnelleres Aufheizen des Abgasnachbehandlungssystems erreicht, da der konvektive Wärmeübertragungsanteil zwischen Abgas und Katalysatoren mit zunehmendem Massenstrom steigt. Es gibt allerdings auch Untersuchungen von anderen Fahrzeugen, die ergeben, dass für Heizstrategien zu Beginn ausschließlich ungekühltes HD-AGR in Verwendung ist, um den Motor schneller auf Betriebstemperatur zu bringen.

Untersuchung der Korrelation zwischen End-of-Tailpipe Massenstrom und Massenstrom durch SCR

Beim untersuchten Audi A4 Avant wird die ND-AGR nach dem Abgasnachbehandlungssystem entnommen, wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt. Grundlage für eine in Kapitel 4.3 erläuterte Simulationsmethode ist die Untersuchung der Korrelation des ND-AGR-Massenstroms zum Massenstrom, der beim PEMS gemessen wurde. Der Zusammenhang zwischen dem bei PEMS gemessenen Massenstrom und dem Massenstrom durch den SCR-Katalysator (PEMS+ND-AGR-Massenstrom) ist in Abbildung 3-24 dargestellt.

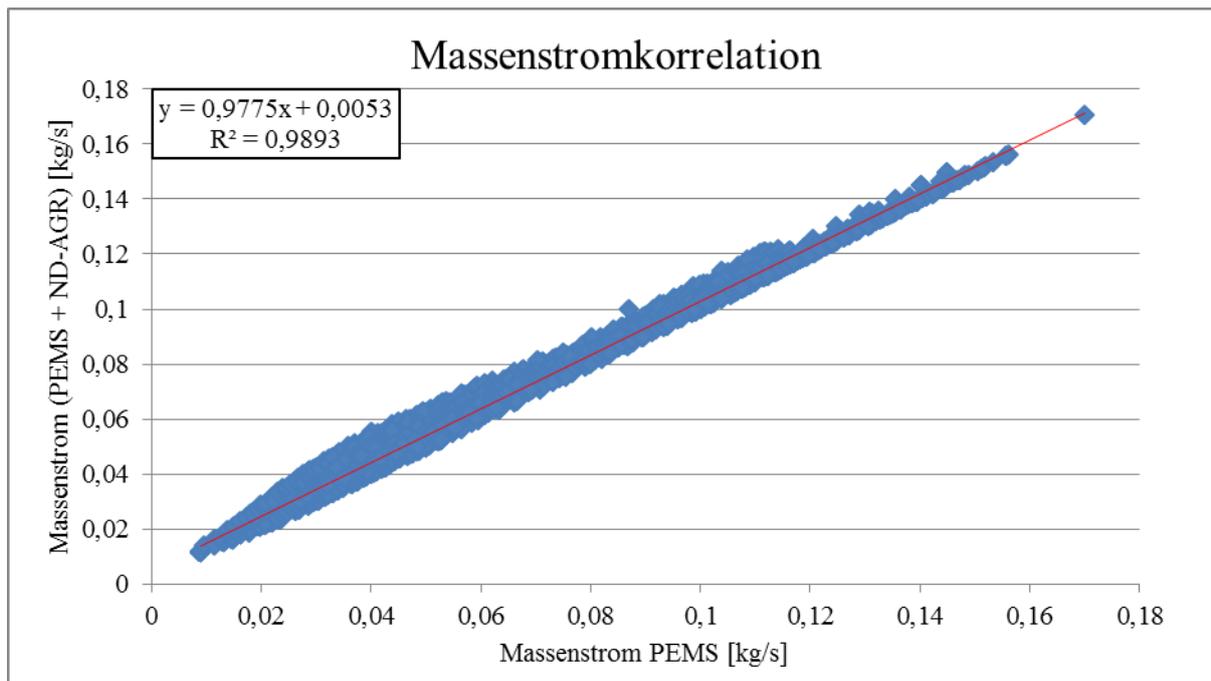


Abbildung 3-24: Korrelation zwischen PEMS- und PEMS+ND-AGR-Massenstrom

3.4.3 Analyse der Stauzyklen-Messungen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der einzelnen Stauzyklen näher erläutert. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen dem im Stadtverkehr gefahrenen Stauzyklus und den auf der Teststrecke absolvierten Stauzyklen ist die mittlere Geschwindigkeit. Diese ist beim Stadtzyklus mit 18 km/h deutlich höher als bei den absolvierten Stauzyklen auf der Teststrecke. Wie bereits erwähnt, konnten beim Stadt-Stauzyklus weder Temperaturen noch Stickoxidkonzentrationen aus dem Fahrzeug-CAN-Bus aufgrund eines Softwarefehlers ausgelesen werden (siehe Tabelle A-2). Aus diesen Gründen ist ein Vergleich zwischen dem Stadt-Stauzyklus und denen auf der Teststrecke nur eingeschränkt möglich.

Um Ergebnisse mit RDE-Fahrten zu vergleichen können, sind auch bei den Stauzyklen die Emissionen auf km bezogen.

Abbildung 3-25 zeigt einen Auszug des gemessenen Geschwindigkeitsverlaufes bei den Stauzyklen auf der Teststrecke. Auf die Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes der Aufwärmphase (siehe Kapitel 3.2.2) wird an dieser Stelle verzichtet.

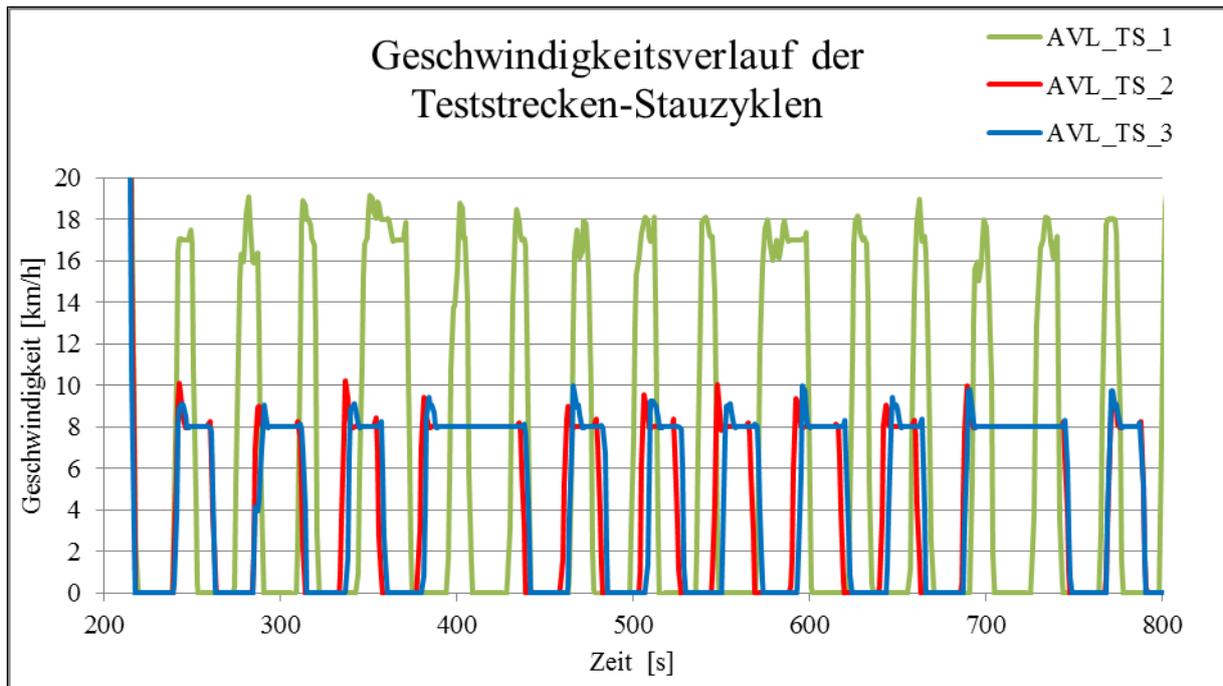


Abbildung 3-25: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf der Stauzyklen auf der Teststrecke

Beachtlich ist der fast deckungsgleiche Geschwindigkeitsverlauf zwischen AVL_TS_2 und AVL_TS_3. Diese beiden Zyklen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Verwendung der Start-Stopp Funktion.

In Tabelle 3-8 sind die durchschnittlichen CO_2 -Emissionen bei den unterschiedlichen Stauzyklen und deren Abweichung zum Mittelwert (gebildet aus allen vier Stauzyklen) dargestellt. Der erste Stauzyklus auf der Teststrecke weist deutlich höhere Kohlendioxidemissionen auf. Dies ist durch die höheren Geschwindigkeiten begründet, wie bereits in Kapitel 3.2.3 gezeigt.

Die Abweichung ist nach Gleichung (3-15) berechnet.

$$Abweichung = \frac{MW_{Zyklus} - MW_{Gesamt}}{MW_{Gesamt}} \quad (3-15)$$

MW_{Zyklus} [g/km] bzw. [# / km] durchschnittliche Emissionen des Zyklus

MW_{Gesamt} [g/km] bzw. [# / km] durchschnittliche Emissionen aller Zyklen

Tabelle 3-8: Zusammenfassung der CO_2 -Emissionen

Zyklusbezeichnung	Durchschnittliche CO_2 -Emissionen [g/km]	Abweichung zum Mittelwert [%]
Puntigam	205,2	-2,64
AVL_TS_1	381,8	15,47

AVL_TS_2	361,8	-4,32
AVL_TS_3	349,9	-8,50
Mittelwert	324,7	

Bei den Stickoxidemissionen weisen die Stauzyklen auf der Teststrecke deutlich höhere Messwerte im Vergleich zum Stadt-Stauzyklus auf, wie Tabelle 3-9 entnommen werden kann. Die Abweichung zum Mittelwert wird wieder nach Gleichung (3-15) berechnet. Aufgrund fehlender Messdaten beim Puntigam-Stauzyklus kann nur vermutet werden, dass u.a. unterschiedliches Auskühlverhalten wegen der höheren Durchschnittsgeschwindigkeit im Stadt-Stauzyklus für diese Unterschiede verantwortlich ist.

Tabelle 3-9: Zusammenfassung der NO_x-Emissionen

Zyklusbezeichnung	Durchschnittliche NO _x -Emissionen [g/km]	Abweichung zum Mittelwert [%]
Puntigam	0,16	-74,65
AVL_TS_1	1,19	22,90
AVL_TS_2	1,40	26,67
AVL_TS_3	1,40	25,08
Mittelwert	1,04	

Emissionswerte der restlichen gemessenen Schadstoffkomponenten (*CO* und *PN*) werden an dieser Stelle nicht näher untersucht. Für diverse weiterführende Untersuchungen sind alle gemessenen Emissionswerte der Stauzyklen in Tabelle A-4 zusammengefasst.

Auskühlverhalten bei Stauzyklen

Im Folgenden wird das Auskühlverhalten des Abgasnachbehandlungssystems bei Stauzyklen analysiert. Dafür werden zum einen der Einfluss der maximalen Fahrgeschwindigkeit und zum anderen der Einfluss der Start-Stopp-Funktion untersucht.

Abbildung 3-26 zeigt den Temperaturverlauf aller Stauzyklen auf der Teststrecke. In den ersten 220 s findet die Aufwärmphase (siehe Kapitel 3.2.3) statt.

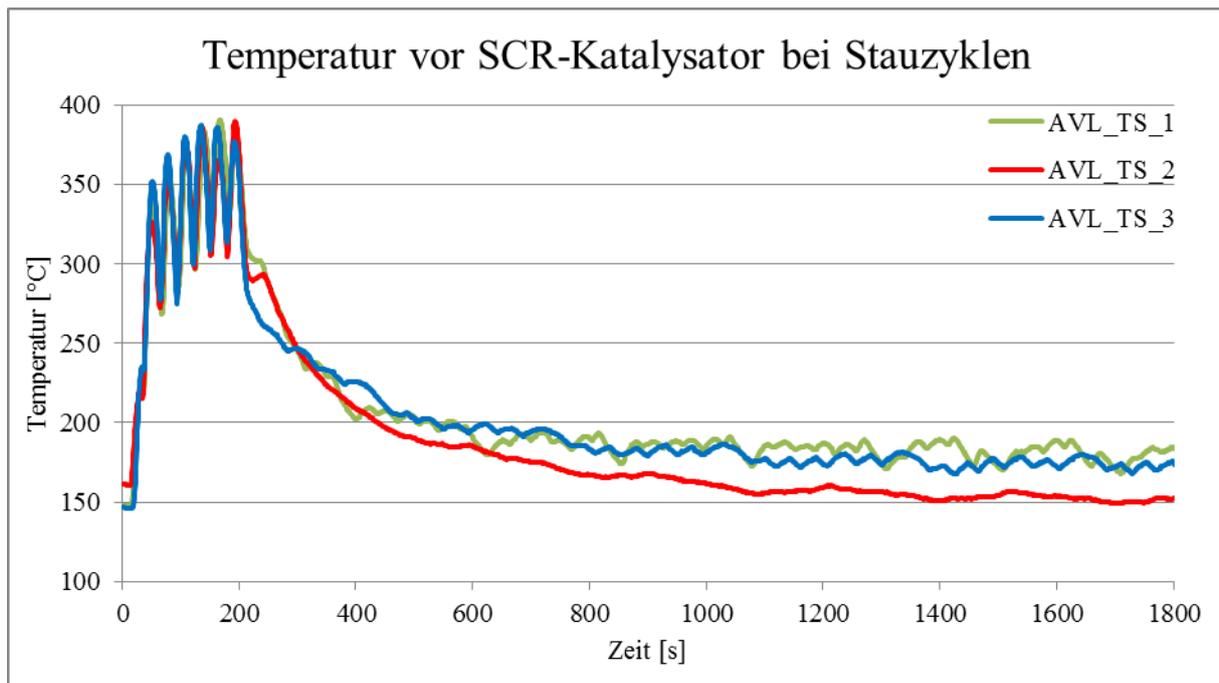


Abbildung 3-26: Temperaturverlauf bei Stauzyklen

Die Vorkonditionierung durch drei Aufwärmrunden führt zu ähnlichen Starttemperaturen für die Stauzyklen (bei 220 s beginnt die erste Stopp-Phase mit einer Dauer von 20 s). Das Temperaturniveau liegt zu Beginn des ersten Stillstands im Mittel bei 286 °C. Für den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit zwischen den Stopp-Zeiten werden die ersten beiden Teststrecken-Stauzyklen verglichen. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch das deutlich höhere Geschwindigkeitsniveau (siehe Seite 57).

Da der erste Teststrecken-Stauzyklus mit höheren Fahrgeschwindigkeit durchgeführt wurde, treten hier bedingt durch höhere Leistungsanforderungen höhere Massenströme auf. Höhere Lasten haben auch höhere Temperaturen zur Folge. Die genaue Ursache konnte im Zuge dieser Arbeit allerdings nicht ermittelt werden.

Der stark oszillierende Temperaturverlauf bei AVL_TS_1 ist durch das deutlich dynamischere Fahrverhalten begründet. Bei AVL_TS_2 und AVL_TS_3 wird nur mehr auf 8 km/h beschleunigt.

Im Folgenden werden der zweite und dritte Teststrecken-Stauzyklus, die sich nur durch die Verwendung der Start-Stopp Funktion unterscheiden, verglichen. Mit aktiver Start-Stopp Funktion ist das Temperaturniveau während des Auskühlvorganges durchschnittlich um 17 °C höher. Durch die Start-Stopp Funktion ist der Motor bei Fahrzeugstillstand ausgeschaltet. Der Massenstrom über das Abgasnachbehandlungssystem ist daher null. Das höhere Temperaturniveau bei aktivierter Start-Stopp Funktion ist somit mit hoher Wahrscheinlichkeit durch geringeren konvektiven Wärmetransport begründet.

Einfluss von Start-Stopp auf Verbrauch und Stickoxidemissionen

Die folgenden Analysen basieren auf dem Vergleich zwischen der zweiten und dritten Stauzyklenfahrt (AVL_TS_2 und AVL_TS_3). Durch aktive Start-Stopp Funktion konnten die CO_2 -Emissionen in Bezug auf den gesamten Zyklus inklusive Aufwärmphase um 14 g/km gesenkt werden. Dies entspricht in etwa 4 % der CO_2 -Emissionen ohne Start-Stopp Funktion. Bei separater Betrachtung der Stauphase, also ohne Berücksichtigung der Aufwärmphase, wird mit aktiver Start-Stopp Funktion durchschnittlich 46 g/km weniger emittiert. Dies entspricht in

etwa 22 % der CO_2 -Emissionen ohne Start-Stopp Funktion.

Die notwendige Leistung für diverse Nebenverbraucher (Klimaanlage, etc.) muss bei abgestelltem Motor vom Batteriesystem zur Verfügung gestellt werden. Unter einem bestimmten SOC-Wert (State-Of-Charge-Wert) der Batterie wird der Motor auch bei Fahrzeugstillstand wieder gestartet. Bei dem untersuchten Audi A4 Avant konnte für die gesamte Dauer des Testzyklus (ca. 30 min im Stop&Go-Betrieb) die Start-Stopp Funktion genutzt werden (der Motor wurde bei allen Stillstandsanteilen abgestellt).

Neben der Reduktion der CO_2 -Emissionen ist anzumerken, dass auch die Stickoxidemissionen durch Start-Stopp deutlich reduziert werden können. Die Reduktion der NO_x -Emissionen ist zum einen, gleich wie bei CO_2 -Emissionen, durch Abstellen des Motors und zum anderen durch das erhöhte Temperaturniveau begründet. Außerdem wird vermutet, dass beim Abstellen des Motors die Temperaturen im Brennraum sinken. Damit einhergehend könnten niedrigere Verbrennungstemperaturen vorliegen, welche dann auch zu niedrigeren NO_x -Rohemissionen führen könnten (siehe Abbildung 3-27). Weiters ist zu erwähnen, dass die gemessenen AGR-Raten zwischen beiden Stauzyklen keine Unterschiede aufweisen. Die rot punktierten Verläufe kennzeichnen gemessene NO_x -Rohemissionen. Die Volllinien sind über 45 s gemittelte Messwerte. Es ist eine deutliche Senkung der Rohemissionen mit aktiver Start-Stopp Funktion zu erkennen.

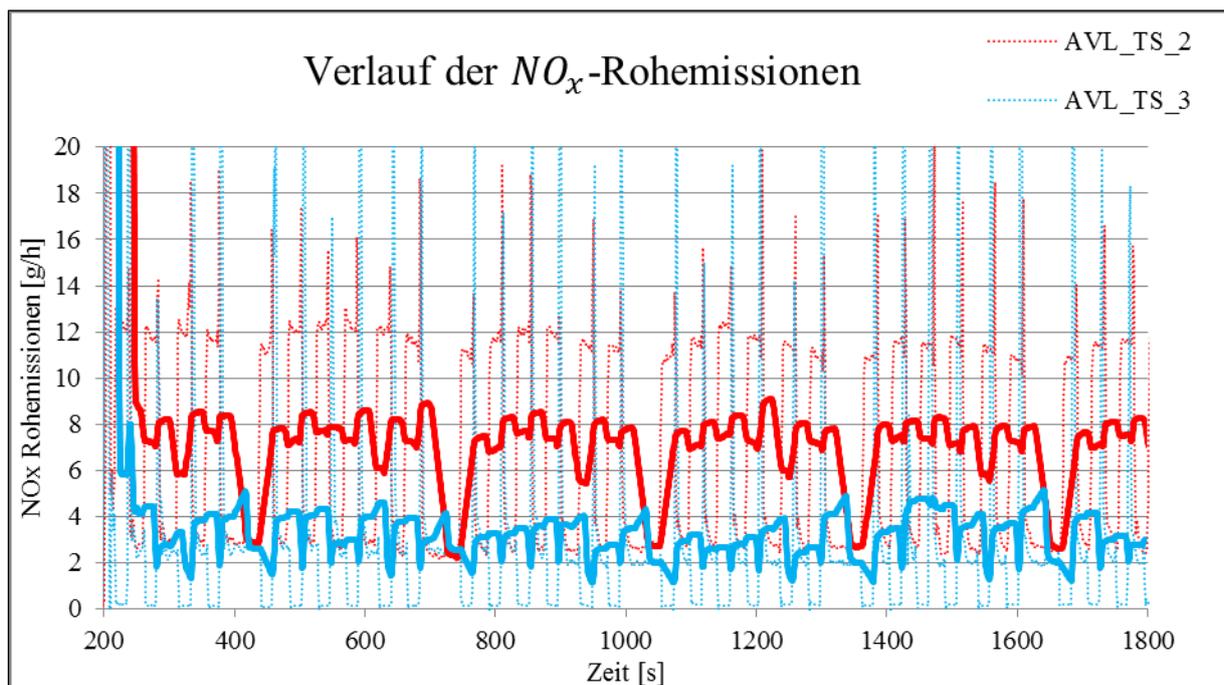


Abbildung 3-27: Einfluss von Start-Stopp auf NO_x -Rohemissionen bei den Stauzyklen

Bedingt durch das höhere Temperaturniveau (siehe Seite 59), befindet sich der SCR-Katalysator in einem besseren Konvertierungsbereich (siehe Kapitel 2.3.2). Um den Einfluss des höheren Temperaturniveaus des SCR-Katalysators durch Start-Stopp auf die Stickoxidemissionen ermitteln zu können, werden die gemessenen Zyklen in Fahranteile und Stillstandsanteile unterschieden. Als Unterscheidungskriterium dient in diesem Zusammenhang die Geschwindigkeit. Stillstandsanteile werden an dieser Stelle mit Geschwindigkeiten kleiner als 0,1 km/h definiert.

Basierend auf dieser Definition kann festgestellt werden, dass mit aktiver Start-Stopp Funktion die NO_x -Leerlaufemissionen um 98 % gesenkt werden². Beim Fahranteil wird eine Reduktion um 56 % durch Start-Stopp erreicht. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Aufteilung von Fahranteilen und Stillstandsanteilen ergibt sich eine gesamte durchschnittliche Reduktion um 75 % während des Auskühlvorganges (beginnend nach der Vorkonditionierung bei Sekunde 220 bis zum Ende des Stauzyklus). In Abbildung 3-28 ist der zeitliche Verlauf der NO_x -Emissionen End-of-Tailpipe von beiden untersuchten Stauzyklen dargestellt. Die punktierten Linien stellen die sekundlichen Messdaten dar und die Volllinien sind über 45 s gemittelte Werte der Messdaten. Es ist zu erkennen, dass die NO_x -Emissionen bei aktiver Start-Stopp Funktion deutlich reduziert sind. Durch Betrachtung der zeitlichen Konvertierungsrate wird in diesem Zusammenhang nochmal die Auswirkung des höheren Temperaturniveaus des SCR-Katalysators erkennbar. Wie in Abbildung 3-29 zu sehen ist, ist die mittlere Konvertierungsrate zu Beginn der Stauzyklenfahrt relativ konstant. Bei zusätzlicher Betrachtung von Abbildung 3-26 wird ersichtlich, dass die Konvertierungsrate mit zunehmender Temperaturdifferenz ohne Start-Stopp Funktion deutlich sinkt.

Diese Reduktion der Konvertierungsrate um durchschnittlich 25 % ist, wie bereits erwähnt, auf das niedrigere Temperaturniveau im SCR-Katalysator zurückzuführen. Ein anderer Teil der NO_x -Reduktion ist vermutlich dem Auskühlverhalten des Brennraums durch Abstellen des Motors zuzuschreiben.

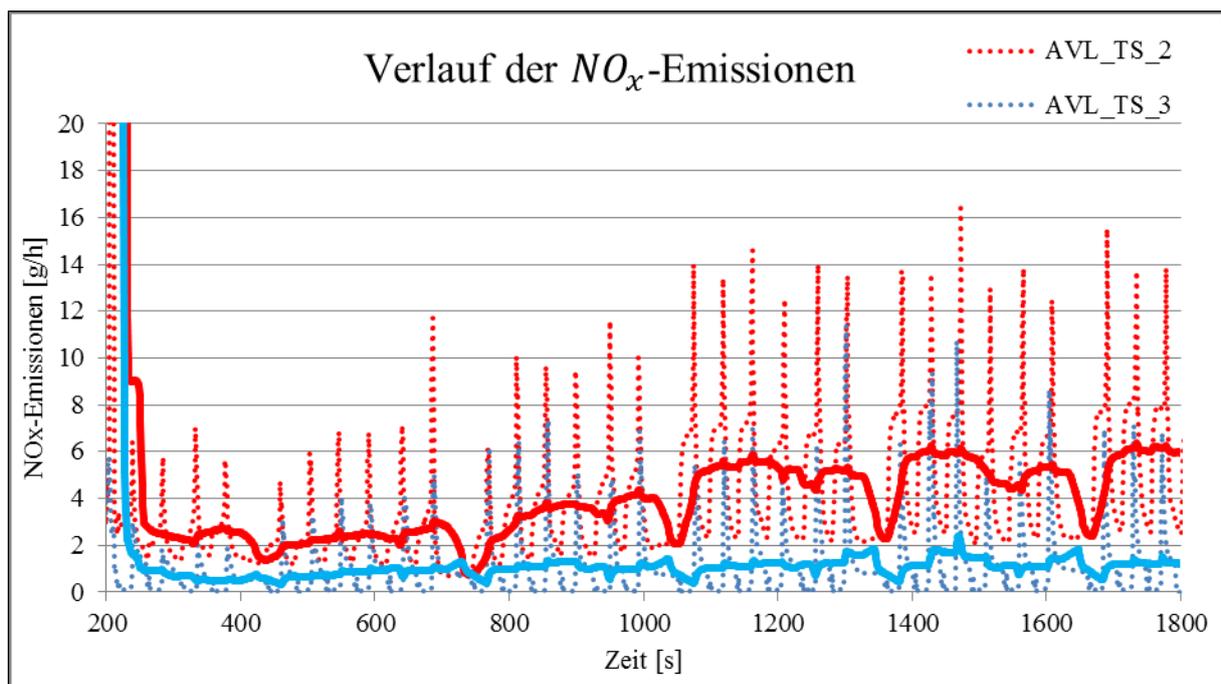


Abbildung 3-28: Einfluss der Start-Stopp auf NO_x -Emissionen End-of-Tailpipe bei den Stauzyklen AVL_TS_2 und AVL_TS_3

² Grundsätzlich ist eine Reduktion um 100 % zu erwarten. Die Tatsache, dass diese nicht erreicht wird, kann damit begründet werden, dass der Verbrennungsmotor vor der Weiterfahrt wieder angestartet wird und somit Stickoxidemissionen erzeugt, die per Definition dem Stillstandsanteil zuzuschreiben sind. Außerdem wurden diverse mögliche Messungenauigkeiten nicht berücksichtigt.

Durch die Reduktion der Stickoxide wird zusätzlich weniger NH_3 für die selektive katalytische Reduktion benötigt. Dadurch muss weniger AdBlue eidosiert werden (siehe Kapitel 2.3.2 und Kapitel 5.1).

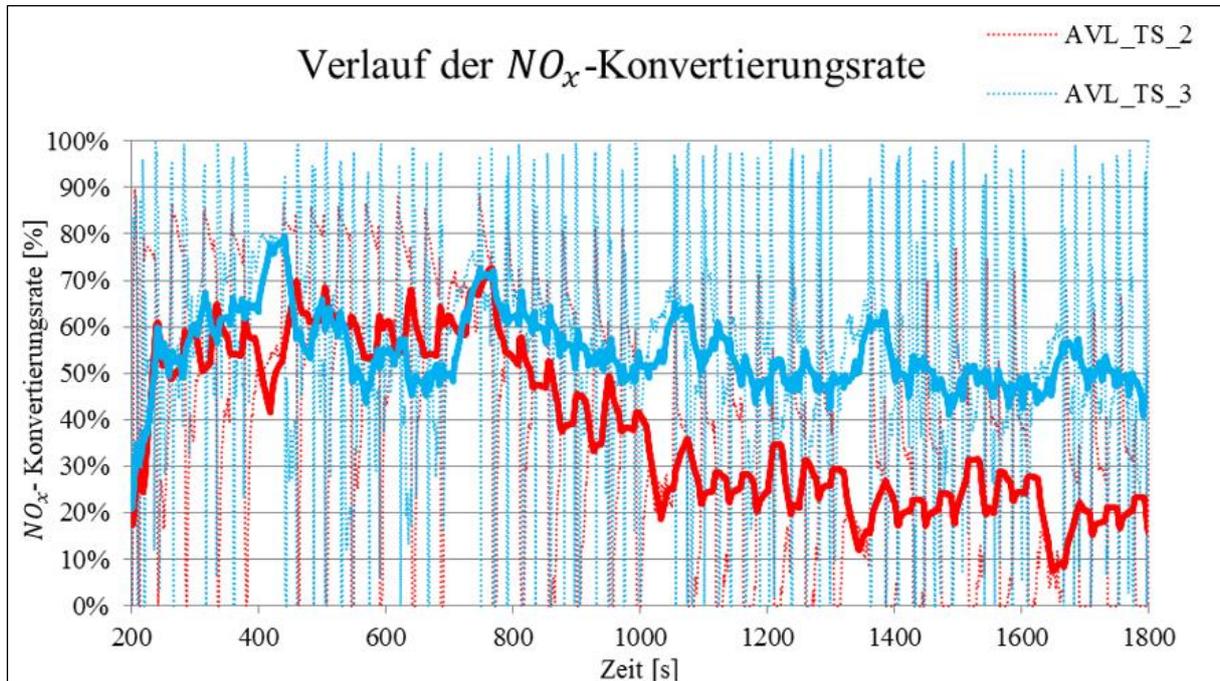


Abbildung 3-29: Verlauf der Konvertierungsrate mit und ohne Start-Stopp Funktion

Durch die aktive Start-Stopp Funktion können somit beim untersuchten Audi A4 Avant zusammenfassend folgende Ergebnisse aufgezeigt werden:

- Senkung der CO_2 -Emissionen und damit Senkung des Kraftstoffverbrauches
- Deutlich langsames Auskühlverhalten des Abgasnachbehandlungssystems
- Deutliche Senkung der NO_x -Emissionen um ca. 75 % durch
 - vermutliche signifikante Senkung der Brennraumtemperatur und damit Senkung der NO_x -Rohemissionen und
 - erhöhtes Temperaturniveau im SCR-Katalysator und damit höhere Konvertierungsraten
- Reduktion der benötigten Menge an AdBlue (proportional zur Senkung der Stickoxide)

AGR-Strategie bei gemessenen Stauzyklen

In Anlehnung an die in Abbildung 3-23 dargestellten AGR-Strategien im Stillstand bei RDE-Fahrten sind in Abbildung 3-30 die unterschiedlichen AGR-Massenströme und die NO_x -Konzentration von Stillstandsanteilen bei Stauzyklen dargestellt. Für die Darstellung sind wiederum die ersten drei Sekunden der Stillstandszeit entfernt (siehe Seite 54). Der untersuchte Audi A4 Avant verwendet bei den gemessenen Stauzyklen im Stillstand ausschließlich HD-AGR. Der HD-AGR-Massenstrom wird generell nicht über das Abgasnachbehandlungssystem geführt. Es wird vermutet, dass es sich hierbei um eine Art der Heizstrategie handelt, um das Auskühlverhalten des SCR zu minimieren. Dies ist zum aktuellen Zeitpunkt allerdings noch nicht vom Hersteller bestätigt.

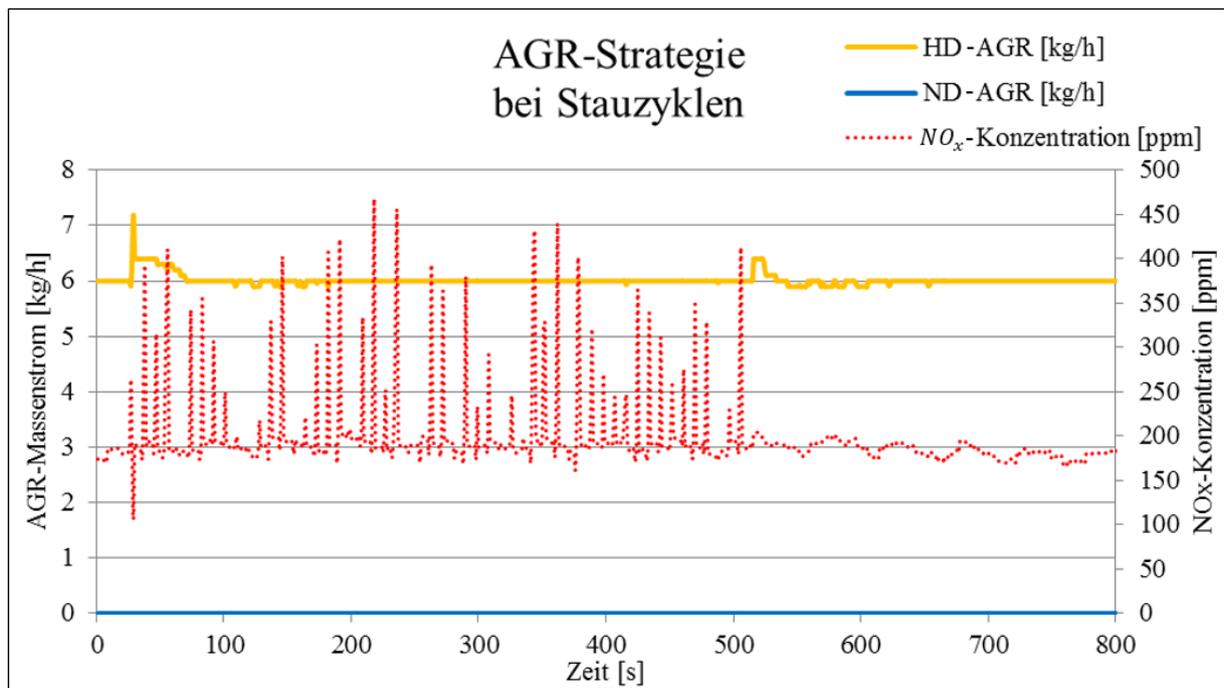


Abbildung 3-30: Ausschließlich HD-AGR im Stillstand bei Stauzyklen ohne Start-Stopp

4. Simulative Untersuchungen und Vergleich mit Messungen

In diesem Kapitel wird die methodische Vorgangsweise bei der Simulation von Emissionskomponenten erläutert. Grundlage für diverse Eingangsdaten stammen sowohl von Messdaten des untersuchten Audi A4 Avant als auch von Untersuchungen des segmentähnlichen Fahrzeuges Skoda Superb in einer parallel laufenden Arbeit [32]. Beide Hersteller sind dem VW-Konzern zuzuordnen, weshalb auch von einem baugleichen Motor unter Berücksichtigung unterschiedlicher Motorsteuerungssystem-Bedatungen ausgegangen wird. Simulativ werden beim Audi A4 Avant zwei unterschiedliche Simulationsmethoden (mit und ohne Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems) untersucht. Neben der Simulationsmethode werden auch unterschiedliche Interpolationsmethoden, Kennfeldraasterungen und weitere methodische Anpassungsmöglichkeiten untersucht. Ziel ist es festzustellen, welche Simulationsmethode unter welchen Rahmenbedingungen (Simulationsmethode, Kennfeldraasterung, etc.) für den untersuchten Audi A4 Avant am besten funktioniert und somit die geringsten Abweichungen zwischen Simulation und Messung liefert.

4.1 Simulationsprogramm PHEM

Für die Simulation unterschiedlicher Emissionskomponenten wird im Zuge dieser Arbeit das Passenger car and Heavy-duty Emissions Model (PHEM) Programm verwendet.

Durch Vorgabe eines zeitlichen Geschwindigkeitsverlaufs wird die Radleistung durch ein Längsdynamikmodell berechnet. Zudem kann optional die sekundlich aufgelöste Motordrehzahl und die Fahrbahnsteigung vorgegeben werden. Ausgehend von der Radleistung wird schließlich unter Berücksichtigung der Verlustleistung im Getriebe sowie der Nebenverbraucher die aktuelle Motorleistung ermittelt. Wenn man keine Motordrehzahl vorgibt, wird diese aus der Fahrgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des eingelegten Ganges unter Verwendung eines implementierten Schaltmodells errechnet. Dafür müssen als Eingangsdaten die Übersetzungen der Gänge bekannt sein.

Auch Abgasnachbehandlungssysteme können mit PHEM simuliert werden (siehe Kapitel 4.5.2). Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den Motor separat im sogenannten Engine-Only Modus von PHEM simulieren zu lassen, wobei die Kupplung als Schnittstelle für die vorzugebende Leistung und Drehzahl fungiert.

Im Folgenden sind die erforderlichen Eingangsdaten für die Simulation zusammengefasst:

- Fahrzeugdaten (Leerlaufdrehzahl, Nenndrehzahl, maximale Leistung, etc.)
- Motorkennfeld
- Schlepp- und Vollastkurve des Fahrzeuges
- Zyklus, für den der Verbrauch und die Emissionen errechnet werden sollen

Für nähere Ausführungen sei an dieser Stelle auf [33] verwiesen.

Im Zuge dieser Arbeit wird der Engine-Only Modus auch für diverse Kennfelderstellungen verwendet. Im Standard-Modus werden beide Simulationsvarianten (mit und ohne Abgasnachbehandlung) für die Emissionssimulation von RDE- und Stauzyklen angewandt.

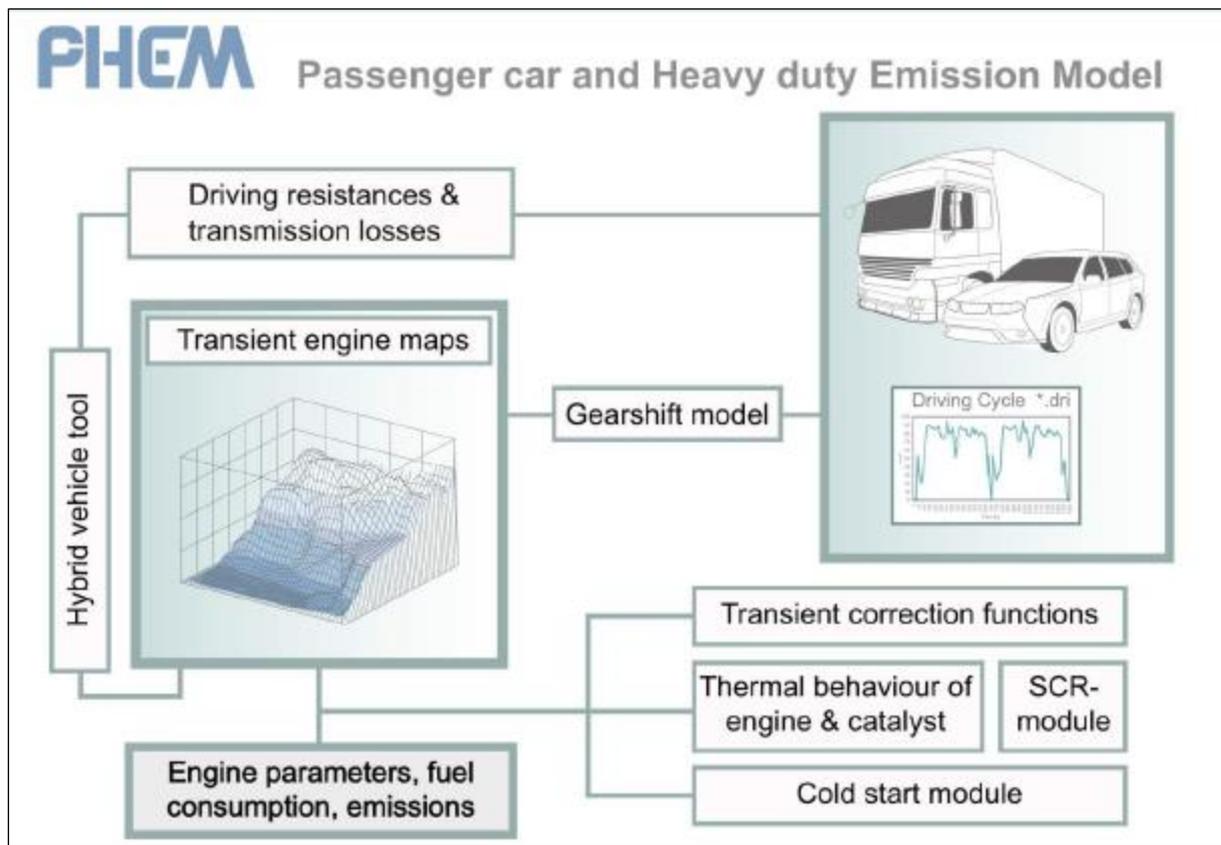


Abbildung 4-1: Funktionsprinzip von PHEM [33]

Simulationen werden im Folgenden bei Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems als EO-Simulation (Engine-Out-Simulation) und ohne Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems als EoT-Simulation (End-of-Tailpipe-Simulation) bezeichnet.

4.2 Motorkennfelderstellung mittels PHEM

generisches Kennfeld

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Simulation von Emissionskomponenten bei unterschiedlichen Zyklen. Basis für die untersuchten Simulationsmethoden ist ein Emissionskennfeld. Um ein solches Kennfeld für PHEM zu erhalten, müssen Emissions-Messdaten als Funktion von Motorleistung und Motordrehzahl herangezogen werden. Die Kennfelderstellung selbst kann wiederum mit PHEM erfolgen. Für die Messdaten gibt es drei verschiedene Quellen:

- Messung der Emissionen am Motorprüfstand (Motorleistung und -drehzahl sind bekannt)
- Messung der Emissionen am PKW-Rollenprüfstand (Radleistung und Motordrehzahl sind bekannt)
- Messung der Emissionen mittels PEMS im Straßenbetrieb (Motorleistung ist in der Regel nicht bekannt, Motordrehzahl bekannt)

Bei der Messung am Motorprüfstand liegt durch vorhandene Emissionsdaten als Funktion von Motorleistung und -drehzahl bereits ein Motorkennfeld vor. Für Messungen am PKW-Rollenprüfstand muss zusätzlich von der Radleistung auf die Motorleistung zurückgerechnet

werden. Dies erfolgt aber im Zuge der Kennfelderstellung automatisch mit PHEM. Bei Messungen mit PEMS kann durch Drehmomentfelgen die Radleistung grundsätzlich gemessen werden. Aufgrund der hohen Kosten für Drehmomentfelgen wird diese Option de facto nicht genutzt. Mit der sogenannten CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode kann durch gemessene Emissionen und Motordrehzahl die Motorleistung ermittelt werden. In weiterer Folge können dadurch die gemessenen Emissionen in ein Kennfeld eingerastert werden. Mit Hilfe eines generischen Kennfeldes, das zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit bereits vorhanden war, kann durch Messung der Motordrehzahl und CO_2 -Emissionen die Motorleistung durch Interpolation ermittelt werden. Für weitere Ausführungen sei an dieser Stelle auf [34] verwiesen.

Da im Zuge dieser Arbeit nur Messungen mit PEMS durchgeführt wurden, wird nur auf die CO_2 -Leistungsinterpolationsmethode näher eingegangen. Basis für diese ist ein generisches Verbrauchskennfeld (auch generisches CO_2 -Kennfeld genannt). In diesem Kennfeld sind normierte Werte für CO_2 über der normierten Motorleistung und -drehzahl aufgetragen. Das hat den Vorteil, dass das Motorkennfeld für Motoren unterschiedlicher Leistungsklassen und ähnlicher Technologie verwendet werden kann. Die Normierung erfolgt nach Gleichungen (4-1) bis (4-3). [35]

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

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

$$CO_{2norm} = \frac{CO_2}{P_{rated}} \quad (4-3)$$

n_{norm}	[-]	Normierte Motordrehzahl
n_{rated}	[U/min]	Nenndrehzahl des Motors
n_{idle}	[U/min]	Leerlaufdrehzahl des Motors
n	[U/min]	Motordrehzahl
P_{norm}	[-]	Normierte Motorleistung
P_{rated}	[kW]	Nennleistung des Motors

Ähnlich wie bei den SCR-Kennfeldraasterungsvarianten (siehe Kapitel 4.3) wird auch für das Motorkennfeld eine grobe Rasterung mit jeweils 20 Stützstellen in Richtung normalisierter Motordrehzahl und normalisierter Motorleistung verwendet. Weiters wird eine feinere Motorkennfeldraasterung untersucht. Diese hat doppelt so viele Stützstellen für normalisierte Motordrehzahl und -leistung. Im Folgenden sind diese beiden Motorkennfeldraasterungsvarianten mit „20“ für grobe und „40“ für feine Rasterung abgekürzt.

4.3 SCR-Kennfelderstellung mittels PHEM

Für die Simulation des Abgasnachbehandlungssystems wird u.a. ein SCR-Konvertierungskennfeld für NO_x-benötigt. Es werden einige unterschiedliche SCR-Kennfelderstellungsmethoden untersucht. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich hinsichtlich der:

- Aufbereitung der Messdaten (Plausibilisierung der Messdaten)
- Berücksichtigung der ND-AGR
- verwendeten Kennfeldraasterung
- zeitlichen Mittelung von Messdaten
- Anwendung von weiteren Plausibilitätskriterien für das SCR-Kennfeld

Als Eingangsdaten zur SCR-Kennfelderstellung werden die NO_x-Emissionen vor und nach dem SCR-Katalysator, die Temperatur vor dem SCR-Katalysator und der Massenstrom durch den SCR benötigt. Die SCR-Kennfelderstellung kann auch mittels PHEM durchgeführt werden, allerdings müssen einige Details beachtet werden. Da PHEM bis dato für die Emissionskennfelderstellung ausgelegt ist, müssen für die SCR-Kennfelderstellung normierte Temperatur und normierter Massenstrom anstelle der normierten Motordrehzahl und -leistung vorgegeben werden. Zusätzlich werden die gemessenen NO_x-Emissionen vor und nach SCR-Katalysator benötigt. Das erstellte SCR-Kennfeld enthält somit die NO_x-Emissionen vor und nach SCR in Abhängigkeit der Temperatur vor SCR und dem Massenstrom durch SCR. Um nun die Konvertierung zu berechnen, wird für jede einzelne Stützstelle Gleichung (4-4) angewandt. [32], [35]

$$NO_{x_{Konvertierung}} = \frac{NO_{x_{in}} - NO_{x_{out}}}{NO_{x_{in}}} \quad (4-4)$$

$NO_{x_{Konvertierung}}$	[-]	NO _x -Konvertierungsrate
$NO_{x_{in}}$	[g/h]	NO _x -Massenstrom vor SCR
$NO_{x_{out}}$	[g/h]	NO _x -Massenstrom nach SCR

Damit das SCR-Konvertierungskennfeld für unterschiedlich große SCR-Katalysatoren verwendet werden kann, wird der Massenstrom in eine Raumgeschwindigkeit umgerechnet. Die Raumgeschwindigkeit entspricht dem Kehrwert der Aufenthaltszeit der Stickoxide im SCR-Katalysator und wird nach Gleichung (4-5) berechnet. [33], [35]

$$v_{Raum} = \frac{\dot{V}}{V_{SCR}} \quad (4-5)$$

v_{Raum}	[1/s]	Raumgeschwindigkeit
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom

V_{SCR} [m³] Volumen des SCR-Katalysators

Der Volumenstrom wird aus dem Massenstrom mit Hilfe der idealen Gasgleichung bei Standardbedingungen (273,15 K und 1,013 bar) errechnet. Für die Gaskonstante von Abgas bei Diesel-Fahrzeugen kann mit guter Näherung die der Luft mit 287 J/(kgK) verwendet werden. Die einzelnen Schritte zur Erstellung des SCR-Konvertierungskennfeldes sind:

- Aufbereitung der Messdaten für SCR-Kennfelderstellung: Durch Mess- und Interpolationsfehler können negative Daten vorliegen. In diesem Zusammenhang gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten:
 - a) Keine Korrektur der Messdaten
 - b) Korrektur der Messdaten
 - I. Datensätze mit $NO_{x_{in}} \leq 0$ entfernen
 - II. Datensätze mit $NO_{x_{out}} < 0$ entfernen
 - III. Datensätze mit $NO_{x_{Konvertierung}} < 0$ entfernen
- Einrasterung der Messdaten mit PHEM-Programm
 - Variieren der zeitlichen Mittelung
 - Wahl der Kennfeldraasterung
- Kennfeldoptimierung
 - Entfernung extrapolierter Daten
 - Kennfeldglättung durch Median-Bildung
- Anwendung von Plausibilitätskriterien für SCR-Kennfeld
 - Ermittlung der Temperatur bei bester Konvertierungsrate
 - Plausibilisierung der Konvertierungsrate in Abhängigkeit von Massenstrom und Temperatur

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte für die Erstellung des SCR-Konvertierungskennfeldes näher erläutert. Zudem werden einige untersuchte Varianten für die SCR-Kennfelderstellung erläutert.

Aufbereitung der Messdaten

Bei der Aufbereitung der Daten werden drei unterschiedliche Varianten untersucht. Bei der ersten Variante werden alle Messdaten zur Kennfelderstellung herangezogen. Für die zweite Variante werden Datensätze mit $NO_{x_{in}} \leq 0$ entfernt, da zum einen negative Stickoxidmassenströme generell nicht plausibel und zum anderen für $NO_{x_{in}} = 0$ die Berechnung der Konvertierungsrate mathematisch nicht definiert ist (Division durch null, siehe Gleichung (4-4)). Bei der dritten Variante werden zusätzlich Datensätze mit negativen $NO_{x_{out}}$ und negativen $NO_{x_{Konvertierung}}$ entfernt. Auch hier gilt, dass negative NO_x -Massenströme nicht plausibel sind. Zudem sind negative Konvertierungsraten ebenso nicht plausibel. Für den Vergleich zwischen den einzelnen Varianten werden im Folgenden die Abkürzungen DA1,

DA2 und DA3³ verwendet.

Berücksichtigung der ND-AGR für SCR-Kennfelderstellung in PHEM

Der NO_x -Massenstrom durch den SCR-Katalysator kann durch Gleichung (3-8) aus der gemessenen NO_x -Konzentration vor SCR und den gemessenen Massenströmen errechnet werden.

Da beim Versuchsfahrzeug das ND-AGR nach dem SCR-Katalysator entnommen wird, wird der Gesamtmassenstrom durch SCR, wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, nicht vom PEMS gemessen. Aus diesem Grund werden in Bezug auf die ND-AGR folgende Varianten für das SCR-Konvertierungskennfeld unterschieden:

- ND-AGR nicht berücksichtigen, im Folgenden als MS1 (Massenstrom 1) bezeichnet
 - NO_x -Massenstrom durch SCR-Katalysator ist über gemessene NO_x -Konzentration vor SCR und PEMS-Massenstrom berechnet
- ND-AGR berücksichtigen, im Folgenden als MS2 (Massenstrom 2) bezeichnet und ist die physikalisch richtige Variante
 - NO_x -Massenstrom durch SCR ist über gemessene NO_x -Konzentration vor SCR und PEMS und ND-AGR Massenstrom berechnet

Die Variante MS2 stellt somit die tatsächlich auftretenden NO_x -Massenströme⁴ vor und nach dem SCR-Katalysator dar, während bei MS1 in vielen Fällen niedrigere NO_x -Massenströme vor und nach dem SCR-Katalysator abgebildet sind. Bei Variante MS2 muss der errechnete NO_x -Massenstrom nach dem SCR-Katalysator um den ND-AGR-Massenstromanteil verringert werden, um das Simulationsergebnis am Auspuffende mit der Messung vergleichen zu können. Basis hierfür ist der in Kapitel 3.4.1 erläuterte lineare Zusammenhang (siehe Seite 56).

Zeitliche Mittelung der Messdaten

Es gibt in PHEM die Möglichkeit die Anzahl der zeitlich zu mittelnden Inputdaten zu variieren. In der vorliegenden Arbeit werden hierzu zwei unterschiedliche Mittelungswerte (3 und 20 s) untersucht.

Kennfeldraasterung

Weiters wird der Einfluss der SCR-Kennfeldraasterung untersucht. Hier werden zwei unterschiedliche Varianten (grobe Rasterung 20x20 und eine feine Rasterung, deren Auflösung doppelt so hoch ist⁵) untersucht. 20x20 bezieht sich auf die Anzahl der Stützstellen, die das Kennfeld aufweist. Es sind somit 20 Stützstellen in Richtung Temperatur und ebenso 20 in Richtung Raumgeschwindigkeit vorhanden.

³ DAX...Datenaufbereitung nach Variante x

⁴ diverse Messungenauigkeiten, Querempfindlichkeiten, etc. der unterschiedlichen NO_x -Sensoren werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

⁵ Beim feinen Kennfeld ist der Abstand zwischen Stützstellen exakt halb so groß, wie bei der groben Kennfeldraasterung.

Kennfeldoptimierung

In diesem Schritt werden in erster Iteration die in PHEM extrapolierten Werte für das NO_x -Konvertierungskennfeld entfernt, um Unsicherheiten durch die Extrapolation auszuschließen. In einem weiteren Schritt erfolgt eine Glättung des Kennfeldes durch Medianbildung. Ein Problem des SCR-Konvertierungskennfeldes ist, dass einige Messdaten bei der Kennfeldglättung (bedingt durch die Medianbildung) entfernt werden.

Anwendung von Plausibilitätskriterien

Als letzte Variation ist die Anwendung von Plausibilitätskriterien zu nennen. Plausibilitätskriterien werden nach der Kennfeldglättung angewandt. Folgendes wird vorausgesetzt:

- Konvertierungsrate muss mit abnehmender Raumgeschwindigkeit steigen; im Grenzfall bleibt sie gleich
- Die Konvertierungsrate darf bei gleichem Massenstrom bei Temperaturen über und unter der Idealtemperatur⁶ nicht steigen.

In Abbildung 4-3 und Abbildung 4-5 (nach Überarbeitung) ist die Anwendung dieser Plausibilitätskriterien auf ein SCR-Kennfeld (Abbildung 4-2 und Abbildung 4-4) beispielhaft dargestellt⁷. Eine dreidimensionale Darstellung beider Varianten ist im Anhang auf Seite 119 angeführt.

Durch Erzwingung einer monoton steigenden Konvertierungsrate mit abnehmender Raumgeschwindigkeit bei gleicher Temperatur kann man eine teilweise Anhebung der Konvertierungsrate des geglätteten SCR-Kennfeldes erreichen.

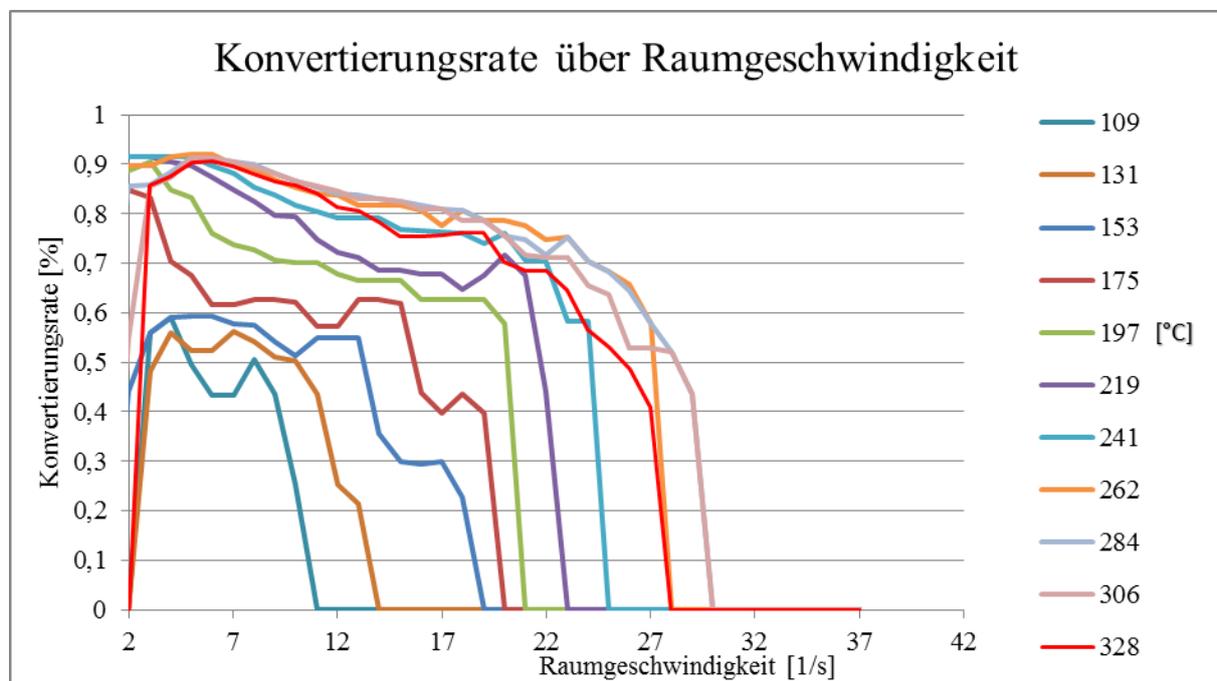


Abbildung 4-2: Konvertierungsrate über Raumgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur vor

⁶ als Idealtemperatur bezogen auf SCR-Konvertierungsfelder wird die Temperatur mit der größten Anzahl an höchsten Konvertierungsraten bei gleichem Massenstrom definiert.

⁷ Anmerkungen zum dargestellten Kennfeld: Messdaten sind nach Variante DA3 aufbereitet, PHEM-Mittelung über 3 s sowie feine SCR-Kennfeldraasterung und MS1.

Anwendung von Plausibilitätskriterien

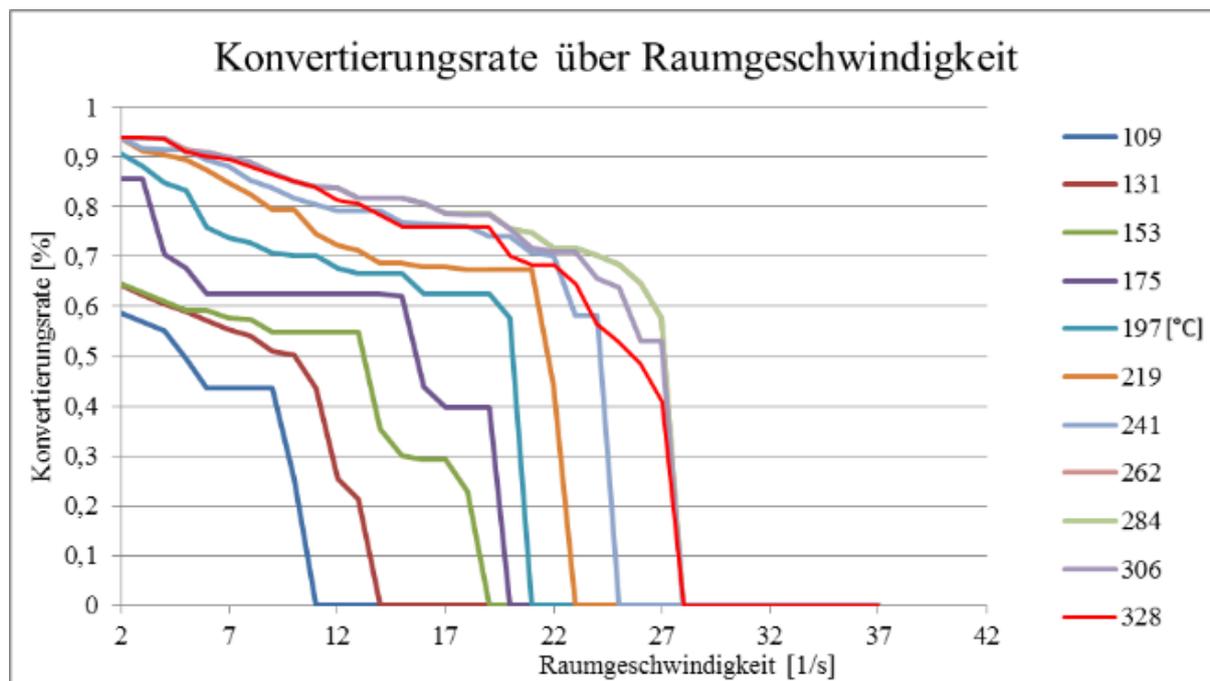


Abbildung 4-3: Konvertierungsrate über Raumgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur nach Anwendung von Plausibilitätskriterien

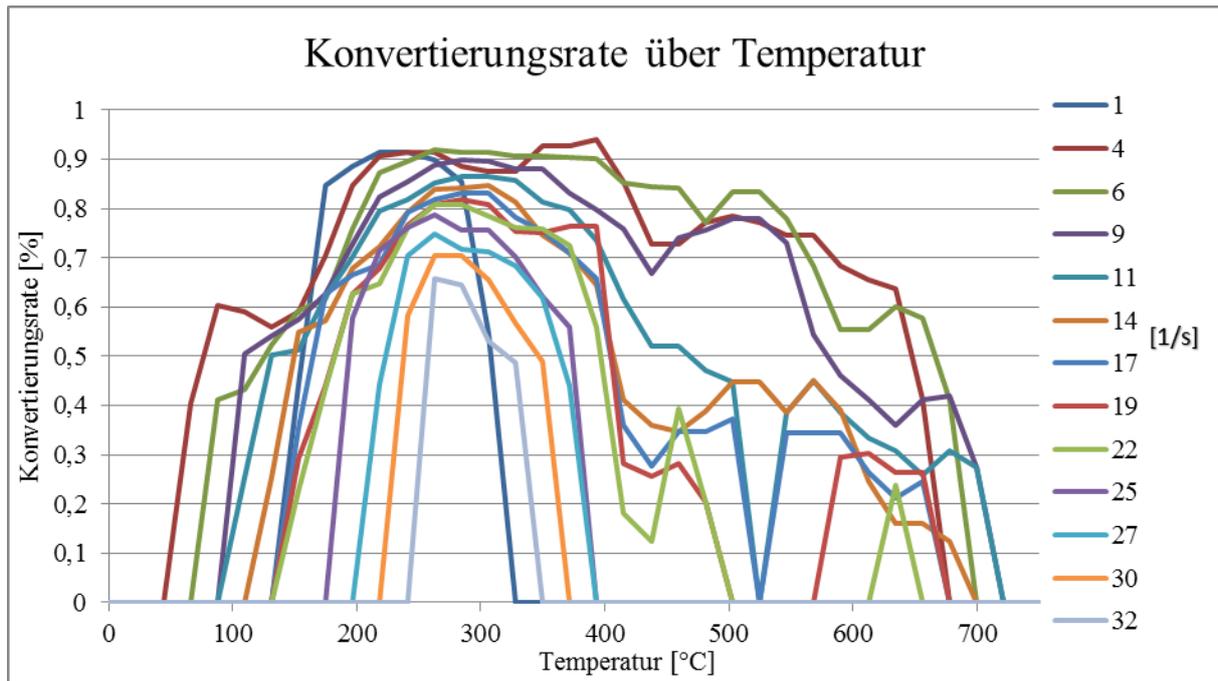


Abbildung 4-4: Konvertierungsrate über Temperatur bei bestimmten Raumgeschwindigkeiten vor Anwendung von Plausibilitätskriterien

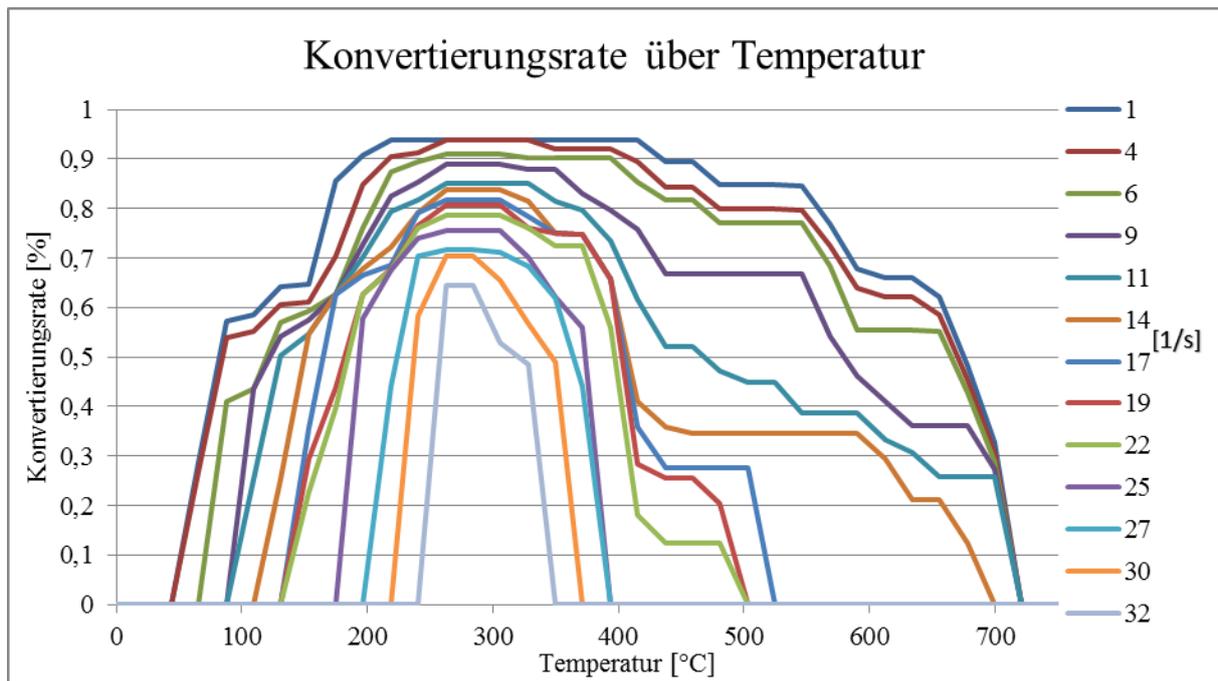


Abbildung 4-5: Konvertierungsrate über Temperatur bei bestimmten Raumgeschwindigkeiten nach Anwendung von Plausibilitätskriterien

4.4 Untersuchte Simulationsvarianten sowie Optimierungsmethoden

Im Folgenden werden unterschiedliche Interpolationsmethoden und Kennfelderstellungsvarianten sowohl für EoT-Simulationen als auch für EO-Simulationen untersucht. EoT-Simulationen bedeutet, dass keine Abgasnachbehandlungssysteme in der Simulation abgebildet werden und daher die Messdaten End-of-Tailpipe direkt in ein Emissionskennfeld einfließen, das auch als EoT-Kennfeld bezeichnet wird. Bei der EO-Simulation wird ein Rohemissionskennfeld vorgegeben und unter Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems die Emissionen am Auspuffende simuliert. An dieser Stelle sei erwähnt, dass im Rahmen dieser Arbeit nur die Konvertierung der NO_x-Emissionen betrachtet wurde. D.h. DOC und DPF wurden im Abgasnachbehandlungssystem nicht abgebildet. Daher tritt nur bei den Stickoxiden ein Unterschied zwischen EoT- und EO-Simulationen auf.

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden folgende Einflussgrößen untersucht:

- Einfluss der Interpolationsmethode
- Einfluss der Motorkennfeldraasterung
- Einfluss der SCR-Kennfeldraasterung
- Mittelungseinfluss von PHEM
- Zusätzliche Plausibilisierung des SCR-Konvertierungskennfeldes

Die Simulationsgenauigkeit von EoT-Simulationen hängt stark davon ab, welche Zyklen zur Kennfelderstellung herangezogen werden. Im Folgenden werden die NO_x-Simulationsergebnisse von zwei unterschiedliche Motorkennfeldraasterungen mit Verwendung eines EoT-Kennfeldes aus allen Zyklen und mit EoT-Kennfeldern aus ausgewählten Zyklen gezeigt (siehe Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9). Die ausgewählten Zyklen können Tabelle 4-1 entnommen werden.

Tabelle 4-1: Beschreibung der Zyklen Auswahl für EoT-Simulationen in Abbildung 4-7

Simulierte Zyklen	EoT-Kennfeld aus folgenden Zyklen erstellt
Alle Ries-Fahrten	Alle Ries-Fahrten
Arzberg_1; Arzberg_2; Puntigam	Alle Ries-Fahrten; Arzberg_1; Arzberg_2
Arzberg_3; Arzberg_4	Arzberg_3; Arzberg_4
AVL_TS_1; AVL_TS_2; AVL_TS_3	AVL_TS_1; AVL_TS_2; AVL_TS_3

Die Änderung der restlichen Emissionsfaktoren durch die Adaption der Zyklen Auswahl ist in Anhang B dargestellt.

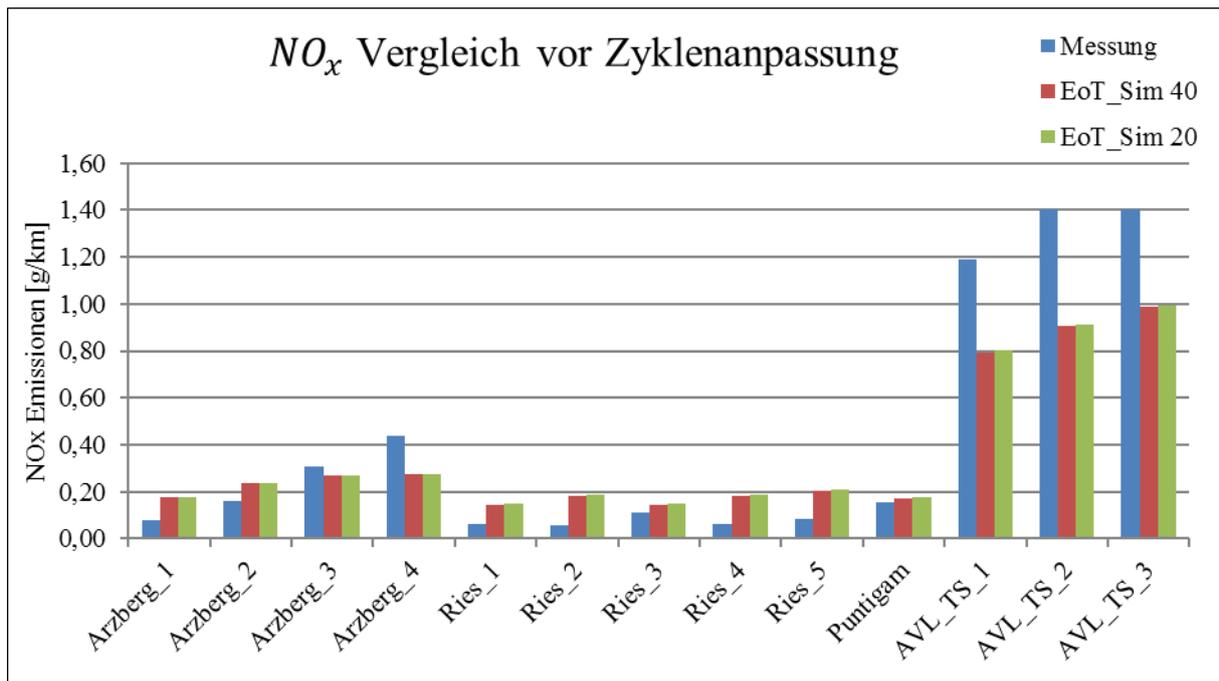


Abbildung 4-6: Zusammenfassung der NO_x-Messung und EoT-Simulation vor Zyklenanpassung

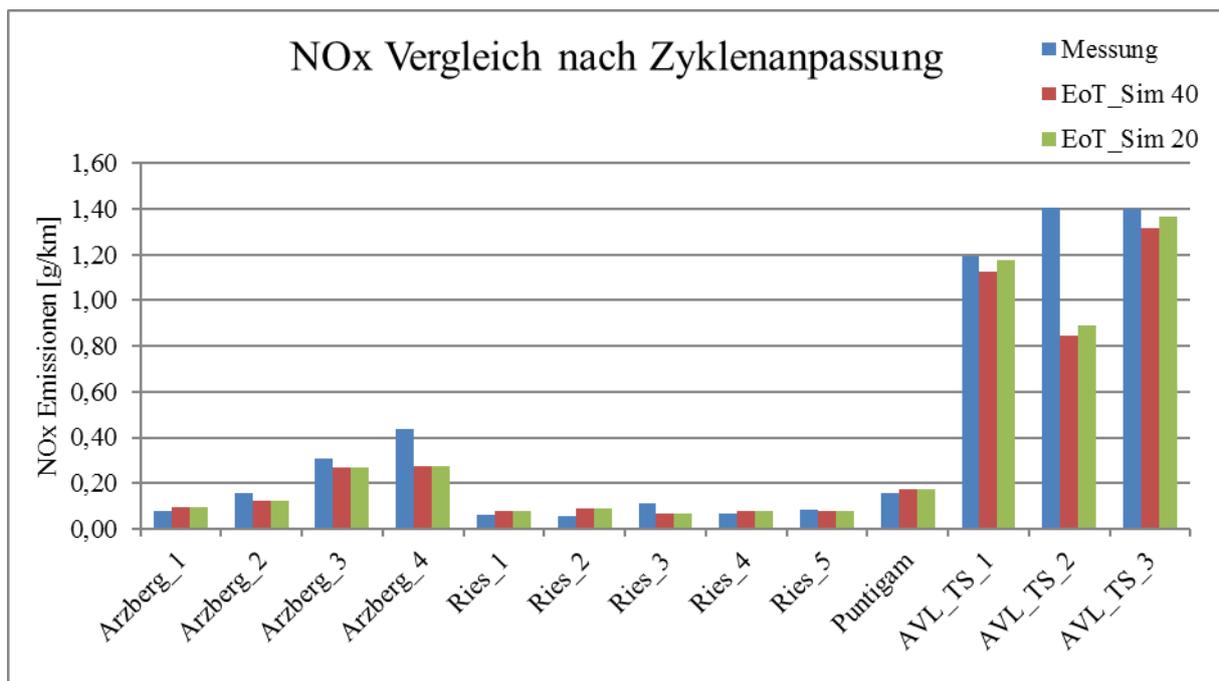
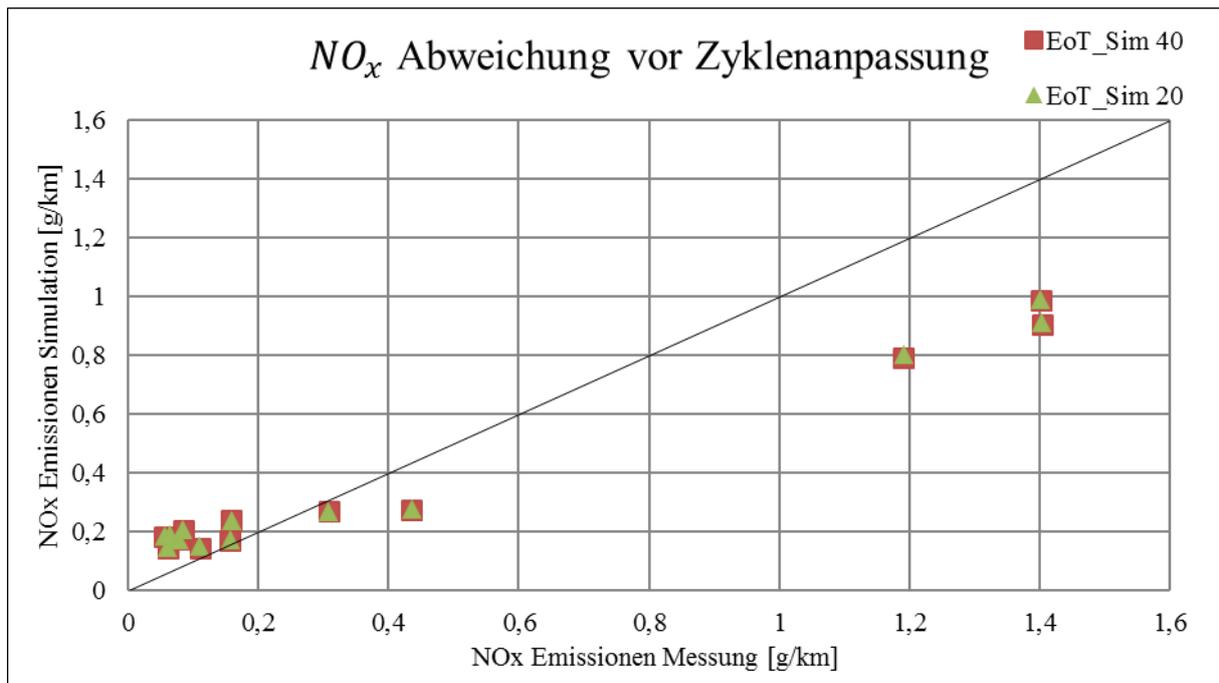
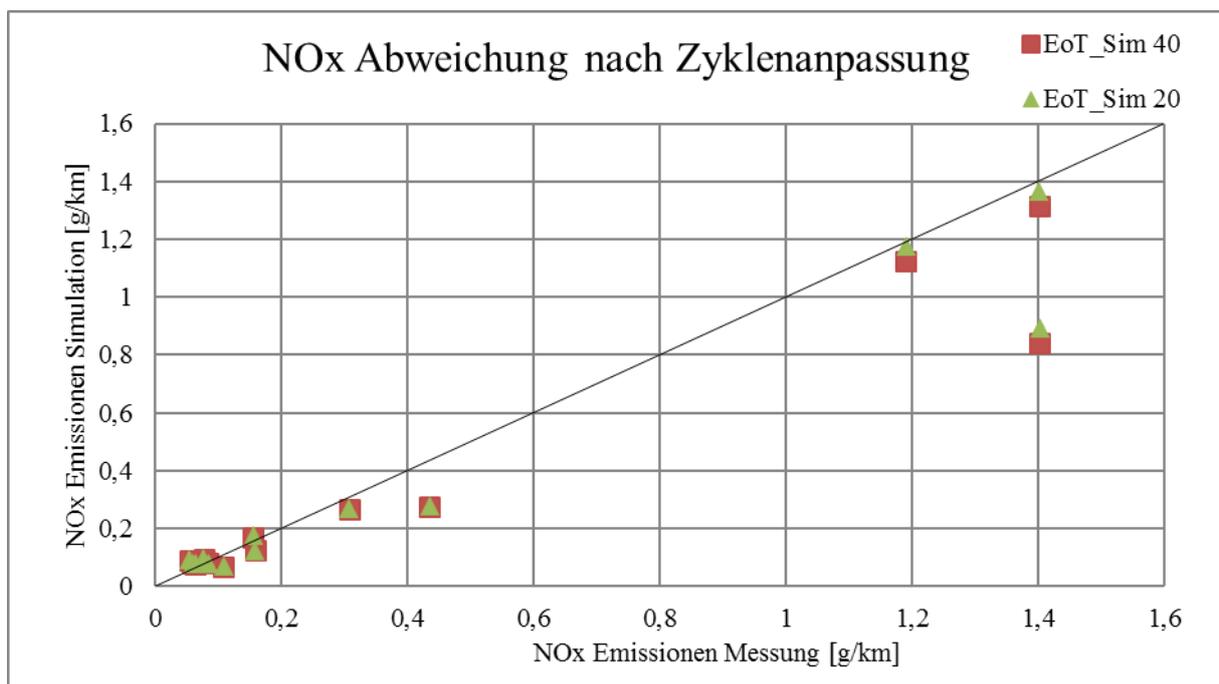


Abbildung 4-7: Zusammenfassung der NO_x-Messung und EoT-Simulation nach Zyklenanpassung

Abbildung 4-8: Abweichung der NO_x-Simulationen zur Messung vor ZyklenanpassungAbbildung 4-9: Abweichung der NO_x-Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung

Anhand der in Tabelle 4-1 beschriebenen Zyklen Auswahl wird im Folgenden der Einfluss der Interpolationsmethode und der Kennfeldraasterung bei EoT-Simulationen untersucht.

4.4.1 Interpolationsmethode

Auf Basis der in Kapitel 4.4 erläuterten Varianten ist der Einfluss unterschiedlicher Interpolationsmethoden in diesem Kapitel analysiert. Grundsätzlich gibt es in PHEM die Möglichkeit zwischen zwei Interpolationsmethoden zu wählen. Diese ist zum einen die sogenannte Delaunay-Triangulation und zum anderen die Shepard-Interpolationsmethode. Während bei der Delaunay-Triangulation Dreiecke für die Vernetzung und somit für die Interpolation verwendet werden, wird bei der Shepard-Interpolationsmethode mit Hilfe eines stützstellenabstandsabhängigen Ansatzes, der umliegende Kennfeldstützstellen über deren Abstand gewichten, interpoliert. Für nähere Beschreibung der beiden Interpolationsmethoden sei an dieser Stelle auf [36] und [37] verwiesen.

Zusätzlich zu den beiden grundsätzlichen Interpolationsmethoden wird eine Variante untersucht, bei der die aus PHEM extrapolierten Werte für Emissionskomponenten unterhalb der Schleppkurve null gesetzt werden. Da beim verwendeten Emissionskennfeld die Schleppkurve integriert ist, führen Änderungen der Emissionswerte unterhalb der Schleppkurve mit Delaunay-Interpolation zu keiner Änderung. Diese Variante wird daher nur für die Shepard-Interpolationsmethode untersucht. Es sind somit folgende Interpolationsmethoden verglichen:

- Delaunay-Triangulation (Del)
- Shepard-Interpolationsmethode (Shep)
- Shepard-Interpolationsmethode mit Änderung der Emissionen unterhalb der Schleppkurve auf null (Shep0)

Untersuchungen zwischen den genannten Interpolationsmethoden ergeben, dass mit der Delaunay-Interpolationsmethode in 10 von 12 Varianten⁸ die mittlere Abweichung am geringsten ist, während die Standardabweichung bei den untersuchten Varianten in 11 von 12 Varianten am geringsten ist. Weiters kann festgehalten werden, dass mit Shep0 sowohl die mittlere Abweichung als auch die Standardabweichung in allen untersuchten Varianten geringer gegenüber Shep ist.

Anhand der untersuchten Varianten kann (für den untersuchten Audi A4 Avant) zusammengefasst werden, dass mit der Delaunay-Triangulation die besten Ergebnisse erzielt werden. Eine Anpassung des Kennfeldes unterhalb der Schleppkurve führt bei der Wahl der Shepard-Interpolationsmethode in allen untersuchten Fällen zu Verbesserungen, sowohl in Bezug auf die mittlere Abweichung, als auch bei der Standardabweichung von Simulation zu Messung.

4.4.2 Kennfeldraasterung

Dieses Kapitel untersucht den Einfluss der Kennfeldraasterung (sowohl für Motorkennfeld, als auch für SCR-Konvertierungskennfeld) auf Simulationsergebnisse. Grundlage für die Entscheidungsfindung sind in diesem Fall für EoT-Simulationen alle 13 Messfahrten und bei EO-Simulationen 10 Messfahrten (da bei drei Zyklen keine Rohemissionsmessdaten vorhanden sind). Untersuchungen ergeben, dass eine feinere Rasterung des Motorkennfeldes nur geringfügige Änderungen bewirkt. Der Einfluss ist für einzelne Emissionskomponenten unterschiedlich und ist im Folgenden für EoT- und EO-Simulationen erläutert.

⁸ Die 12 untersuchten Varianten sind in Tabelle Tabelle B-1 zusammengefasst.

Einfluss der Kennfeldraasterung auf EoT-Simulationen

Bei der Simulation von CO_2 wird mit einer feineren Motorkennfeldraasterung in 7 von 13 Fällen ein besseres Ergebnis erzielt. Allerdings ist im Mittel betrachtet keine nennenswerte Verbesserung erzielbar. Ebenso kann bei der CO - und PN -Simulation mit einer feineren Motorkennfeldraasterung keine nennenswerte Verbesserung der Simulationsergebnisse erzielt werden. Lediglich bei NO - und NO_x -Simulationen wird eine mittlere Verbesserung um etwa 3 % durch die feinere Motorkennfeldraasterung erreicht. Neben den mittleren Abweichungen ist anzumerken, dass die Standardabweichung für alle Emissionskomponenten (außer CO_2) durch Verwendung einer feineren Motorkennfeldraasterung gegenüber einer groben Raasterung geringer und damit besser ist.

Gegenüber dieser geringfügigen Verbesserung, bedingt durch die Wahl einer feineren Motorkennfeldraasterung, stehen deutlich erhöhte Rechenzeiten. Basierend auf Abwägung dieser Vor- und Nachteile wird an dieser Stelle für EoT-Simulationen eine grobe Motorkennfeldraasterung (20x20) empfohlen. 20x20 bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Emissionskennfeld, aufgespannt über P_{norm} und n_{norm} , auf der P_{norm} - sowie n_{norm} -Achse in 20 Inkremente unterteilt ist. Daraus kann abgeleitet werden, dass zwischen den Stützstellen ein Abstand von $\Delta n_{norm}=0.06$ und $\Delta P_{norm}=0.07$ vorliegt.

Einfluss der Kennfeldraasterung auf EO-Simulationen

Für die Entscheidung der besten Motorkennfeldraasterung sind an dieser Stelle wie bereits vorhin erwähnt, nur die NO_x -Rohemissionen analysiert. In Abbildung 4-10 sind die mittleren Abweichungen der NO_x -Rohemissionssimulationen zu Messdaten dargestellt. Dieses Emissionskennfeld basiert auf allen vorhandenen Messdaten. Untersuchungen ergeben, dass bei der Rohemissionssimulation beim untersuchten Fahrzeug deutlich geringere Schwankungen auftreten, als bei der EoT- NO_x -Simulation

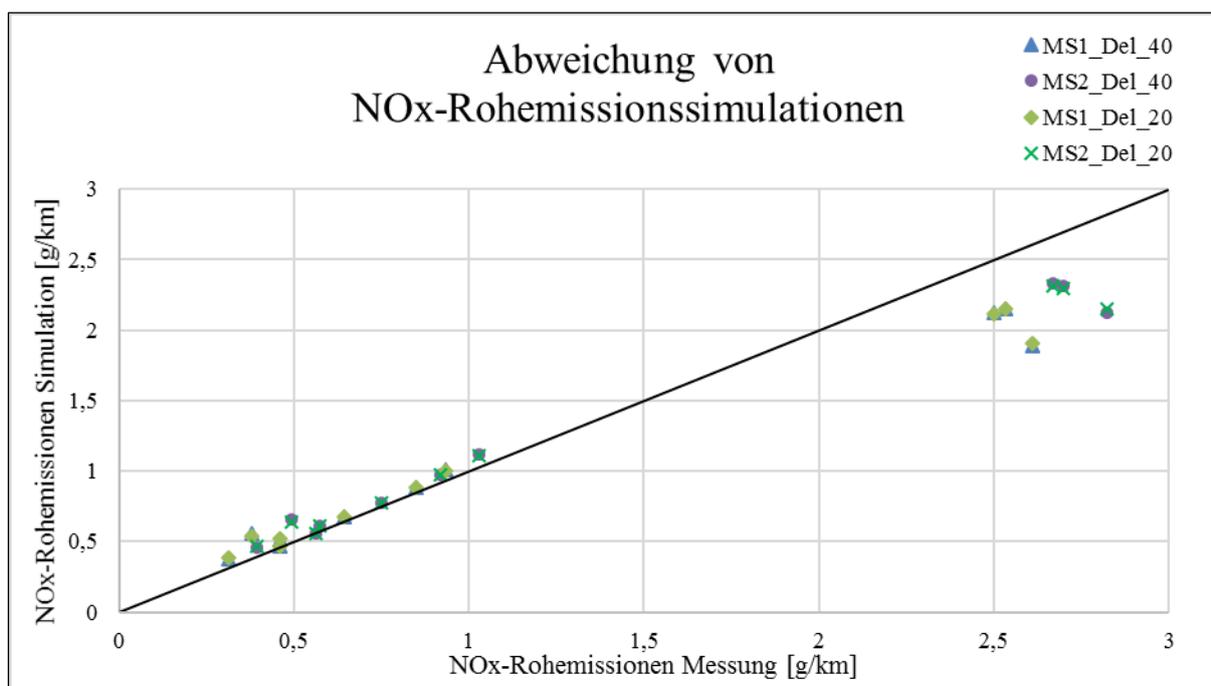


Abbildung 4-10: NO_x -Rohemissionsabweichung unterschiedlicher Simulationen

Bei beiden Simulationsvarianten mit grober und feiner Raasterung sowie jeweils mit und ohne Berücksichtigung von ND-AGR (MS1 bzw. MS2) werden unabhängig von der Variante kaum

Verbesserungen erreicht. Auch in Bezug auf die Standardabweichung kann keine nennenswerte Verbesserung durch feinere Motorkennfeldraasterung erzielt werden. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der deutlich höheren Rechendauer bei Verwendung feinerer Rasterungen wird an dieser Stelle auch für EO-Simulationen ein Motorkennfeld mit grober Rasterung (20x20) empfohlen.

Das SCR-Konvertierungskennfeld weist eine deutlich höhere Abhängigkeit von der gewählten Kennfeldraasterung auf. Die hier gewählten Rasterungen unterscheiden sich geringfügig von den Motorkennfeldraasterungen (grobe Rasterung: 20x20 und feine Rasterung mit doppelt so viel Stützstellen wie die grobe Rasterung). Insgesamt sind vier unterschiedliche SCR-Kennfelderstellungsvarianten, wie in Kapitel 4.3 erwähnt, untersucht worden.

Die mittleren Abweichungen und Standardabweichungen dieser Simulationen sind im Anhang unter Tabelle B-2 zusammengefasst. Daraus geht hervor, dass eine gröbere SCR-Kennfeldraasterung in allen untersuchten Varianten sowohl in Bezug auf mittlere Abweichung als auch auf Standardabweichung bessere Simulationsergebnisse liefert. Der Grund dafür ist aber die Methodik der Kennfelderstellung. Bei der Kennfeldglättung wird durch die Median-Bildung ein Teil der aus PHEM eingerasteten Messdaten nicht berücksichtigt bzw. „null“ gesetzt. Dies führt dazu, dass vor allem im Randbereich des SCR-Konvertierungskennfeldes bei gröberer Rasterung mehr Stützstellen vorhanden sind. Bei einer simulativen Überschätzung der NO_x-Rohemissionen (siehe Kapiteln 4.5.2 und 4.6.2) erreicht ein breiteres Konvertierungskennfeld bessere Ergebnisse. In Abbildung 4-11 sind die Stützstellen für grobe und feine Kennfeldraasterung exemplarisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit der groben Kennfeldraasterung ein größerer Bereich abgedeckt wird. Mit feinerer Kennfeldraasterung wird vor allem im niedrigeren Kennfeldbereich (Raumgeschwindigkeit zwischen 5-10 1/s; Temperatur bis 300 °C) ein etwas breiterer Bereich abgedeckt.

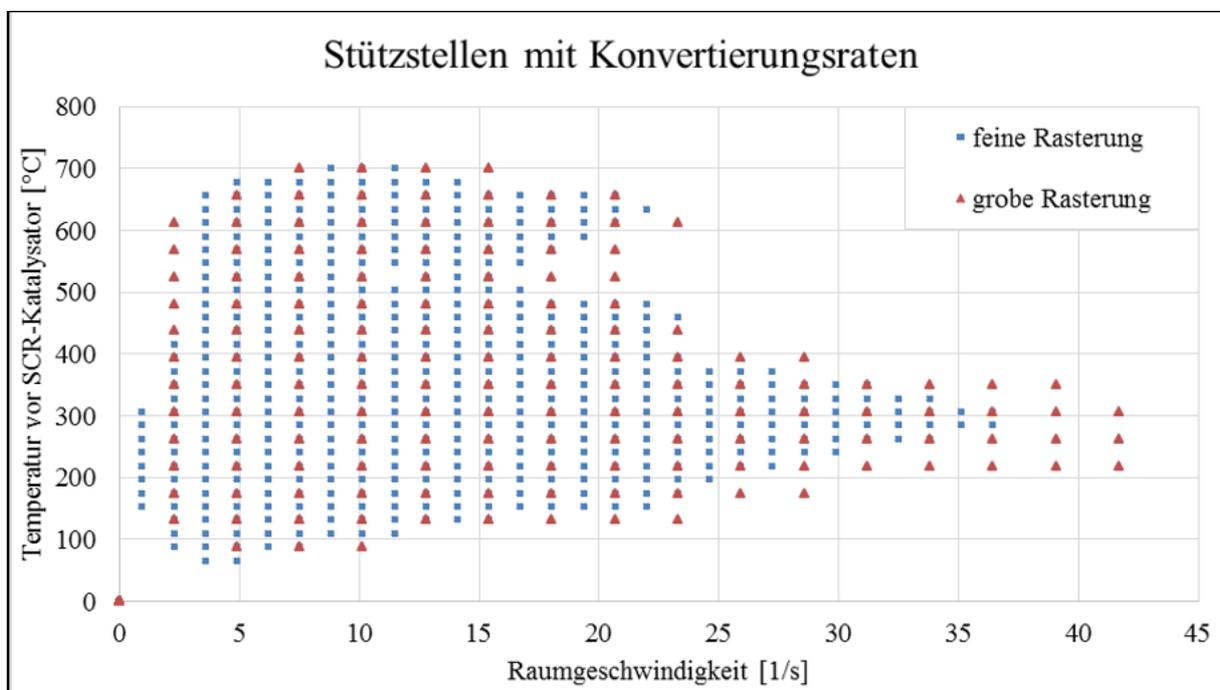


Abbildung 4-11: Vergleich verwendeter Kennfeldstützstellen bei grober und feiner SCR-Kennfeldraasterung

Weiters ist anzumerken, dass bei SCR-Konvertierungskennfelder mit feiner Kennfeldraasterung

Bereiche nicht-plausibler Konvertierungsverläufe auftreten können, wie in Abbildung 4-12 durch rote Kreise beispielhaft markiert ist.

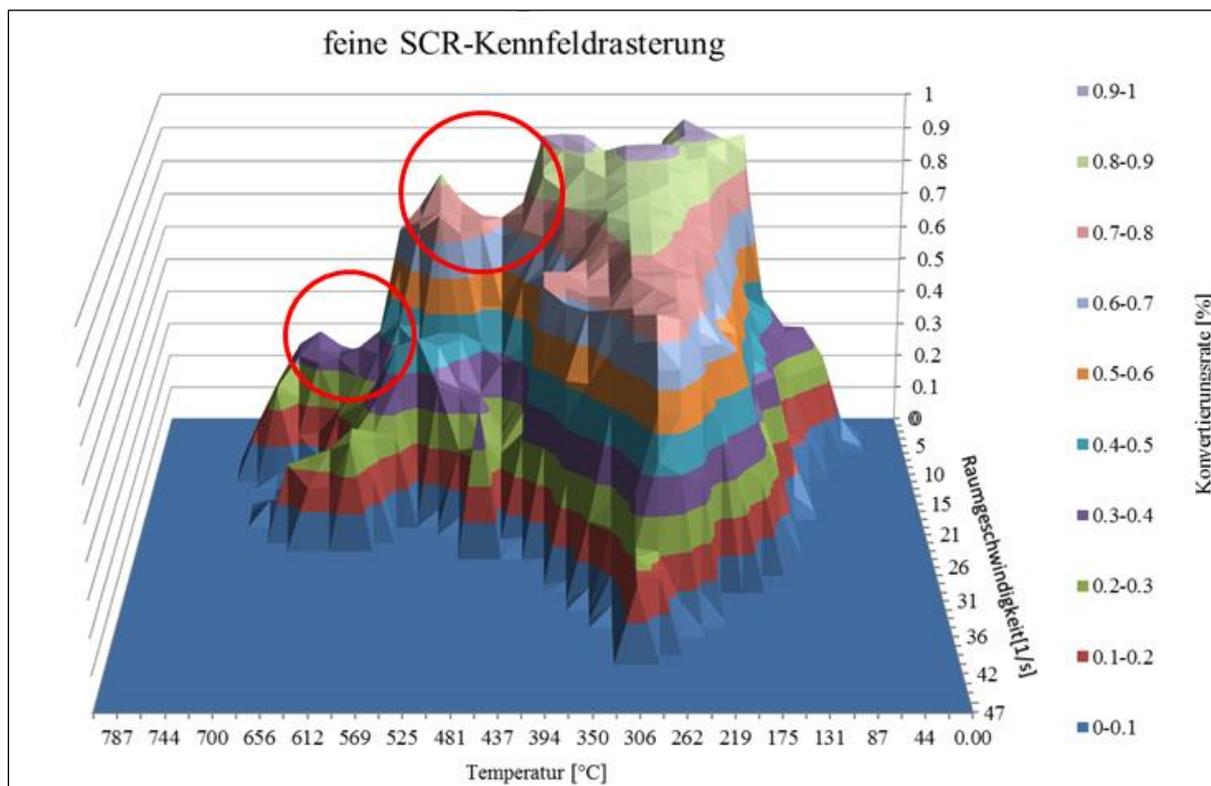


Abbildung 4-12: Auftreten nicht plausibler Konvertierungsverläufe bei feiner Kennfeldraasterung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für Motorkennfelder sowohl bei EoT- als auch bei EO-Simulationen grobe Motorkennfeldraasterungen verwendet werden können. Bei SCR-Konvertierungskennfeldern wird auf Basis der Messdaten des untersuchten Audi A4 Avant mit einer größeren Rasterung ein deutlich größerer Kennfeldbereich abgedeckt, was dazu führt, dass weniger NO_x -Emissionen simuliert werden. Bei Verwendung einer feineren Kennfeldraasterung treten nicht plausible Konvertierungsverläufe auf. Die in dieser Arbeit verwendeten Plausibilitätskriterien können im Zuge weiterer Arbeiten noch weiter modifiziert werden.

4.4.3 Systematische Anpassung des Abgasnachbehandlungssystems

Grundlage für Simulation des Abgasnachbehandlungssystems ist die 0-dimensionale Abbildung des Abgasstrangs. Dieses Modell kann fahrzeugspezifisch aus einzelnen Modulen zusammengesetzt werden. Für die Nachbildung des Abgasnachbehandlungssystems des untersuchten Audi A4 Avant sind folgende Module in Verwendung.

- Turbolader-Modul (TC)
- DOC-Modul
- Pipe-Modul (zur Abbildung eines Rohrstückes)
- SCR -Modul (DPF wird bzgl. seiner Funktion der Filterung nicht abgebildet, jedoch fließt seine thermische Masse für die korrekte Abbildung der Temperatursimulation mit ein.)

Im Wesentlichen wird zur Simulation der Temperatur jedes Modul durch eine Masse und Wärmeübergangparameter abgebildet. Dieser prinzipielle Ansatz ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

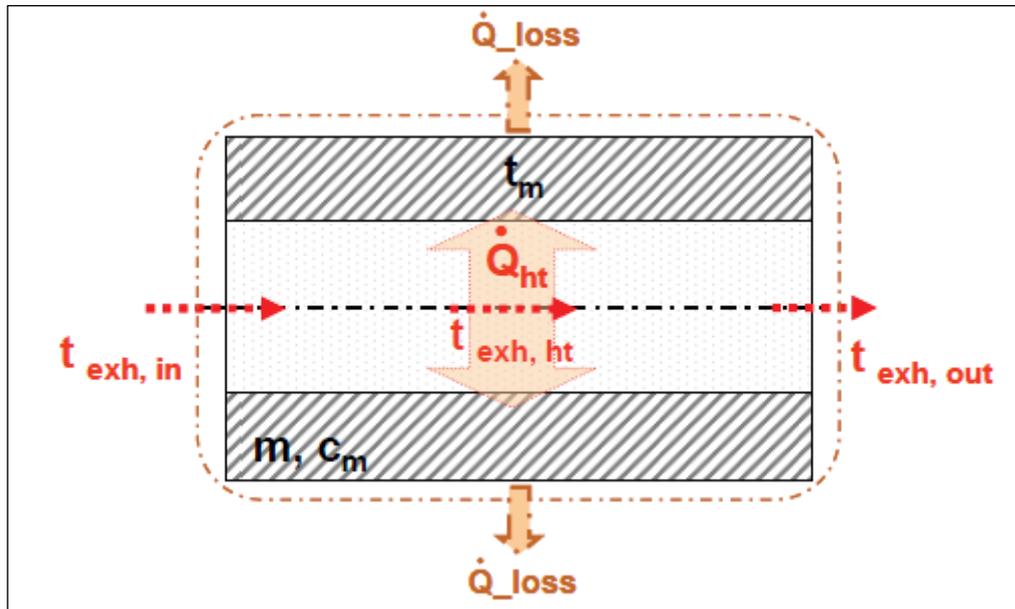


Abbildung 4-13: Prinzip Skizze des 0-dimensionalen Modellansatzes [38]

$t_{exh,in}$	[°C]	Abgastemperatur am Einlass der thermischen Masse
$t_{exh,out}$	[°C]	Abgastemperatur am Auslass der thermischen Masse
$t_{exh,ht}$	[°C]	Abgastemperatur im Modul
t_m	[°C]	Temperatur der thermischen Masse
m	[kg]	thermische Masse
c_m	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität der thermischen Masse
\dot{Q}_{ht}	[W]	Wärmestrom durch Konvektion
\dot{Q}_{loss}	[W]	Wärmestrom an Umgebung durch Strahlung

Für jedes Modul wird die Gastemperatur als Mittelwert der Temperatur bei Einlass und Auslass ermittelt. Weiters wird die Temperatur des Moduls und die theoretisch gemessene Temperatur bei einem Thermoelement nach dem Modul simuliert. Der systematische Aufbau des

Abgasnachbehandlungssystem vom Audi A4 Avant, sowie die simulierten Temperaturen sind in Abbildung 4-14 beschrieben.

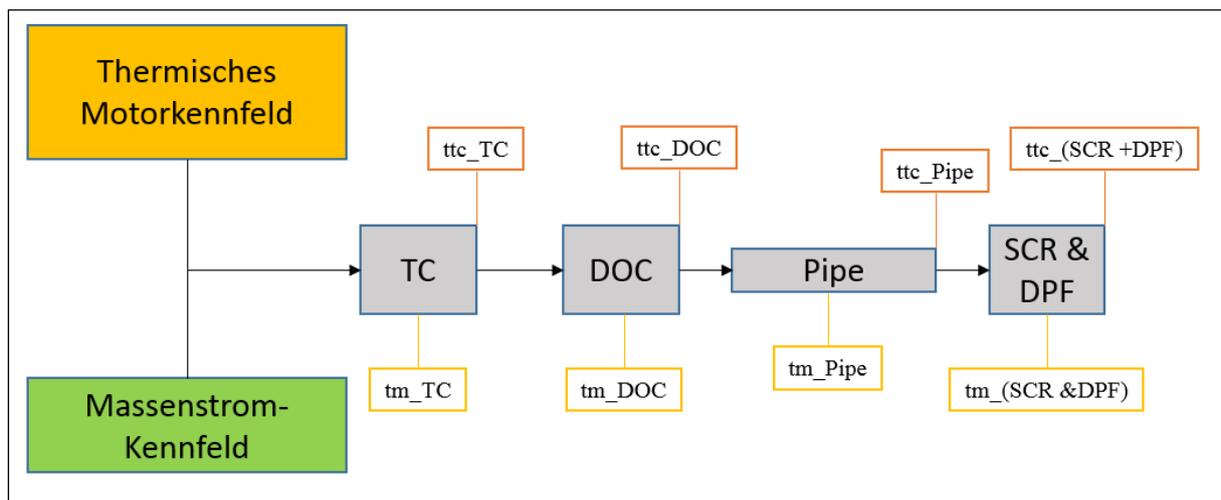


Abbildung 4-14: Prinzip Skizze des 0-dimensionalen Abgasnachbehandlungssystems

Neben geometrischen Daten werden auch zwei Kennfelder, jeweils für Temperatur und Massenstrom zur Simulation benötigt. Das im Zuge dieser Arbeit verwendete Temperaturkennfeld stammt von Messungen eines segmentähnlichen Fahrzeuges mit baugleichen Motor (Skoda Superb).

Weiters wird ein Massenstromkennfeld benötigt. Dieses kann direkt aus den Messdaten der RDE-Fahrten abgeleitet werden.

Um bessere Simulationsergebnisse erzielen zu können, ist eine Anpassung diverser Parameter des Abgasnachbehandlungsmodells in PHEM, im Folgenden als EXS (Exhaust-System) bezeichnet, sinnvoll. Im Wesentlichen sind zwei unterschiedliche Optimierungsmethoden für das EXS untersucht worden. Bevor mit der Optimierung des EXS begonnen werden kann, sind einige Basisdaten, die durch diverse Abmessungen/Eigenschaften vorgegeben sind, zu definieren. Diese Parameter sind u.a.: [35], [38]

- Temperaturen der Module zu Beginn der Simulation
- Massen der Module
- Außenfläche von Katalysator-Modulen
- Durchmesser, Schutz- und Rußschichten von Thermoelementen
- Wärmekapazitäten der Katalysator-Module
- Strömungsverhalten im jeweiligen Modul

Damit Parameter im EXS-File für unterschiedliche Fahrzeugkategorien verwendet werden können, werden einige Eingangsgrößen mit der maximalen Motorleistung normiert. Das sind z.B. Katalysatorvolumen und die Massen der einzelnen Module. [35], [38]

Abschätzung des Strömungsverhaltens

Während Starttemperaturen und geometrische Daten durch Abmessung des Abgasnachbehandlungssystems festgelegt werden, ist das Strömungsverhalten im jeweiligen

Modul abzuschätzen. Konkret muss zwischen laminarem und turbulentem Strömungsverhalten unterschieden werden. Wie auch in Kapitel 2.4.1 wird für die Abschätzung des Strömungsverhaltens die Reynoldszahl verwendet. Die kritische Reynolds-Zahl unterscheidet sich bei den im Abgasnachbehandlungssystem vorliegenden Rohrströmungen allerdings von Plattenströmungen und beträgt in etwa 2040 laut [39]. Die Reynolds-Zahl wird für Rohrströmungen nach Gleichung (4-6) ermittelt. Diese kann mit Hilfe der idealen Gasgleichung und dem Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Geschwindigkeit zu Gleichung (4-11) umgeformt werden.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\eta} \quad (4-6)$$

$$p * \dot{V} = \dot{m} * R * T \quad (4-7)$$

$$p * \frac{1}{\rho} = R * T \quad (4-8)$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (4-9)$$

$$A = D^2 * \frac{\pi}{4} \quad (4-10)$$

$$Re = \rho * \frac{\dot{m}}{\rho * D^2 * \frac{\pi}{4}} * D * \frac{1}{\eta} = \frac{4 * \dot{m}}{D * \pi * \eta} \quad (4-11)$$

Re	[-]	Reynolds-Zahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Fluids
v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
D	[m]	Durchmesser des durchströmten Rohrquerschnitts
η	[kg/(ms)]	dynamische Viskosität des strömenden Fluids
p	[Pa]	vorliegender Druck
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
R	[J/(kgK)]	Gaskonstante
T	[K]	Temperatur des Fluids

A	[m ²]	Querschnittsfläche des durchströmten Rohres
$\pi = 3,14$	[-]	mathematische Konstante, Kreiszahl

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass die Reynolds-Zahl direkt weder von der Temperatur noch von der Dichte des Abgases abhängig ist. Da beim Versuchsfahrzeug allerdings Temperaturen zwischen 100 °C und 700 °C gemessen wurden, und nach [40] die dynamische Viskosität der meisten Stoffe abnimmt und damit eine Erhöhung der Reynolds-Zahl bedeuten würde, wird die dynamische Viskosität des Abgases an dieser Stelle näher untersucht. Die dynamische Viskosität des Abgases hängt von folgenden Parametern ab: [41], [42], [43]

- Zusammensetzung des Gemisches
- Molare Masse der auftretenden Abgaskomponenten
- Viskosität der Reinstoffe
- bei polaren Gemischen zusätzliche Abhängigkeit von
 - Dipol-Momenten
 - Siedepunkten und
 - Dichte bei Siedepunkten

Für die Berechnung der dynamischen Viskosität wird an dieser Stelle die dynamische Viskosität einiger Reinstoffe, die im Abgas vorkommen, nach der sogenannten Wilke-Funktion berechnet. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Kohlen-Wasserstoff-Moleküle werden diese hier nicht berücksichtigt. Basierend auf empirischen Untersuchungen wird die dynamische Viskosität der Reinstoffe nach einem Polynom vierter Ordnung bestimmt. Die dafür notwendigen vier Stoffkonstanten sind dem CFD-Programm der AVL List GmbH (Fire) entnommen. Die dynamische Viskosität wird mit diesen Konstanten für die einzelnen Reinstoffe nach Gleichung (4-12) in Abhängigkeit der Temperatur berechnet. Die dynamische Viskosität des Gemisches wird nach Gleichungen (4-13) und (4-14) berechnet. [42], [43]

$$\ln(\eta_k) = \sum_{n=1}^N a_{n,k} * [\ln(T)]^{n-1} \quad (4-12) [43]$$

$$\eta = \sum_{k=1}^K \frac{X_k * \eta_k}{\sum_{j=1}^K X_j * \phi_{kj}} \quad (4-13) [43]$$

$$\phi_{kj} = \frac{1}{\sqrt{8}} * \left(1 + \frac{M_k}{M_j}\right)^{-\frac{1}{2}} * \left[\left(1 + \frac{\eta_k}{\eta_j}\right)^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{M_j}{M_k}\right)^{\frac{1}{4}} \right]^2 \quad (4-14) [43]$$

η_k	[Pas]	dynamische Viskosität der Komponente k
$a_{n,k}$	[Pas/ T^{n-1}]	stoffspezifische Konstante
X_k	[-]	Mol-Verhältnis der Komponente k
X_j	[-]	Mol-Verhältnis der Komponente j
M_k	[kg/kmol]	Molare Masse der Komponente k
M_j	[kg/kmol]	Molare Masse der Komponente j
ϕ_{kj}	[-]	Mischungsvariable für Komponenten k und j

In Abbildung 4-15 ist der Verlauf der dynamischen Viskosität von Reinstoffen, die im Abgas vorliegen, dargestellt. Man erkennt, dass mit zunehmender Temperatur die Viskosität der Abgaskomponenten steigt. Damit sinkt bei gleichbleibendem Massenstrom die Reynoldszahl mit zunehmender Temperatur (siehe Gleichung (4-11)).

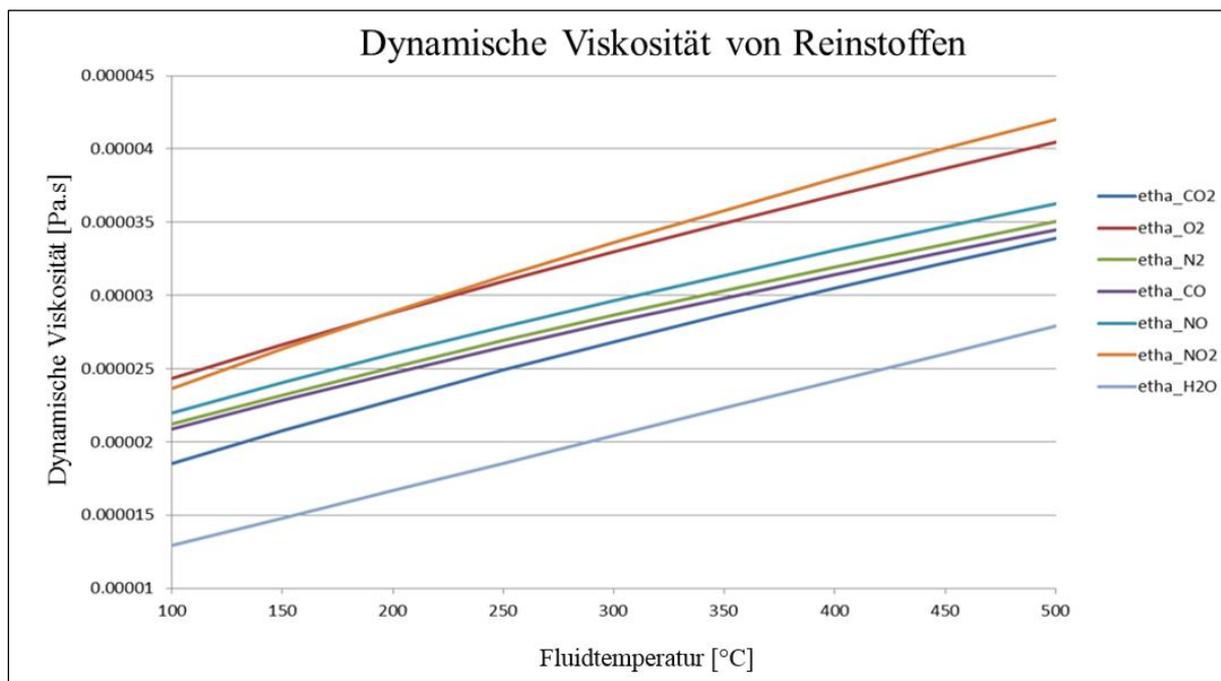


Abbildung 4-15: Dynamische Viskosität von Reinstoffen in Abhängigkeit der Temperatur

Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität ist die Reynolds-Zahl für zwei Bereiche im EXS untersucht. Für das Turbolader-Modul liegt aufgrund des relativ großen Rohrdurchmessers (50 mm) in fast allen Betriebspunkten turbulentes Strömungsverhalten vor. Bei Katalysatoren kann der Durchmesser der einzelnen durchströmten Kanäle über die Anzahl der Kanäle pro Fläche, in der Regel 300 cpsi, ermittelt werden. Dadurch ergibt sich für Katalysatoren in de facto allen Betriebspunkten ein laminares Strömungsverhalten, da die Reynolds-Zahl, je nach Temperatur und Massenstrom, deutlich unter der kritischen Reynoldszahl liegt.

Neben dem Strömungsverhalten im Turbolader-Modul und in Katalysator-Modulen ist das Umströmungsverhalten von Katalysatoren zur Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs durch einen zusätzlichen Parameter berücksichtigt. Dieser wird in Abhängigkeit der Messmethode (RDE- oder Rollenprüfstandsmessungen) und der Einbauposition des Katalysators eingestellt⁹.

Nach Definition aller Parameter (Masse, Geometrie, Umströmung, Abschätzung des Strömungsverhaltens, etc.) kann mit der methodischen Optimierung des EXS begonnen werden.

Methodische Optimierung von Parametern im EXS-File

Voraussetzung zur Anpassung der Parameter sind vorhandene Messdaten zu Temperaturen, die in Abbildung 4-14 mit „*ttc*“ (temperature of thermocouple) beschrieben sind. Zur Optimierung der einzelnen Parameter wird der simulierte Temperaturverlauf mit dem gemessenen Temperaturverlauf an der jeweiligen Position verglichen. Bildet man die absolute sekundliche Differenz dieser Verläufe und bildet über diese den Mittelwert, so entsteht ein einziger Parameter, den es zu minimieren gilt. Dieser Parameter wird im Folgenden als Optimierungskriterium bezeichnet. Das weitere Optimierungsverfahren ist im Wesentlichen ein Iterationsprozess.

Beginnend beim Turbolader-Modul wird jeweils ein Parameter, der nicht durch vorangegangene Definitionen festgelegt ist, verändert und die Simulation erneut durchgeführt. Sinkt das vorher definierte Optimierungskriterium, so liegt eine Verbesserung des 0-dimensionalen Modells vor und der Parameter kann in die gleiche Richtung weiter angepasst werden. Eine Erhöhung des Optimierungskriteriums bedeutet eine Verschlechterung des Simulationsmodells. Der jeweilige Parameter muss dann in die entgegengesetzte Richtung angepasst werden. Wenn für einen Parameter ein Optimum gefunden ist, kann das gleiche Verfahren für weitere Parameter des EXS-Files angewandt werden, wobei angepasste Parameter nicht mehr verändert werden. Folgende Parameter des EXS-Files können für diese Methode verwendet werden¹⁰:

- Normalised heat transfer factor
- Normalised factor heat loss radiation
- Thickness of soot film on thermocouple
- Factor A for convective heat transfer
- Factor k for linear relation between temperature of mass and temperature of cat
- Factor d for linear relation between temperature of mass and temperature of cat

Im Zuge dieser Arbeit ist aber kein automatischer Algorithmus, der dieses Optimierungsverfahren abbildet, ausgearbeitet, sondern nur die Methodik aufgezeigt und untersucht worden. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass bei der Erstellung eines solchen Algorithmus Plausibilitätsgrenzen für einzelne Parameter definiert werden sollten.

⁹ Bei Messungen am Rollenprüfstand keine Umströmung angenommen (factor B for convective heat transfer = 0); der Faktor B wird auch 0 gesetzt, wenn Straßenfahrt simuliert wird und der SCR motornah eingebaut ist.

Bei Messungen im Straßenbetrieb und motorferner Einbausituation gilt: factor B for convective heat transfer = 0,21

¹⁰ Notation entspricht der im EXS-File

Beispielsweise sollte der Faktor für konvektiven Wärmeübergang im Katalysator (Factor A for convective heat transfer) nicht 0 gesetzt werden können, da dies bedeutet, dass das Modul nicht durch den Abgaswärmestrom aufgeheizt werden kann.

Zudem ist anzumerken, dass Fahrzeuge unterschiedliche Heizstrategien u.a. durch AGR-Regelungen aufweisen können. Wie aus Kapitel 3.4.2 und 3.4.3 hervorgeht, verwendet der untersuchte Audi A4 Avant in unterschiedlichen Situationen verschiedene AGR-Strategien, was den Temperaturverlauf des Abgasnachbehandlungssystems beeinflussen kann.

Da PHEM bis dato AGR-Massenströme in der Simulation nicht aktiv berücksichtigt, gilt es die Optimierung des EXS-Files unter Berücksichtigung von möglichst vielen Messdaten durchzuführen um im Durchschnitt die Fahrten gut simulieren zu können.

4.5 Simulation der RDE-Fahrten und Validierung mit Messdaten

Basierend auf den Erkenntnissen, die in Kapitel 4.4.1 erläutert sind, werden im Folgenden Simulationsergebnisse mit der Delaunay-Triangulations-Interpolationsmethode mit Messungen verglichen. Für die Emissionskennfelderstellung werden alle RDE-Messdaten verwendet. Sowohl bei EoT-Simulationen, als auch bei EO-Simulationen sind alle vorhandenen Messdaten, mit Ausnahme der Kaltstartanteile, zur Kennfelderstellung herangezogen worden. Als Kaltstartanteile werden jene Messbereiche verstanden, bei denen die Kühlwassertemperatur unter 70 °C liegt. Zudem wird für beide Simulationsvarianten das CO_2 -Kennfeld des segmentähnlichen Fahrzeugs Skoda Superb zur Emissionskennfelderstellung verwendet, wie in Kapitel 4.2 erläutert.

Neben Simulationsergebnissen mit grober Kennfeldraasterung, womit bessere Ergebnisse erzielt werden (siehe Kapitel 4.4.2), werden auch Ergebnisse mit feiner Motorkennfeld- und SCR-Kennfeldraasterung gezeigt. Begonnen wird jeweils mit der groben Rasterungsvariante.

4.5.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung in PHEM

Bei den folgenden Säulendiagrammen sind Messergebnisse blau, Simulationsergebnisse mit feiner Motorkennfeldraasterung rot, und Simulationsergebnisse mit grober Kennfeldraasterung grün dargestellt. Die Abweichungen der einzelnen Simulationen zu Messungen sind mit roten Quadraten (feine Motorkennfeldraasterung) und grünen Dreiecken (grobe Motorkennfeldraasterung) dargestellt. Die exakten Zahlenwerte einzelner Messungen und Simulationen können Tabelle C-1 und Tabelle C-2 entnommen werden.

Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17 zeigen den Vergleich zwischen Messung und Simulation der CO_2 -Emissionen für alle RDE-Zyklen. Die mittlere Abweichung über alle Zyklen mit -0,98 % ist sehr gering. Man kann somit nochmals festhalten, dass das angepasste generischer CO_2 -Kennfeld eines segmentähnlichen Fahrzeuges auch für den untersuchten Audi A4 Avant gut geeignet ist.

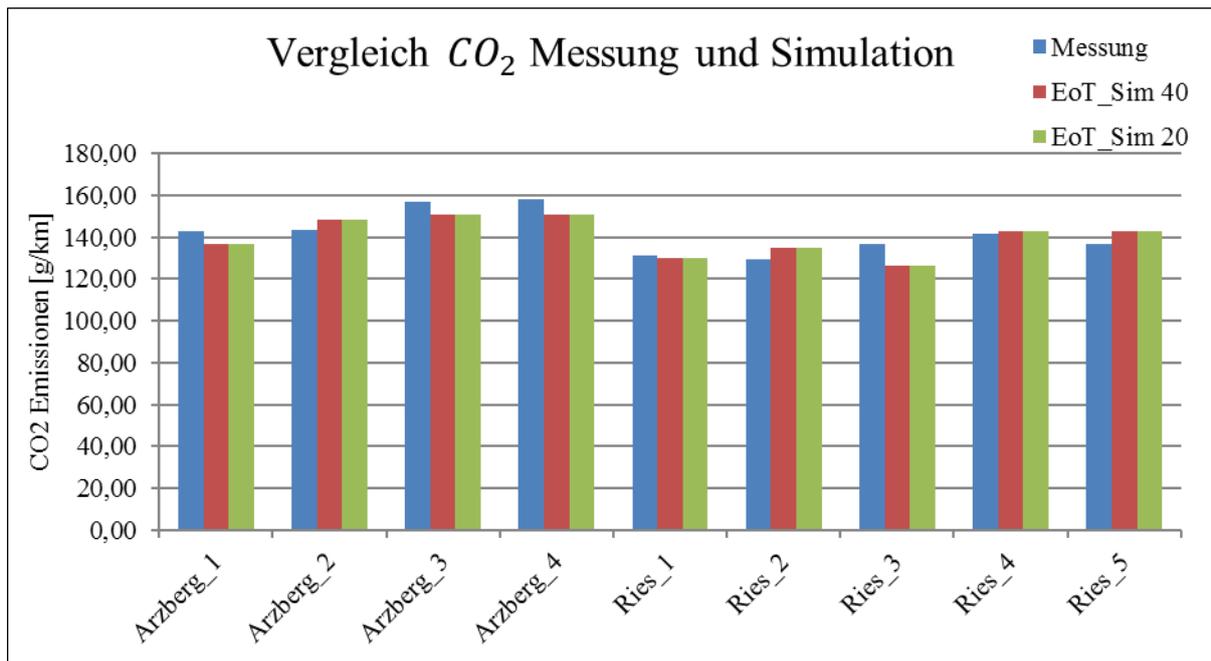
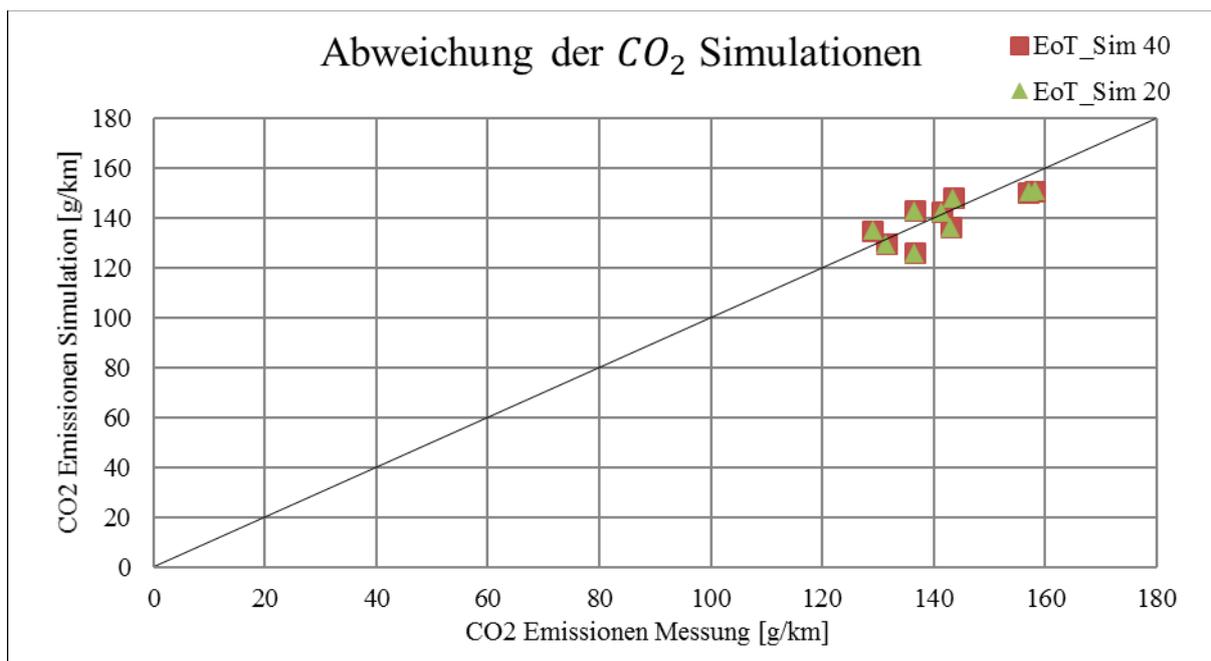
Abbildung 4-16: CO₂-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-MessungAbbildung 4-17: Abweichung der CO₂-EoT-Simulation zur PEMS-Messung

Abbildung 4-18 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten CO-Emissionen, Abbildung 4-19 die dazugehörigen Abweichungen. Hier sind mit 31 % mittleren Abweichungen (für grobe und feine Rasterung) deutlich größer als bei der CO₂-Simulation.

Die CO-Emissionen und die relativ hohen Abweichungen der Simulationen zu den Messungen wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht.

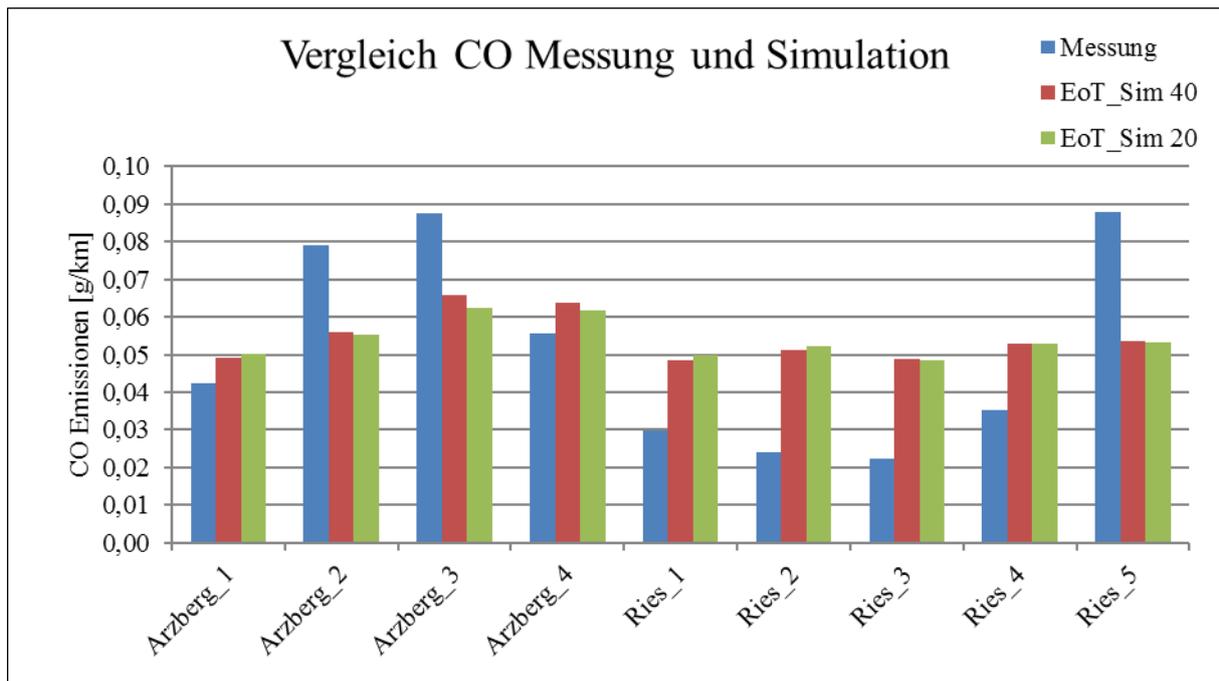


Abbildung 4-18: CO-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung

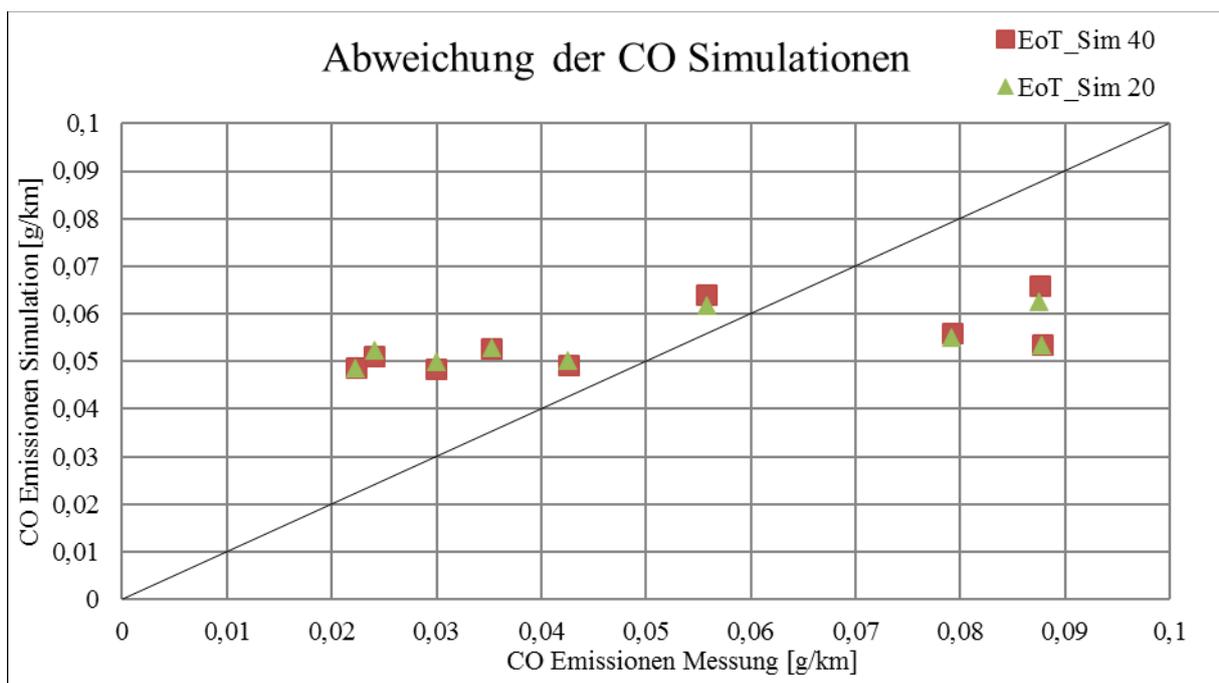


Abbildung 4-19: Abweichung der CO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung

In Abbildung 4-20 bis Abbildung 4-23 sind die Simulationsergebnisse und Abweichungen von NO_x - und NO -Emissionen dargestellt. Man erkennt, dass sowohl bei den Ries-Zyklen als auch bei den Arzberg-Zyklen hohe Abweichungen vorliegen. Zudem ist auffallend, dass lediglich bei den beiden Extremfahrten (Arzberg 3 & 4) zu wenig NO_x -Emissionen simuliert werden. Im Mittel werden bei feiner und grober Motorkennfeldrastrerung um 93 % und 98 % höhere NO_x -

Emissionen simuliert. Bei *NO* werden um 81 % und 85 % mehr Emissionen simuliert, als gemessen wurden. Es ist festzustellen, dass durch Berücksichtigung der Extremfahrten eine deutliche Erhöhung des Kennfeldniveaus stattfindet. Wie in Kapitel 4.4.1 gezeigt ist, kann durch Adaption der Zyklen Auswahl eine deutliche Verbesserung der Simulationsergebnisse erreicht werden. Für die EoT-Simulation ist es sinnvoll, Extremfahrten nicht bei der Kennfelderstellung zu berücksichtigen, da ansonsten im Durchschnitt deutlich mehr Stickoxidemissionen simuliert werden, als tatsächlich auftreten. Für Extremfahrten ist es im Umkehrschluss sinnvoll, Kennfelder nur aus Messdaten von extremen Zyklen miteinzubeziehen.

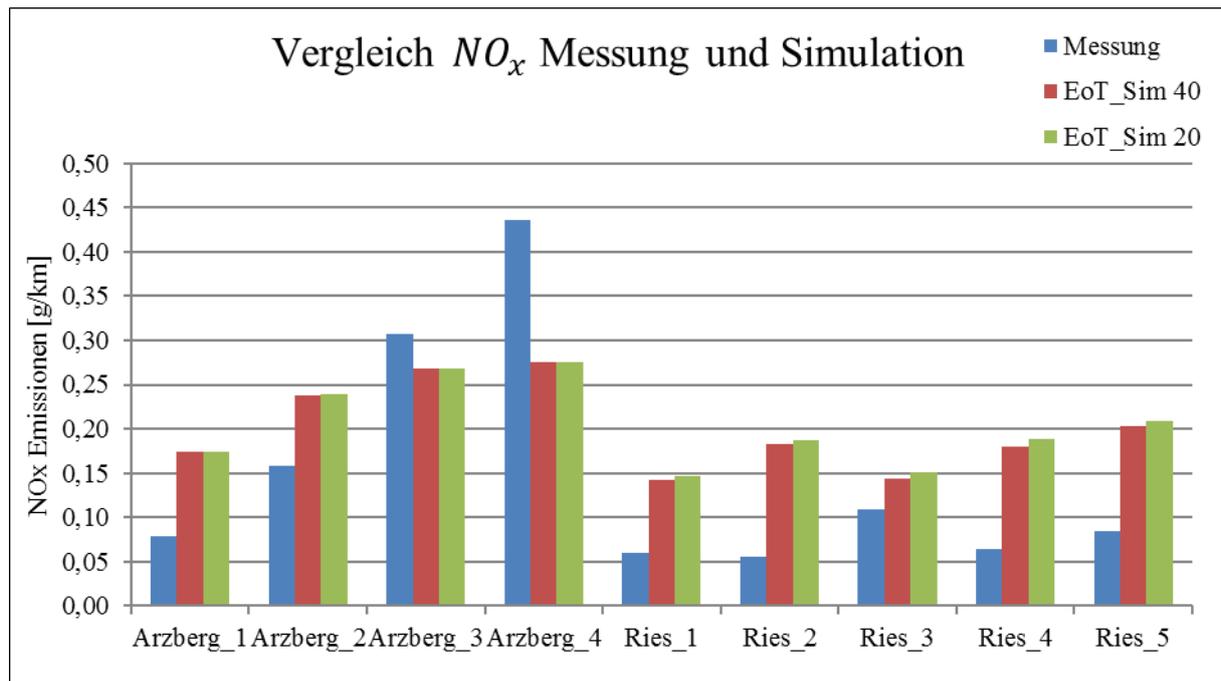


Abbildung 4-20: NO_x-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung

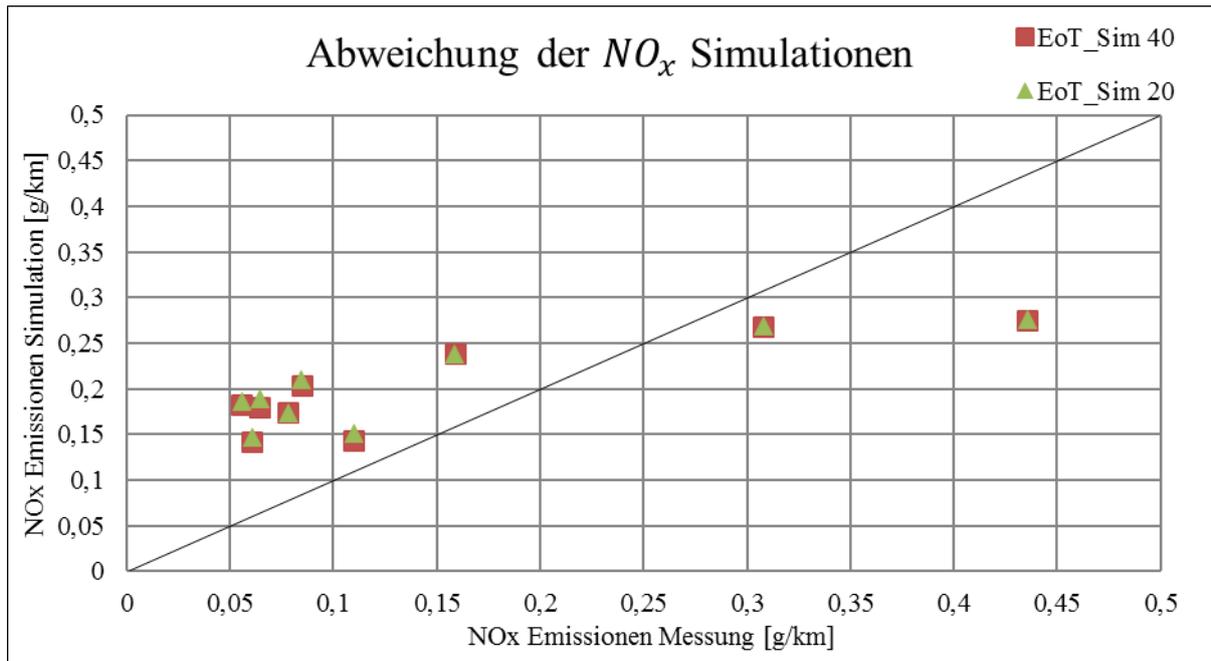
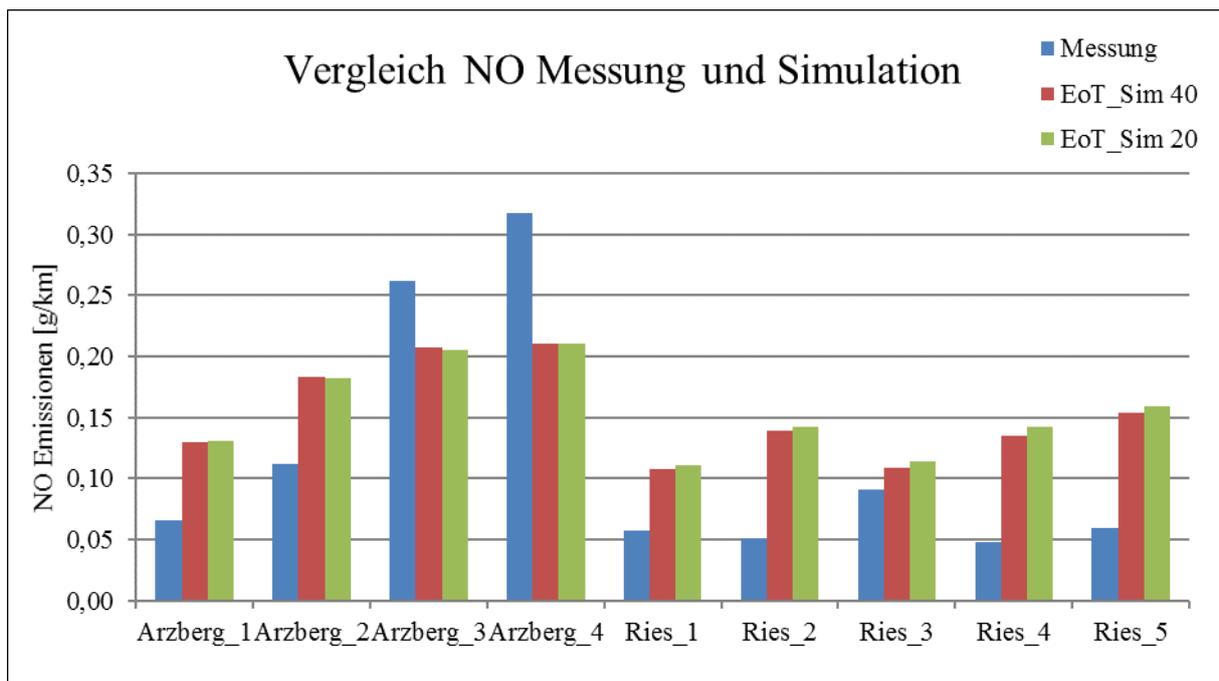
Abbildung 4-21: Abweichung der NO_x -EoT-Simulationen zur PEMS-Messung

Abbildung 4-22: NO-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung

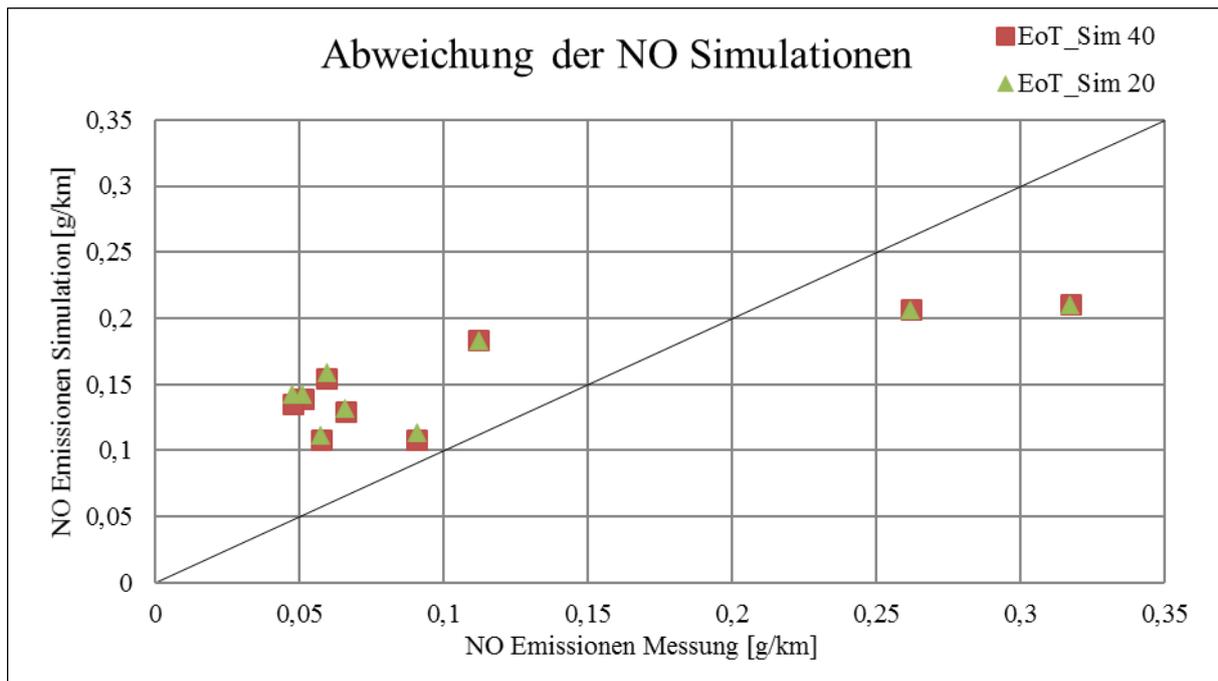


Abbildung 4-23: Abweichung der NO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung

Unter Betrachtung von Abbildung 4-24 und Abbildung 4-25 wird deutlich, dass die Simulation der Partikel stark von den Messergebnissen abweicht. Grund dafür sind die beiden Partikelfilterregenerationszyklen Arzberg_3 und Ries_3. Es kann festgehalten werden, dass unter Vernachlässigung dieser beiden Zyklen bei der Motorkennfelderstellung deutlich bessere Simulationsergebnisse erreicht werden können.

Es wird an dieser Stelle empfohlen, für die Simulation der Partikelanzahl unterschiedlicher Fahrzeuge Zyklen mit Partikelfilterregeneration nicht bei der Motorkennfelderstellung zu berücksichtigen und die höheren *PN*-Emissionen in Folge von DPF-Regenerationen als Post-Processing aufzuschlagen.

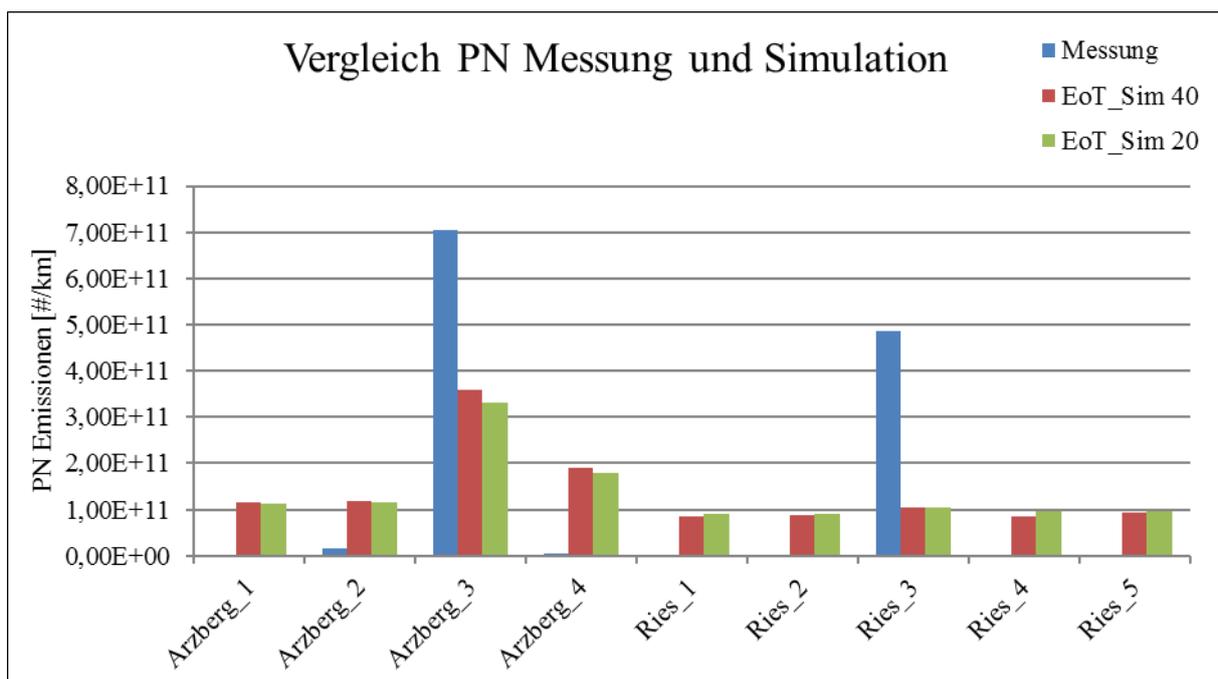


Abbildung 4-24: PN-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung

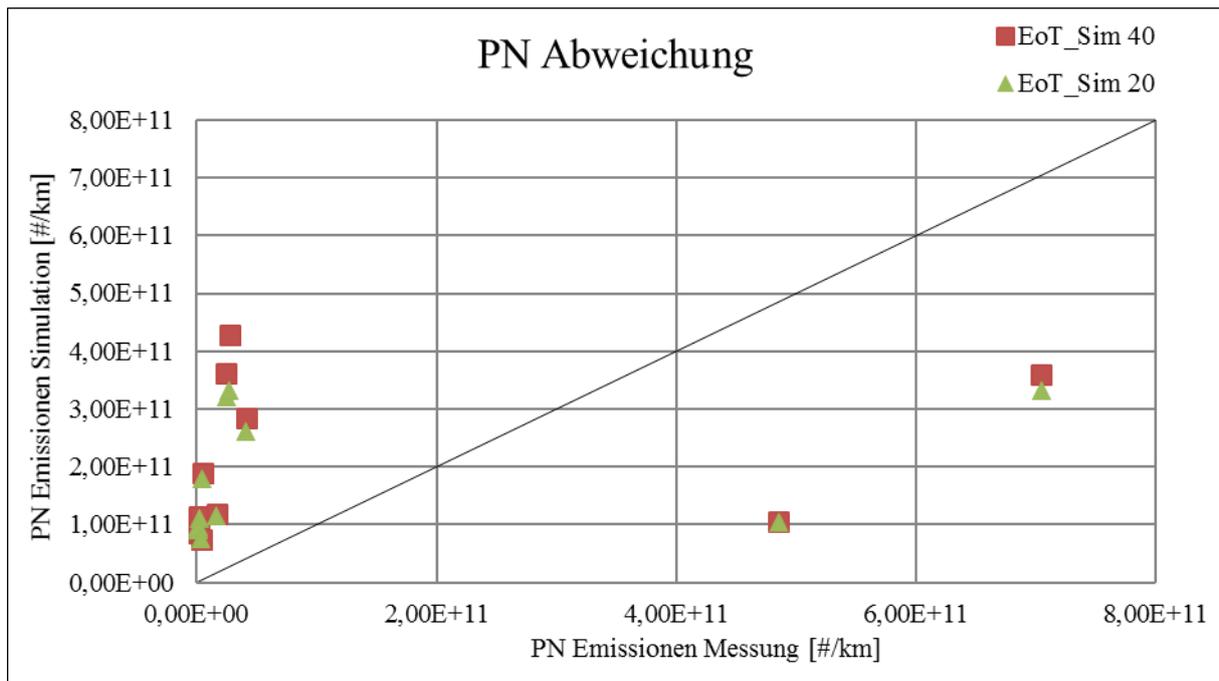


Abbildung 4-25: Abweichung der PN-EoT-Simulation zur PEMS-Messung

4.5.2 Ergebnisse mit Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems in PHEM

Die EO-Simulation unterscheidet sich gegenüber der EoT-Simulation durch die Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems für die Stickoxide in der Simulation. Ergebnis der EO-Simulation ist ebenfalls das Emissionsniveau am Auspuffende. Die restlichen Emissionskomponenten ändern sich, wie bereits erwähnt, nicht und sind daher an dieser Stelle nicht erneut gezeigt. Im Folgenden werden allerdings zwei unterschiedliche Massenströme zur Emissionssimulation verwendet. Bei einer Simulationsvariante wird der beim PEMS gemessene Massenstrom zur Emissionskennfelderstellung verwendet. Bei der zweiten Variante wird neben dem gemessenen Massenstrom beim PEMS auch der gemessene ND-AGR-Massenstrom berücksichtigt. Für die Simulation der Stickoxide wird in diesem Fall nach der PHEM-Simulation eine Massenstromkorrektur auf Basis der in Kapitel 3.4.1 ermittelten Korrelation zwischen dem ND-AGR-Massenstrom und dem Massenstrom vom PEMS vorgenommen, um die Simulationsergebnisse mit den Messwerten am Auspuffende vergleichen zu können. Wie in Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 zu sehen ist, wird mit Berücksichtigung des ND-AGR Massenstroms eine durchschnittlich höhere Temperatur simuliert, was durch den Anstieg des konvektiven Wärmeübergangs begründet werden kann. Weiters ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen grober und feiner Motorkennfeldraasterung vernachlässigbar ist. Die Abweichungen der mittleren Temperaturen sind in allen Zyklen, mit Ausnahme der beiden Regenerationszyklen niedrig. Weiters sei an dieser Stelle erwähnt, dass für beide Simulationsvarianten das gleiche EXS-File verwendet wurde.

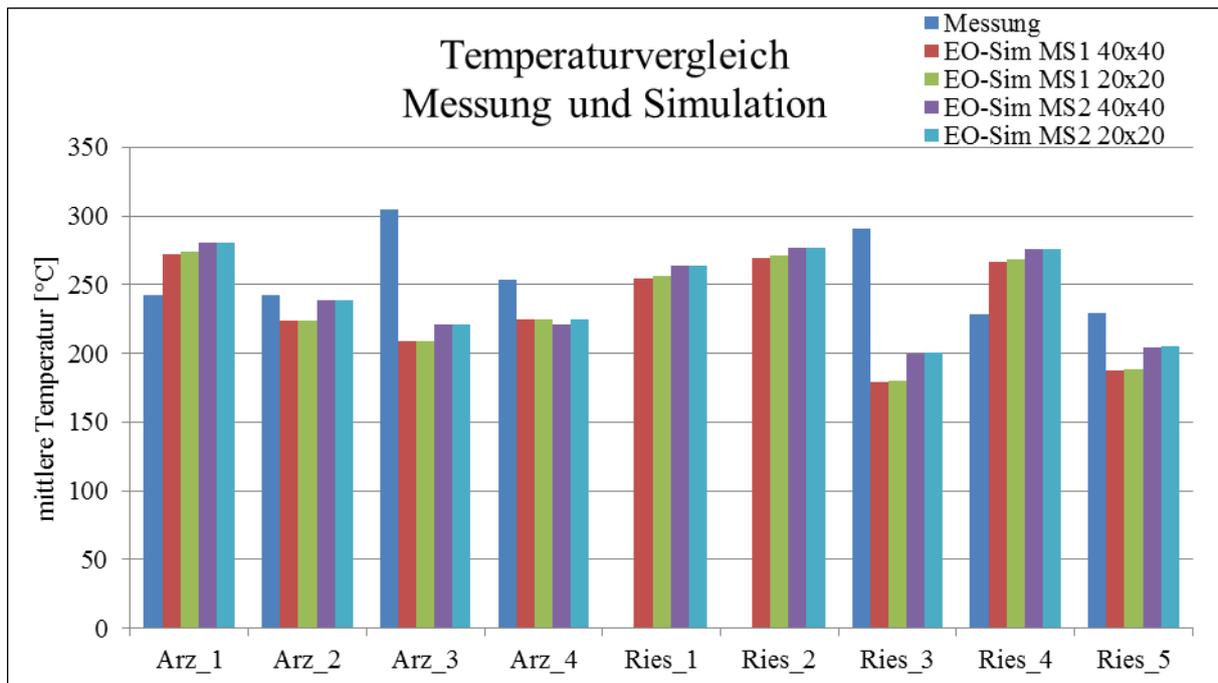


Abbildung 4-26: Temperaturvergleich zwischen EO-Simulation und Messung

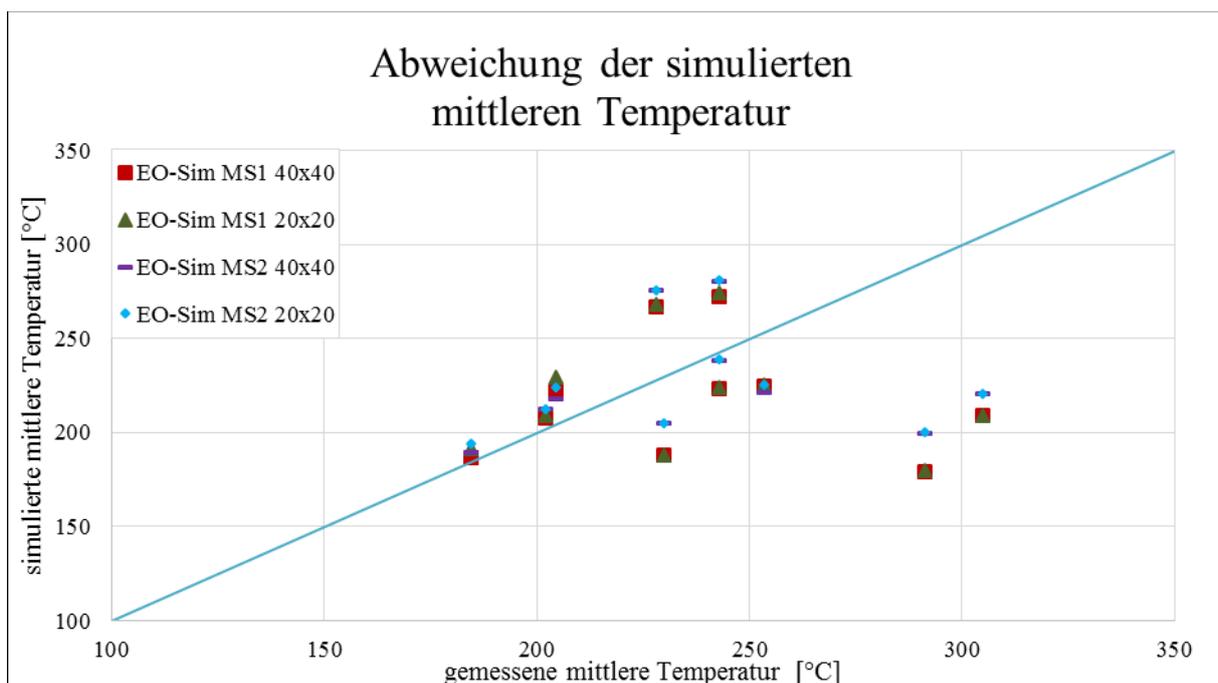


Abbildung 4-27: Abweichung der Temperatursimulation zur Messung

Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 zeigen den sekundlichen Temperaturverlauf, sowohl gemessen als auch simuliert, von zwei Zyklen, wobei bei einem (Ries_3) eine Partikelfilterregeneration stattfand. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Temperaturverlauf bei einer Partikelfilterregeneration mit PHEM aktuell nicht nachsimuliert werden kann.

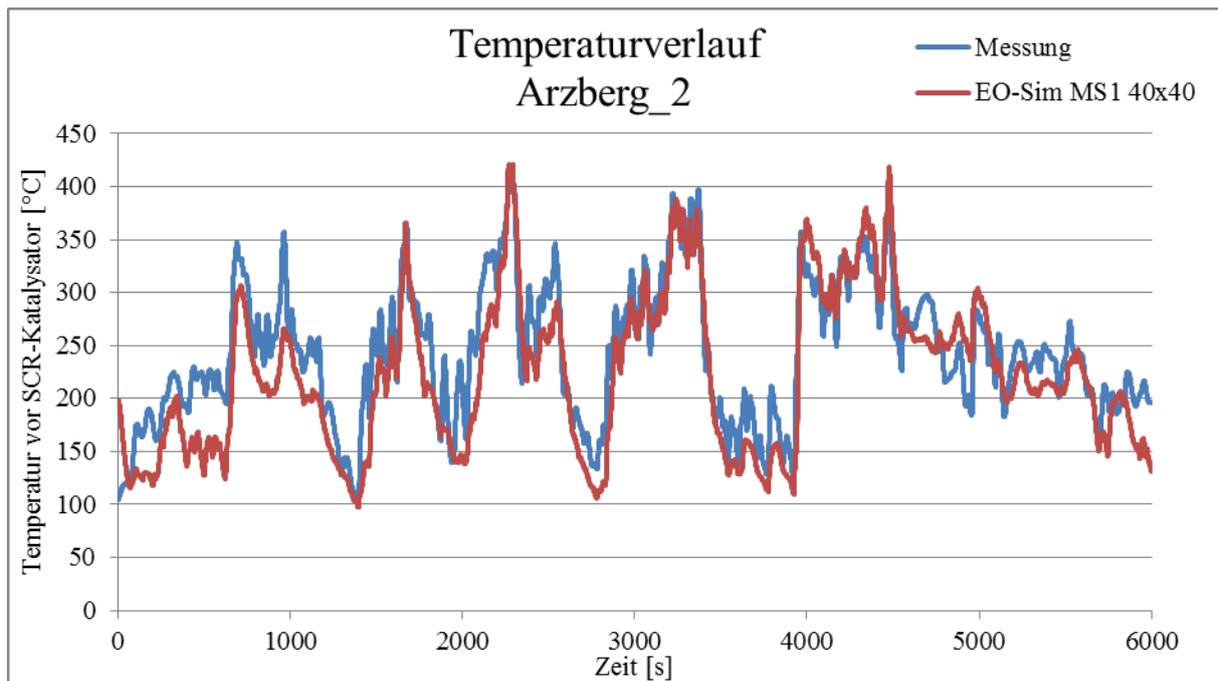


Abbildung 4-28: Temperaturverlauf bei Arzberg_2

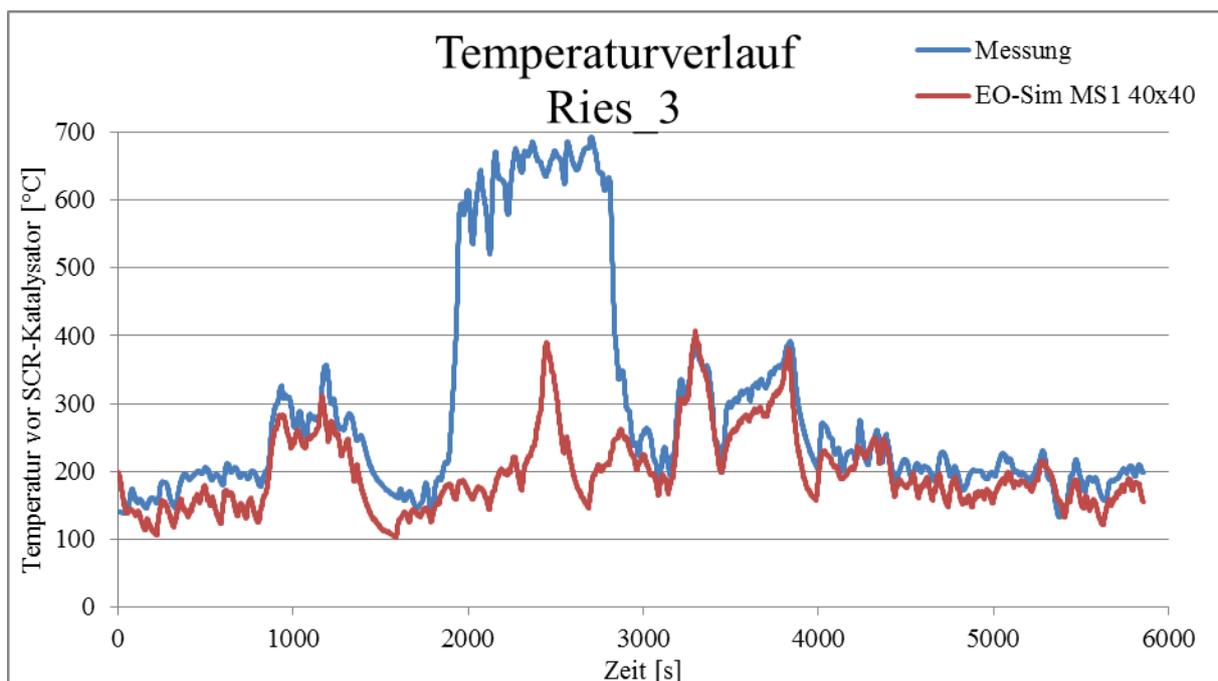
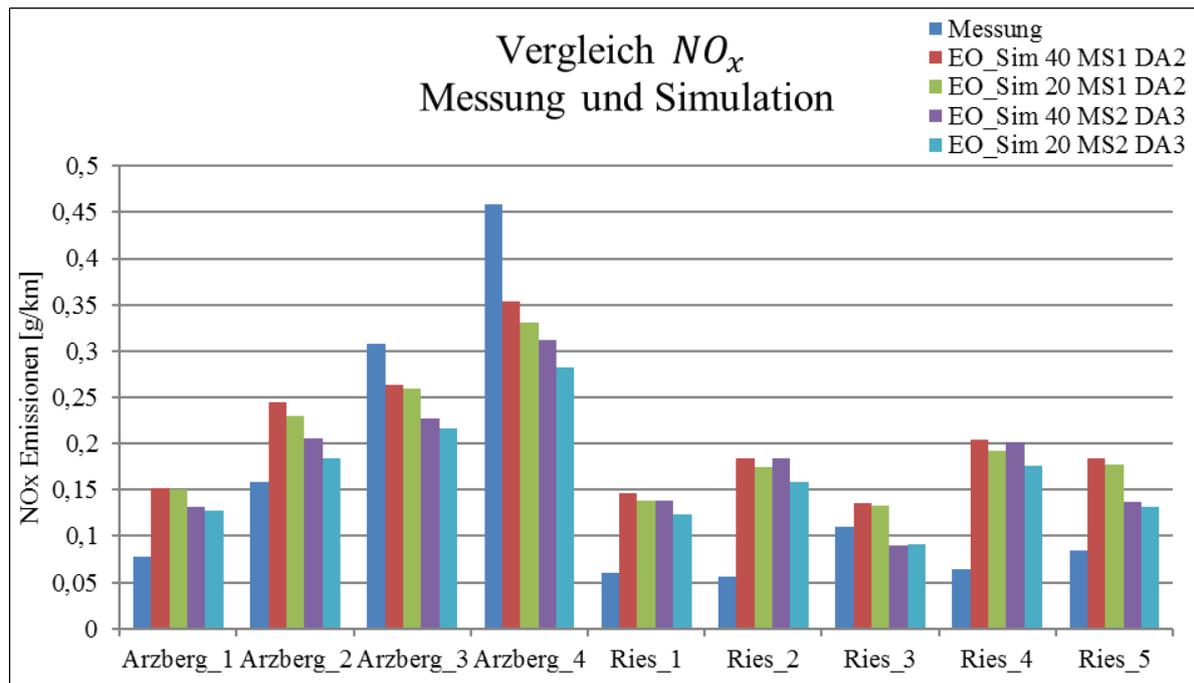
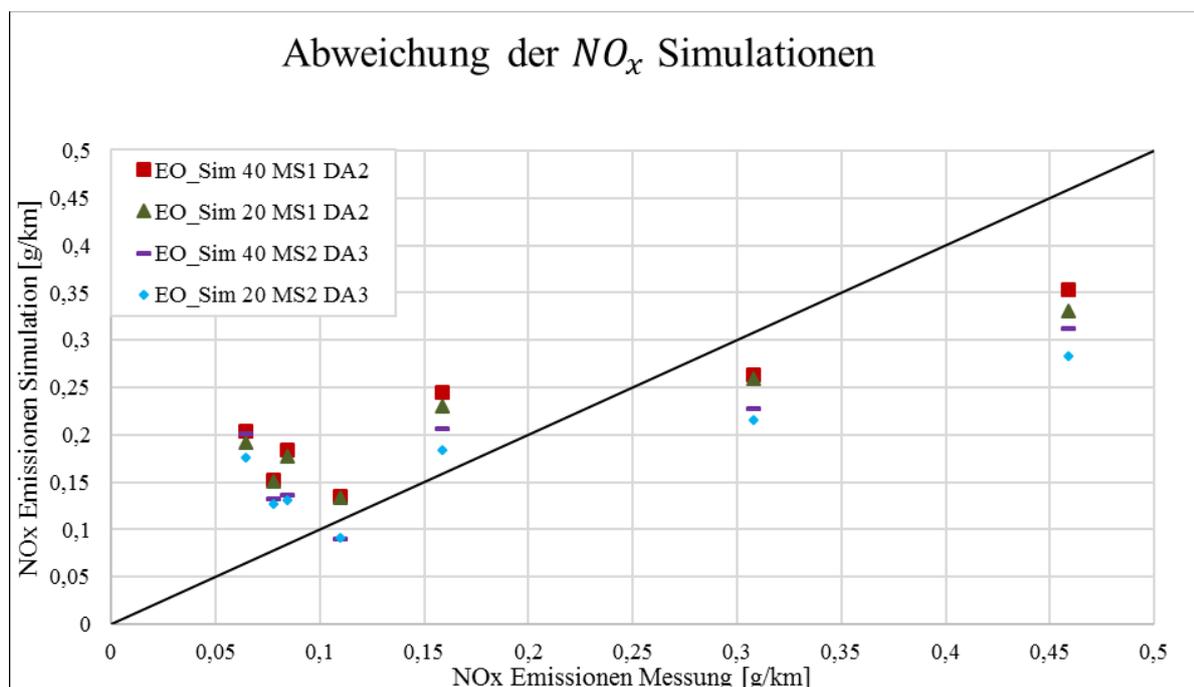


Abbildung 4-29: Temperaturverlauf bei Ries_3

Neben den vier unterschiedlichen Simulationsvarianten in Bezug auf die Wahl des Motorkennfeldes sind 14 verschiedene SCR-Konvertierungskennfeld-Varianten untersucht. An dieser Stelle werden nur die vier relevantesten Varianten in Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31 dargestellt. Die gesamten Daten der restlichen EO-Simulationsvarianten für Stickoxide können Tabelle C-3 entnommen werden. Die besten Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems werden mit der groben SCR-Kennfeldraasterung, einer Datenaufbereitung nach Variante 3 (siehe Kapitel 4.3) und mit Berücksichtigung des ND-AGR-Massenstroms, sowohl in Bezug auf mittlere Abweichung als auch auf Standardabweichung zur Messung, erreicht.

Abbildung 4-30: NO_x -Vergleich zwischen EO-Simulation und MessungAbbildung 4-31: Abweichung der NO_x -EO-Simulation zur PEMS-Messung

4.5.3 Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Abgasnachbehandlung

Für den Vergleich beider Simulationsvarianten werden nur NO_x -Emissionen verglichen. In Abbildung 4-32 und Abbildung 4-33 sind Ergebnisse von EoT- und EO-Simulationen mit feiner Motorkennfeldraasterung und feiner SCR-Konvertierungskennfeldraasterung dargestellt. Wenn bei EO-Simulationen die Datenaufbereitung nach Variante 3 erfolgt (siehe Kapitel 4.3) wird beim untersuchten Fahrzeug eine Verbesserung der Simulationsergebnisse um durchschnittlich 20 % gegenüber der EoT-Simulation mit feiner Motorkennfeldraasterung erreicht.

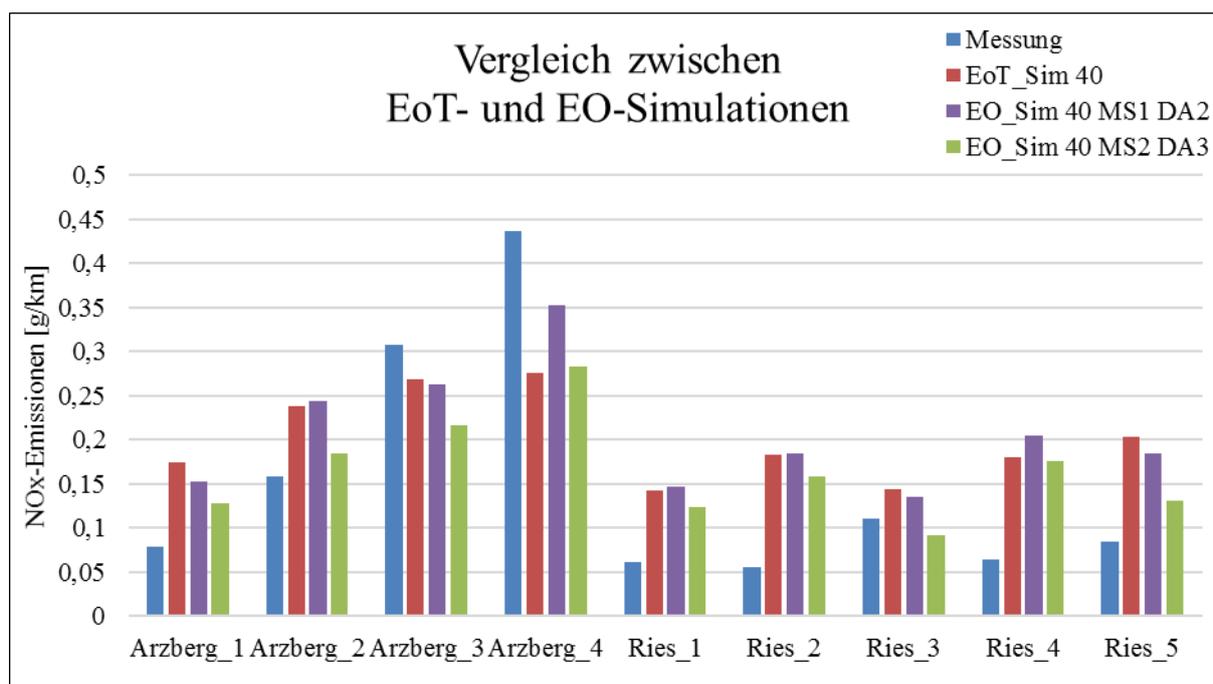


Abbildung 4-32: Vergleich der Simulation von NO_x-Emissionen mit feiner Kennfeldraasterung

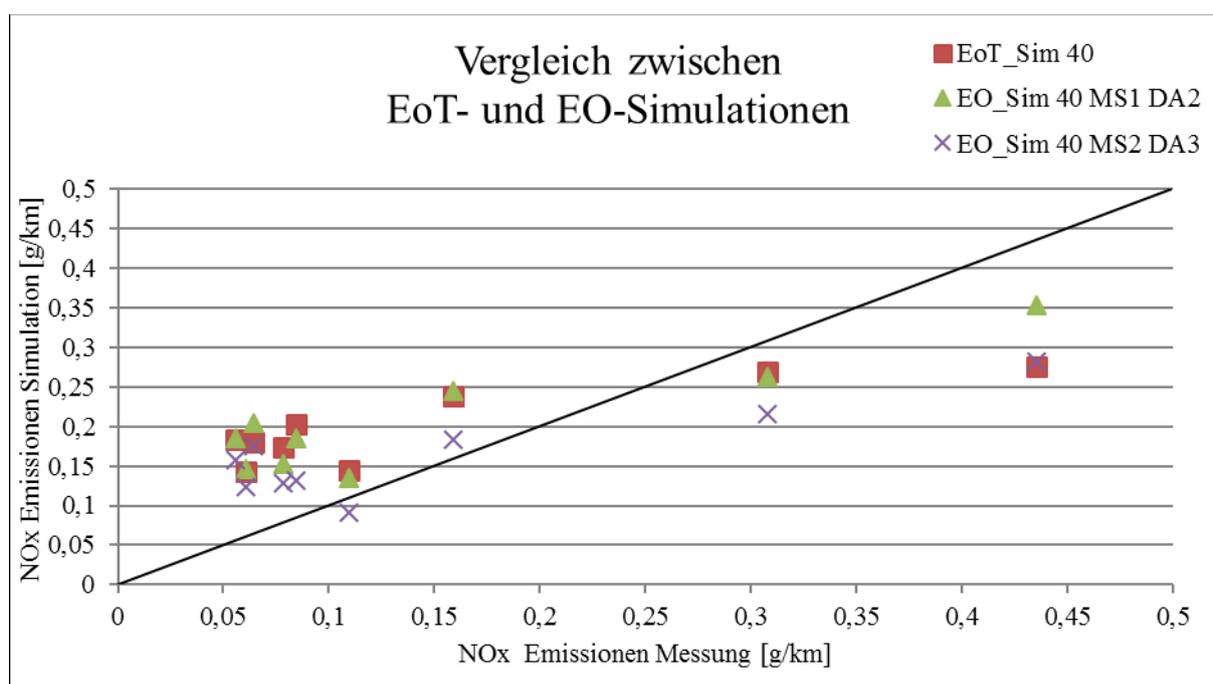


Abbildung 4-33: Abweichung der NO_x-Simulationen mit feiner Emissionskennfeldraasterung und SCR-Kennfeldraasterung

Beim Vergleich zwischen Simulationsvarianten und Messergebnissen bei grober Kennfeldraasterung kann ebenso festgehalten werden, dass mit einer Datenaufbereitung nach Variante 3 eine deutliche Verbesserung der mittleren Abweichungen zu Messungen erreicht wird (siehe Abbildung 4-34). Beim untersuchten Fahrzeug verbessert sich die mittlere Abweichung der EO-Simulation um 40 % gegenüber der EoT-Simulation (beide mit grober Motorkennfeldraasterung; EO-Simulation zusätzlich mit grober SCR-Konvertierungskennfeldraasterung).

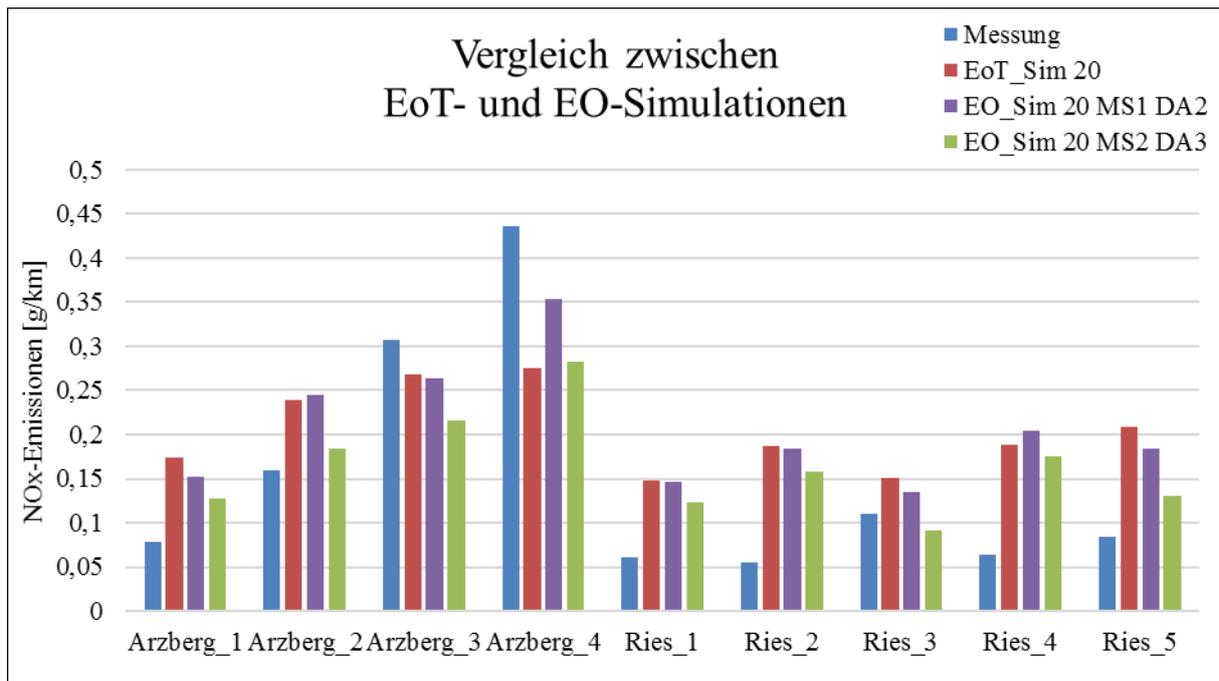


Abbildung 4-34: Vergleich der Simulation von NO_x-Emissionen mit grober Kennfeldraasterung

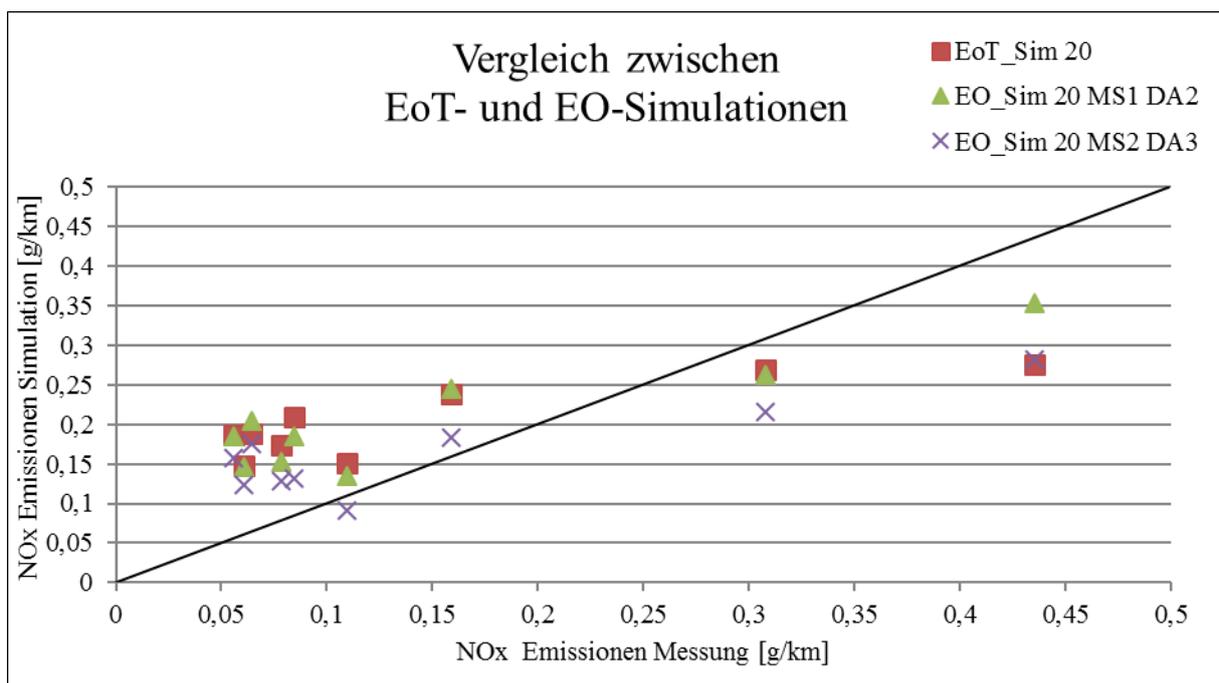


Abbildung 4-35: Abweichung der NO_x-Simulationen mit grober Emissionskennfeldraasterung und SCR-Kennfeldraasterung

Wie in Kapitel 4.4.2 bereits erläutert, ist der Unterschied zwischen grober und feiner Motorkennfeldraasterung für Simulationen sehr gering. Bei EO-Simulationen ist die Wahl der Rasterung des SCR-Konvertierungskennfeldes von deutlich größerer Bedeutung. Allerdings konnte festgestellt werden, dass die Art der Datenaufbereitung beim untersuchten Audi A4 Avant ebenso einen merklichen Einfluss auf Simulationsergebnisse hat.

4.6 Simulation der Stauzyklen-Fahrten und Validierung mit Messdaten

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse der Stauzyklen näher erläutert. Neben den mittleren Abweichungen, bezogen auf den gesamten Zyklus, ist in diesem Zusammenhang besonders das Auskühlung des Abgasnachbehandlungssystems analysiert. Für die Emissionskennfelderstellung sind an dieser Stelle alle RDE-Fahrten und alle Stauzyklen-Fahrten mit einbezogen.

4.6.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung in PHEM

In den folgenden Säulendiagrammen sind Mittelwerte über die gesamten Messzyklen dargestellt. Die blauen Säulen repräsentieren, gleich wie in Kapitel 4.5, Messdaten. Der zeitliche Verlauf der Simulationsergebnisse einzelner Stauzyklen wird in Kapitel 4.6.3 behandelt.

In Abbildung 4-36 und Abbildung 4-37 sind die Ergebnisse der CO_2 -Emissionen von Simulationen und Messungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die simulierten CO_2 -Emissionen sowohl bei feiner als auch bei grober Kennfeldraasterung deutlich unter den Messergebnissen liegen. Mit feiner und grober Motorkennfeldraasterung werden durchschnittlich unter Berücksichtigung der Aufwärmrunde jeweils 13 % weniger CO_2 -Emissionen simuliert, als gemessen wurden. Es ist anzunehmen, dass das generische CO_2 -Kennfeld besonders im Niederlastbereich zusätzlich anzupassen wäre bzw. die Nebenverbraucher im Stauzyklus anders gesteuert werden als bei einer herkömmlichen Fahrt.

Die genauen Zahlenwerte der einzelnen Simulationsvarianten für die untersuchten Stauzyklen sind in Tabelle C-1 und Tabelle C-2 zusammengefasst.

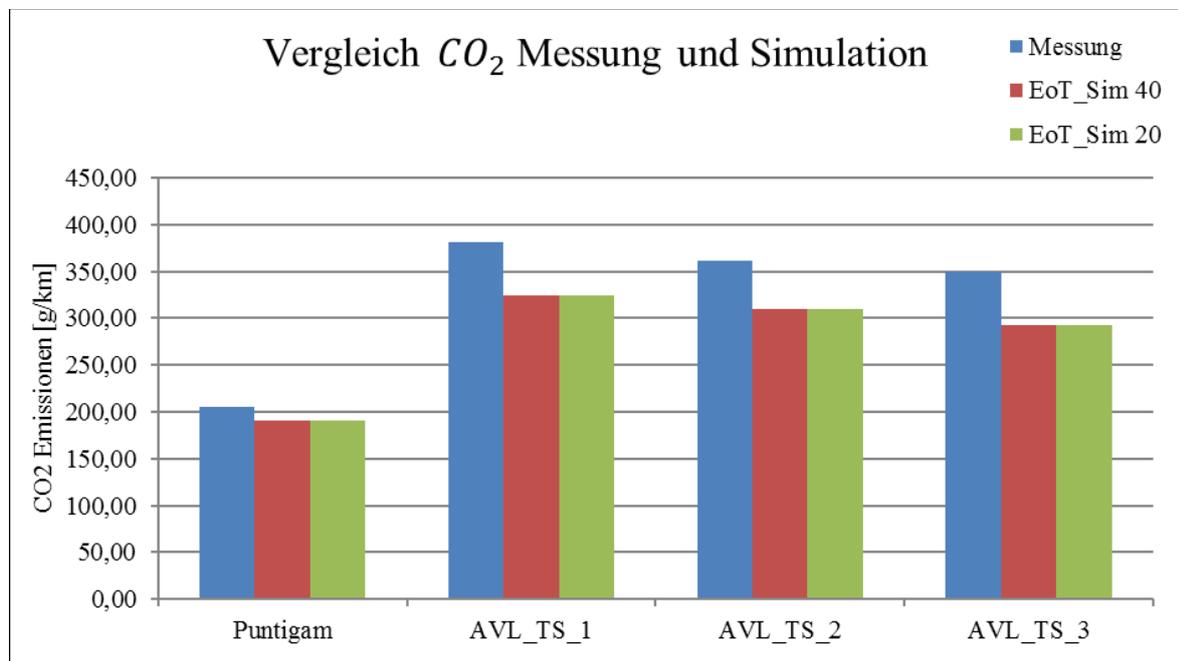


Abbildung 4-36: CO_2 -Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung bei Stauzyklen

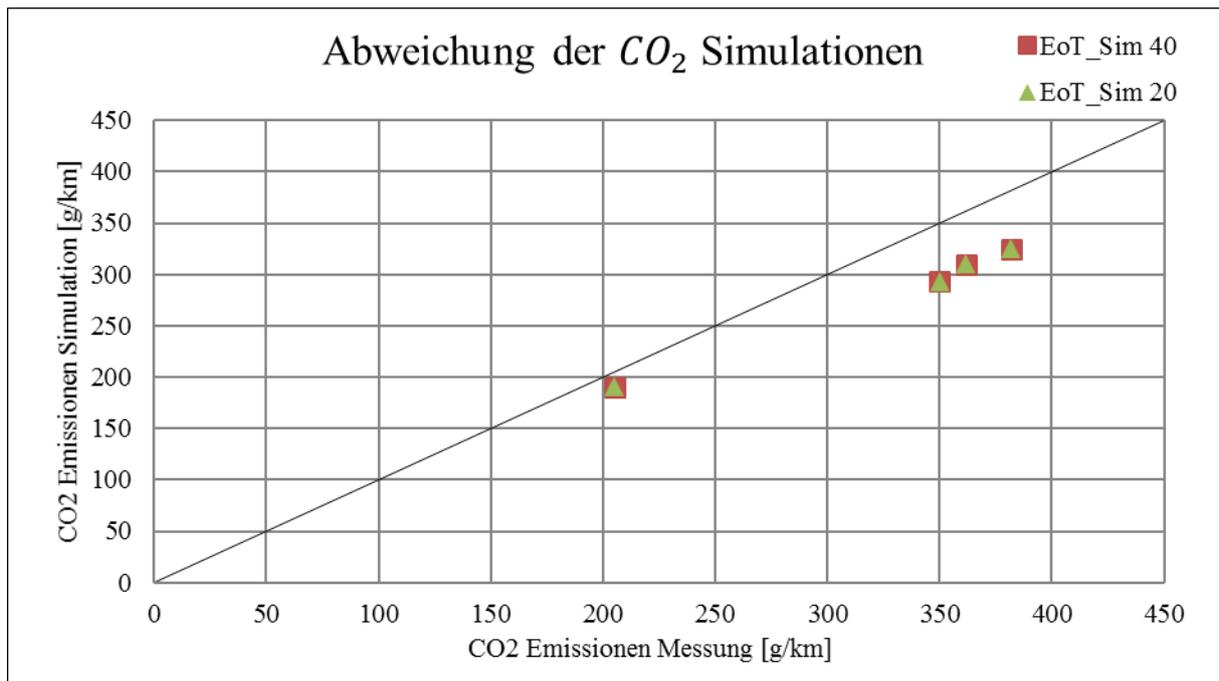
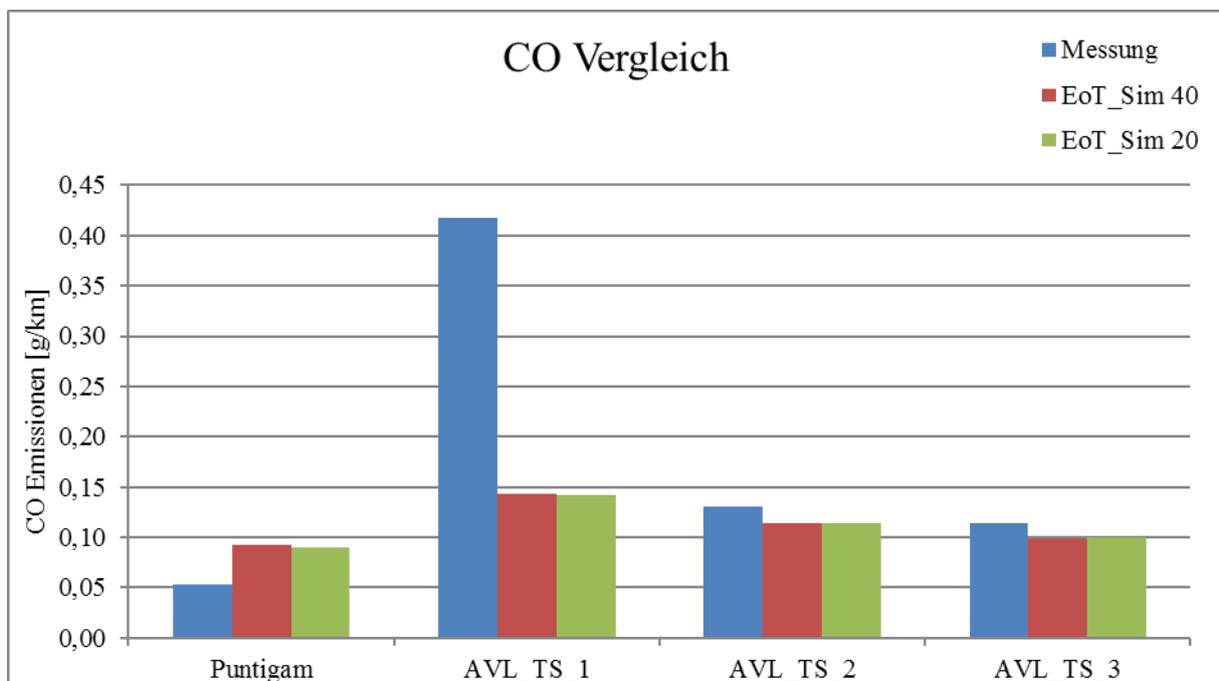
Abbildung 4-37: Abweichung der CO_2 -EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen

Abbildung 4-39 und Abbildung 4-40 zeigen den Vergleich der gemessenen und simulierten CO -Emissionen. Es ist zu erkennen, dass beim ersten Stauzyklus auf der Teststrecke (AVL_TS_1) durchschnittlich deutlich höhere CO -Emissionen gemessen wurden. Genaue Untersuchungen zu diesem erhöhten Messwert wurde für das untersuchte Fahrzeug allerdings nicht durchgeführt. Die Simulation weicht neben dem ersten Stauzyklus auf der Teststrecke auch von dem Stadtstauzyklus erheblich ab. Die gewählte Motorkennfeldraasterung hat dabei nahezu keinen Einfluss.

Abbildung 4-38: CO -Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung bei Stauzyklen

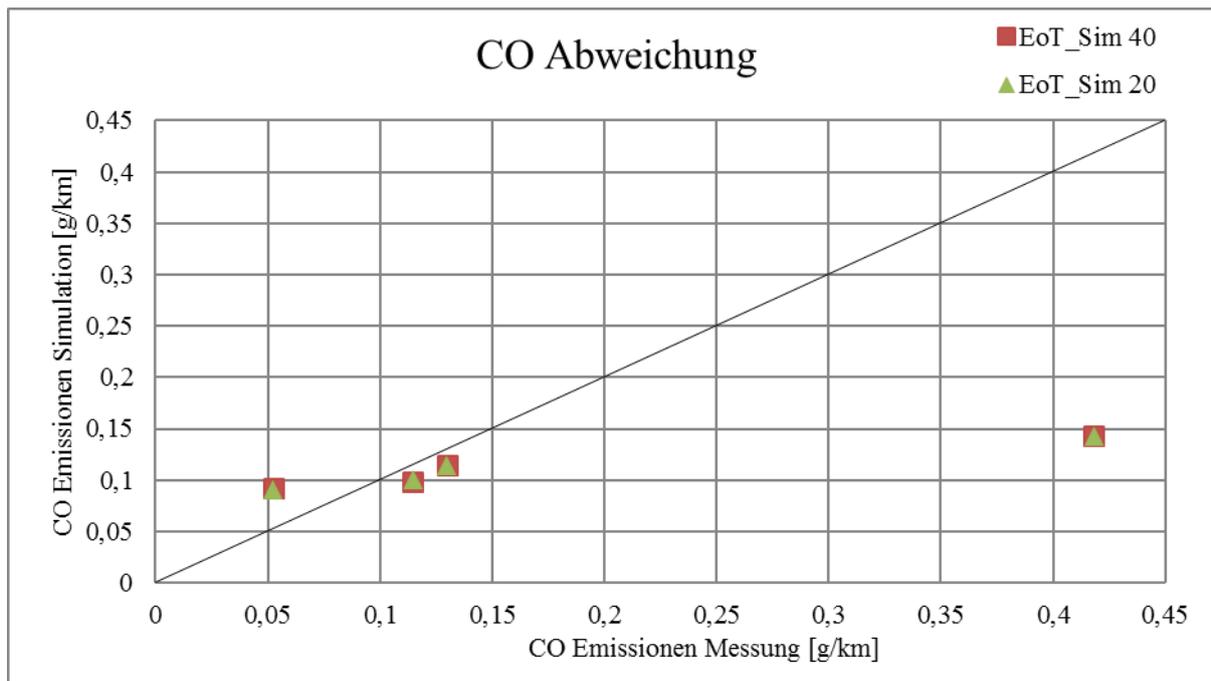


Abbildung 4-39: Abweichung der CO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen

In Abbildung 4-40 und Abbildung 4-41 sind die Ergebnisse und Abweichungen der einzelnen Stauzyklen für NO_x -Emissionen dargestellt. Auffallend ist, dass beim Stauzyklus in Graz bei realem Verkehrsaufkommen die Abweichung der Simulation zur Messung deutlich geringer ist. Die Simulationen der NO_x -Emissionen bei den Stauzyklen auf der Teststrecke liegen hingegen nahezu unabhängig von der Motorkennfeldraasterung bei 32 % unter den Messergebnissen.

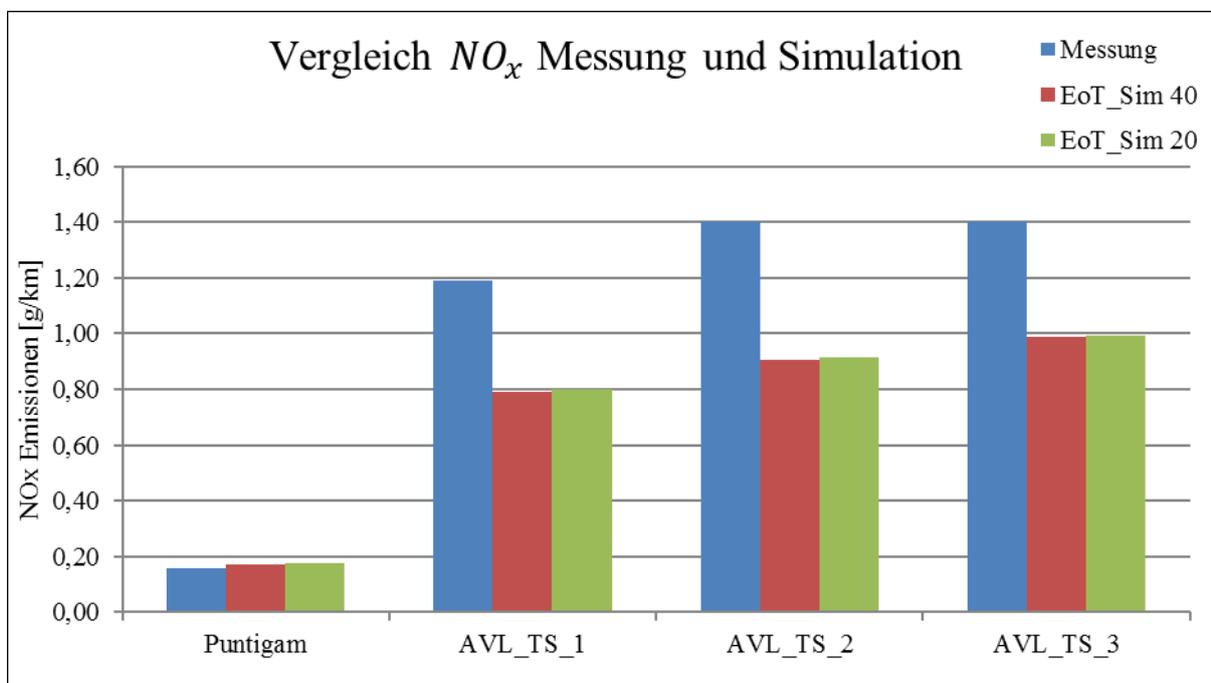
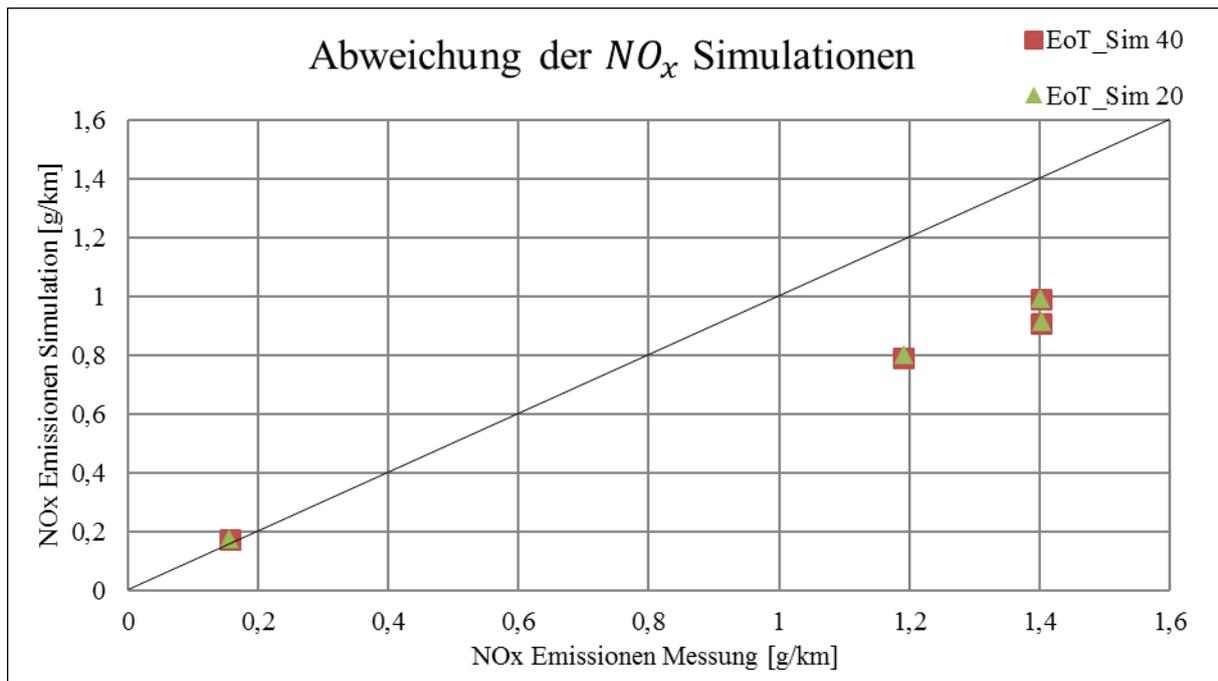
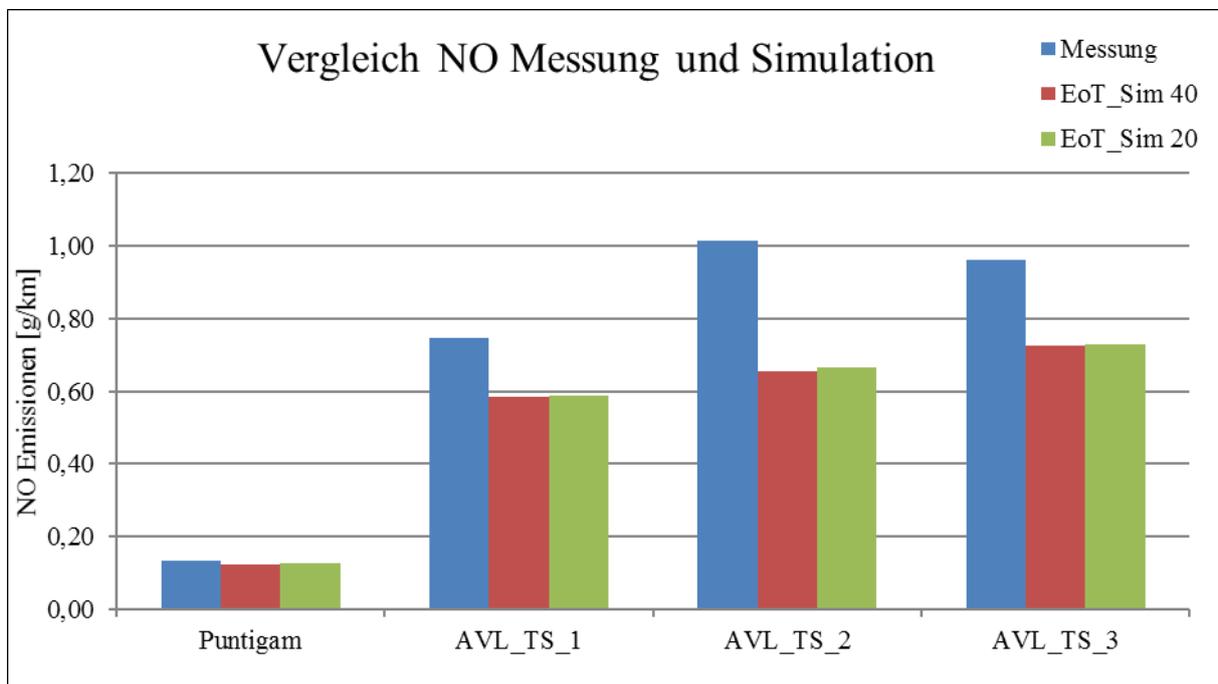


Abbildung 4-40: Vergleich der EoT-Simulationen von NO_x -Emissionen bei Stauzyklen

Abbildung 4-41: Abweichung der NO_x -EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen

Ähnliche Ergebnisse können für NO -Emissionen festgestellt werden. Wie in Abbildung 4-42 und Abbildung 4-43 zu sehen ist, weisen die NO -Simulationen ähnliche Abweichungen wie die NO_x -Emissionen auf.

Abbildung 4-42: Vergleich der EoT-Simulationen von NO -Emissionen mit feiner Kennfeldraasterung bei Stauzyklen

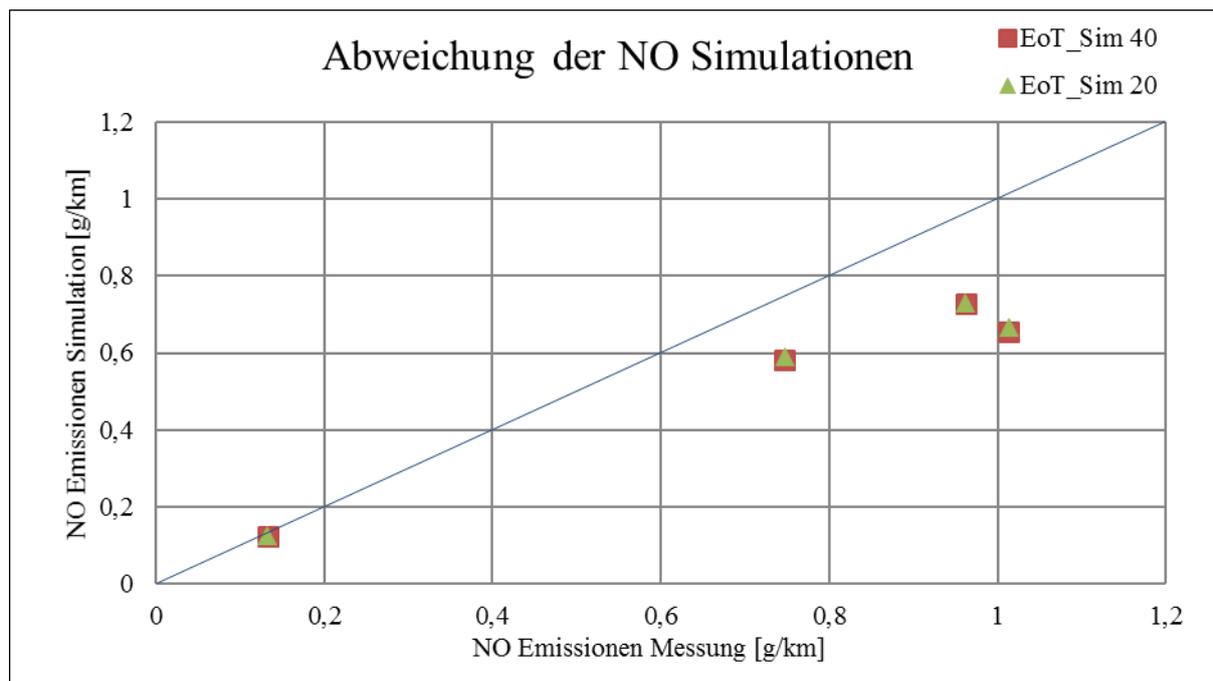


Abbildung 4-43: Abweichung der NO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen

Auf die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse der PN -Emissionen wird aufgrund der hohen Abweichungen an dieser Stelle verzichtet. Die genauen Ergebnisse können Tabelle C-1 und Tabelle C-2 entnommen werden. Die hohen Abweichungen sind, wie in Kapitel 4.5.1 erläutert, auf die Einbeziehung der Partikelfilterregenerationen in die Emissionskennfelderstellung zurückzuführen.

4.6.2 Ergebnisse mit Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung in PHEM

In diesem Kapitel sind die NO_x -Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems angeführt. Für die Temperatursimulation wird neben den mittleren Temperaturen auch der zeitliche Verlauf der simulierten Temperatur analysiert. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass beim Stadt-Stauzyklus „Puntigam“ keine Aufzeichnung von Temperaturen und Rohemissionen vorhanden sind und daher im Folgenden auch nicht für Vergleiche herangezogen werden können. Die simulierten Temperaturen werden trotzdem angeführt, um das Temperaturniveau des Stauzyklus in etwa abschätzen zu können.

Wie in Abbildung 4-44 und Abbildung 4-45 zu sehen ist, weichen die mittleren Temperaturen nur geringfügig von den gemessenen Temperaturen ab. Das dynamische Verhalten während der Vorkonditionierung für die Stauzyklen (siehe Kapitel 3.2.3) kann allerdings nicht gut abgebildet werden. Abbildung 4-46 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf eines Teststrecken-Stauzyklus. Es ist zu erkennen, dass das Auskühlverhalten beim Stauzyklus, was ein Kernthema dieser Arbeit ist, relativ gut nachsimuliert werden kann.

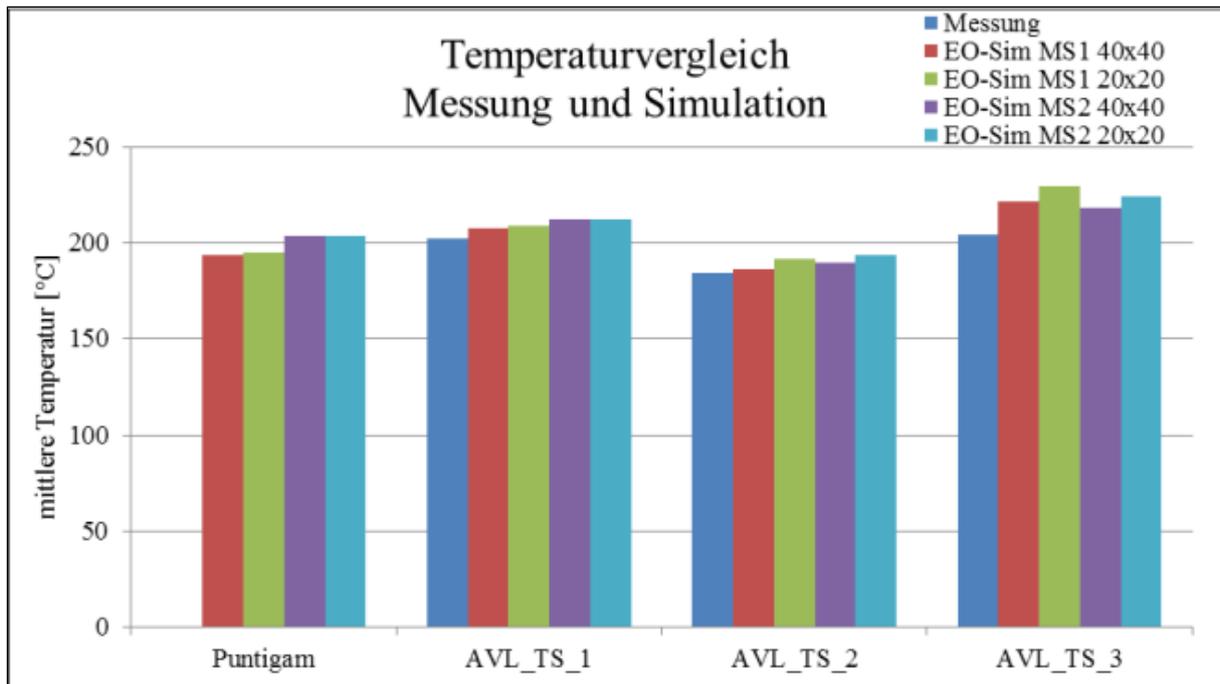


Abbildung 4-44: Temperaturvergleich zwischen EO-Simulation und Messung bei Stauzyklen

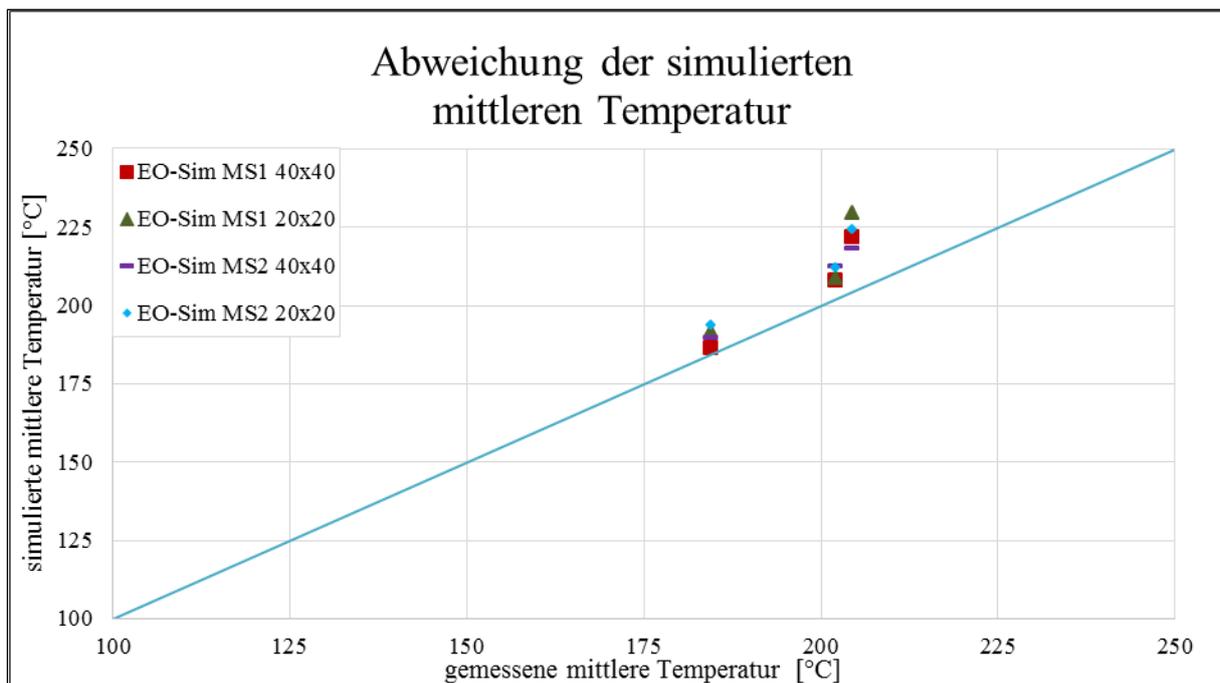


Abbildung 4-45: Abweichung der Simulation der mittleren Temperatur zur Messung

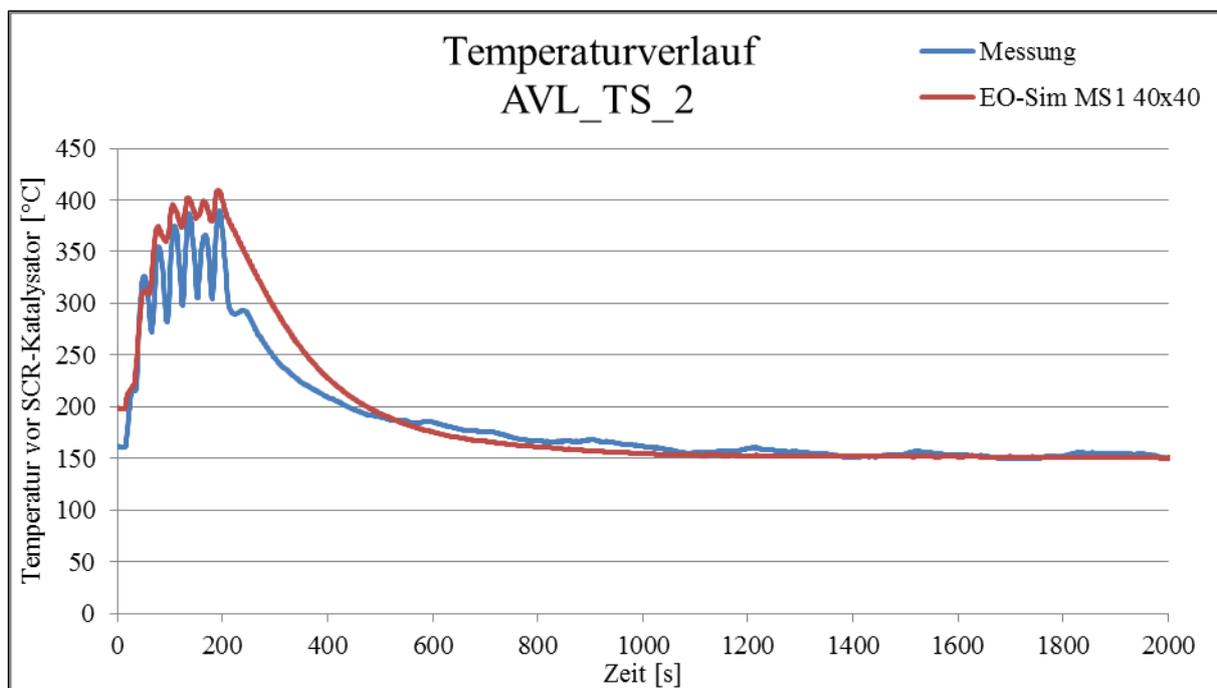


Abbildung 4-46: Temperaturverlauf eines Teststrecken-Stauzyklus

In Tabelle C-3 sind die und Simulationsergebnisse der NO_x -Emissionen dargestellt. In Abbildung 4-47 ist zu erkennen, dass die NO_x -Emissionen beim Stadt-Stauzyklus deutlich niedriger sind, als bei Stauzyklen auf der Teststrecke. Durch die deutlich höhere mittlere Geschwindigkeit beim Stadt-Stauzyklus wird der Motor in einem höheren Lastbereich betrieben. Bei den Teststrecken-Stauzyklen liegt hingegen ein starkes Auskühlen des Abgasnachbehandlungssystems vor und die Konvertierungsrate des SCR-Katalysators sinkt auch deutlich.

In Abbildung 4-49 und Abbildung 4-50 sind die durchschnittlichen Emissionen der Teststrecken-Stauzyklen, anders als bei den zuvor erläuterten Abbildungen, ohne Berücksichtigung der Aufwärmphasen, also ab Beginn der ersten Stopp-Phase, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Durchschnittsemissionen um ein Vielfaches niedriger sind, wenn die Aufwärmphase nicht miteinbezogen wird. Die prozentuelle Abweichung der einzelnen Simulationen zur Messung steigt allerdings.

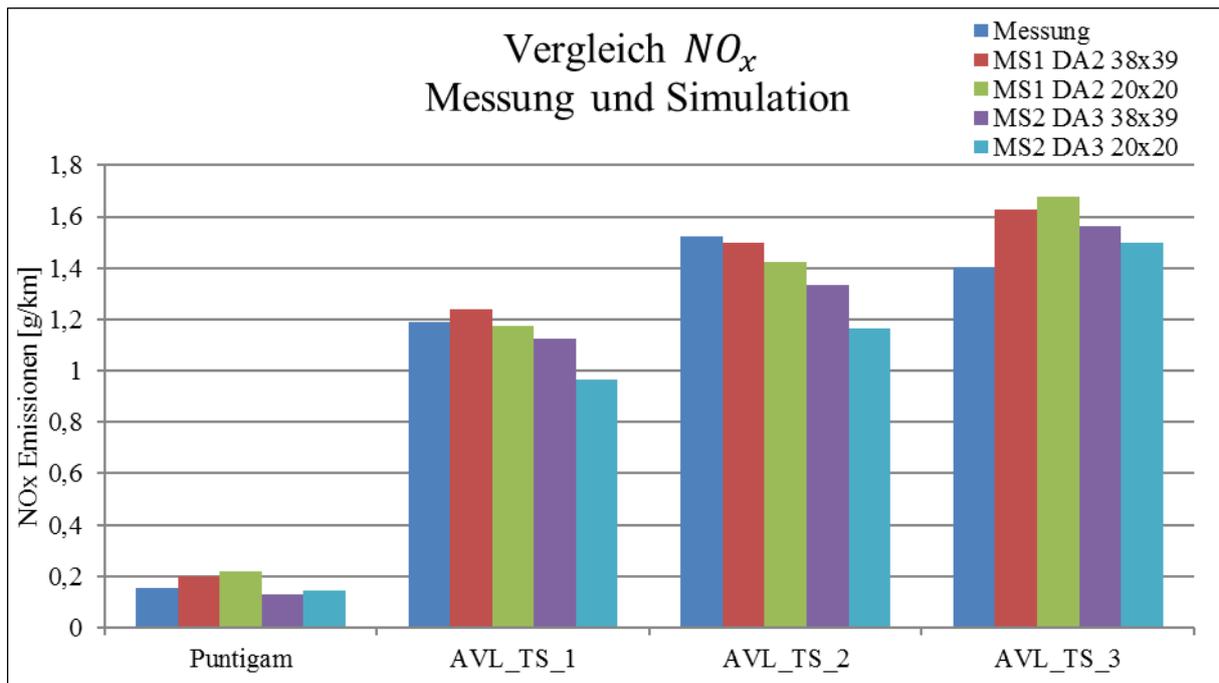


Abbildung 4-47: Vergleich der EO-Simulationen von NO_x -Emissionen bei Stauzyklen mit Aufwärmphasen

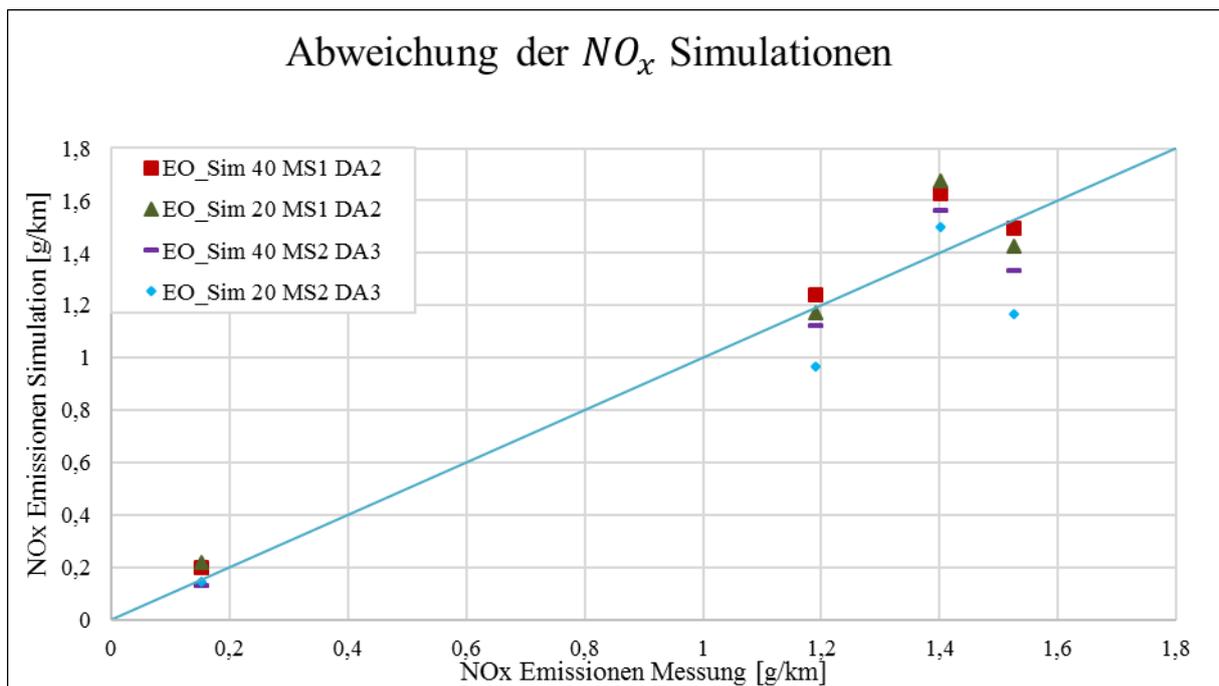


Abbildung 4-48: Abweichung der NO_x -EO-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen mit Aufwärmphase

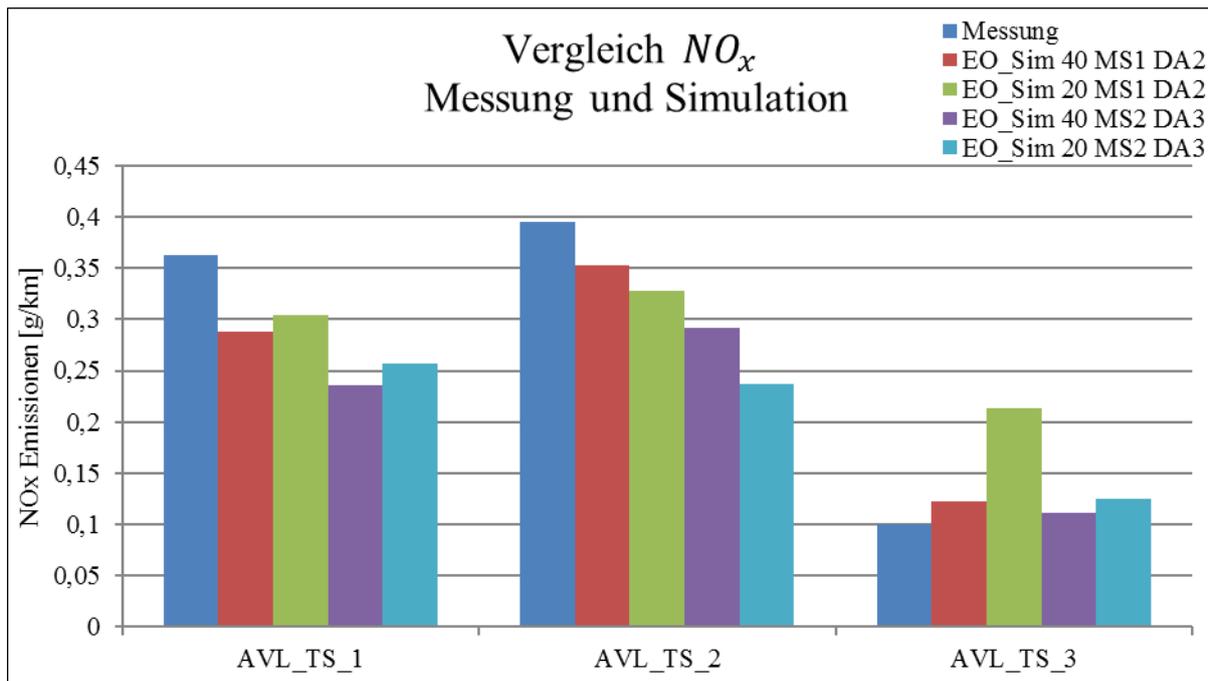


Abbildung 4-49: Vergleich der EO-Simulationen von NO_x -Emissionen bei Stauzyklen ohne Aufwärmphasen

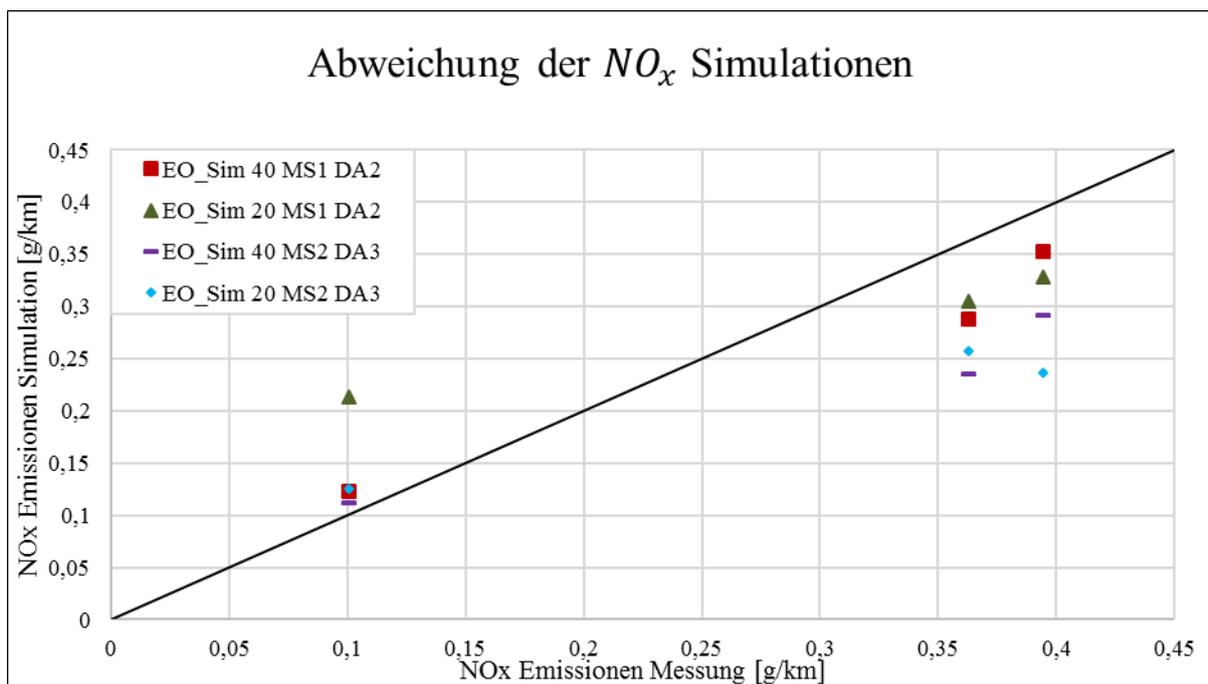


Abbildung 4-50: Abweichung der NO_x -EO-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen ohne Aufwärmphase

4.6.3 Vergleich der Simulationsergebnisse mit und ohne Abgasnachbehandlung

In diesem Kapitel wird vor allem der sekundliche Verlauf der gemessenen und simulierten NO_x -Emissionen während des Auskühlvorgangs betrachtet. Im Folgenden stellen punktierte Kurven Messdaten bzw. Simulationsergebnisse dar und Volllinien repräsentieren über 45 s gemittelte Werte.

Aus Abbildung 4-51 geht hervor, dass das Auskühlverhalten und die damit steigenden NO_x -Emissionen nur mit EO-Simulationen angenähert werden können. Weiters ist zu erkennen, dass in diesem Fall mit einer Datenaufbereitung nach Variante zwei bessere Ergebnisse erzielt werden. Alle in Abbildung 4-51 gezeigten Simulationen sind mit einer feinen Motorkennfeldraasterung (40x40) durchgeführt. EO-Simulationen sind zudem mit einer feinen SCR-Konvertierungskennfeldraasterung durchgeführt.

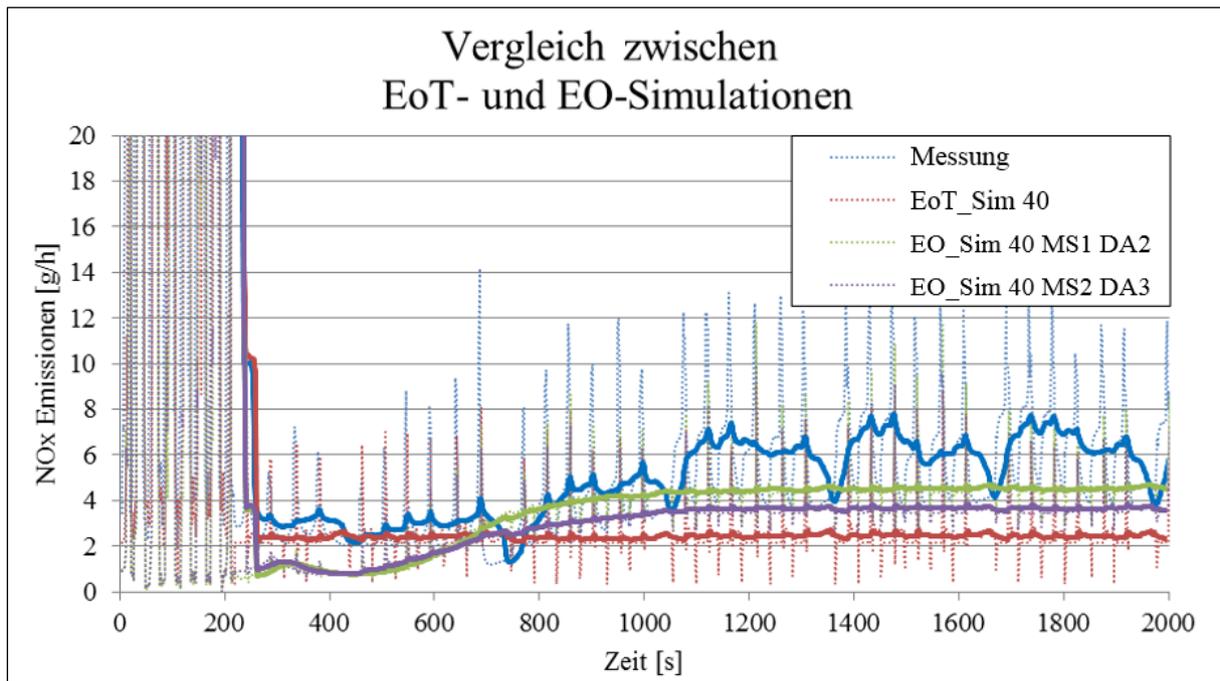


Abbildung 4-51: Vergleich der sekundlichen NO_x -Emissionen zwischen Messung und Simulationen mit feiner SCR-Kennfeldraasterung

Abbildung 4-52 zeigt wiederum den sekundlichen Verlauf der NO_x -Emissionen von Messung und Simulation. In diesem Fall sind neben groben Motorkennfeldraasterungen auch grobe SCR-Konvertierungskennfeldraasterungen für Simulationen in Verwendung. Man erkennt, dass eine grobe SCR-Konvertierungskennfeldraasterung in diesem Fall zu schlechteren Simulationsergebnissen führt. Dies ist dadurch begründet, dass im Niederlastbereich das feinere SCR-Konvertierungskennfeld mehr Stützstellen im Randbereich aufweist, wie in Abbildung 4-11 zu sehen ist.

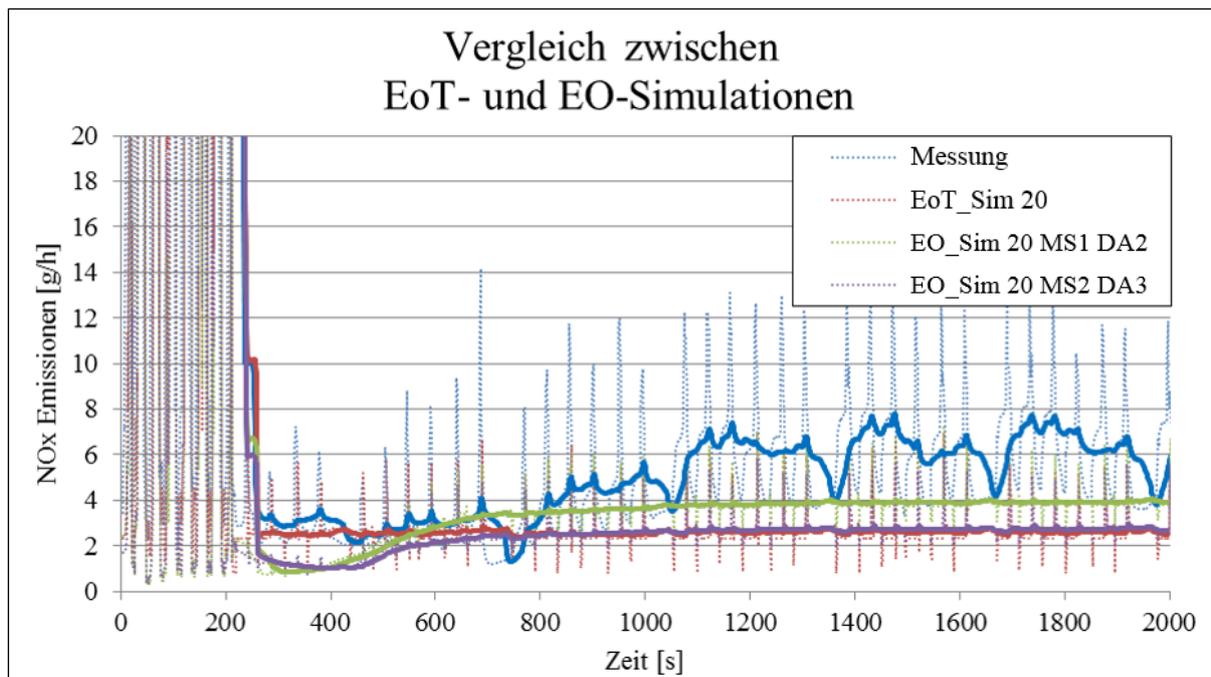


Abbildung 4-52: Vergleich der sekundlichen NO_x -Emissionen zwischen Messung und Simulationen mit grober Kennfeldraesterung

In Abbildung 4-53 und Abbildung 4-54 sind die Mess- und Simulationsergebnisse der Stauzyklen dargestellt. Verglichen werden hier die EoT- und EO-Simulationsvarianten mit feiner Motorkennfeldraesterung. Ebenso ist für EO-Simulationen eine feine SCR-Konvertierungskennfeldraesterung in Verwendung. In fast allen Fällen wird mit EO-Simulationen ein besseres Ergebnis erreicht. Zudem ist anzumerken, dass mit der zweiten Datenaufbereitungsvariante deutlich bessere Simulationsergebnisse erreicht werden. Vor allem kann das Auskühlverhalten unter Berücksichtigung aller Messdaten besser nachgebildet werden.

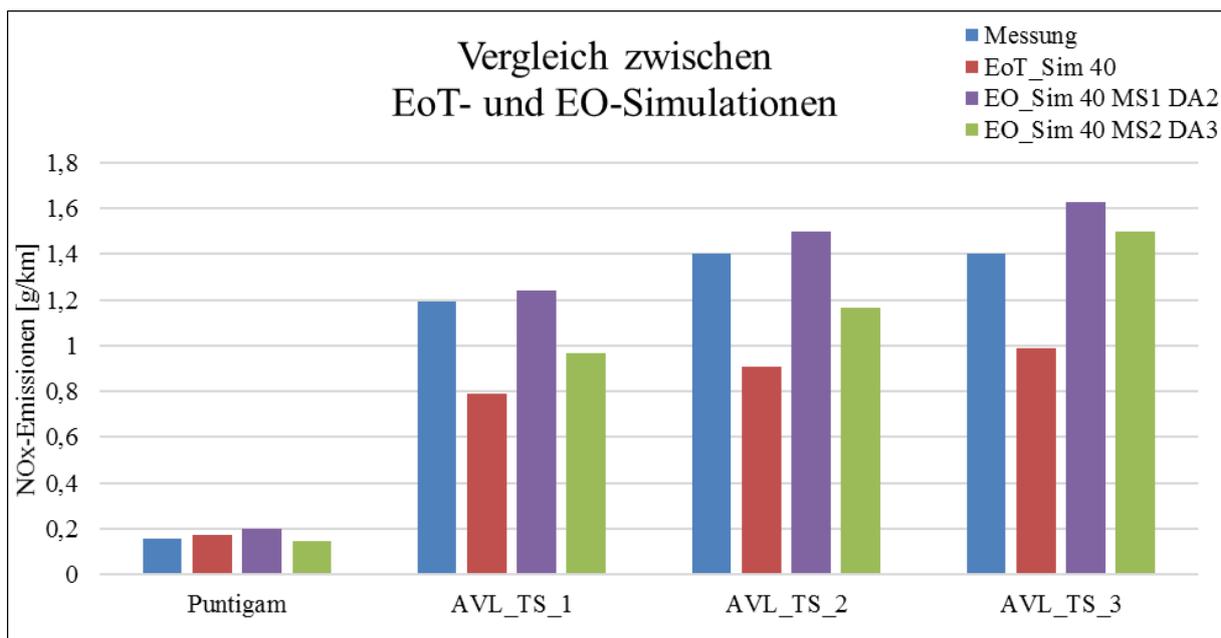


Abbildung 4-53: Vergleich der Simulation von NO_x -Emissionen bei Stauzyklen mit feiner Kennfeldraesterung bei Stauzyklen

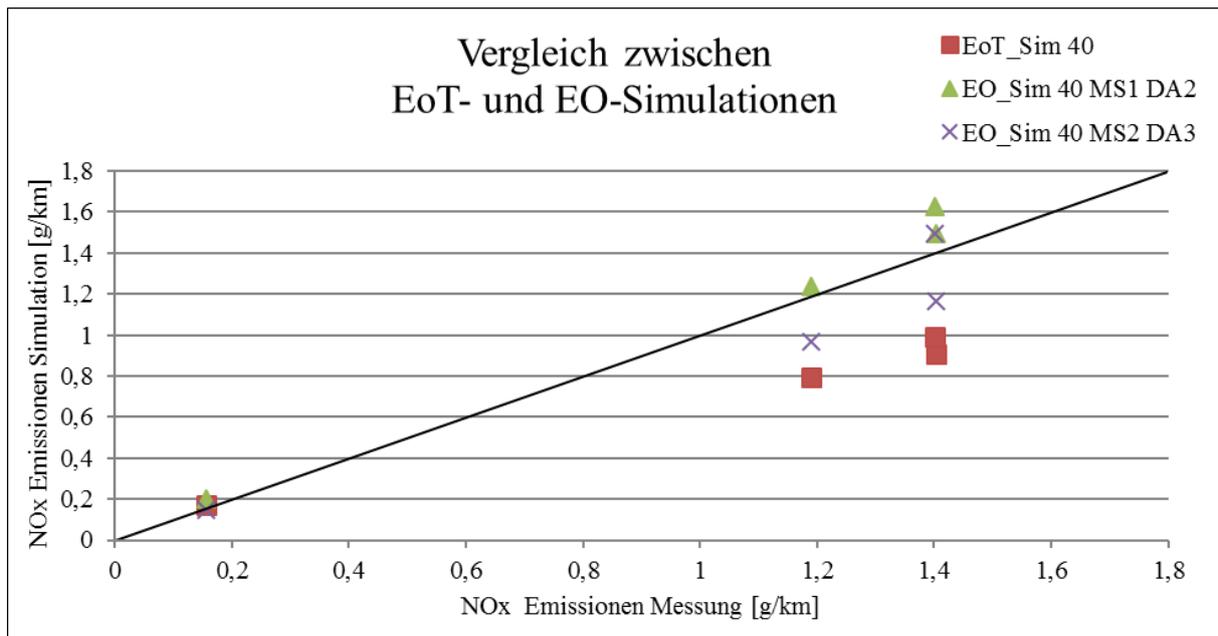


Abbildung 4-54: Abweichung der NO_x-Simulationen bei Stauzyklen mit feiner Kennfeldraasterung bei Stauzyklen

Abbildung 4-55 und Abbildung 4-56 zeigen den Vergleich zwischen EoT- und EO-Simulationsvarianten mit grober Motorkennfeldraasterung und grober SCR-Konvertierungskennfeldraasterung. Mit einer Ausnahme werden mit der EO-Simulationsvariante immer bessere Ergebnisse erreicht.

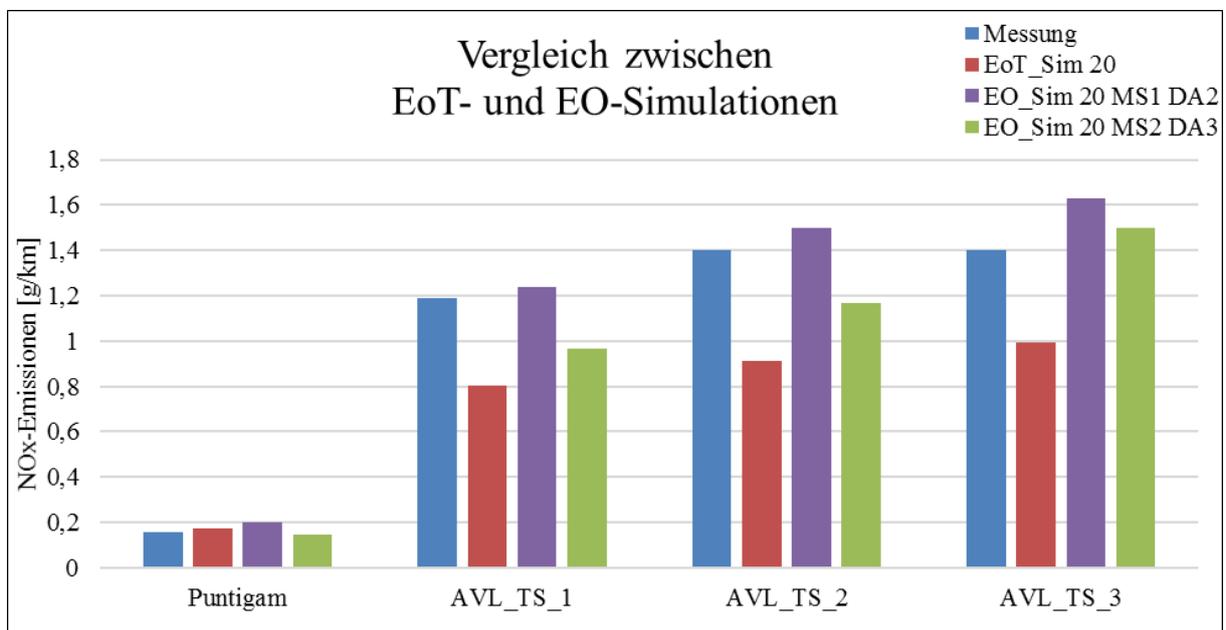


Abbildung 4-55: Vergleich der Simulation von NO_x-Emissionen bei Stauzyklen mit grober Kennfeldraasterung bei Stauzyklen

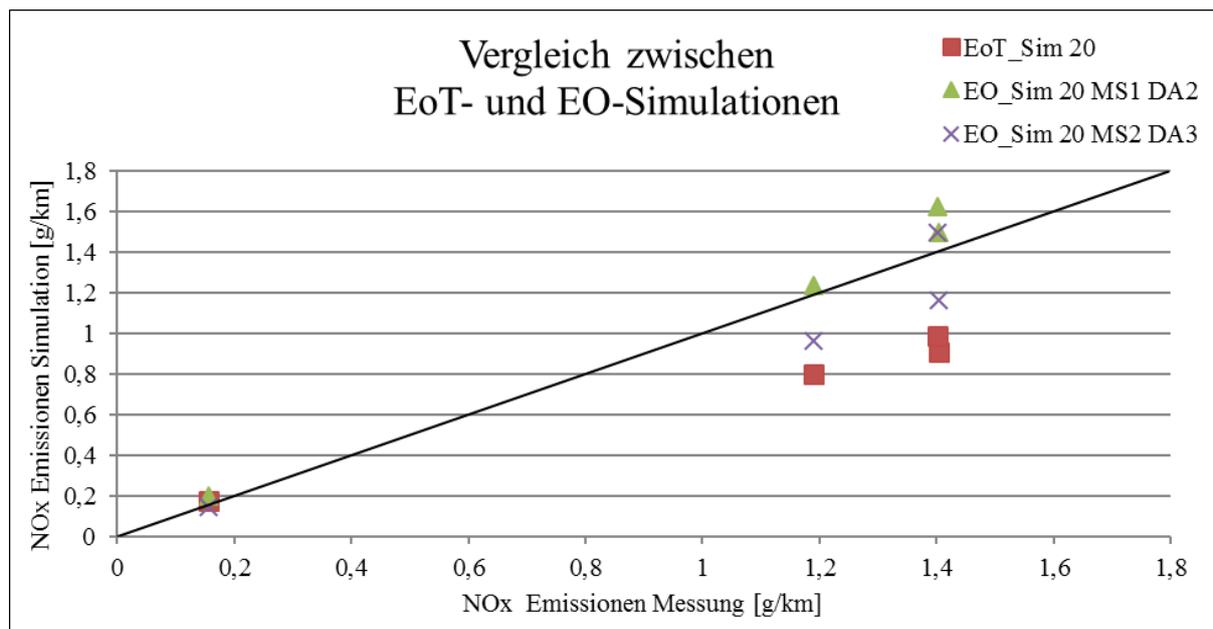


Abbildung 4-56: Abweichung der NO_x-Simulationen bei Stauzyklen mit grober Kennfeldraasterung bei Stauzyklen

Es ist festzuhalten, dass sowohl bei der Simulation von RDE-Fahrten, als auch bei der Simulation von Stauzyklen mit der EO-Simulationsvariante beim untersuchten Audi A4 Avant bessere Ergebnisse erzielt werden. Bezüglich der Motorkennfeldraasterung ist kein nennenswerter Unterschied zu vermerken.

Für RDE-Fahrten werden mit der aktuellen Methodik mit einer größeren SCR-Konvertierungskennfeldraasterung bessere Simulationsergebnisse erreicht, was aber auf die ungünstige Kennfeldglättung zurückzuführen ist. Hier sollen in zukünftigen Arbeiten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Für Stauzyklen und vor allem für die Simulation des Auskühlverhaltens ist eine feinere SCR-Konvertierungskennfeldraasterung zu bevorzugen.

Generell sind EoT-Simulationen aufgrund der fehlenden Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems nicht für die Simulation von Stauzyklen geeignet.

5. Abschätzung von Steuerungsmodellen für NO_x -Reduktion unter Eindosierung von AdBlue

Aufgrund der Tatsache, dass bei den durchgeführten Stauzyklen auf einer Teststrecke trotz niedriger Temperaturen relativ hohe NO_x -Konvertierungsraten beim untersuchten Audi A4 Avant auftreten (siehe Abbildung 3-28), wird vermutet, dass ausreichend NH_3 im SCR-Katalysator während der Aufwärmphase zwischengespeichert wurde, da bei solch niedrigen Temperaturen kein AdBlue mehr eingespritzt werden kann. Aus diesem Grund wurde ein NH_3 -Speicherungsmodell erstellt, mit dem der Ammoniak-Füllstand unter gewissen Annahmen auf Basis von Messdaten berechnet werden kann, um zu überprüfen ob die getroffene Annahme zutrifft.

5.1 NH_3 -Speicherungsmodell

Definitionen und Annahmen

Für das erstellte NH_3 -Speicherungsmodell ist eine Reihe von Annahmen zu treffen. Zum einen muss eine untere Temperaturgrenze definiert werden, ab welcher keine Einspritzung von AdBlue mehr stattfindet. Diese wird im Folgenden mit 180 °C definiert. Weiters besteht mit dem erstellen Modell die Möglichkeit, eine obere Temperaturgrenze für die AdBlue-Einspritzung zu definieren. Diese ist für die folgenden Untersuchungen mit 600 °C definiert.

Um feststellen zu können, wie viel Ammoniak zur Reduktion von Stickoxiden benötigt wird, muss definiert werden, welche chemische Reaktionsgleichung (Gleichung (2-4), (2-5) oder (2-6)) zur Nachbildung verwendet werden soll. Aus dem Verhältnis der Molzahlen ergibt sich für Gleichungen (2-4) und (2-5) ein Verhältnis von benötigtem molarem Ammoniak zu konvertierten molaren Stickoxiden von 1:1 ($\delta_{mol} = 1$). Lediglich unter Verwendung von Gleichung (2-6) wird mehr Ammoniak benötigt. Das Verhältnis ist in diesem Fall 4:3 ($\delta_{mol} = 4/3$).

Der tatsächliche Verbrauch an NH_3 errechnet sich aus den molaren benötigten Mengen und den molaren Massen von Ammoniak und NO_2 ¹¹ nach Gleichung (5-1).

$$\Delta g_{\text{NH}_3} = \Delta g_{\text{NO}_2} * \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NO}_2}} * \delta_{mol} \quad (5-1)$$

Δg_{NH_3}	[g]	Ammoniak-Menge
Δg_{NO_2}	[g]	Stickstoffdioxid-Menge
$M_{\text{NH}_3} = 17$	[kg/kmol]	Molare Masse von Ammoniak
$M_{\text{NO}_2} = 46$	[kg/kmol]	Molare Masse von Stickstoffdioxid
δ_{mol}	[1]	Molverhältnis

¹¹ Stickoxide werden NO_2 -äquivalent gemessen. Daher wird für die Ermittlung der Ammoniak-Masse die molare Masse von Stickstoffdioxid (46 g/mol) verwendet.

Weiters berücksichtigt das NH₃-Speicherungsmodell ein temperaturabhängiges Speicherungsvermögen des SCR-Katalysators nach [5], wie in Abbildung 2-7 dargestellt ist. Es wird zudem angenommen, dass Hersteller aufgrund dieser starken Temperaturabhängigkeit versuchen, den NH₃-Bestand auf ca. 50 % einzuregeln, damit der NH₃-Schlupf möglichst gering gehalten werden kann und andererseits auch immer genug NH₃ vorhanden ist.

Diese Regelungsstrategie ist im Zuge der vorliegenden Arbeit durch drei unterschiedliche, Feed-Verhältnisse nachgebildet. Dieses Verhältnis wird über Gleichung (5-2) definiert. Tabelle 5-1 stellt die unterschiedlichen Feed-Verhältnisse in Abhängigkeit des prozentuellen temperaturabhängigen Füllstandes dar.

$$\alpha_0 := \frac{\text{molares eingespritztes NH}_3}{\text{molares konvertiertes NO}_x} \quad (5-2)$$

α_0 [-] Molares Verhältnis von eingespritztem Ammoniak zu konvertierten Stickoxiden

Tabelle 5-1: Zusammenfassung unterschiedlicher Feed-Verhältnisse

Prozentueller Füllstand ξ	α_0 [%]
$0 < \xi < 50$	7
$50 \leq \xi < 70$	0.98
$\xi \geq 70$	0

Außerdem wird als Rahmenbedingung der Füllstand zu Beginn des jeweiligen Zyklus definiert. Dieser hat allerdings aufgrund der vorliegenden Regelungsstrategie nur einen untergeordneten Einfluss auf die folgenden Untersuchungen.

Anhand dieser Annahmen wurden zwei Teststrecken-Stauzyklen in Bezug auf die NH₃-Speicherung untersucht.

Untersuchung der Ammoniak-Speicherung bei Stauzyklen mit und ohne Start-Stopp

Das erstellte NH₃-Speicherungsmodell ist auf zwei Teststrecken-Stauzyklen angewandt. Beim Vergleich zwischen Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 wird zum einen deutlich, dass beim Zyklus mit aktiver Start-Stopp-Funktion deutlich länger AdBlue eingespritzt werden kann. Zudem kann festgestellt werden, dass bei beiden Stauzyklen auch nach langem Betrieb unter 180 °C ausreichend NH₃ im SCR-Katalysator gespeichert ist. Dadurch können die hohen Konvertierungsraten auch gegen Ende des Stauzyklus, zu sehen in Abbildung 3-28, erklärt werden. Weiters kann unter genauer Betrachtung des aktuellen Füllstands (rot markiert) erkannt werden, dass ohne aktiver Start-Stopp-Funktion deutlich mehr Ammoniak aufgrund der höheren NO_x-Emissionen benötigt wird.

Selbst wenn man verschärfend annimmt, dass beim untersuchten Audi A4 Avant erst ab 220 °C

AdBlue eingespritzt wird, kann festgestellt werden, dass zum Ende der jeweiligen Zyklen immer noch ausreichend Ammoniak im SCR-Katalysator vorhanden ist.

Es kann somit festgehalten werden, dass ein vollständiger Verbrauch aller NH_3 -Reserven im SCR-Katalysator bei keinem gemessenen Zyklus aufgetreten ist. Hierfür wären deutlich längere Stauzyklen im Niederlastbereich notwendig.

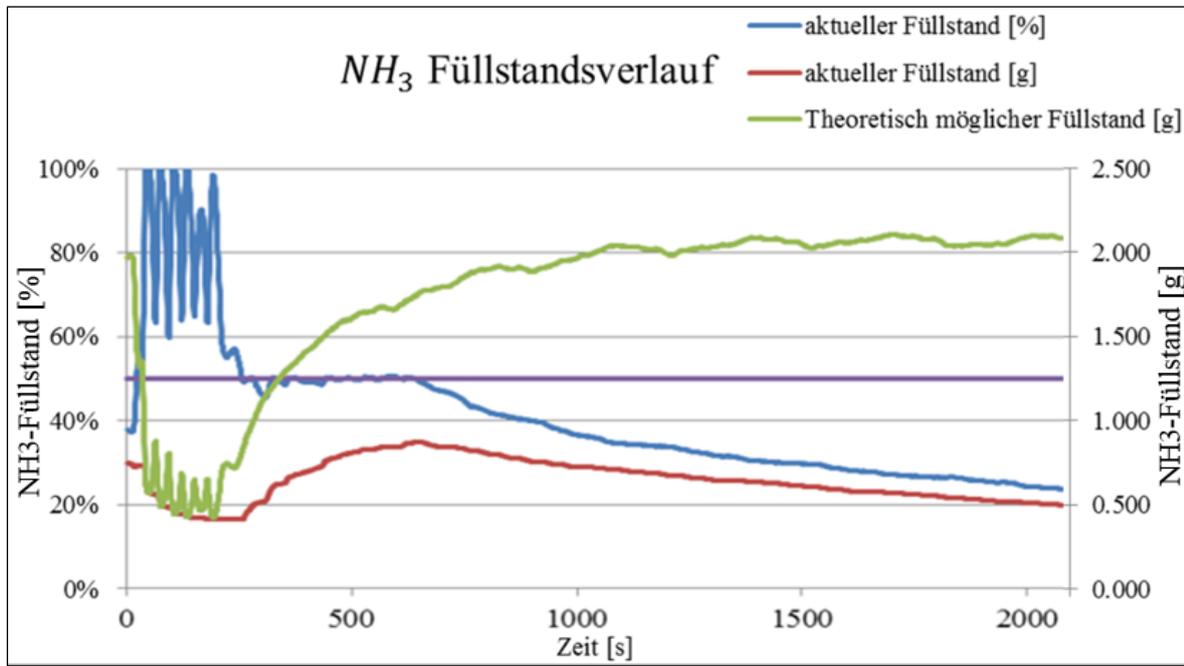


Abbildung 5-1: NH_3 -Füllstandsverlauf beim Zyklus AVL_TS_2 (ohne Start-Stopp)

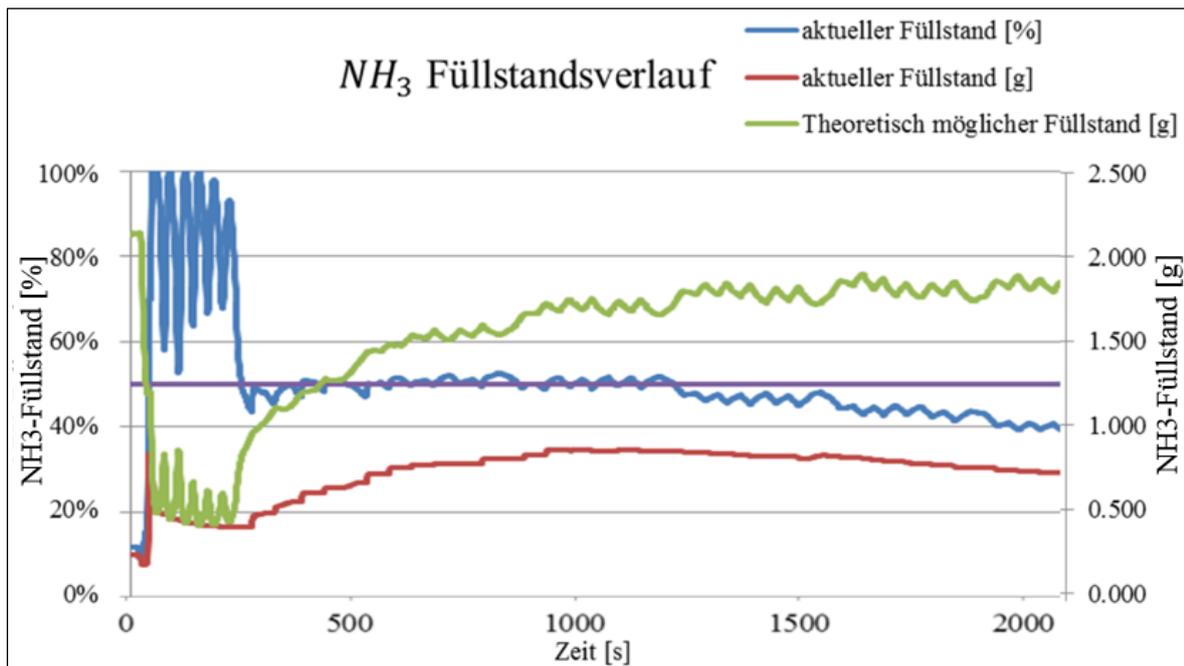


Abbildung 5-2: NH_3 -Füllstandsverlauf beim Zyklus AVL_TS_3 (mit Start-Stopp)

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch Messdaten konnte unter anderem festgestellt werden, dass eine aktive Start-Stopp Funktion neben der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs eine Reihe von Vorteilen in Bezug auf das Emissionsverhalten hat. Zudem konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche AGR-Strategien beim Versuchsfahrzeug in Verwendung sind und diese einen hohen Einfluss auf die Stickoxidemission hat. Weiters konnte eine größtenteils lineare Korrelation zwischen End-of-Tailpipe Massenstrom zu End-of-Tailpipe + ND-AGR Massenstrom festgestellt werden.

Das untersuchte Fahrzeug erfüllt schon mit wenigen Ausnahmen die seit September 2017 gültige RDE-Emissionsgesetzgebung, was beachtlich ist, da das Fahrzeug nach der (alten) Emissionsgesetzgebung Euro 6b typisiert ist. Die Stickoxidemissionen können bei Dieselfahrzeugen durch die Verwendung von SCR-Katalysatoren deutlich reduziert werden, wie auch das Testfahrzeug Audi A4 Avant zeigt. Analysen der Stauzyklen-Fahrten haben ergeben, dass selbst bei starkem Auskühlverhalten des Abgasnachbehandlungssystems und nach langem Betrieb in diesem Bereich (> 20 min), hohe Konvertierungsraten durch den SCR-Katalysator erreicht werden. Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass dies auf die gute Ammoniak-Speicherungsfähigkeit von SCR-Katalysatoren zurückzuführen ist.

In Bezug auf Simulationsvarianten konnte festgestellt werden, dass für das untersuchte Fahrzeug eine Simulation mit Berücksichtigung des Abgasnachbehandlungssystems immer zu besseren Ergebnissen führt. Für die Abbildung des Emissionskennfeldes kann eine grobe Rasterung verwendet werden. Mit einer feineren Motorkennfeldraasterung können beim untersuchten Fahrzeug keine besseren Simulationsergebnisse erzielt werden. Eine zusätzliche, Verbesserung kann beim untersuchten Audi A4 Avant durch Berücksichtigung des ND-AGR-Massenstroms erzielt werden. Bei der SCR-Kennfeldraasterung konnte festgestellt werden, dass die Rasterung und Kennfeldglättung sowie die Plausibilisierung noch in weiteren Arbeiten untersucht werden soll.

Außerdem konnte festgestellt werden, dass mit der Delaunay-Triangulation-Interpolationsmethode die besten Simulationsergebnisse erreicht werden können.

Das erarbeitete methodische Iterationsverfahren zur Optimierung des Abgasnachbehandlungssystems hat zu einer deutlichen Verbesserung der Temperatursimulation geführt und könnte in weiteren Schritten durch einen Algorithmus automatisiert werden.

Auf Basis des erarbeiteten Ammoniak-Speicherungsmodells kann abgeschätzt werden, wie lange Stickoxidkonvertierungsraten in SCR-Katalysatoren bei niedrigen Temperaturen stattfinden können. Eine Implementierung dieses Modellansatzes in PHEM könnte im Zuge weiterer Arbeiten durchgeführt werden.

A) Anhang 1

Tabelle A-1: Übersicht der einzelnen Messfahrten-Teil 1

Zyklus	Gesamtgewicht [kg]	Fahrstil	ECU-Daten
Ries_1	1857	Normal	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] Kühlmitteltemperatur [°C]
Ries_2	1857	Normal	Motordrehzahl [rpm] Errechnete Motorleistung [%]
Ries_3 Ries_5	1782	ECO	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] Temperatur vor SCR [°C] HD-AGR Massenstrom [g/h] ND-AGR Massenstrom [g/h] Kühlmitteltemperatur [°C]
Ries_4	1857	ECO	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] Temperatur vor SCR [°C] HD-AGR Massenstrom [g/h] ND-AGR Massenstrom [g/h] Kühlmitteltemperatur [°C]
Arzberg_1 Arzberg_2	1857	Normal	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] Temperatur vor SCR [°C] HD-AGR Massenstrom [g/h] ND-AGR Massenstrom [g/h] Kühlmitteltemperatur [°C]
Arzberg_3	1782	Aggressiv	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] Temperatur vor SCR [°C] HD-AGR Massenstrom [g/h] ND-AGR Massenstrom [g/h] Kühlmitteltemperatur [°C]

Tabelle A-2: Übersicht der einzelnen Messfahrten-Teil 2

Zyklus	Gesamtgewicht [kg]	Fahrstil	ECU-Daten
Arzberg_4	2037	Aggressiv	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] Temperatur vor SCR [°C] HD-AGR Massenstrom [g/h] ND-AGR Massenstrom [g/h] Kühlmitteltemperatur [°C]
Puntigam_1	1857	Staufahrt in Graz	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h]
AVL_TS_1 ¹² AVL_TS_2 AVL_TS_3	1857	Künstlicher Stau	Motordrehzahl [rpm] Fahrgeschwindigkeit [km/h] HD-AGR Massenstrom [g/h] ND-AGR Massenstrom [g/h] Temperatur vor DOC [°C] Temperatur vor SCR [°C] Temperatur nach DPF [°C]

¹² AVL_TS_X bezeichnet eine Messfahrt auf der Teststrecke der AVL List GmbH

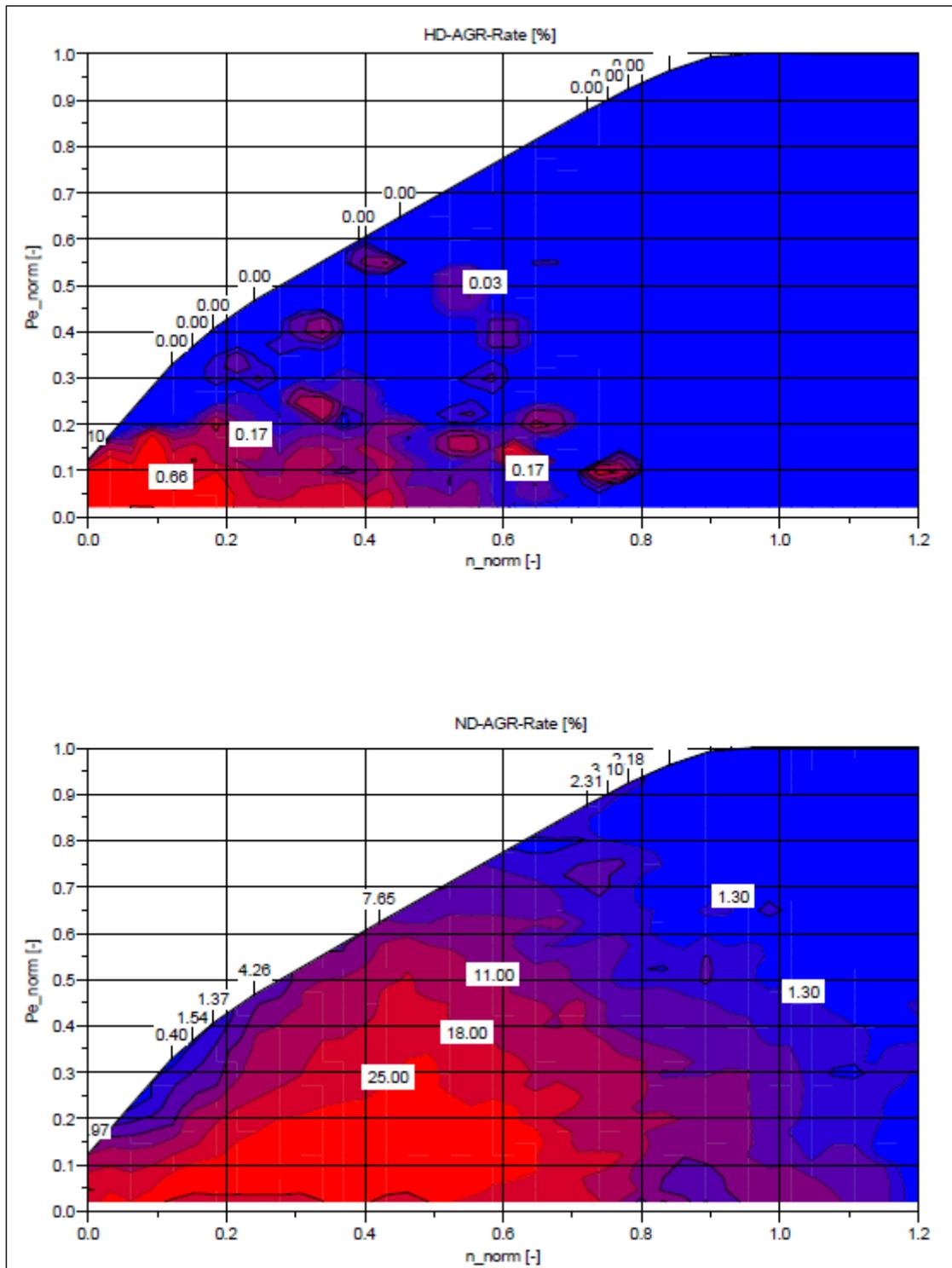


Abbildung A-1: HD- und ND-AGR-Rate

Tabelle A-3: Chronologische Abfolge der Messfahrten mit Partikelemissionsdaten

Zyklus; chronologisch sortiert	Kilometerstand bei Beginn [km]	Kilometerstand bei Ende [km]	Durchschnittliche Partikelfilteremissionen [#h]
Ries_1	172	257	8,80E+10
Ries_2	257	342	8,54E+10
Puntigam	343	355	6,45E+10
Arzberg_1	356	461	1,06E+11
Ries_3 (vor Reg.)	462	488	3,52E+11
Ries_3 (Reg.)	488	505	1,71E+14
Ries_3 (nach Reg.)	505	545	3,52E+11
Arzberg_2	545	651	1,02E+12
Ries_4	651	740	8,44E+10
Ries_5	740	827	8,88E+10
Arzberg_3 (vor Reg.)	827	870	3,10E+11
Arzberg_3 (Reg.)	870	906	1,65E+14
Arzberg_3 (nach Reg.)	906	932	3,10E+11
Arzberg_4	1075	1181	2,56E+11
Stauzyklen Teststrecke	1181	1233	4,82E+11

Tabelle A-4: Zusammenfassung der Messdaten von Stauzyklen

Zyklus	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	NO _x [g/km]	NO [g/km]	PN [#h]
Puntigam	205,2	0,05	0,16	0,13	3,61E+09
AVL_TS_1	381,8	0,42	1,19	0,75	4,11E+10
AVL_TS_2	361,8	0,13	1,40	1,01	2,45E+10
AVL_TS_3	349,9	0,11	1,40	0,96	2,71E+10

B) Anhang 2

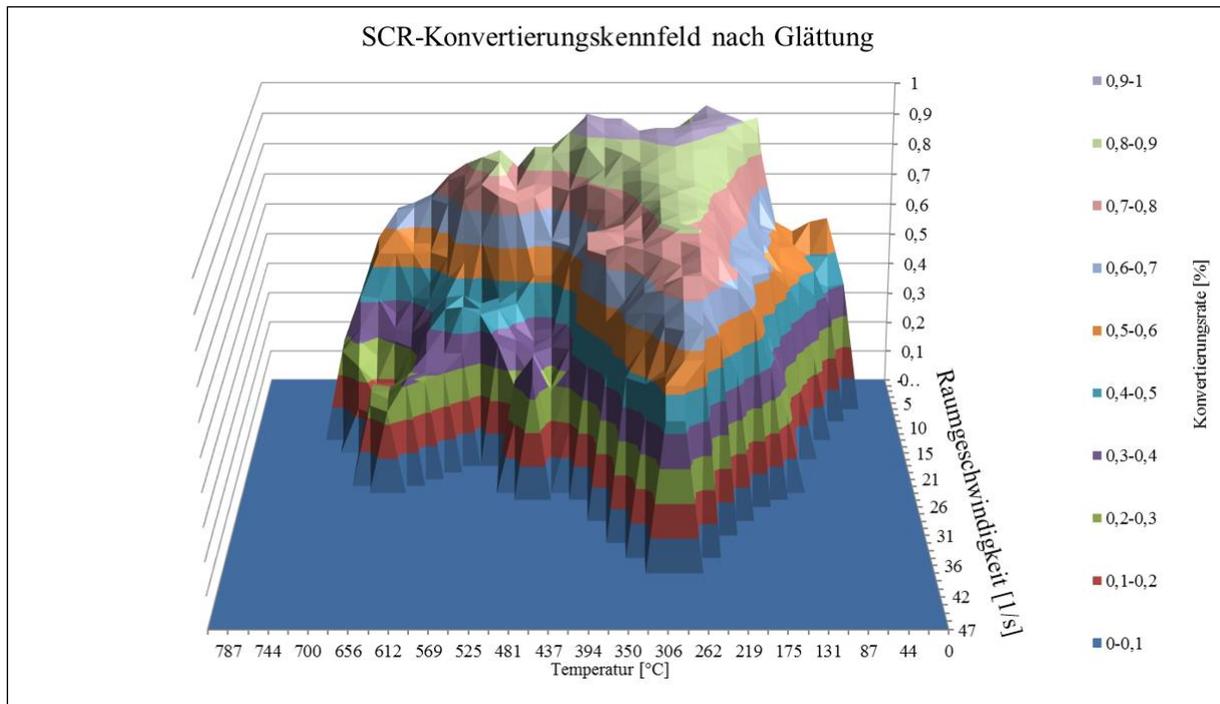


Abbildung B-1: SCR-Konvertierungskennfeld nach Glättung; vor der Anwendung von Plausibilitätskriterien

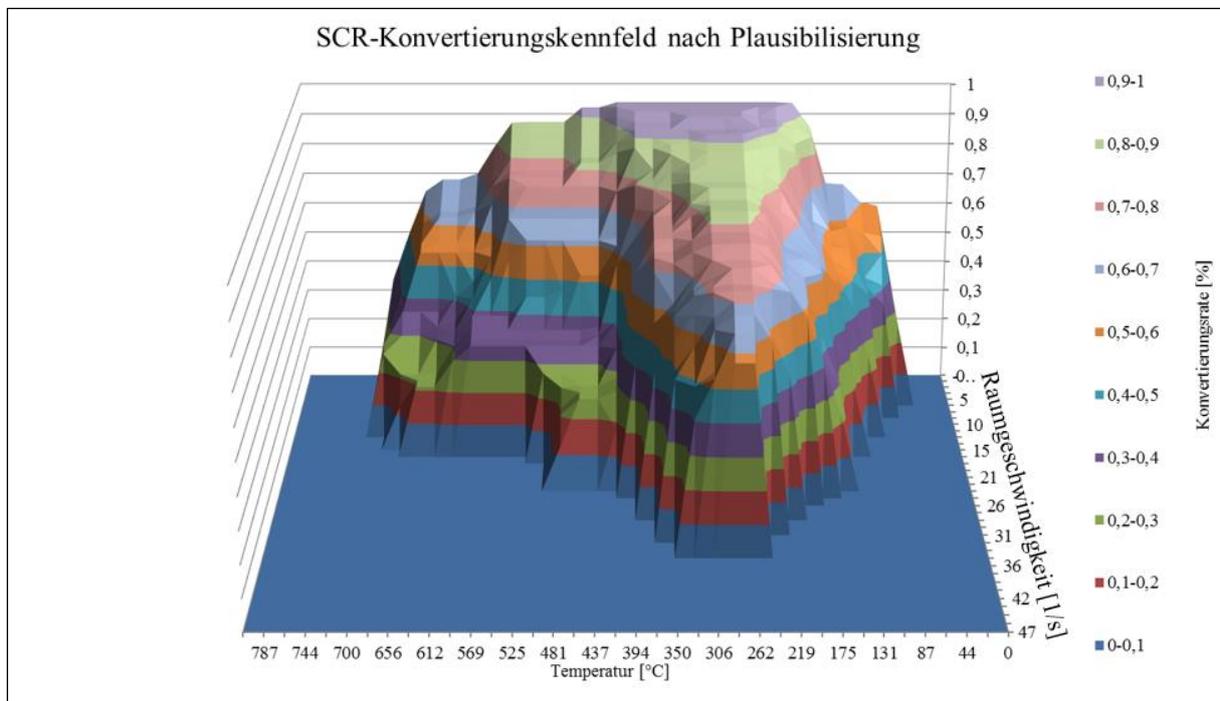


Abbildung B-2: SCR-Konvertierungskennfeld nach Anwendung von Plausibilitätskriterien

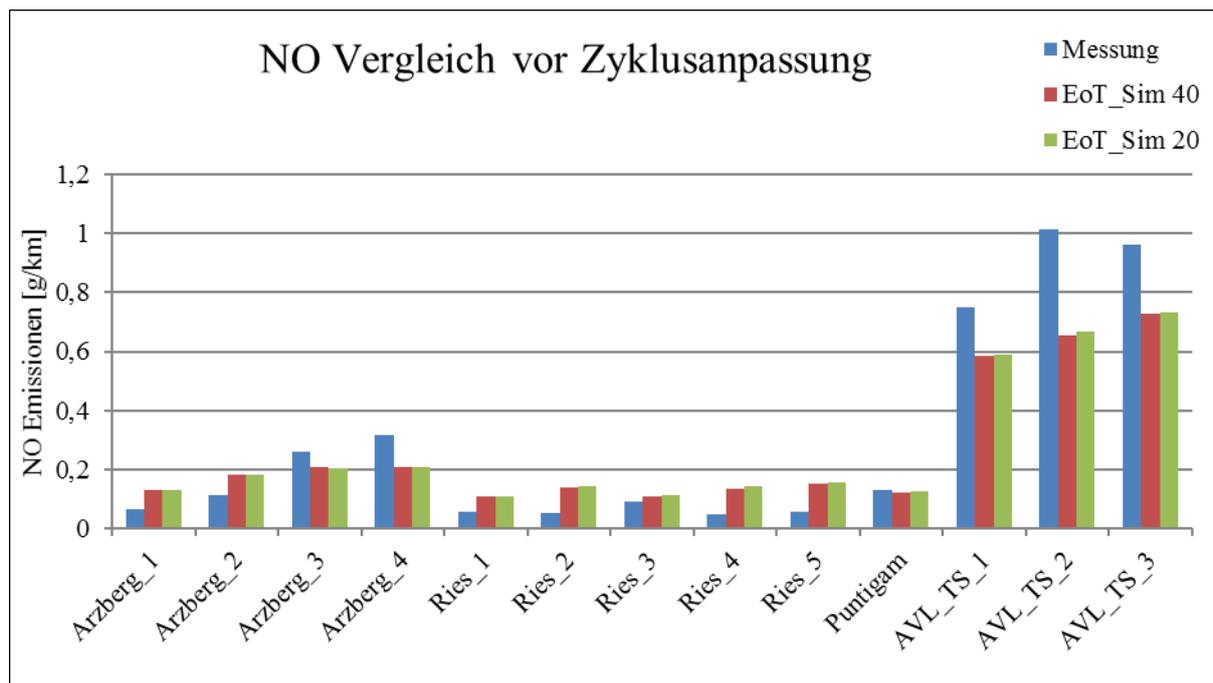


Abbildung B-3: Zusammenfassung der NO-Messung und EoT-Simulation vor Zyklusanpassung

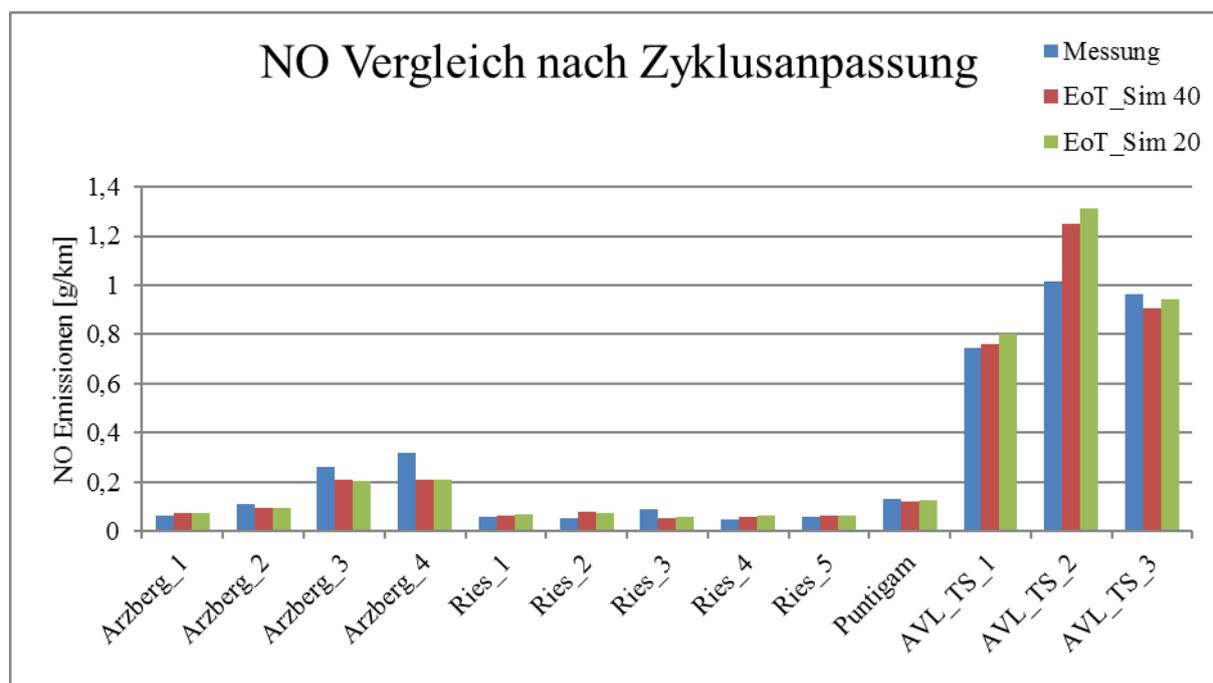


Abbildung B-4: Zusammenfassung der NO-Messung und EoT-Simulation nach Zyklusanpassung

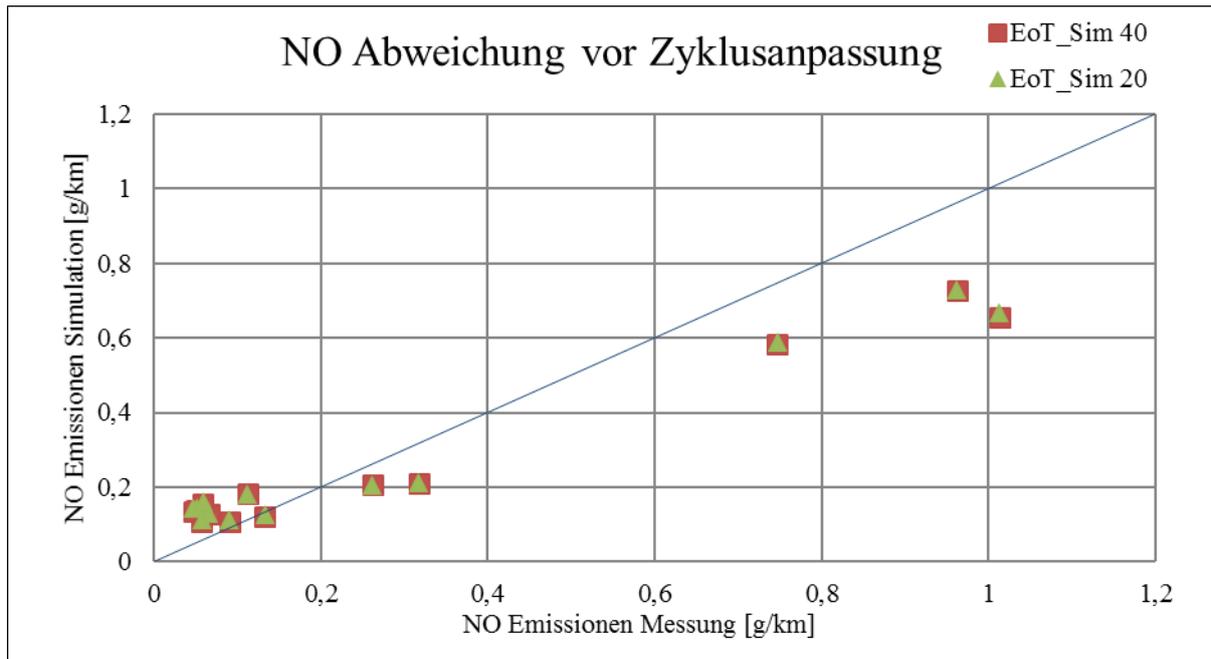


Abbildung B-5: Abweichung der NO-Simulationen zur Messung vor Zyklenanpassung

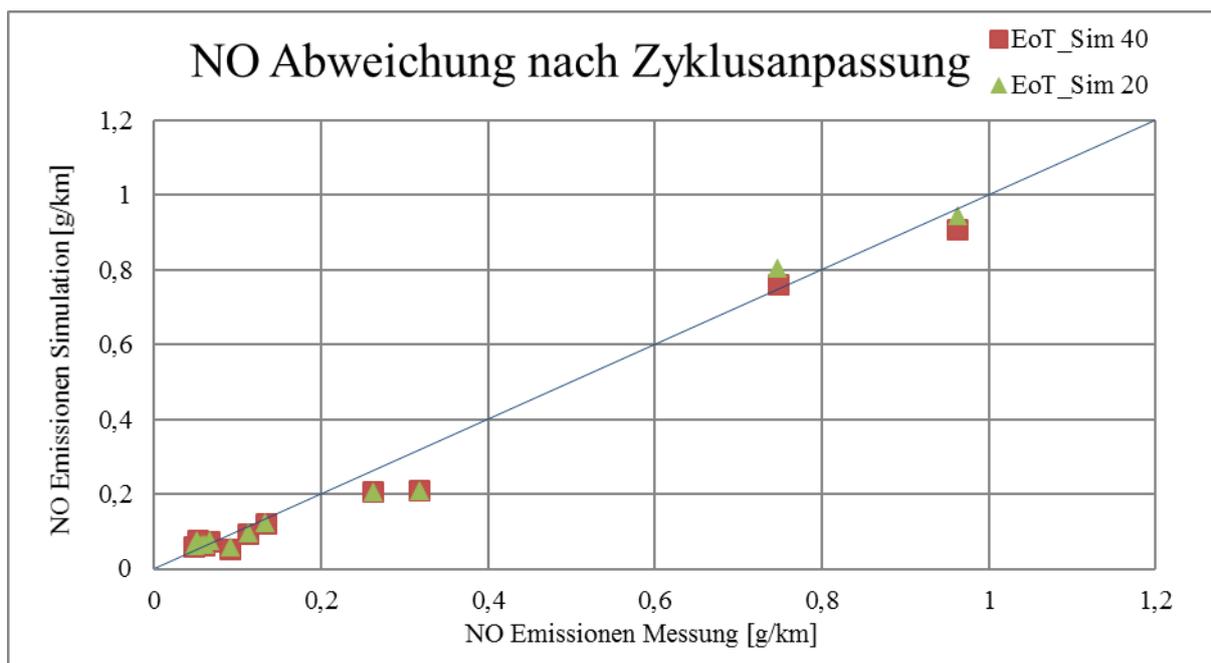


Abbildung B-6: Abweichung der NO-Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung

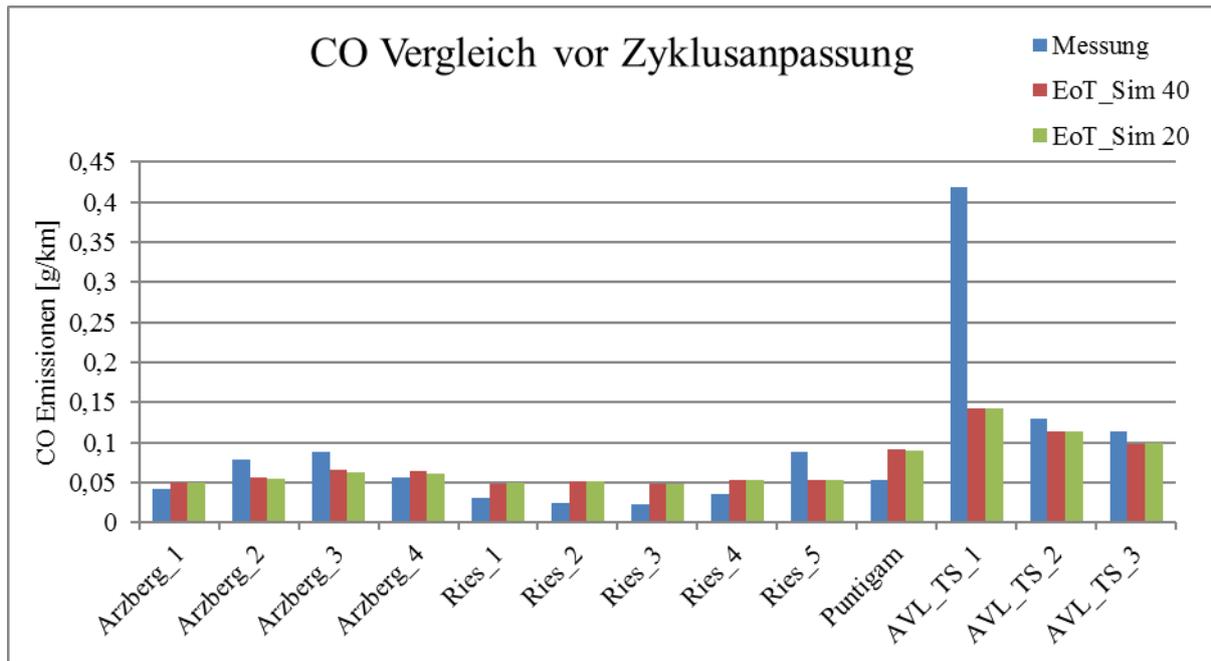


Abbildung B-7: Zusammenfassung der CO-Messung und EoT-Simulation vor Zyklenanpassung

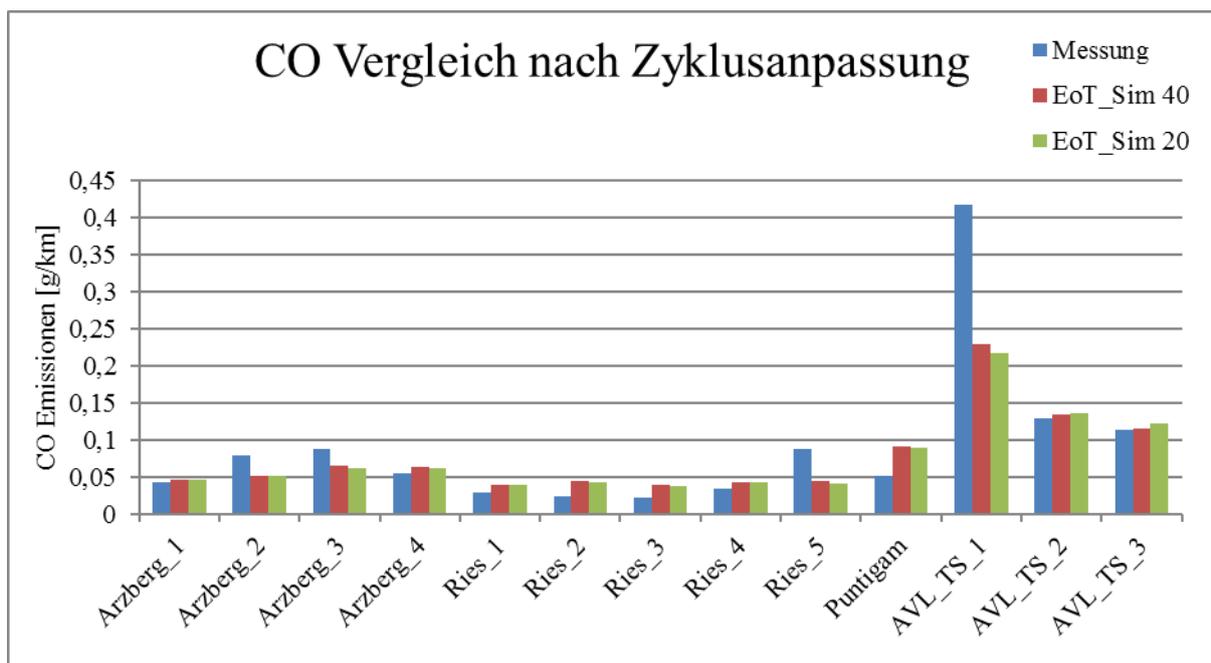


Abbildung B-8: Zusammenfassung der CO-Messung und EoT-Simulation nach Zyklenanpassung

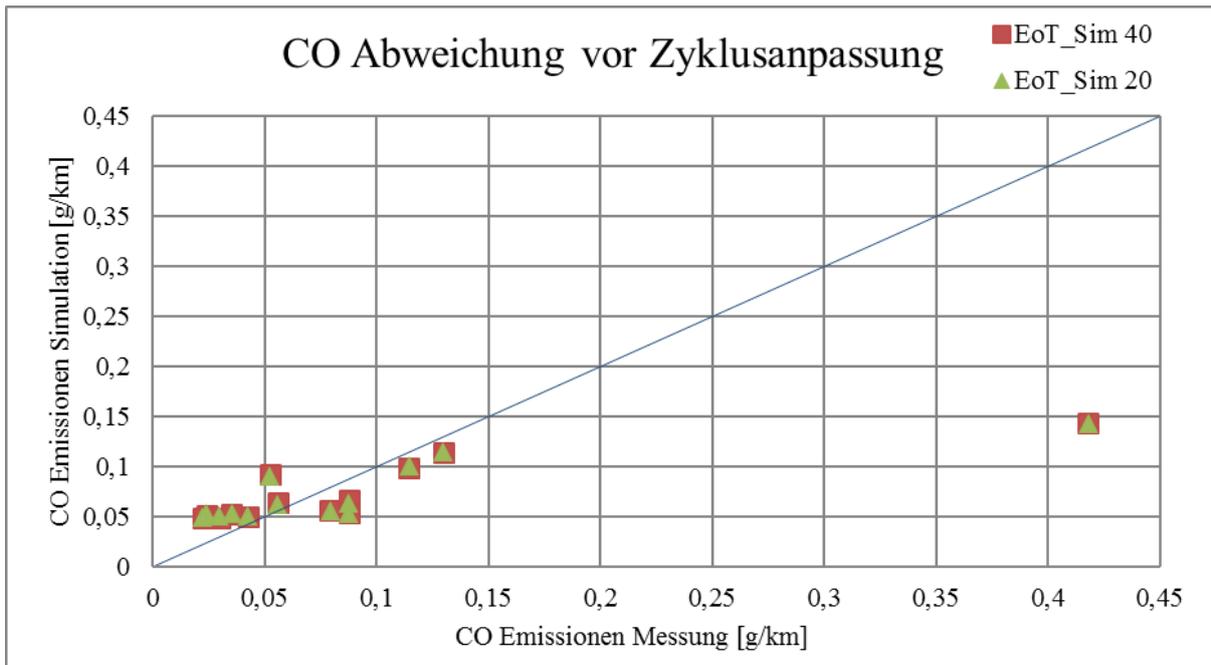


Abbildung B-9: Abweichung der CO-Simulationen zur Messung vor Zyklusanpassung

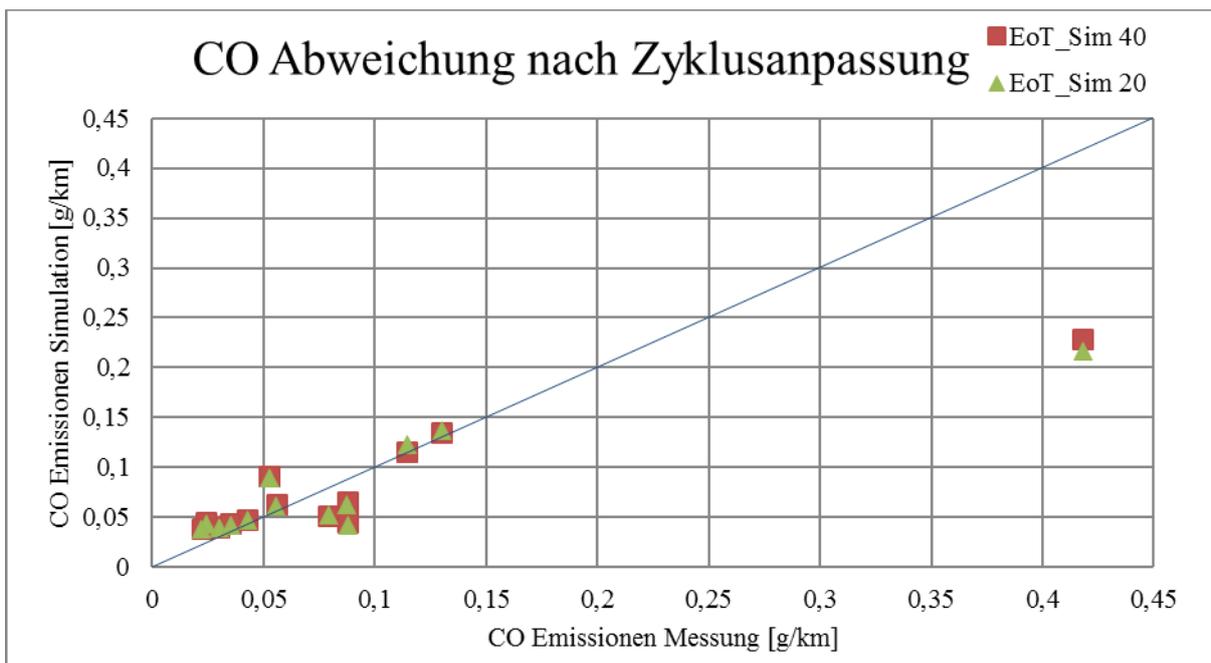


Abbildung B-10: Abweichung der CO-Simulationen zur Messung nach Zyklusanpassung

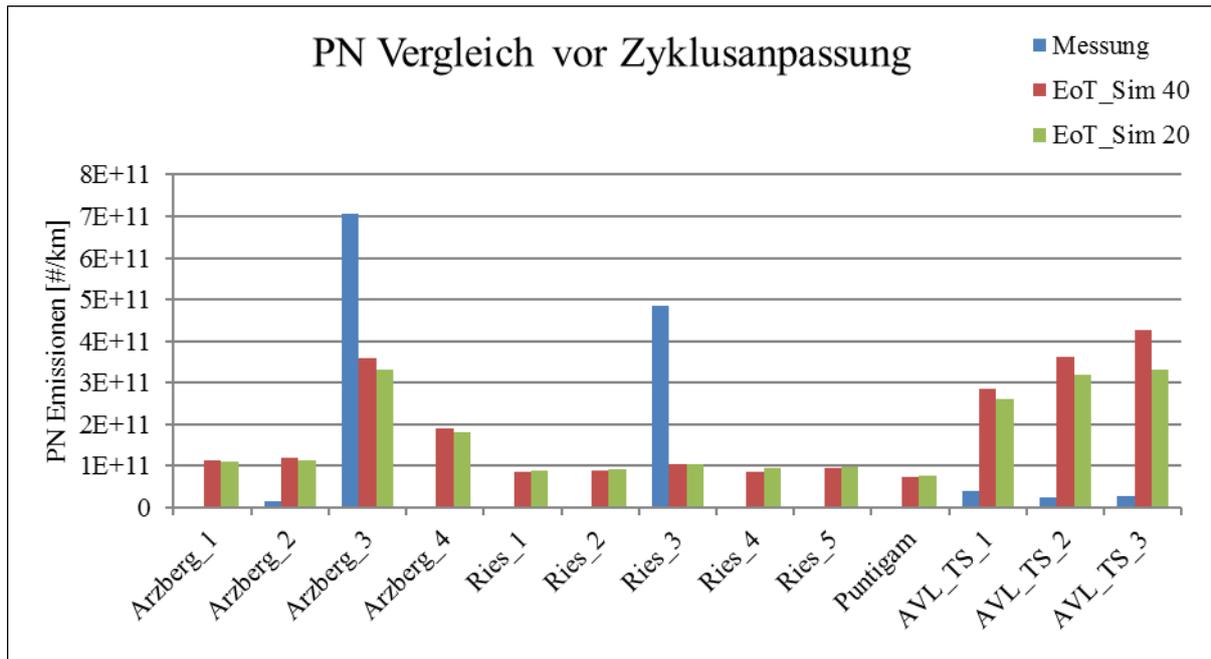


Abbildung B-11: Zusammenfassung der PN-Messung und EoT-Simulation vor Zyklusanpassung

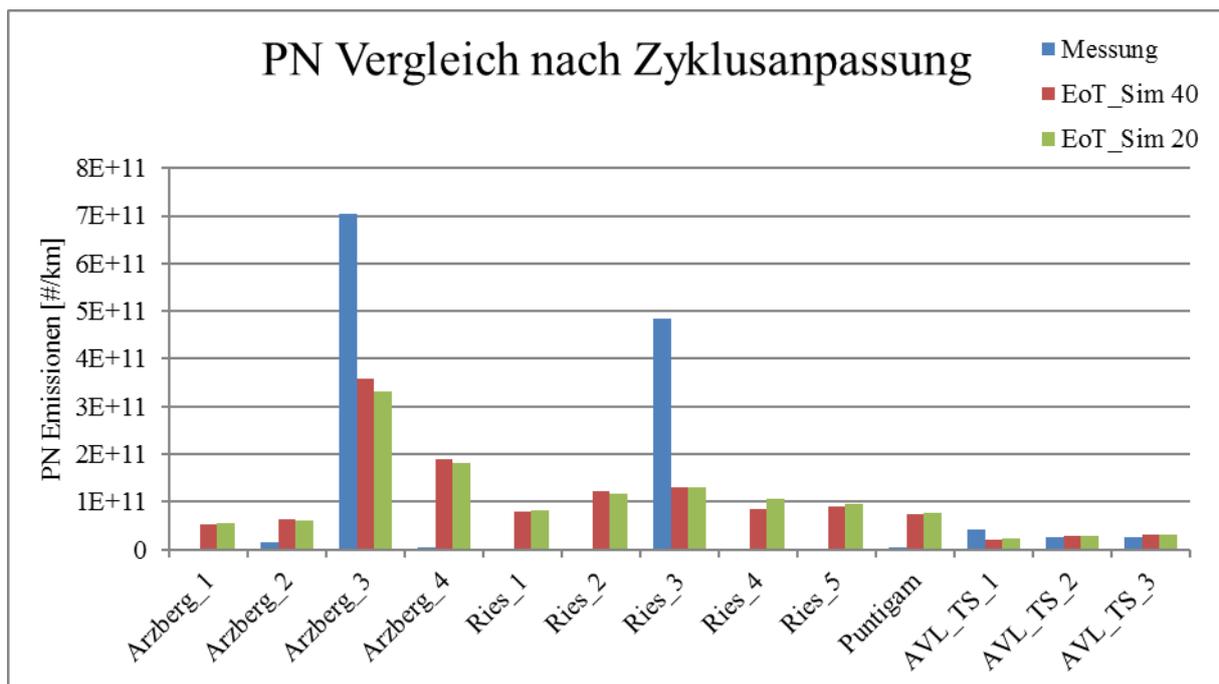


Abbildung B-12: Zusammenfassung der PN-Messung und EoT-Simulation nach Zyklusanpassung

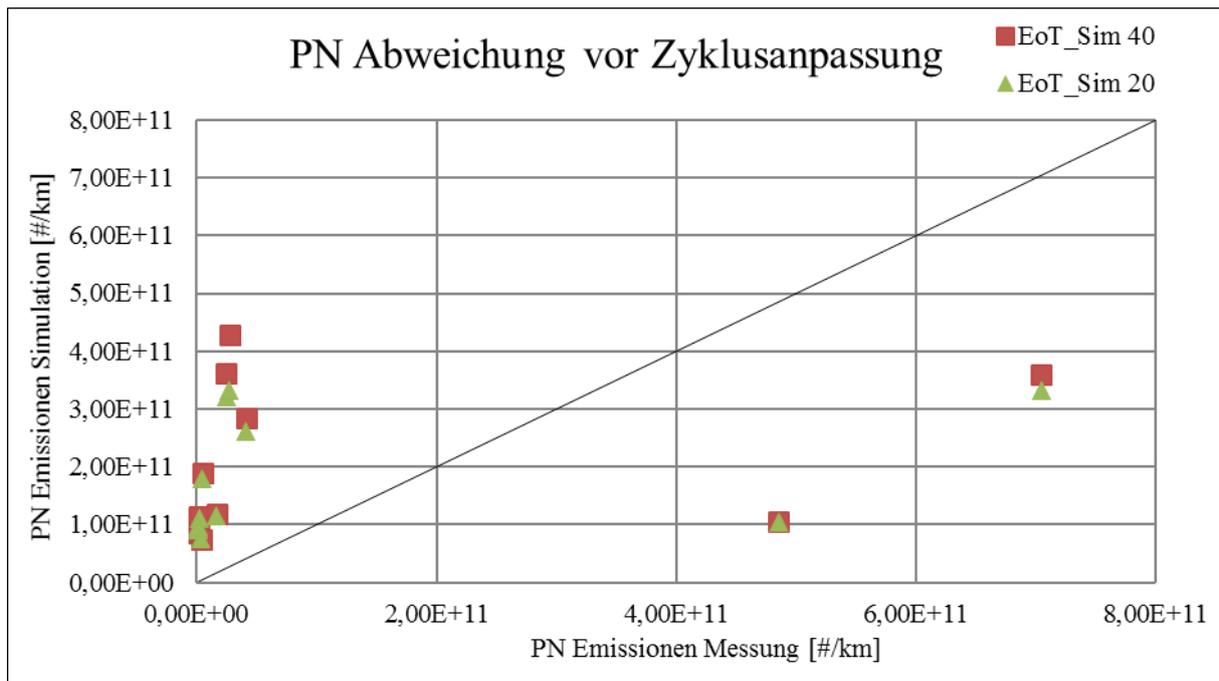


Abbildung B-13: Abweichung der PN-Simulationen zur Messung vor Zyklenanpassung

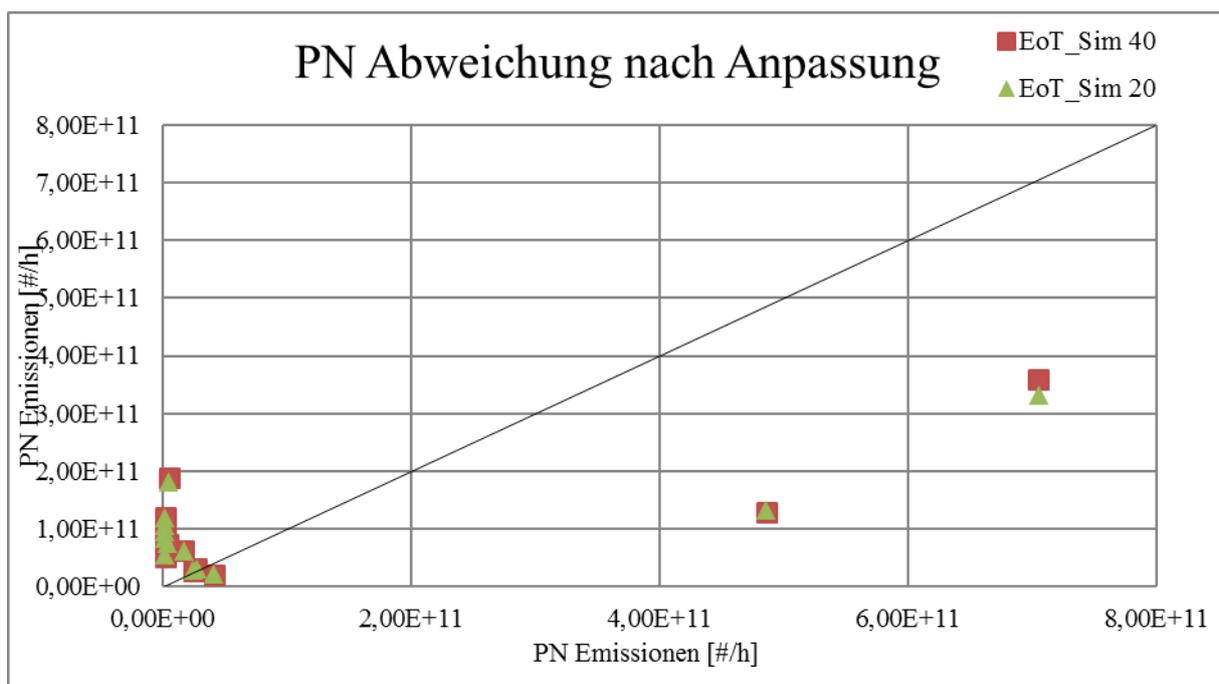


Abbildung B-14: Abweichung der PN-Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung

Tabelle B-1: Zusammenfassung der Simulationsvarianten zur Ermittlung der besten Interpolationsmethode

Nummer	Simulationsvariante
1	MS1_40_Del
2	MS1_40_Shep
3	MS1_40_Shep0
4	MS1_20_Del
5	MS1_20_Shep
6	MS1_20_Shep0
7	MS2_40_Del
8	MS2_40_Shep
9	MS2_40_Shep0
10	MS2_20_Del
11	MS2_20_Shep
12	MS2_20_Shep0

Tabelle B-2: Zusammenfassung der Simulationsvarianten für SCR-Kennfeldraasterungsuntersuchung

Simulationsvariante	Mittlere Abweichung [%]	Standardabweichung [%]
DA2_MS1_3sek_fein	51,82	76,34
DA3_MS1_3sek_fein	68,54	82,24
DA2_MS2_3sek_fein	48,77	60,15
DA3_MS2_3sek_fein	60,15	87,14
DA2_MS1_3sek_grob	42,58	70,33
DA3_MS1_3sek_grob	63,25	76,37
DA2_MS2_3sek_grob	36,12	72,58
DA3_MS2_3sek_grob	54,54	79,48

C)Anhang 3

Tabelle C-1: EoT-Simulationsergebnisse mit grober Emissionskennfeldraasterung

Zyklus\ Emissionskomponente	Emissionskennfeldraasterung 20x20				
	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	PN [#km]	NO [g/km]
Arzberg_1	136,5	0,17	0,05	1,12E+11	0,13
Arzberg_2	148,2	0,24	0,06	1,14E+11	0,18
Arzberg_3	150,7	0,27	0,06	3,32E+11	0,21
Arzberg_4	151,0	0,28	0,06	1,80E+11	0,21
Ries_1	129,9	0,15	0,05	9,06E+10	0,11
Ries_2	135,0	0,19	0,05	9,08E+10	0,14
Ries_3	126,0	0,15	0,05	1,04E+11	0,11
Ries_4	142,5	0,19	0,05	9,49E+10	0,14
Ries_5	143,0	0,21	0,05	9,76E+10	0,16
Puntigam	190,1	0,17	0,09	7,57E+10	0,12
AVL_TS_1	324,7	0,80	0,14	2,61E+11	0,59
AVL_TS_2	309,6	0,91	0,11	3,20E+11	0,67
AVL_TS_3	293,0	0,99	0,10	3,32E+11	0,73

Tabelle C-2: EoT-Simulationsergebnisse mit feiner Emissionskennfeldraasterung

Zyklus\ Emissionskomponente	Emissionskennfeldraasterung 40x40				
	CO ₂ [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	PN [#km]	NO [g/km]
Arzberg_1	136,47	0,17	0,05	1,15E+11	0,13
Arzberg_2	148,16	0,24	0,06	1,19E+11	0,18
Arzberg_3	150,64	0,27	0,07	3,59E+11	0,21
Arzberg_4	150,97	0,28	0,06	1,90E+11	0,21
Ries_1	129,87	0,14	0,05	8,63E+10	0,11
Ries_2	135,07	0,18	0,05	8,79E+10	0,14
Ries_3	126,07	0,14	0,05	1,05E+11	0,11
Ries_4	142,54	0,18	0,05	8,50E+10	0,14
Ries_5	142,96	0,20	0,05	9,45E+10	0,15
Puntigam	190,08	0,17	0,09	7,49E+10	0,12
AVL_TS_1	324,76	0,79	0,14	2,84E+11	0,58
AVL_TS_2	309,51	0,91	0,11	3,62E+11	0,66
AVL_TS_3	292,93	0,99	0,10	4,28E+11	0,73

Tabelle C-3: EO-Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Varianten

Zyklus/ Simulationsvariant e	NOx-Emissionen [g/km]														
	Emissionskennfeldrastrung 40x40							Emissionskennfeldrastrung 20x20							
	MS1 20sek DA1	MS1 3sek DA1	MS1 20sek DA3	MS1 20sek DA3	MS1 20sek plaus	MS1 3sek DA3	MS1 3sek DA3 plaus	MS1 3sek DA2	MS2 3sek DA1	MS2 3sek DA3	MS2 3sek DA2	MS1 3sek DA3	MS1 3sek DA2	MS2 3sek DA3	MS2 3sek DA2
Arzberg_1	0,19	0,16	0,17	0,20	0,14	0,16	0,15	0,15	0,15	0,13	0,14	0,13	0,15	0,13	0,14
Arzberg_2	0,31	0,25	0,28	0,31	0,22	0,24	0,24	0,24	0,23	0,21	0,23	0,20	0,23	0,18	0,22
Arzberg_3	0,33	0,27	0,30	0,32	0,24	0,26	0,26	0,26	0,26	0,23	0,25	0,23	0,26	0,22	0,25
Arzberg_4	0,43	0,36	0,39	0,42	0,32	0,36	0,35	0,35	0,35	0,31	0,34	0,30	0,33	0,28	0,32
Ries_1	0,17	0,15	0,15	0,16	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,12	0,14	0,12	0,14
Ries_2	0,22	0,19	0,20	0,22	0,17	0,19	0,18	0,18	0,19	0,18	0,19	0,16	0,17	0,16	0,18
Ries_3	0,16	0,14	0,12	0,24	0,11	0,11	0,14	0,14	0,12	0,09	0,11	0,11	0,13	0,09	0,11
Ries_4	0,24	0,21	0,23	0,25	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20	0,18	0,19	0,18	0,19
Ries_5	0,23	0,19	0,19	0,19	0,16	0,16	0,18	0,18	0,16	0,14	0,16	0,15	0,18	0,13	0,16
Puntigam	0,22	0,21	0,18	0,12	0,16	0,11	0,20	0,20	0,16	0,13	0,15	0,16	0,22	0,14	0,17
AVL TS_1	1,35	1,25	1,29	1,21	1,17	1,13	1,24	1,24	1,18	1,12	1,18	1,04	1,17	0,97	1,11
AVL TS_2	1,69	1,52	1,61	1,50	1,40	1,35	1,50	1,50	1,46	1,33	1,45	1,29	1,42	1,17	1,32
AVL TS_3	1,74	1,63	1,72	1,72	1,59	1,62	1,63	1,63	1,61	1,56	1,61	1,55	1,68	1,50	1,58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Rohabgaszusammensetzung beim Diesel-Motor im Teillastbereich [2]	2
Abbildung 2-2: Beispiele zu chemischer Zusammensetzung von Partikeln [7]	4
Abbildung 2-3: Prinzip der Hochdruck-AGR [2]	7
Abbildung 2-4: Prinzip der Hochdruck-AGR [2]	7
Abbildung 2-5: Prinzip-Skizze für aktives SCR-System [1]	9
Abbildung 2-6: Modularer Systemaufbau bei einem SCR-Verfahren [2]	10
Abbildung 2-7: Temperaturabhängigkeit der NH ₃ -Speicherfähigkeit von SCR-Systemen [5]	12
Abbildung 2-8: Systemskizze eines keramischen Partikelfilters [2]	13
Abbildung 2-9: Partikelfilterabscheidungsmechanismen [9]	13
Abbildung 2-10: Abscheidung von Partikeln an Oberflächen- und Tiefenfiltern [9]	14
Abbildung 2-11: Schema der Filterregenerationsmöglichkeiten im Motorkennfeld [5]	15
Abbildung 2-12: Geschwindigkeitsverlauf von NEDC und WLTC [10]	17
Abbildung 2-13: Emissionsspektrum eines schwarzen und eines realen Körpers, berechnet auf Basis von Gleichung (2-8)	19
Abbildung 2-14: Laminare Temperaturgrenzschicht	21
Abbildung 2-15: Systembeschreibung und Messprinzipien AVL Gas PEMS [17]	23
Abbildung 2-16: Messprinzip des PN-PEMS [22]	25
Abbildung 3-1: Schematische Systemdarstellung von Motor & Abgasnachbehandlungssystem Audi A4 Avant	27
Abbildung 3-2: Aufbau des Gas-PEMS im Versuchsfahrzeug	29
Abbildung 3-3: Riesroute [23]	31
Abbildung 3-4: Arzbergroute [23]	32
Abbildung 3-5: Streckenverlauf der Puntigamroute [23]	34
Abbildung 3-6: Stauzyklus-Szenario 1	35
Abbildung 3-7: Stauzyklus-Szenario 2	35
Abbildung 3-8: AVL-Teststrecke mit zwei unterschiedlichen Runden. [27]	36
Abbildung 3-9: Leistungsbezogenes generisches CO ₂ -Kennfeld	41
Abbildung 3-10: generisches CO ₂ -Kennfeld mit Absolutwerten	42
Abbildung 3-11: spezifisches CO-Kennfeld vom Audi A4 Avant, erstellt aus allen vorhandenen Messdaten	43
Abbildung 3-12: Gesamt-AGR-Rate, erstellt aus allen vorhandenen Messdaten	44
Abbildung 3-13: NO _x -Rohemissionskennfeld mit Absolutwerten, erstellt aus allen vorhandenen Messdaten	44
Abbildung 3-14: DPF-Regeneration bei Ries_3	45
Abbildung 3-15: DPF-Regeneration bei Arzberg_3	46
Abbildung 3-16: Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen bei RDE-Fahrten	47
Abbildung 3-17: CO-Emissionen vom Audi A4 Avant bei RDE-Fahrten	48
Abbildung 3-18: NO _x -Emissionen vom Audi A4 Avant bei RDE-Fahrten	49
Abbildung 3-19: DPF-Regeneration bei Ries_3	50
Abbildung 3-20: DPF-Regeneration bei Arzberg_3	51
Abbildung 3-21: PN-Emissionen vom Audi A4 Avant bei RDE-Fahrten	52
Abbildung 3-22: Unterschiedliche AGR-Strategien im Stillstand bei RDE-Fahrten	54
Abbildung 3-23: Unterschiedliche NO _x -Rohemissionsmassenstrom-Varianten aus Messdaten	55
Abbildung 3-24: Korrelation zwischen PEMS- und PEMS+ND-AGR-Massenstrom	56
Abbildung 3-25: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf der Stauzyklen auf der Teststrecke	57
Abbildung 3-26: Temperaturverlauf bei Stauzyklen	59
Abbildung 3-27: Einfluss von Start-Stopp auf NO _x -Rohemissionen bei den Stauzyklen	60
Abbildung 3-28: Einfluss der Start-Stopp auf NO _x -Emissionen End-of-Tailpipe bei den Stauzyklen AVL_TS_2 und AVL_TS_3	61

Abbildung 3-29: Verlauf der Konvertierungsrate mit und ohne Start-Stopp Funktion	62
Abbildung 3-30: Ausschließlich HD-AGR im Stillstand bei Stauzyklen ohne Start-Stopp	63
Abbildung 4-1: Funktionsprinzip von PHEM [33]	65
Abbildung 4-2: Konvertierungsrate über Raumgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur vor Anwendung von Plausibilitätskriterien	70
Abbildung 4-3: Konvertierungsrate über Raumgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur nach Anwendung von Plausibilitätskriterien	71
Abbildung 4-4: Konvertierungsrate über Temperatur bei bestimmten Raumgeschwindigkeiten vor Anwendung von Plausibilitätskriterien	72
Abbildung 4-5: Konvertierungsrate über Temperatur bei bestimmten Raumgeschwindigkeiten nach Anwendung von Plausibilitätskriterien	72
Abbildung 4-6: Zusammenfassung der NO _x -Messung und EoT-Simulation vor Zyklenanpassung	74
Abbildung 4-7: Zusammenfassung der NO _x -Messung und EoT-Simulation nach Zyklenanpassung	74
Abbildung 4-8: Abweichung der NO _x -Simulationen zur Messung vor Zyklenanpassung	75
Abbildung 4-9: Abweichung der NO _x -Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung	75
Abbildung 4-10: NO _x -Rohemissionsabweichung unterschiedlicher Simulationen	77
Abbildung 4-11: Vergleich verwendeter Kennfeldstützstellen bei grober und feiner SCR-Kennfeldraasterung	78
Abbildung 4-12: Auftreten nicht plausibler Konvertierungsverläufe bei feiner Kennfeldraasterung	79
Abbildung 4-13: Prinzip Skizze des 0-dimensionalen Modellansatzes [38]	80
Abbildung 4-14: Prinzip Skizze des 0-dimensionalen Abgasnachbehandlungssystems	81
Abbildung 4-15: Dynamische Viskosität von Reinstoffen in Abhängigkeit der Temperatur	84
Abbildung 4-16: CO ₂ -Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung	87
Abbildung 4-17: Abweichung der CO ₂ -EoT-Simulation zur PEMS-Messung	87
Abbildung 4-18: CO-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung	88
Abbildung 4-19: Abweichung der CO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung	88
Abbildung 4-20: NO _x -Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung	89
Abbildung 4-21: Abweichung der NO _x -EoT-Simulationen zur PEMS-Messung	90
Abbildung 4-22: NO-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung	90
Abbildung 4-23: Abweichung der NO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung	91
Abbildung 4-24: PN-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung	91
Abbildung 4-25: Abweichung der PN-EoT-Simulation zur PEMS-Messung	92
Abbildung 4-26: Temperaturvergleich zwischen EO-Simulation und Messung	93
Abbildung 4-27: Abweichung der Temperatursimulation zur Messung	93
Abbildung 4-28: Temperaturverlauf bei Arzberg ₂	94
Abbildung 4-29: Temperaturverlauf bei Ries ₃	94
Abbildung 4-30: NO _x -Vergleich zwischen EO-Simulation und Messung	95
Abbildung 4-31: Abweichung der NO _x -EO-Simulation zur PEMS-Messung	95
Abbildung 4-32: Vergleich der Simulation von NO _x -Emissionen mit feiner Kennfeldraasterung	96
Abbildung 4-33: Abweichung der NO _x -Simulationen mit feiner Emissionskennfeldraasterung und SCR-Kennfeldraasterung	96
Abbildung 4-34: Vergleich der Simulation von NO _x -Emissionen mit grober Kennfeldraasterung	97
Abbildung 4-35: Abweichung der NO _x -Simulationen mit grober Emissionskennfeldraasterung und SCR-Kennfeldraasterung	97
Abbildung 4-36: CO ₂ -Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung bei Stauzyklen	98

Abbildung 4-37: Abweichung der CO ₂ -EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen	99
Abbildung 4-38: CO-Vergleich zwischen EoT-Simulation und PEMS-Messung bei Stauzyklen	99
Abbildung 4-39: Abweichung der CO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen	100
Abbildung 4-40: Vergleich der EoT-Simulationen von NO _x -Emissionen bei Stauzyklen	100
Abbildung 4-41: Abweichung der NO _x -EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen	101
Abbildung 4-42: Vergleich der EoT-Simulationen von NO-Emissionen mit feiner Kennfeldraasterung bei Stauzyklen	101
Abbildung 4-43: Abweichung der NO-EoT-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen	102
Abbildung 4-44: Temperaturvergleich zwischen EO-Simulation und Messung bei Stauzyklen	103
Abbildung 4-45: Abweichung der Simulation der mittleren Temperatur zur Messung	103
Abbildung 4-46: Temperaturverlauf eines Teststrecken-Stauzyklus	104
Abbildung 4-47: Vergleich der EO-Simulationen von NO _x -Emissionen bei Stauzyklen mit Aufwärmphasen	105
Abbildung 4-48: Abweichung der NO _x -EO-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen mit Aufwärmphase	105
Abbildung 4-49: Vergleich der EO-Simulationen von NO _x -Emissionen bei Stauzyklen ohne Aufwärmphasen	106
Abbildung 4-50: Abweichung der NO _x -EO-Simulation zur PEMS-Messung bei Stauzyklen ohne Aufwärmphase	106
Abbildung 4-51: Vergleich der sekundlichen NO _x -Emissionen zwischen Messung und Simulationen mit feiner SCR-Kennfeldraasterung	107
Abbildung 4-52: Vergleich der sekundlichen NO _x -Emissionen zwischen Messung und Simulationen mit grober Kennfeldraasterung	108
Abbildung 4-53: Vergleich der Simulation von NO _x -Emissionen bei Stauzyklen mit feiner Kennfeldraasterung bei Stauzyklen	108
Abbildung 4-54: Abweichung der NO _x -Simulationen bei Stauzyklen mit feiner Kennfeldraasterung bei Stauzyklen	109
Abbildung 4-55: Vergleich der Simulation von NO _x -Emissionen bei Stauzyklen mit grober Kennfeldraasterung bei Stauzyklen	109
Abbildung 4-56: Abweichung der NO _x -Simulationen bei Stauzyklen mit grober Kennfeldraasterung bei Stauzyklen	110
Abbildung 5-1: NH ₃ -Füllstandsverlauf beim Zyklus AVL_TS_2 (ohne Start-Stopp)	113
Abbildung 5-2: NH ₃ -Füllstandsverlauf beim Zyklus AVL_TS_3 (mit Start-Stopp)	113
Abbildung A-1: HD- und ND-AGR-Rate	117
Abbildung B-1: SCR-Konvertierungskennfeld nach Glättung; vor der Anwendung von Plausibilitätskriterien	119
Abbildung B-2: SCR-Konvertierungskennfeld nach Anwendung von Plausibilitätskriterien	119
Abbildung B-3: Zusammenfassung der NO-Messung und EoT-Simulation vor Zyklenanpassung	120
Abbildung B-4: Zusammenfassung der NO-Messung und EoT-Simulation nach Zyklenanpassung	120
Abbildung B-5: Abweichung der NO-Simulationen zur Messung vor Zyklenanpassung	121
Abbildung B-6: Abweichung der NO-Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung	121
Abbildung B-7: Zusammenfassung der CO-Messung und EoT-Simulation vor Zyklenanpassung	122

Abbildung B-8: Zusammenfassung der CO-Messung und EoT-Simulation nach Zyklenanpassung _____	122
Abbildung B-9: Abweichung der CO-Simulationen zur Messung vor Zyklenanpassung __	123
Abbildung B-10: Abweichung der CO-Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung _	123
Abbildung B-11: Zusammenfassung der PN-Messung und EoT-Simulation vor Zyklenanpassung _____	124
Abbildung B-12: Zusammenfassung der PN-Messung und EoT-Simulation nach Zyklenanpassung _____	124
Abbildung B-13: Abweichung der PN-Simulationen zur Messung vor Zyklenanpassung _	125
Abbildung B-14: Abweichung der PN-Simulationen zur Messung nach Zyklenanpassung	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Fahrzeugdaten.....	26
Tabelle 3-2: Getriebeübersetzungen.....	27
Tabelle 3-3: Eckdaten der RDE-Routen [24].....	32
Tabelle 3-4: Zusammenfassung der künstlichen Stauzyklen.....	36
Tabelle 3-5: U_{Gas} -Faktoren unterschiedlicher Emissionskomponenten [30].....	39
Tabelle 3-6: Übersicht der ungültigen RDE-Zyklen (die Gültigkeitsüberprüfung nach EMROAD würde weitere Zyklen ungültig bewerten).....	52
Tabelle 3-7: Maximale Emissionsunterschiede zwischen gültigen RDE-Zyklen (Gültigkeitstests nach EMROAD nicht berücksichtigt, diese würde weitere Tests ungültig setzen).....	53
Tabelle 3-8: Zusammenfassung der CO ₂ -Emissionen.....	57
Tabelle 3-9: Zusammenfassung der NO _x -Emissionen.....	58
Tabelle 4-1: Beschreibung der Zyklen Auswahl für EoT-Simulationen in Abbildung 4-7.....	73
Tabelle 5-1: Zusammenfassung unterschiedlicher Feed-Verhältnisse.....	112
Tabelle A-1: Übersicht der einzelnen Messfahrten-Teil 1.....	115
Tabelle A-2: Übersicht der einzelnen Messfahrten-Teil 2.....	116
Tabelle A-3: Chronologische Abfolge der Messfahrten mit Partikelemissionsdaten.....	118
Tabelle A-4: Zusammenfassung der Messdaten von Stauzyklen.....	118
Tabelle B-1: Zusammenfassung der Simulationsvarianten zur Ermittlung der besten Interpolationsmethode.....	126
Tabelle B-2: Zusammenfassung der Simulationsvarianten für SCR-Kennfeldraasterungsuntersuchung.....	127
Tabelle C-1: EoT-Simulationsergebnisse mit grober Emissionskennfeldraasterung.....	128
Tabelle C-2: EoT-Simulationsergebnisse mit feiner Emissionskennfeldraasterung.....	128
Tabelle C-3: EO-Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Varianten.....	129

Formelverzeichnis

(2-1) [1]	2
(2-2) [2]	10
(2-3) [2]	11
(2-4) [2]	11
(2-5) [2]	11
(2-6) [2]	11
(2-7) [4]	16
(2-8) [12]	18
(2-9) [14]	20
(2-10) [13]	21
(3-1)	28
(3-2)	37
(3-3)	37
(3-4)	37
(3-5)	37
(3-6)	37
(3-7)	37
(3-8) [28]	39
(3-9) [28]	39
(3-10)	41
(3-11)	41
(3-12)	41
(3-13)	45
(3-14)	51
(3-15)	57
(4-1)	66
(4-2)	66
(4-3)	66
(4-5)	67
(4-6)	67
(4-7)	82
(4-8)	82
(4-9)	82
(4-10)	82
(4-11)	82
(4-12)	82
(4-13) [39]	83
(4-14) [39]	83
(4-15) [39]	83
(5-1)	111
(5-2)	112

Literaturverzeichnis

- [1] R. van Basshuysen und F. Schäfer, Handbuch Verbrennungsmotor, Bad Wimpfen/Hamm: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [2] K. Reif, Dieselmotor-Management, Friedrichshafen: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012.
- [3] S. Hauberger, Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil I, Graz: TU Graz, 2015.
- [4] K. Reif, Abgastechnik für Verbrennungsmotoren, Friedrichshafen: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [5] S. Hausberger und T. Sams, Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ, Technische Universität Graz, 2010.
- [6] H. Eichlseder, Kolbenmaschinen. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2011.
- [7] K. Mollenhauer und H. Tschöke, Handbuch Dieselmotoren, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [8] C. Friedrich, T. Inellan, B. Wilmes, V. Blichzin und M. Eller, „Dieselverdampfer zur Partikelfilterregeneration,“ in *MTZ*, Frankfurt, 2009.
- [9] R. S. Peck, Experimentelle Untersuchung und dynamische Simulation von Oxidationskatalysatoren und Diesel-Partikelfiltern, Stuttgart: Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, 2007.
- [10] United Nations, „Global technical regulation on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure,“ Global Registry, 2014.
- [11] European Commission, „Annex to the Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6),“ European Commission, Brüssel, 2008.
- [12] H. Steiner, Höhere Strömungslehre und Wärmeübertragung, Technische Universität Graz, 2016.
- [13] G. P. Merker, Wärmeübergang an der ebenen Platte, Springer-Verlag, 2013.
- [14] VDI-GVC, VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag, 2013.
- [15] G. Brenn und W. Meile, Strömungslehre und Wärmeübertragung I, Technische Universität Graz, 2015.
- [16] G. Wiegand, Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [17] AVL List GmbH, AVL Gas PEMS und AVL Gas PEMS IX Product Guide, 2016.
- [18] ISO 8178, Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions from engines used in nonroad mobile machinery under transient test conditions, 2004.
- [19] H.-R. Tränkler und L. M. Reindl, Sensortechnik, Springer-Verlag, 2014.
- [20] AVL List GmbH, AVL Concerto M.O.V.E. User's Guide, 2016.

- [21] W. Menesklou, Systematische Produktentwicklung in der Sensorik; Abgssensor-Prinzipien, Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- [22] AVL List GmbH, AVL M.O.V.E PN PEMS iS Product Guide, 2017.
- [23] „Maplorer,“ [Online]. Available: https://maplorer.com/view_gpx.html. [Zugriff am 24 September 2017].
- [24] T. Hainisch, Messung und Simulation von PKW Real World Emissionen bei einem Euro 6 Dieselfahrzeug, Technische Universität Graz, 2017.
- [25] S. Graz, „Straßenamt,“ [Online]. Available: <http://www.graz.at/cms/beitrag/10023623/311315>. [Zugriff am 24 September 2017].
- [26] D. Lohse und W. Schnabel, Grundlagen der Verkehrstechnik und der Verkehrsplanung Band 1, Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [27] „Google Maps,“ [Online]. Available: <https://www.google.at/maps/place/AVL+List+GmbH/@47.1205799,15.3588819,680m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x1495123cc28cd4e4!8m2!3d47.1216356!4d15.3643352>. [Zugriff am 15 Juli 2017].
- [28] A. Wimmer und J. Blassnegger, Laborübung Motor und Umwelt, Technische Universität Graz, 2015.
- [29] OICA and IWG, Proposal for amendments to ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2016/3, GRPE, 2016.
- [30] IVT, ERMES-Tool; Documentation of evaluation algorithms, Technische Universität Graz, 2016.
- [31] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastr., „Bericht der Untersuchungskommission "Volkswagen",“ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2016.
- [32] P. Kapus, Messung und Simulation der NO_x-Emission bei einem EURO 6 Diesel PKW mit SCR-Katalysator, Technische Universität Graz, 2017.
- [33] S. Hausberger, M. Rexeis und R. Luz, Passenger car and Heavy duty Emissions Model; User Guide for Version 11, Technische Universität Graz; IVT, 2015.
- [34] C. Matzer, S. Hausberger, S. Lipp und M. Rexeis, A new approach for systematic use of PEMS data in emission simulation, Graz University of Technology, 2016.
- [35] K. Weller, S. Hausberger, M. Rexeis und B. Zach, A comprehensive evaluation method for instantaneous emission measurements, Technische Universität Graz, 2016.
- [36] P. Maur und I. Kolingerova, The Employment of Regular Triangulation for Constrained Delaunay Triangulation, University of West Bohemia, 2010.
- [37] T. Catinas, The bivariate Shepard operator of Bernoulli type, Springer-Verlag, 2007.
- [38] M. Rexeis, Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles, Technische Universität Graz, 2009.

- [39] H. Kanda, Laminar-Turbulent Transmission: Calculation of Minimum Critical Reynolds Number in Channel Flow, Japan: University of Aizu.
- [40] „Wikipedia,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>. [Zugriff am 16 06 2017].
- [41] R. S. Brokaw, „VISCOSITY OF GAS MIXTURES,“ National Aeronautics and Space Administration (NASA), Cleveland, Ohio, 1968.
- [42] H. Alkandry, I. D. Boyd und A. Martin, „Comparison of Models for Mixture Transport Properties for Numerical Simulations of Ablative Heat-Shields,“ Universtity of Michigan, Texas, 2013.
- [43] R. J. Kee, G. Dixon-Lewis und J. Warnatz, „A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase, Multicomponent Transport Properties,“ Computational Mechanics Division; Sandia National Laboratories, 1998.