



Werner Calisto, BSc

# **Einfluss des Höhenprofils der RDE-Messstrecke auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei Fahrzeugen mit SCR-Katalysator**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
DiplomingenieurIN  
Masterstudium Maschinenbau / Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

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

Zweitbetreuer/in  
Dipl.-Ing. BSc. Silke Lipp  
FVT

Graz, November 2018



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



## **Vorwort**

Seit Beginn meines Studiums an der Technischen Universität Graz hat mich das Thema Abgasnachbehandlung von Verbrennungskraftmaschinen fasziniert. Zu Beginn meines Masterstudiums habe ich mich daher für die Fachrichtung „Motor- und Antriebstechnik“ entschieden.

Ich wollte daher ein Thema für meine Abschlussarbeit finden, welches mein Interessensgebiet widerspiegelt, aber auch die Aktualität der Schadstoffreduktion im Verkehr trifft.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Hausberger, für die Ermöglichung dieser Masterarbeit und für das jederzeit Bereitstehen mit Rat und Tat bedanken.

Ein großes Dankeschön gilt Frau Dipl.-Ing. Silke Lipp für die erstklassige Betreuung und Unterstützung während meiner Masterarbeit. Des Weiteren möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Claus Uwe Matzer für die Unterstützung in verschiedenen Abschnitten meiner Diplomarbeit bedanken.

Generell gilt allen Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mein Dank für die tatkräftige Unterstützung bei der Umsetzung dieser Masterarbeit.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch besonders bei meinen Eltern Maria und Werner bedanken die mich über all die Jahre immer unterstützt, und mir diese Ausbildung ermöglicht hat

# Inhaltsverzeichnis

<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>VIII</b>
<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>2</b>
2.1 LIMITIERTE SCHADSTOFFE .....	2
2.1.1 CO <sub>2</sub> .....	3
2.1.2 CO.....	3
2.1.3 HC.....	3
2.1.4 Partikel.....	3
2.1.5 NO <sub>x</sub> .....	4
2.2 MAßNAHMEN ZUR SCHADSTOFFREDUKTION.....	6
2.2.1 Innermotorische Maßnahmen zur NO <sub>x</sub> -Reduktion .....	6
2.2.2 Abgasnachbehandlung .....	8
2.3 EMISSIONSGESETZGEBUNG.....	12
2.3.1 RDE Gesetzgebung.....	12
2.4 HANDBUCH EMISSIONSFAKTOREN.....	14
<b>3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>15</b>
3.1 ROUTENFINDUNG .....	15
3.1.1 Route Arzberg.....	15
3.1.2 Route Rechberg (Arzberg modifiziert).....	16
3.1.3 Route Deutschlandsberg .....	18
3.2 MOBILES EMISSIONSMESSGERÄT.....	20
3.2.1 Gas-PEMS.....	20
3.3 AUDI A4 AVANT .....	22
3.4 MESSDATENERFASSUNG.....	25
3.5 DURCHFÜHRUNG DER RDE MESSFAHRTEN.....	25
3.6 AUSWERTUNG DER MESSDATEN.....	26
3.6.1 <i>ERMES Tool</i> .....	26
3.6.2 <i>ECE Tool</i> .....	27
3.6.3 <i>Durchgeführte Berechnungen</i> .....	27
<b>4 SIMULATION .....</b>	<b>29</b>
4.1 SIMULATIONSTOOL PHEM.....	29
4.2 SIMULATIONSMODELL IN PHEM.....	30
4.2.1 <i>VW Golf</i> .....	30
4.2.2 <i>Mercedes Sprinter</i> .....	34
4.2.3 <i>Audi A4</i> .....	37
4.3 SIMULATION DER HÖHENPROFILE .....	46
4.3.1 <i>Simulation mit Schaltmodell PHEM</i> .....	46
4.3.2 <i>Simulation mit Gangvorgabe</i> .....	46
4.4 SIMULATION DER RDE ROUTEN .....	47
4.5 EINFLUSS KONSTANTER UND VARIABLER STEIGUNGSPROFILE .....	47
<b>5 ERGEBNISSE .....</b>	<b>48</b>
5.1 SIMULATIONSERGEBNISSE MIT PHEM SCHALTMODELL.....	48
5.1.1 <i>VW Golf</i> .....	48
5.2 SIMULATIONSERGEBNISSE MIT GANGVORGABE .....	61
5.2.1 <i>VW Golf</i> .....	61
5.2.2 <i>Mercedes Sprinter</i> .....	75
5.3 RDE MESSUNGEN MIT AUDI A4 AVANT .....	90
5.4 GEGENÜBERSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE UND SIMULATIONSERGEBNISSE DER RDE ROUTEN .....	95

5.5	GEGENÜBERSTELLUNG DER SIMULATION MIT KONSTANTER UND REALER STEIGUNG .....	98
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>99</b>
	<b>LITERATUR.....</b>	<b>101</b>

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$c_{NO_x}$	ppm	Konzentration NO <sub>x</sub>
$\dot{m}_{Abgas}$	kg/s	Abgasmassenstrom
$\dot{m}_{NO_x}$	g/s	Massenstrom NO <sub>x</sub>
$\dot{m}_{NO_xEO}$	g/s	Massenstrom NO <sub>x</sub> EO
$\dot{m}_{NO_xTailpipe}$	J/kg	Massenstrom NO <sub>x</sub> EoT
$n$	U/min	Aktuelle Motordrehzahl
$n_{idle}$	U/min	Leerlaufdrehzahl
$n_{norm}$	–	Normierte Motordrehzahl
$P$	kW	Aktuelle Motorleistung
$P_{norm}$	–	Normierte Motorleistung
$P_{rated}$	kW	Nennleistung des Motors
$U_{Gas}$	m/s	Gasfaktor für NO <sub>x</sub>
$\dot{v}_{Gas}$	l/h	Raumgeschwindigkeit
$\dot{V}_{Gas}$	m <sup>3</sup> /h	Abgas-Volumenstrom
$V_{Kat}$	m <sup>3</sup>	Volumen des Katalysators

### Griechische Formelzeichen

$\eta_{SCR}$	–	Konvertierungsrate des SCR-Katalysators
$\lambda$	–	Luftverhältnis

### Weitere Indices und Abkürzungen

ACEA	European Automobile Manufacturers' Association
BaO	Bariumoxid
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Bariumnitrat
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DOC	Oxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EO	Engine out
EoT	End of Tailpipe
EU	Europäische Union
FVT	Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
GPS	Global Positioning System
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
HNCO	Isocyansäure
N	Stickstoff
N <sub>2</sub>	Molekularer Stickstoff
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
NSK	NO <sub>x</sub> -Speicher-katalysator

RDE	Real driving emissions
O	Elementarer Sauerstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
OBD	On Board Diagnose
OH	Hydroxidion
PEMS	Portable emissions measurement system
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model
PN	Partikelanzahl
Pt	Platin
Rh	Rhodium
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
VO	Verordnung
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	Harnstoff

## **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.

Vorname Nachname

Graz, Datum

## Kurzfassung

Fahrzeuge mit Dieselmotoren gerieten in den letzten Jahren wegen ihrer hohen Stickoxidemissionen und wegen der Manipulation der Emissionsmesswerte einiger Hersteller immer stärker in den Mittelpunkt der Öffentlichkeit. Der Dieselmotor steht im Besonderen nach den aktuellen Gerichtsurteilen in Deutschland zu Fahrverboten für Fahrzeuge mit einer Abgasnorm schlechter Euro 5 unter enormer Kritik.

Neue Fahrzeugtypen müssen seit 1. September 2017 nach der neuen Prüfmethode WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) zugelassen werden. Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte des Fahrzeuges werden dabei nicht nur in einem Fahrzyklus auf einem PKW-Rollenprüfstand überprüft, sondern auch im realen Straßenverkehr die sogenannten Realfahrmissionen (RDE Real driving emissions) gemessen. Der bisherige neue europäische Fahrzyklus für die Messung am PKW-Rollenprüfstand wurde durch den WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) ersetzt.

Zunehmend an Bedeutung gewinnt dadurch die Simulation und die Messung der limitierten Schadstoffe. Bei Fahrzeugen mit Dieselmotor sind das durch den genannten Hintergrund im Besonderen die Stickoxidemissionen  $\text{NO}_x$ . Bei der Messung im realen Betrieb kann die Teststrecke eine relevante Auswirkung auf die Messergebnisse haben. Daher wurde in dieser Arbeit der Effekt des Höhenprofils auf die Emissionsniveaus mittels Simulation und Messung analysiert.

Das im Zuge dieser Arbeit untersuchte Fahrzeug ist ein Personenkraftwagen mit Dieselmotor, welcher nach der Abgasnorm EURO 6b zertifiziert wurde. In den theoretischen Grundlagen wird auf die limitierten Schadstoffe, sowie die Maßnahmen zur Schadstoffreduktion und auf die RDE-Gesetzgebung eingegangen.

In einem ersten Schritt wurden Simulationen von Fahrzeugen mit einem SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reduction) über Höhenprofile mit unterschiedlichen Steigungen und unterschiedlichen Periodenlängen durchgeführt um den Einfluss der Topographie auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen bei Fahrzeugen mit einem SCR-Katalysator zu bestimmen. Aus den Simulationen ist hervorgegangen das bei großen Steigungen und langer Periodendauer die Konvertierungsrate absinkt im Gegenzug die  $\text{NO}_x$ -Emissionen stark ansteigen.

Anschließend wurden RDE-Routen gesucht, die ein ähnliches Höhenprofil ausweisen wie in der Simulation. Neben der bereits am Institut bestehenden Route Arzberg, wurde eine weitere Route, die Route Deutschlandsberg, gefunden. Auf dieser und der bereits existierenden Route wurden RDE-Messfahrten durchgeführt um die Simulationsergebnisse zu überprüfen. Bei der Auswertung der Messdaten dieser Route hat sich ergeben, dass sie nicht RDE-konform ist. Außerdem konnte festgestellt werden, dass das gemessene Kfz empfindlicher auf Steigungen und Gefälle reagiert, als dies in der Simulation zuvor abgeschätzt wurde.

Des Weiteren konnte anhand der Messungen festgestellt werden, dass es zu einer relevanten Auskühlung des SCR-Katalysators schon bei Gefällen welche weniger steil und kürzer sind als in der Simulation kommt.

Anschließend folgte eine simulative Untersuchung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen von Zyklen mit konstanter Längsneigung, wie sie im HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren) abgebildet sind und Zyklen mit realer Längsneigung. Hierfür wurden Sub-Zyklen aus den durchgeführten RDE-Messfahrten extrahiert und mit unterschiedlichen Fahrzeugen nachsimuliert. Dabei konnte eine mit der Steigung zunehmende Abweichung der  $\text{NO}_x$ -Emission zwischen den unterschiedlichen Zyklen festgestellt werden. Mit zunehmender Steigung wurden bei den Zyklen mit realer Längsneigung durchwegs höhere  $\text{NO}_x$ -Emission als bei Zyklen mit konstanter Längsneigung festgestellt. Der Unterschied betrug bis zu 70 %.

## Abstract

Vehicles with diesel engines got into public focus in the past years because of its nitrogen oxide emission and because of the manipulation of the exhaust emission of some manufacturer. The diesel engine is in particular the subject of critic after the court decision for a ban of driving for vehicles with an emission standard below Euro 5.

With the introduction of the more dynamic test cycle WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle), the measurement of the real driving emissions (RDE) on public roads is mandatory for all new vehicle types since September 2017. For these new vehicle types, it is mandatory to adhere threshold values for emissions as under real driving conditions. Under this background the simulation and the measurement of the regulated pollutant emissions are gaining in importance. For vehicles with diesel engines these are especially the nitrogen oxide emissions. In real world emission tests, the driven route can have a significant influence on test results. Thus, the effects of the altitude profile of test routes on the emission results was analysed in this thesis by simulation and by measurements.

The vehicle tested is a passenger car equipped with a diesel engine. It was certified with the emission standard Euro 6b. In the theoretical foundations the regulated pollutants, the actions to reduce the pollutants and the legislation for the real driving emissions are described.

First a simulation of vehicles equipped with an SCR-catalyst in profiles with different road gradients and different cycle durations was done to test the influence of the topography on NO<sub>x</sub>-emissions of these type of vehicles. The result of the simulation was that with increasing gradients and cycle time the conversion rate is decreasing and the NO<sub>x</sub>-emission is increasing significantly.

Afterwards RDE routes were prospected, which have a similar elevation profiles as in the simulation. Besides the route used for standard tests in the department, a new RDE-route was compiled. On the existing and the new route RDE test runs were executed to validate the simulation results. During the test runs it showed that the new route is not conform to the RDE legislation. Furthermore, it has emerged that the SCR catalyst cools down in not so steep and long downhill grades as in the simulation and that the heat up of the catalyst takes longer than in the simulation.

Subsequent a simulative investigation of the NO<sub>x</sub> exhaust emission was made in cycles with a constant gradient, as in the handbook of emission factors for road transportation, and in cycles with real gradients. Therefore, sub-cycles out of the RDE test runs were extracted and then simulated with different vehicles. Though it was asserted that with increasing gradient the deviation between the cycles with constant gradient and with the real-world gradient profile is increasing. With increasing gradients, the NO<sub>x</sub> emissions of the cycles with real gradients were up to 70 % higher than the NO<sub>x</sub> emissions of the cycles with a constant gradient.

# 1 Einleitung

Fahrzeuge mit Dieselmotoren gerieten in den letzten Jahren wegen ihrer hohen Stickoxidemissionen und wegen der Abgasmanipulation einiger Hersteller immer stärker in den Mittelpunkt der Öffentlichkeit. Der Dieselmotor steht, im Besonderen nach den aktuellen Gerichtsurteilen in Deutschland zu Fahrverboten für Fahrzeuge mit einer Abgasnorm schlechter Euro 5, unter enormer Kritik.

Neue Fahrzeugtypen müssen seit 1. September 2017 nach der neuen Prüfmethode WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) zugelassen werden. Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte des Fahrzeuges werden dabei nicht nur in einem Fahrzyklus auf einem PKW-Rollenprüfstand überprüft, sondern auch im realen Straßenverkehr die sogenannten Realfahrmissionen (RDE Real driving emissions) gemessen. Der bisherige neue europäische Fahrzyklus für die Messung am PKW-Rollenprüfstand wurde durch den WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) ersetzt.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich hauptsächlich mit der Simulation und Messung von Stickoxidemissionen bei Fahrzeugen mit Dieselmotoren, welche mit einem SCR-Katalysator ausgestattet sind.

Zu Beginn dieser Arbeit wird ein Überblick über die limitierten Schadstoffe sowie über die Möglichkeiten zu Reduktion dieser gegeben. Zudem werden Auszüge der mit September 2017 eingeführten RDE-Gesetzgebung erläutert. Weiters wird das zur Messung der Schadstoffe eingesetzte mobile Emissionsmessgerät erläutert.

Im Zuge dieser Arbeit wurden unterschiedliche Höhenprofile mit Fahrzeugen, welche SCR-Katalysatoren mit unterschiedlichen Volumen simuliert. Dies diente im Besonderen zur Analyse des Auskühlverhalten und Aufheizverhaltens des SCR-Katalysators bei den unterschiedlichen Höhenprofilen.

Weiters wurde basierend auf diesen Ergebnissen eine neue RDE-Route zusammengestellt und auf dieser, sowie auf den bereits bestehenden Routen, Messfahrten durchgeführt um die Simulationsergebnisse zu verifizieren.

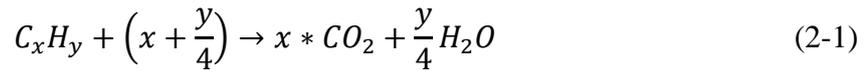
Zum Abschluss dieser Arbeit erfolgte ein Vergleich der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Zyklen mit konstanter Längsneigung, wie sie im HBEFA abgebildet sind, zu Zyklen mit realer Längsneigung, basierend auf dem Höhen- und Geschwindigkeitsprofil welches während der RDE-Messfahrten aufgezeichnet wurde.

## 2 Theoretische Grundlagen

Die Emissionen von Schadstoffen wurden erstmals mit einer Gesetzgebung im Jahre 1970 in Europa geregelt. Die Emissionen limitierter Schadstoffe werden je nach Fahrzeugart (Motorrad, PKW, etc.) und Art des Antriebs (Diesel, Otto) begrenzt. Die limitierten Schadstoffe werden hinsichtlich ihrer Wirkung und Entstehung im nachfolgenden Kapitel genauer beschrieben.

### 2.1 Limitierte Schadstoffe

Bei der idealen, vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen wie Benzin und Diesel würde folgende chemische Reaktion ablaufen:



$C_xH_y$	[mol]	Kohlenwasserstoffe
$CO_2$	[mol]	Kohlenstoffdioxid
$H_2O$	[mol]	Wasser
x	[-]	Kohlenstoffanteil
y	[-]	Wasserstoffanteil

Dies bedeutet, dass neben Wasser, welches umwelttechnisch unbedenklich ist,  $CO_2$  (Kohlendioxid) entsteht.  $CO_2$  ist ungiftig, trägt jedoch zum Treibhauseffekt bei. Die reale Verbrennung im Motor läuft jedoch nicht ideal und vollständig ab, so dass neben  $CO_2$  noch weitere Schadstoffe entstehen. [1]

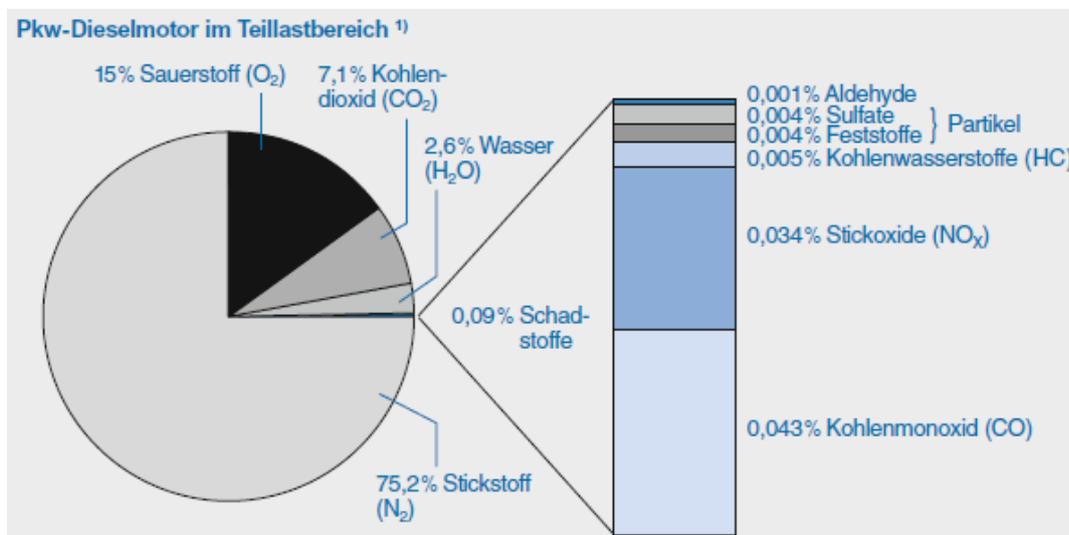


Abbildung 2-1: Abgaszusammensetzung eines Dieselmotors im Teillastbereich [2]

Abbildung 2-1 zeigt die Zusammensetzung des Abgases eines Dieselmotors im Teillastbereich. In dieser ist ersichtlich, dass die limitierten Schadstoffe 0.09% des gesamten emittierten Abgases ausmachen.

### 2.1.1 CO<sub>2</sub>

Die Kohlendioxidemissionen sind direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch und lassen sich nur über diesen reduzieren. Kohlendioxid wird nicht als Schadstoff eingestuft und ist Bestandteil der natürlichen Luft. Es trägt jedoch zum Treibhauseffekt bei und der damit zusammenhängenden Klimaerwärmung. Dadurch werden die Maßnahmen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs immer bedeutender. [2]

### 2.1.2 CO

Bei unvollständiger Verbrennung eines fetten Luft-Kraftstoff-Gemisch, dies bedeutet es steht weniger Luft zur Verfügung als für eine vollständige Verbrennung notwendig wäre, entsteht Kohlenmonoxid. Aufgrund des inhomogenen Luft-Kraftstoff-Gemischs, mit nicht verdampften Kraftstofftröpfchen, entsteht dieses auch bei Betrieb mit Luftüberschuss. [2]

Durch Nachoxidation wird das Kohlenmonoxid weiter zu Kohlendioxid aufoxidiert, dies führt zu wesentlich geringeren spezifischen Kohlenmonoxidemissionen des Dieselmotors gegenüber dem Ottomotor. [3] Die Nachoxidation beim Dieselmotor wird durch den im Dieselmotor herrschenden Luftüberschuss begünstigt, im Gegensatz hierzu wird der Ottomotor bei stöchiometrischen Luftverhältnis betrieben.

[2]: „Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas. Es verringert beim Menschen die Sauerstoffaufnahme-fähigkeit des Bluts und führt daher zur Vergiftung des Körpers.“

### 2.1.3 HC

[2]: „Unter Kohlenwasserstoffen (engl.: HC, Hydrocarbon) versteht man den Sammelbegriff aller chemischen Verbindungen von Kohlenstoff C und Wasserstoff H. Die HC-Emissionen sind auf eine unvollständige Verbrennung des Luft-Kraftstoff-Gemischs bei Sauerstoffmangel zurückzuführen. Bei der Verbrennung können aber auch neue Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen, die im Kraftstoff ursprünglich nicht vorhanden waren (z.B. durch Aufbrechen von langen Molekülketten).

Die aliphatischen Kohlenwasserstoffe (Alkane, Alkene, Alkine sowie ihre zyklischen Abkömmlinge) sind nahezu geruchlos. Ringförmige aromatische Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzol, Toluol, polyzyklische Kohlenwasserstoffe) sind geruchlich wahrnehmbar.

Kohlenwasserstoffe gelten teilweise bei Dauereinwirkung als Krebs erregend. Teiloxidierte Kohlenwasserstoffe (z.B. Aldehyde, Ketone) riechen unangenehm und bilden unter Sonneneinwirkung Folgeprodukte, die bei Dauereinwirkung von bestimmten Konzentrationen an ebenfalls als Krebs erregend gelten.“

### 2.1.4 Partikel

Die Partikel von Dieselmotoren und direkt-einspritzenden Ottomotoren bestehen zum überwiegenden Teil aus Kohlenwasserstoffen. Den Rest bilden teilweise an Ruß gebundene Kohlenwasserstoffverbindungen und Sulfate in Form von Aerosolen. Die Entstehung von Ruß erfolgt in zwei Phasen und ist bestimmt durch die örtliche Sauerstoffkonzentration und Temperatur. In der primären Bildungsphase erfolgen die Reaktionen hinter den Strahlspitzen und im Kern der Brennstoffstrahlen. Es bilden sich stabile Zwischenprodukte, die sich durch Aggregation zu den Primärpartikeln zusammenschließen. In weiterer Folge entstehen durch Koagulation der Primärpartikel die Sekundärpartikel an denen sich auf Grund der großen spezifischen Oberfläche Aldehyde anlagern. Im weiteren Verlauf der Verbrennung ist die Rußnachoxidation die sekundäre Bildungsphase. Sie ist durch die Sauerstoffkonzentration und

durch die Verweildauer bestimmt. [3]

[3]: „Der Durchmesser der Partikel variiert zwischen 1 und 1000 nm. Besonders zu beachten ist der Zielkonflikt Partikel–HC–NO<sub>x</sub>. Die Bedingungen für niedrige Partikelbildung und niedrige HC-Emissionen stehen im Gegensatz zu den Voraussetzungen niedriger Stickoxidemissionen.“

### 2.1.5 NO<sub>x</sub>

Man unterscheidet drei verschiedene Prozesse bei der Bildung von NO<sub>x</sub> durch Verbrennung

- Oxidation des Luftstickstoffs zu NO<sub>x</sub> (thermisches NO und NO<sub>2</sub>)
- Promptes NO
- Umwandlung von den im Kraftstoff gebundenen Stickstoff zu NO [4]

Die Umwandlung von dem im Kraftstoff gebundenen Stickstoff zu NO ist vor allem bei der Verbrennung von Kohle von Bedeutung. Diese enthält eine größere Menge an gebundenen Stickstoff. [5] Auf diese Umwandlung wird in weiterer Folge nicht eingegangen.

#### 2.1.5.1 Thermisches Stickstoffmonoxid

Die Bildung von thermischen Stickstoffmonoxid ist der wichtigste Entstehungsmechanismus für NO<sub>x</sub>. Dieser wurde erstmals von Zeldovich 1946 beschrieben. Es treten folgende Elementarreaktionen auf [1]:



O	[mol]	Elementarer Sauerstoff
N <sub>2</sub>	[mol]	Molekularer Stickstoff
O <sub>2</sub>	[mol]	Sauerstoff
NO	[mol]	Stickstoffmonoxid
N	[mol]	Stickstoff
OH	[mol]	Hydroxidion
H	[mol]	Wasserstoff

Durch die Gleichungen (2-2) und (2-3) wird die Zeldovich-Kettenreaktion beschrieben. Aus dem elementaren Sauerstoff (O) und dem Stickstoffdioxid in der Verbrennungsluft entstehen Stickstoffmonoxid und Stickstoff. In weiterer Folge reagiert dieser Stickstoff mit dem Sauerstoff in der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid und elementarem Sauerstoff und die Reaktionskette kann wieder von vorne beginnen. [1]

In Gleichung (2-4) wird die Entstehung von Stickstoffmonoxid in der brennstoffreichen Zone

hinter der Flammenfront beschrieben. [1]

Die Grundbedingung für den Start der Zeldovich-Kettenreaktion ist das Vorhandensein von elementarem Sauerstoff, dieser entsteht bei Temperaturen oberhalb von 2200 K. Für die Entstehung von Stickstoffmonoxid ist also nicht die mittlere Brennraumtemperatur ausschlaggebend, sondern die hohen lokalen Spitzentemperaturen. Eine weitere Voraussetzung ist lokaler Luftüberschuss. [1] Bei einem Dieselmotor liegt das Maximum der NO<sub>x</sub>-Entstehung bei einem Lambda von etwa 1.5. [4]

Die Zeldovich-Kettenreaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen. Ihre Gleichgewichtsparameter sind abhängig von der Temperatur und bekannt. Bei der motorischen Verbrennung werden die Gleichgewichtsreaktionen nicht erreicht, dadurch liegen die tatsächlichen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen unter den Konzentrationen der Gleichgewichtsreaktion. Aufgrund des Absinkens der Brennraumtemperatur in der Expansionsphase werden die Rückreaktionen eingefroren, dies führt zu einer höheren NO<sub>x</sub>-Konzentration gegenüber der NO<sub>x</sub>-Konzentration bei der Gleichgewichtsreaktion. [1]

Eine Vorhersage der NO<sub>x</sub>-Emission ist nur mittels der Reaktionskinetik in Verbindung mit dem Zeitablauf der tatsächlichen Verbrennung möglich.[1]

### 2.1.5.2 Thermisches Stickstoffdioxid

Thermisches Stickstoffdioxid entsteht durch Oxidation des in der Flammenzone gebildeten NO zu NO<sub>2</sub>.



NO	[mol]	Stickstoffmonoxid
H <sub>2</sub> O	[mol]	Wasser
NO <sub>2</sub>	[mol]	Stickstoffdioxid
OH	[mol]	Hydroxidion

Dieses wird wieder zu Stickstoffmonoxid reduziert.



NO	[mol]	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	[mol]	Stickstoffdioxid
O	[mol]	Elementarer Sauerstoff

Die Reduktion läuft um zwei Größenordnungen langsamer ab als die Oxidation. Dies hat eine besonders hohe Auswirkung im Dieselmotor, da dieser ein stark inhomogenes und insgesamt niedrigeres Temperaturniveau gegenüber dem Ottomotor besitzt. Der Anteil von Stickstoffdioxid an den Stickoxiden im Dieselmotor liegt bei etwa 30 %. [4]

### 2.1.5.3 Promptes NO

Die Entstehung des prompten Stickstoffmonoxids ist mit dem CH-Radikal verbunden. Die Aktivierungsenergie beträgt nur 57 kJ/mol, im Vergleich dazu beträgt die Aktivierungsenergie bei der thermischen NO-Bildung 319 kJ/mol. Dies bedeutet, dass das prompte Stickstoffmonoxid schon bei Temperaturen um 1000 K auftritt. [5]

## 2.2 Maßnahmen zur Schadstoffreduktion

Im nachfolgenden Kapitel werden die Maßnahmen zur Schadstoffreduktion beim Dieselmotor erläutert. Grundsätzlich kann die Schadstoffreduktion mittels innermotorischer Maßnahmen und mittels Abgasnachbehandlungssystemen durchgeführt werden.

### 2.2.1 Innermotorische Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Reduktion

Nachfolgend werden zwei innermotorische Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Reduktion im Abgas beschrieben, die beide darauf basieren, dass Abgas in den Brennraum zurückgeführt wird und sich somit der Anteil des Inertgases erhöht.

[1][7]: „Die NO<sub>x</sub>-mindernde Wirkung lässt sich maßgeblich auf die folgenden Ursachen zurückführen:

- Reduktion des Abgasmassenstroms,
- Absenkung der Brenngeschwindigkeit und damit der lokalen Spitzentemperaturen durch einen erhöhten Inertgasanteil im Brennraum sowie
- Verringerung des Sauerstoffpartialdrucks bzw. des lokalen Luftverhältnisses.“

#### 2.2.1.1 Hochdruck-Abgasrückführung

Bei der Hochdruck-Abgasrückführung (HD-AGR), welche in Abbildung 2-2 dargestellt ist, wird das Abgas des Motors (1) vor der Turbine des Turboladers (9) durch Öffnen des AGR-Ventils (7) entnommen und über den AGR-Kühler (5) gekühlt oder über das Bypass-Ventil (6) ungekühlt dem Motor über das Saugrohr (2) wieder zugeführt. Hierfür ist das treibende Druckgefälle größtenteils ausreichend, zudem ist eine saugrohrseitige Drosselung mittels einer Drosselklappe (3) möglich. [1]

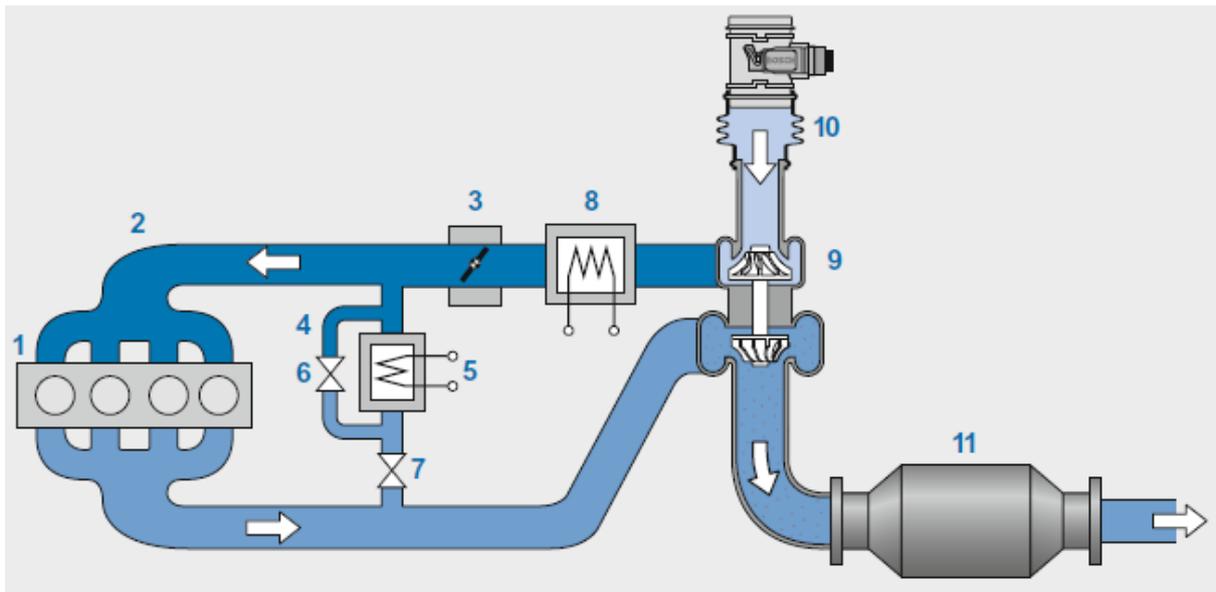


Abbildung 2-2: Prinzip der Hochdruck-Abgasrückführung [1]

### 2.2.1.2 Niederdruck-Abgasrückführung

Abbildung 2-3 zeigt das Prinzip der Niederdruck AGR. Bei der Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR) wird das Abgas nach dem Abgasturbolader (4) und dem Abgasnachbehandlungssystem (6) entnommen. Die rückgeführte Abgasmenge wird über das AGR-Ventil (8) und dem AGR-Kühler (9) geführt und der Frischluft vor dem Kompressor des Abgasturboladers der Frischluft zugeführt. [1]

Vorteile der ND-AGR gegenüber der HD-AGR sind: [1]:

- „optimale AGR-Gleichverteilung zwischen den einzelnen Zylindern,
- eine intensivere Kühlung des homogenen Gemischs aus Abgas und Frischluft nach dem Durchgang durch den Verdichter und den Ladeluftkühler sowie
- eine Erhöhung und weitgehende Entkoppelung des möglichen Ladedrucks von der AGR-Rate, da stets der gesamte Abgasmassenstrom durch die Turbine geleitet wird.“

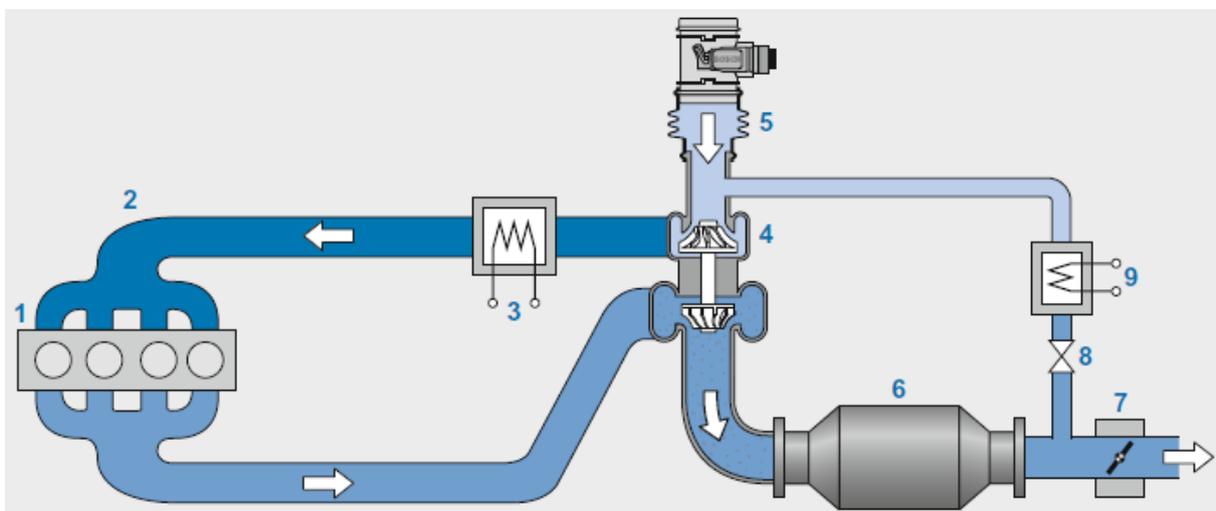


Abbildung 2-3: Prinzip der Niederdruck-Abgasrückführung [1]

## 2.2.2 Abgasnachbehandlung

Im Folgenden werden die Abgasnachbehandlungssysteme kurz erläutert, welche neben den innermotorischen Maßnahmen zur Schadstoffreduktion, bei Dieselmotoren eingesetzt werden.

### 2.2.2.1 Allgemeine Maßnahmen

Nachfolgend sind die gebräuchlichsten Abgasnachbehandlungssysteme für Dieselmotoren aufgeführt.

- Oxidationskatalysator (DOC)
- Dieselpartikelfilter (DPF)
- NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator (NSK)
- Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Reduktion eingegangen. Für die weiteren Abgasnachbehandlungssysteme sei auf [1] und [3] verwiesen.

### 2.2.2.2 Maßnahmen zur NO<sub>x</sub>-Reduktion

Als Maßnahme zur NO<sub>x</sub>-Reduktion werden in heutigen Fahrzeugen sogenannte NSK (NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysatoren), SCR-Katalysatoren oder eine Kombination aus beiden verwendet. Die Anordnung im Fahrzeug kann dabei in der Nähe des Motors sein (als motornah bezeichnet) oder im Unterboden etwas weiter entfernt davon (als Unterflur bezeichnet). Der Vorteil der motornahen Anordnung liegt in der schnelleren Erwärmung des Katalysators in der Kaltstartphase und einer langsameren Auskühlung im Schubbetrieb gegenüber der Unterflur Anbringung. Dies führt zu einer Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen während der Kaltstartphase und nach erneuter Lastauflegung nach dem Schubbetrieb.

#### NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator

Mit dem NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator wird die Minderung von NO<sub>x</sub>-Emissionen ohne zusätzliche Betriebsstoffe ermöglicht. [1]

[1]: *“Der NO<sub>x</sub>-Abbau erfolgt dabei in zwei Schritten:*

- *Beladungsphase: NO<sub>x</sub> wird im mageren Abgas in die Speicherkomponente des Katalysators eingespeichert.*
- *Regenerationsphase: das eingespeicherte NO<sub>x</sub> wird ausgespeichert und in fettem Abgas zu N<sub>2</sub> reduziert.“*

Der NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator ist im Aufbau vergleichbar mit einem 3-Wege-Katalysator, jedoch enthält die Beschichtung auch NO<sub>x</sub>-Speicherkomponenten. [6]

Im Normalbetrieb werden die Stickoxide mit Hilfe des im Abgas enthaltenen Sauerstoffs an der Platinbeschichtung des Katalysators zu Stickstoffdioxid umgewandelt. Dieses reagiert bei einer Temperatur von 220°C bis 450°C mit dem in der Beschichtung enthaltenen Bariumcarbonat und dem Abgas enthaltenen Sauerstoffs zu Bariumnitrat und wird im Katalysator gespeichert. [1]

Mit zunehmender Beladung nimmt die Speicherfähigkeit des Katalysators ab. Die Beladungsphase dauert zwischen 30 und 300 Sekunden je nach Betriebspunkt des Motors. [1]

Nach dieser folgt die Regenerationsphase für zwei bis zehn Sekunden. In dieser erfolgt ein

Motorbetrieb bei fettem Gemisch, dies führt zu einem Anstieg der Kohlenmonoxid Emissionen. Das Kohlenmonoxid bewirkt eine Reaktion des Bariumnitrats zu Bariumoxid, das bedeutet, dass das Stickoxid gelöst wird und ein Teil des Kohlenmonoxids zu Kohlendioxid wird. Eine Rhodiumbeschichtung reduziert, ähnlich wie im Dreiwegekatalysator die herausgelösten Stickoxide mit dem im Abgas vorhandenen Kohlenmonoxid zu Stickstoff. [1]

In der nachfolgenden Abbildung ist das Prinzip der Einlagerung der Stickoxide und die Regeneration des Speicherkatalysators ersichtlich.

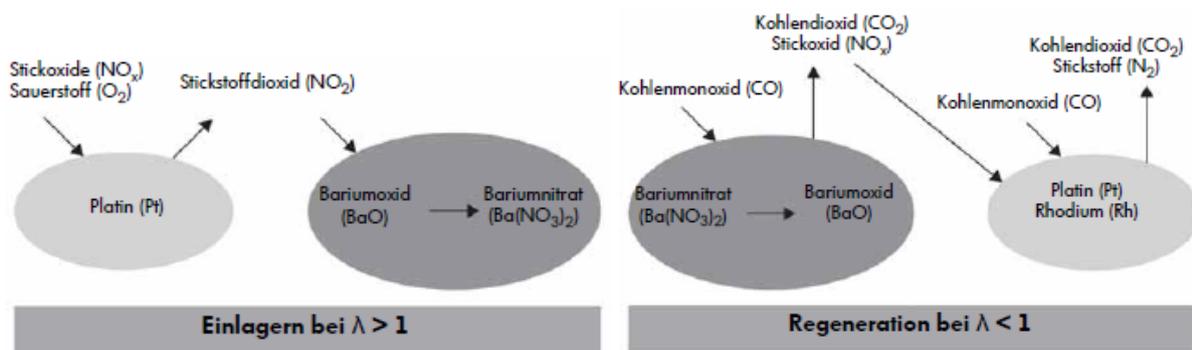


Abbildung 2-4: Prinzip des NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysators [9]

Die Empfindlichkeit gegenüber Schwefel im Treibstoff ist ein Problem des NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysators. Diese werden zu Schwefeldioxid oxidiert, gegenüber dieses die im Katalysator eingesetzten Beschichtung eine große Affinität aufweist. Dies bedeutet, dass SO<sub>2</sub> noch besser als die Stickoxide im Speichermaterial des Katalysators gebunden wird. Dies hat zur Folge, dass die Speicherplätze für NO<sub>x</sub> durch das Schwefeldioxid belegt wird und so die Speicherfähigkeit des Katalysators sinkt. [1]

Die Desulfatisierung erfolgt bei Temperaturen über 620°C und bei einem Betrieb mit Kraftstoffüberschuss. In den meisten Fällen wird die Entsulfatisierung des NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysators nach einer Regeneration des DPF durchgeführt und somit, die bei einer DPF-Regeneration entstandene hohe Abgastemperatur genutzt werden kann. [9]

[1]: „Die bei der Desulfatisierung eingestellten Bedingungen müssen außerdem so gewählt werden, dass die Katalysatoralterung nicht übermäßig erhöht wird. Hohe Temperaturen (>750 °C) beschleunigen zwar die Desulfatisierung, bewirken aber auch eine verstärkte Katalysatoralterung.“

### SCR Verfahren

Die Rückreaktion der in der Verbrennung gebildeten Stickoxiden zu N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> findet im Temperaturbereich der Abgasnachbehandlung nicht statt, da die Aktivierungsenergie für diese zu hoch ist. Die Aktivierungsenergie konnte bisher katalytisch nicht soweit gesenkt werden, dass die Rückreaktion mit ausreichender Reaktionsgeschwindigkeit abläuft. Daher ist es notwendig einen zusätzlichen Reaktionspartner bereitzustellen. [7]

Als Reaktionspartner hat sich Ammoniak NH<sub>3</sub> bewiesen, dass jedoch aufgrund der Toxizität sicherheitstechnisch bedenklich ist. Ammoniak kann aus einer Trägersubstanz, z.B.: Harnstoff oder Ammoniumcarbamat erzeugt werden. Für den Betrieb im Fahrzeug hat sich eine Lösung mit 32.5% Harnstoff gelöst in Wasser, Adblue genannt, bewährt. [8]

Nachfolgend werden die chemische Reaktionen, welche in einem SCR-Katalysator ablaufen erläutert.

Zunächst muss Ammoniak aus der Harnstoff-Wasserlösung gebildet werden. Dies geschieht mit folgenden zwei Reaktionen

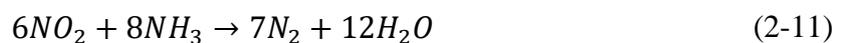
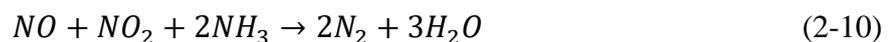
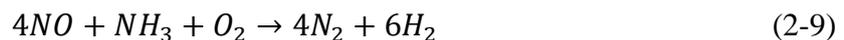


$(NH_2)_2CO$	[mol]	Harnstoff
$NH_3$	[mol]	Ammoniak
$HNCO$	[mol]	Isocyansäure
$H_2O$	[mol]	Wasser
$CO_2$	[mol]	Kohlendioxid

In Formel (2-7) ist die Thermolyse-Reaktion beschrieben. In dieser werden Ammoniak und Isocyansäure gebildet. In der Hydrolysereaktion, Formel (2-8), wird anschließend die Isocyansäure mit Wasser zu Kohlendioxid und Ammoniak umgesetzt. [8].

Um feste Ausscheidungen zu vermeiden, ist es erforderlich, dass die Hydrolysereaktion durch die Wahl eines geeigneten Katalysators und einer Temperatur von mindestens 250°C ausreichend schnell abläuft. Die Hydrolyse-Reaktion läuft im SCR-Reaktor ab.[8]

Das durch die Thermolyse und Hydrolyse entstandene  $NH_3$  reagiert im SCR-Katalysator nach den folgenden Gleichungen



$NO$	[mol]	Stickstoffmonoxid
$NH_3$	[mol]	Ammoniak
$O_2$	[mol]	Sauerstoff
$N_2$	[mol]	Molekularer Stickstoff
$H_2$	[mol]	Wasserstoff
$NO_2$	[mol]	Stickstoffdioxid
$NH_3$	[mol]	Ammoniak
$H_2O$	[mol]	Wasser

Der Umsatz bei Temperaturen unter 300°C läuft hauptsächlich über Reaktion (2-10) ab.[8]

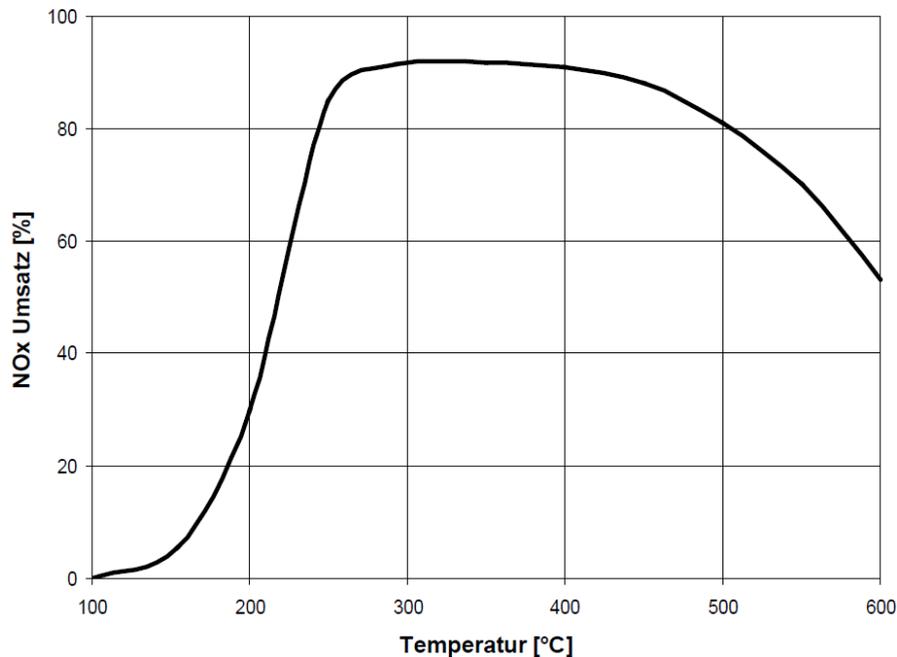


Abbildung 2-5: Umsatzkurve von NO<sub>x</sub> zu Stickstoff im SCR-Verfahren [7]

In Abbildung 2-5 wird eine typische Umsatzkurve von NO<sub>x</sub> zu Stickstoff im SCR-Verfahren gezeigt. Es wird in einem sehr breiten Temperaturbereich, von ca. 250°C bis 450°C eine Umwandlung von ca. 90% erreicht. Bei Temperaturen oberhalb von 450°C setzt die Oxidation von NH<sub>3</sub> mit dem Luftsauerstoff ein, dadurch sinkt der NO<sub>x</sub>-Umsatz. [7]

Bei einer Dosierung von mehr NH<sub>3</sub> als für die Reduktion benötigt, kommt es zu einem NH<sub>3</sub>-Schlupf. Durch diesen NH<sub>3</sub>-Schlupf würde es zu einer Geruchsbelästigung der Umgebung kommen, deswegen ist der Einsatz eines NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysators notwendig. In diesem wird der überschüssige Ammoniak zu N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O oxidiert. [8]

In Abbildung 2-6 ist das Abgasnachbehandlungssystem eines Dieselmotors dargestellt. Bei 3 handelt es sich um den Oxidationskatalysator, bei 6 um den SCR-Katalysator und bei 7 um den NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysator. Die Abgastempersensoren sind auf Position 2, die NO<sub>x</sub>-Sensoren auf Position 5 und der NH<sub>3</sub>-Sensor auf Position 8 abgebildet. Bei 4 handelt es sich um das Dosierventil für die Harnstoff-Wasser-Lösung und bei 11 um den Tank für diese.

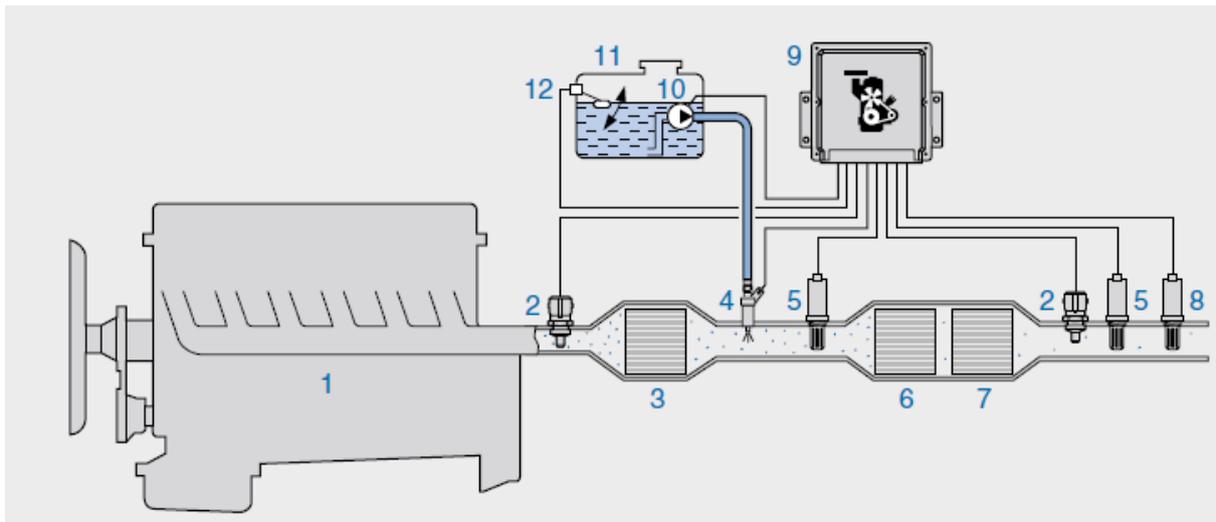


Abbildung 2-6: Abgasanlage zur katalytischen Reduktion von Stickoxiden [8]

## 2.3 Emissionsgesetzgebung

In diesem Kapitel wird auf die Emissionsgesetzgebung, insbesondere auf die RDE-Gesetzgebung (Real Driving Emissions), welche ab September 2019 für alle innerhalb der Europäischen Union erstmals neu zugelassenen Fahrzeuge verpflichtend wird, eingegangen.

### 2.3.1 RDE Gesetzgebung

Da der bis dato verwendete Laborprüfzyklus, der sog. NEDC (New European Driving Cycle) nicht die Emissionen von Fahrzeugen unter realen Fahrbedingungen widerspiegelt, hat die Europäische Kommission neben einem neuen Laborprüfzyklus (WLTC) auch ein Verfahren zur Überprüfung der Emissionen im praktischen Fahrbetrieb RDE eingeführt. Dieses Verfahren ist mit Einführung der Abgasnorm Euro 6d-temp am 1. September 2019 für alle neuzugelassenen Fahrzeuge verpflichtend. Mit Einführung dieser Abgasnorm dürfen die im realen Betrieb gemessenen  $\text{NO}_x$ -Emissionen um den RDE-Konformitätsfaktor von 2.1 höher sein, als die im Laborzyklus gemessenen Emissionen. Dies bedeutet, dass im Realbetrieb der Grenzwert für  $\text{NO}_x$  168mg/km ist. Mit 1. Jänner 2020 wird von der europäischen Union angedacht den RDE-Konformitätsfaktor auf 1.5 zu verringern. Somit dürfen ab diesem Datum nur mehr Fahrzeuge zugelassen werden, die einen  $\text{NO}_x$ -Emissions Grenzwert von 120mg/km unterschreiten. Neben den  $\text{NO}_x$ -Emissionen ist noch die Partikelanzahl limitiert, für diese gilt ein RDE-Konformitätsfaktor von 1.5. [13]

Die Messung der Emissionen erfolgt mit einem sogenannten PEMS (Portable Emission Measuring System) beschrieben in Kapitel 3.2.

Um eine Vergleichbarkeit der RDE-Fahrten zu gewährleisten, gelten gewisse Randbedingungen. Neben den in Tabelle 2-1 aufgeführten Randbedingungen wird auch die Tripdynamik begrenzt. Die Idee dahinter ist vor allem den Einfluss unterschiedlicher Fahrstile zu mindern. Dazu wird die Dynamik sowohl nach oben hin, was ein zu aggressives Fahren bedeuten würde, als auch nach unten hin, zu ökonomisch, begrenzt.

<b>Umgebungsbedingungen</b>			
<b>Wert</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Beschreibung</b>
Seehöhe (gemäßigte Bed.)		700m	Über Meeresspiegel
Seehöhe (erweiterte Bed.)	701m	1300m	Über Meeresspiegel; Emissionen dividiert durch 1.6
Kumulierte positive Höhendifferenz.		1200m/ 100km	
Temperatur (erweiterte Bed.)	-7°C	0°C	Emissionen dividiert durch 1.6
Temperatur (gemäßigte Bed.)	1°C	29°C	
Temperatur (erweiterte Bed.)	30°C	35°C	Emissionen dividiert durch 1.6
<b>Anforderungen an die Fahrstrecke</b>			
Stadt		60km/h	
Landstraße	61km/h	90km/h	
Autobahn	91km/h		Fahrgeschwindigkeit muss für 5min 100km/h überschreiten
Fahrstrecke	16km		Mindeststrecke jeweils für Stadt-, Landstraßen- und Autobahnbetrieb
Gesamte Fahrdauer	90min	120min	
Anteil Urban	29%	44%	An der Gesamtfahrstrecke
Anteil Landstraße	23%	43%	An der Gesamtfahrstrecke
Anteil Autobahn	23%	43%	An der Gesamtfahrstrecke
Durchschnittsgeschw. Stadt	15km/h	40km/h	
Haltezeit Stadtbetrieb	6%	30%	Der Gesamtdauer des Stadtbetriebs; Fahrzeuggeschw. < 1km/h; kann mehrere Haltezeiten von mind. 10s umfassen
Haltezeit Stadtbetrieb		300s	Einzelne Haltezeiten dürfen 300 aufeinanderfolgende Sekunden nicht überschreiten.
Durchschnittsgeschw. Autobahn	90km/h	110km/h	Fahrgeschwindigkeit muss für 5min 100km/h überschreiten
Höchstgeschwindigkeit		145km/h	Darf um 15km/h überschritten

			werden, wenn entsprechende Anteil 3% der Gesamtdauer der Autobahnfahrt nicht überschreitet.
--	--	--	---

Tabelle 2-1: Übersicht über einige der RDE Parameter [10], [11], [12]

## 2.4 Handbuch Emissionsfaktoren

[14][13]: *“Das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) wurde ursprünglich im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, der Schweiz und Österreich erstellt.*

*Das Handbuch stellt den Benutzern Emissionsfaktoren pro km oder Verkehrsvorgang in Abhängigkeit der folgenden Parameter zur Verfügung:*

- *Nach Emissionsart(en): «warme» Emissionsfaktoren, Kaltstartzuschläge, Verdampfungsemissionen.*
- *Nach Fahrzeugkategorie(n): Pkw, Lieferwagen, schwere Nutzfahrzeuge (SNF), Reisebusse (=Reisecars), Linienbusse (=Busse des öffentlichen Verkehrs) sowie Motorräder.*
- *Nach Bezugsjahren von in der Regel 1990 bis 2030 oder 2035, und damit verknüpfte typische, nach Ländern differenzierte Verkehrszusammensetzungen (=Mix von Fahrzeugschichten), die von Jahr zu Jahr variieren, dies für die Länder Deutschland, Österreich, Schweiz, Schweden, Norwegen und Frankreich).*
- *Nach Schadstoffen. Angaben zu folgenden Komponenten sind verfügbar: CO, HC, NO<sub>x</sub>, Partikel, sowie verschiedene HC-Komponenten (CH<sub>4</sub>, NMHC, Benzol, Toluol, Xylol), Kraftstoffverbrauch (Benzin/Diesel), CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub> und PN (Partikelanzahl).*
- *Die sog. «warmen» Emissionsfaktoren werden differenziert nach einer oder mehreren «Verkehrssituationen» sowie nach Längsneigungen (0%, 2%, 4%, 6%), mit denen typische Verkehrsabläufe und -umgebungen abgebildet werden können. Zudem werden Durchschnittswerte angeboten, d.h. ein gewichteter Wert pro Strassenkategorie sowie ein über alle Situationen gewichtetes Mittel (unter Einschluss von Längsneigungen).*
- *Für Kaltstartzuschläge werden Angaben für typische Kennwerte bzw. Verteilungen gemacht (wie etwa Umgebungstemperatur, Fahrtlängenverteilung, Standzeitenverteilung).*
- *Analog werden Angaben für typische Kennwerte bzw. Verteilungen zur Berechnung von Verdampfungsemissionen gemacht.*
- *Die Ergebnisse können in unterschiedlichem Detaillierungsgrad abgefragt werden:*
  - *als «gewichtete Emissionsfaktoren»: darin sind die verschiedenen Fahrzeugschichten länderspezifisch entsprechend ihren Fahrleistungsanteilen gewichtet,*
  - *«je Emissions-Konzept»: Diese Option gibt zusätzlich die Emissionsfaktoren der einzelnen Fahrzeugkonzepte an (z.B. nach EURO-Klassen),*
  - *«je Kraftstoff-Konzept»: Diese Option liefert zusätzlich die Emissionsfaktoren der Kraftstoffkonzepte (Otto- bzw. Diesel-Fahrzeuge),*
  - *«je Fahrzeugschicht»: Diese Option gibt zusätzlich die Emissionsfaktoren der einzelnen Fahrzeugschichten an (z.B. GKat-Pkw mit Hubraum <1.4 l, mit Hubraum 1.4-2 l, mit Hubraum >2 l etc.). PS: Bei den PKW wird die Differenzierung nach Hubraumklassen allerdings nur noch beim Kraftstoffverbrauch bzw. den CO<sub>2</sub>-Emissionen gemacht.*
- *Die gewählte Parameterkombination wird unter einem benutzerdefinierten Namen gespeichert. Das Programm berechnet anschließend die gewünschten Emissionsfaktoren. Die Ergebnisse lassen sich nach MS-Excel exportieren oder in MS-Access weiterverarbeiten.“*



In der nachfolgenden Abbildung ist der Steigungs- und Höhenverlauf der Route ersichtlich. Die Ausschläge in der Steigung zwischen 4750sec und 5500sec sind auf den Ausfall des GPS Signals in den beiden Gratkorn tunnel und dem Plabutsch tunnel auf der A9 Pyhrn Autobahn zurückzuführen.

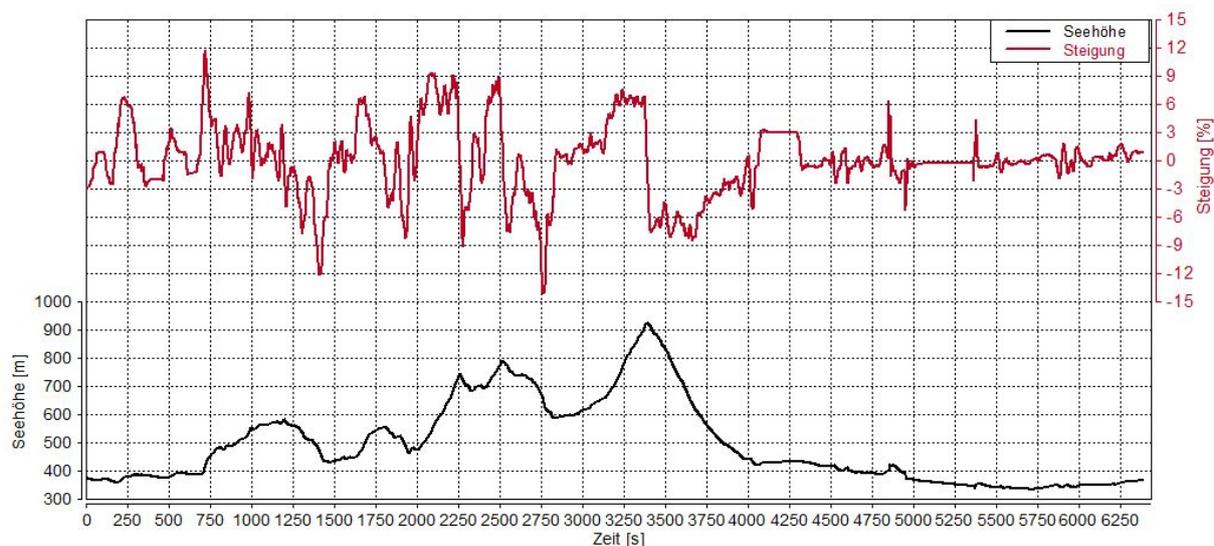


Abbildung 3-2: Steigungs- und Höhenprofil der Route Arzberg

### 3.1.2 Route Rechberg (Arzberg modifiziert)

Die Route Rechberg führt ausgehend von der TU Graz in der Inffeldgasse über die Glacisstraße, Weinzöttl-, Wiener- und die B67 Grazerstraße nach Peggau. Von Peggau führt sie über die Bruckerstraße nach Frohnleiten und in weiterer Folge über den Rechberg nach Tulwitz, wo gewendet wird. Danach führt die Route wieder zurück über den Rechberg nach Frohnleiten und weiter über die S35 Brucker Schnellstraße und die A9 Pyhrn Autobahn bis zur Abfahrt Lieboch. An der Abfahrt Lieboch wird die Autobahn verlassen und die Route wird über B70 und Seiersberg bis in die Gradnerstraße zu ihrem Endpunkt geführt. In Abbildung 3-3 ist die Route Rechberg dargestellt.

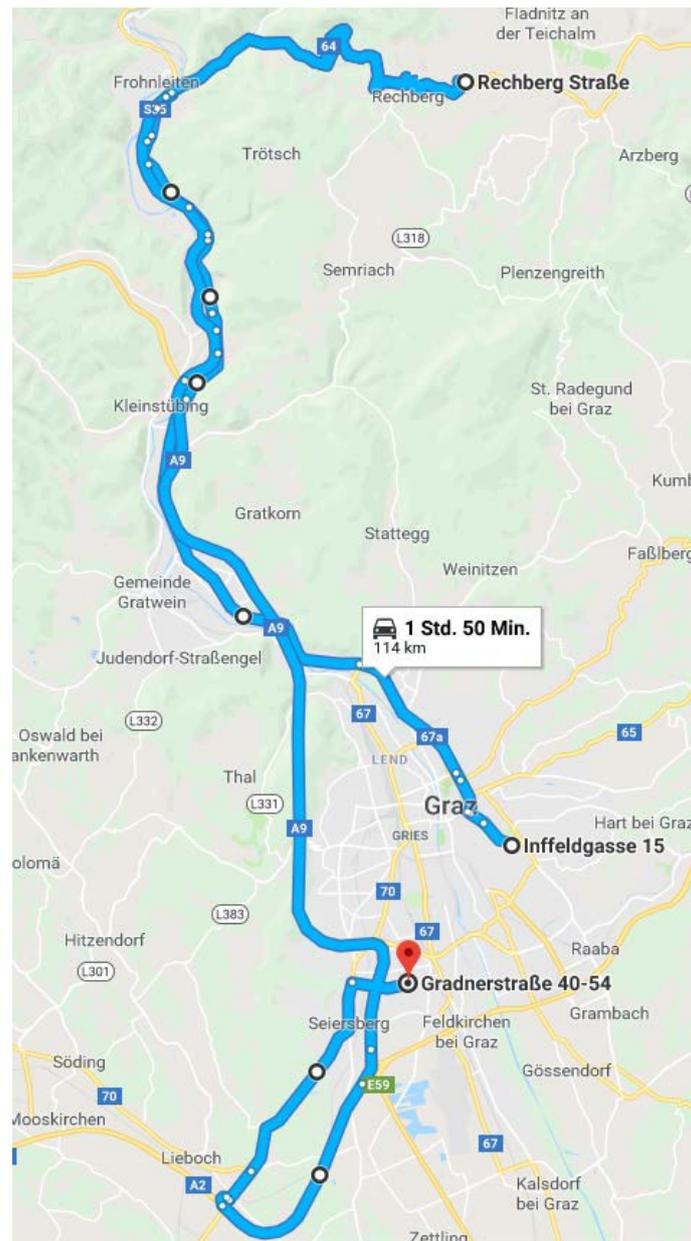


Abbildung 3-3: Route Rechberg

In der nachfolgenden Abbildung ist der Steigungs- und Höhenverlauf der Route ersichtlich. Die Ausschläge in der Steigung und die Seehöhe von 0 Meter zwischen 5000sec und 5500sec sind auf den Ausfall des GPS Signals in den beiden Gratkorn-tunnel und dem Plabutschunnel auf der A9 Pyhrn Autobahn zurückzuführen.

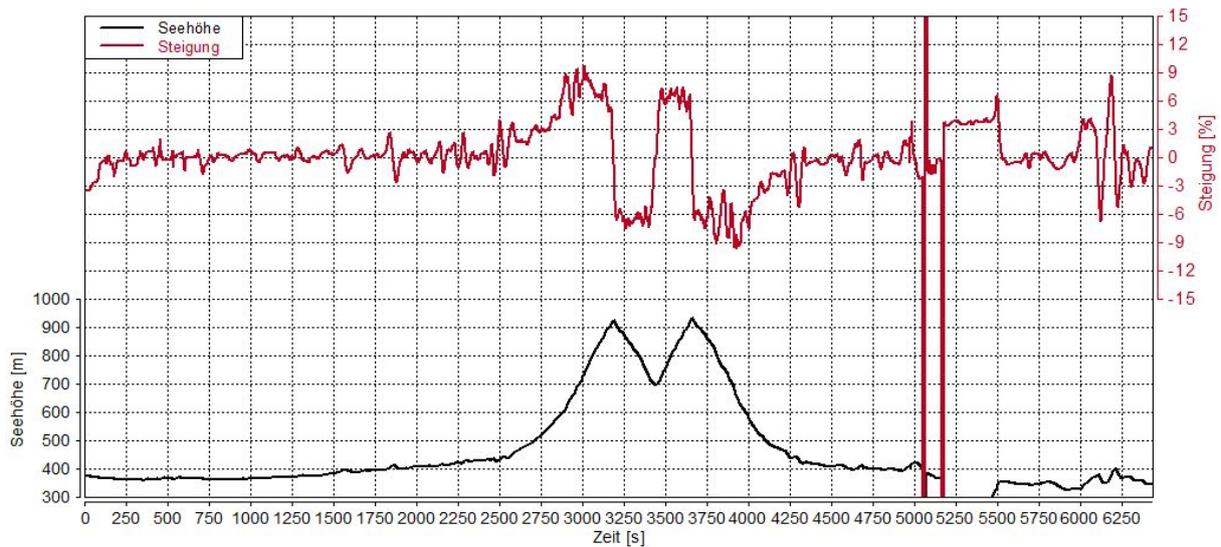


Abbildung 3-4: Steigungs- und Höhenprofil der Route Rechberg

### 3.1.3 Route Deutschlandsberg

Die in Abbildung 3-5 dargestellte Route Deutschlandsberg führt ausgehend von ihrem Startpunkt in der Inffeldgasse über die Puntigamer Straße, den Verteilerkreis Webling, die A9 Pyhrnautobahn und B76 Radlpass Straße nach Deutschlandsberg. In Deutschlandsberg zweigt die Route auf die L619 Weinebenstraße ab und führt bis nach Trahütten, wo gewendet wird. Der Abschnitt Deutschlandsberg-Trahütten wird zweimal befahren. Von Deutschlandsberg führt die Route über die B76 und A9 zurück zu ihrem Endpunkt in Seiersberg.

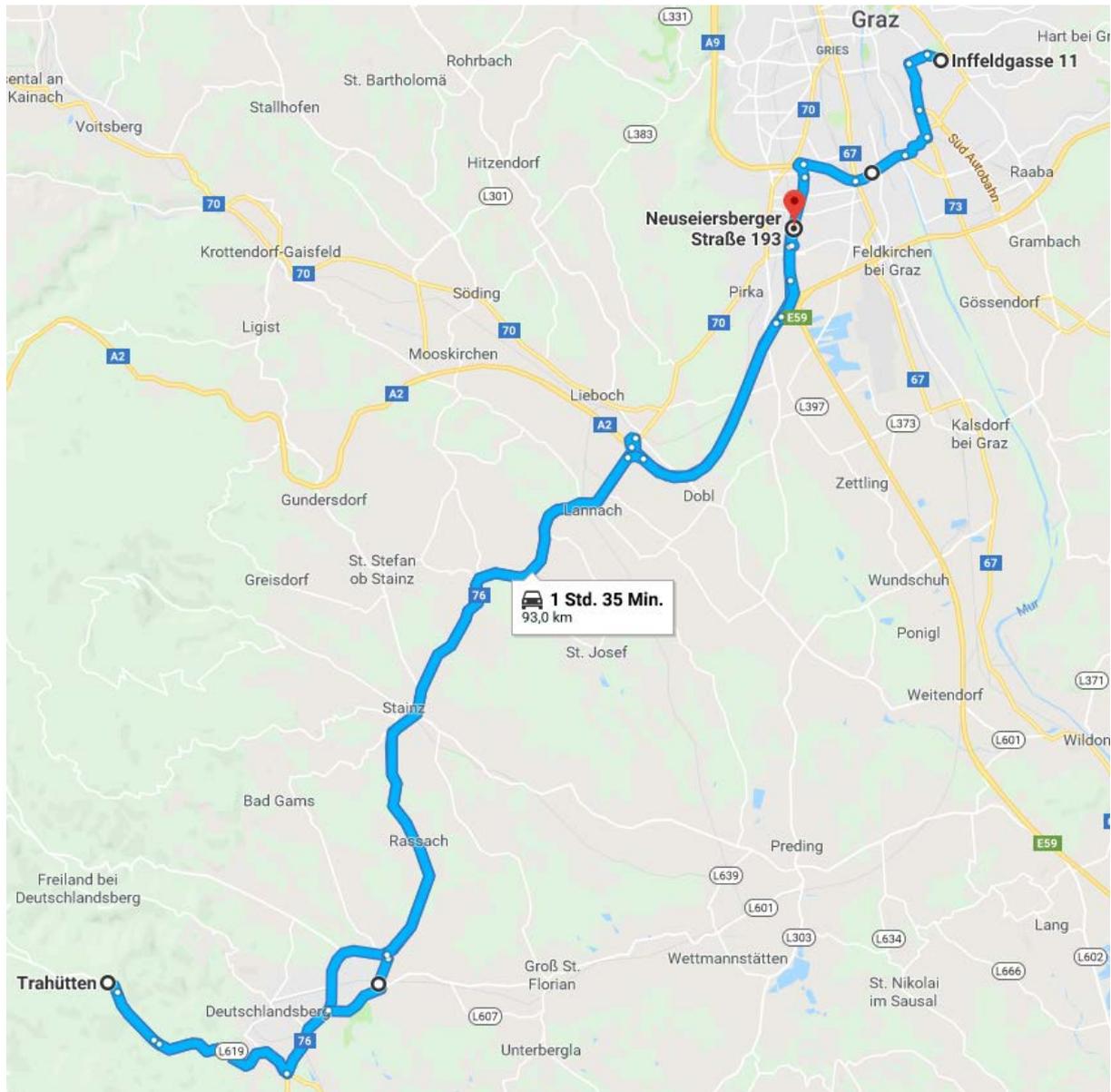


Abbildung 3-5: Route Deutschlandsberg

In der nachfolgenden Abbildung ist der Steigungs- und Höhenverlauf der Route ersichtlich.

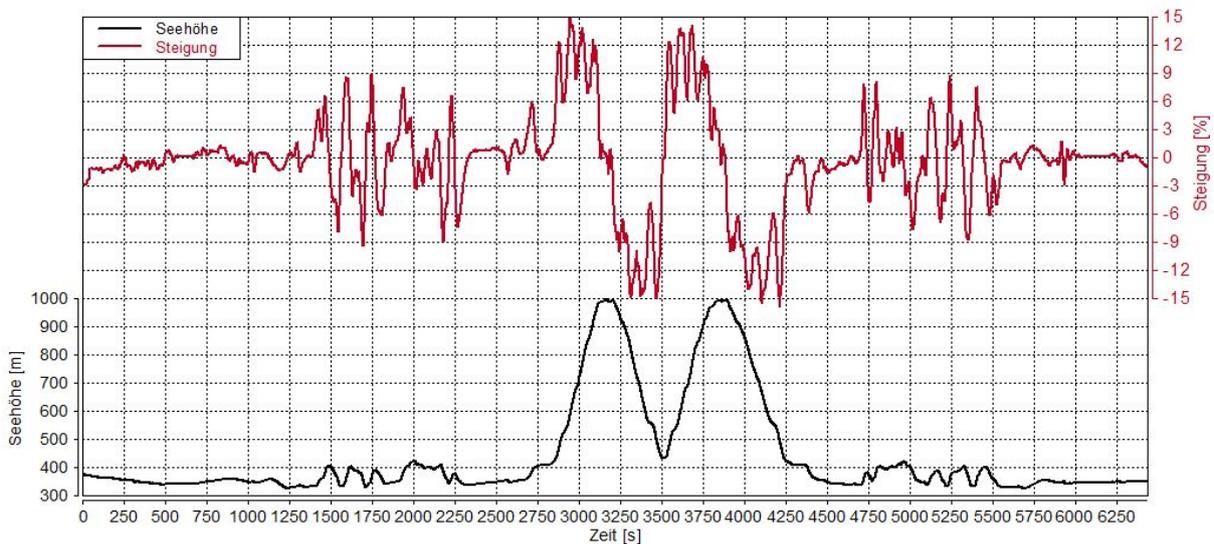


Abbildung 3-6: Steigungs- und Höhenprofil der Route Deutschlandsberg

## 3.2 Mobiles Emissionsmessgerät

Zur Messung der Emissionen im praktischen Fahrbetrieb wurde ein mobiles Emissionsmessgerät (PEMS) der Firma AVL List GmbH verwendet. Dieses besteht aus einem Gas-PEMS zur Messung der gasförmigen Schadstoffe, wie NO, NO<sub>2</sub>, CO und CO<sub>2</sub>, sowie aus einem PN-PEMS zur Messung der Partikelanzahl. Des Weiteren wird noch eine Systemsteuereinheit (System Control) und ein Exhaust Flo Meter (EFM) zur Messung des Abgasmassenstroms benötigt. Mit einem am Fahrzeugdach montierten Global Positioning System (GPS) und einer Wetterstation werden außerdem noch die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Höhe, die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchte mitgemessen. Zur Regelung und Steuerung wird eine Systemsteuereinheit (System Control) und zur Messung des Abgasmassenstroms ein Exhaust Flow Meter (EFM) benötigt. Zusätzlich wird am Fahrzeugdach ein Global Positioning System (GPS) und eine Wetterstation zur Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Seehöhe, der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchte montiert. [15], [16]

Für eine genaue Beschreibung des PN-PEMS sei auf [16] verwiesen.

### 3.2.1 Gas-PEMS

Der Rohabgasstrom wird durch eine beheizte Entnahmeleitung zum Gerät geführt. In diesem wird an einem beheizten Filter die Partikel aus dem Abgas entfernt, zusätzlich wird der Abgasstrom in zwei Teilströme unterteilt.

Einer dieser Teilströme wird nach dem beheizten Filter mit Umgebungstemperatur vorgekühlt und in zweistufigen Kühler geleitet. Nach der ersten Kühlerstufe erreicht der Teilstrom den UV-RAS Analysator, in diesem wird die NO und NO<sub>2</sub> Konzentration gemessen. [15]

Der Abgasstrom durch den UV-RAS Analysator wird nach diesen nochmals in zwei Teilströme geteilt. Einer dieser Teilström fließt zuerst durch den zweiten Kühler und danach durch den NDIR-Analysator, welcher die Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration misst. [15] Für eine genaue Beschreibung des NDIR-Analysators, sowie des Messprinzips sei auf [15] verwiesen. Der schematische Aufbau des Gas-PEMS ist in Abbildung 3-7 ersichtlich.

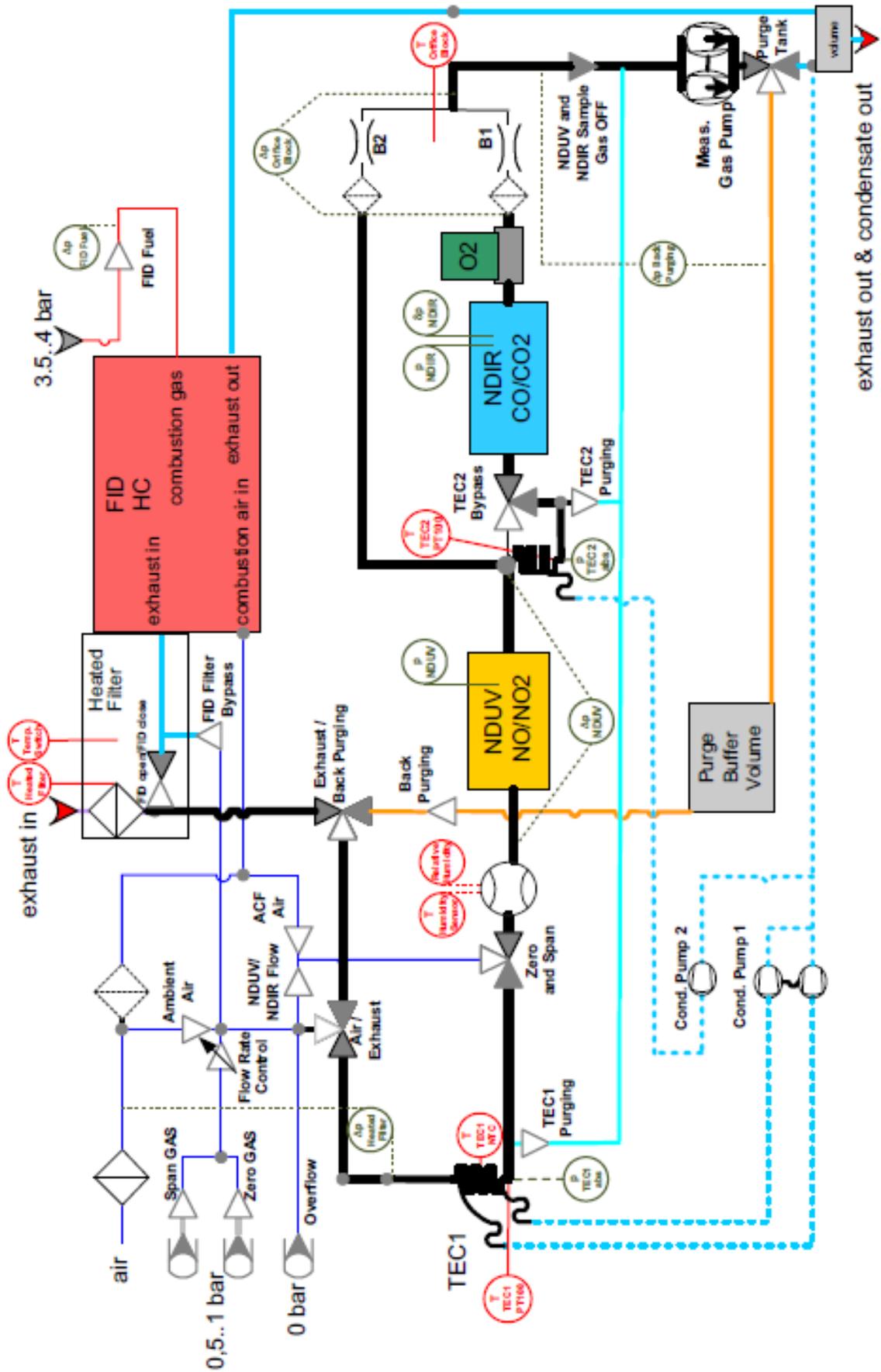


Abbildung 3-7: Schematischer Aufbau des Gas-PEMS [15]

### 3.3 Audi A4 Avant

Im Zuge dieser Arbeit wurde die experimentellen Untersuchungen mit einem Audi A4 Avant Baujahr 2017 durchgeführt. In der nachfolgenden Tabelle sind die technischen Daten dieses Fahrzeugs ersichtlich.

Motorbauart	Reihen-4-Zylinder-Dieselmotor mit Common- Rail-Einspritzsystem und Abgasturboaufladung
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	1968
Max. Leistung [kW]	90 bei 3500-4000min <sup>-1</sup>
Max. Drehmoment [Nm]	270 bei 1500-3000min <sup>-1</sup>
Abgasnachbehandlungssystem	Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter mit SCR-Beschichtung
EU-Abgasnorm	EU6
Motorbaureihe	VW EA288
Motorkennbuchstabe	DEUC
Antriebsart	Vorderradantrieb
Getriebe	6-Gang Handschaltung
Leergewicht (nach VO (EU) 1230/2012) [kg]	1550 kg
Höchstzulässiges Gesamtgewicht [kg]	2095
Testgewicht [kg]	2052
Kraftstoffverbrauch kombiniert [l/100 km]	4.3-4.0
CO <sub>2</sub> -Emissionen kombiniert [g/km]	115-103

Tabelle 3-1: Technische Daten des Messfahrzeuges [17], [18]

Nachfolgend abgebildet ist ein Ausschnitt des Abgassystems des Audi A4's. Das Abgasnachbehandlungssystem besteht aus dem Abgasreinigungsmodul und einem diesen nachgeschalteten Sperrkatalysator. Der Sperrkatalysator eliminiert einerseits das Ammoniak, welches bei hohen Temperaturgradienten im Abgasreinigungsmodul entsteht und andererseits wandelt er das während der Dieselpartikelfilterregeneration entstehende CO in CO<sub>2</sub> um. [18]

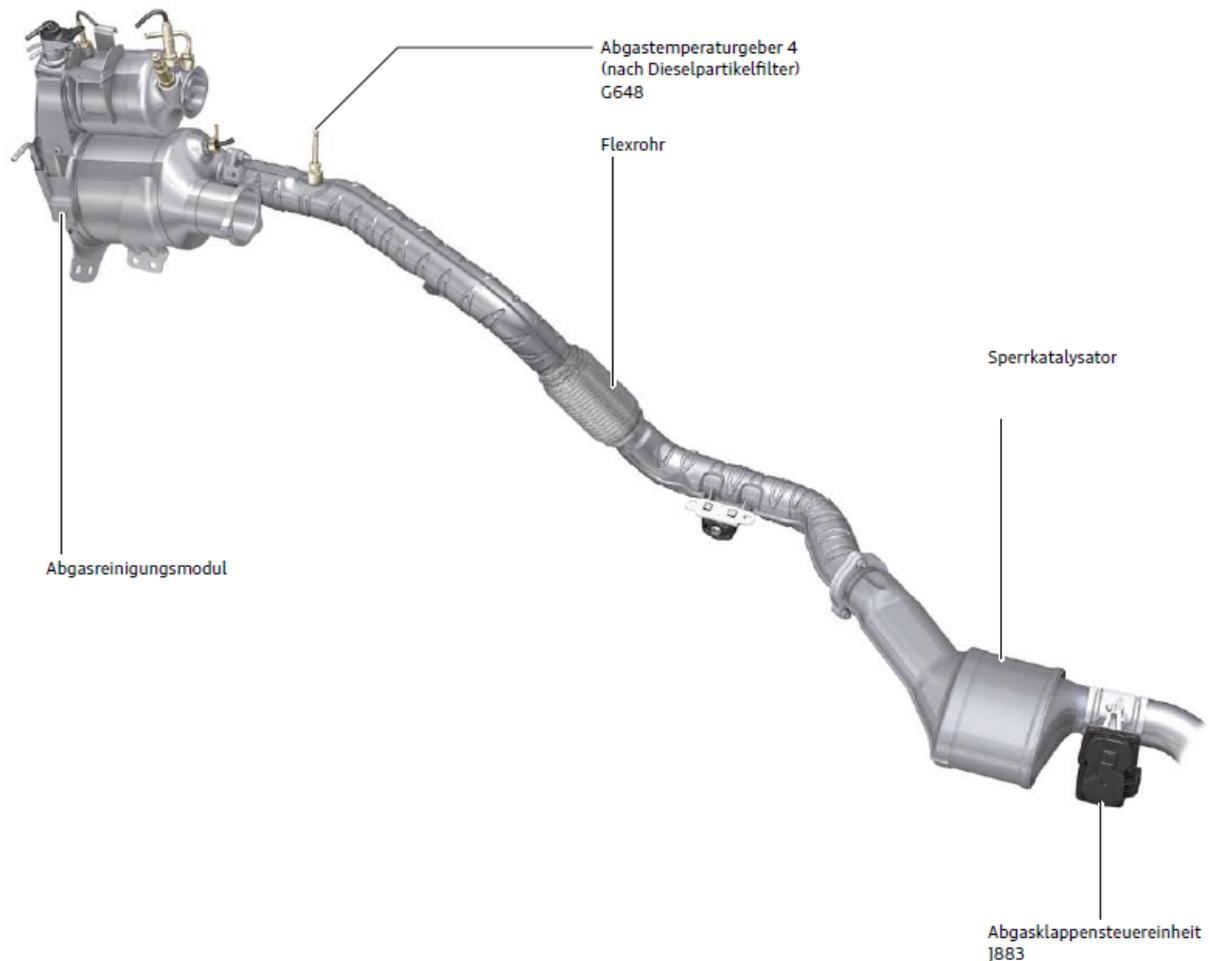


Abbildung 3-8: Ausschnitt des Abgassystems, Audi A4 Avant [18]

Das Abgasreinigungsmodul, ersichtlich in Abbildung 3-9 ist motornah zwischen Motor und Spritzwand angebracht. Im Abgasreinigungsmodul befindet sich der Oxidationskatalysator der Dieselpartikelfilter mit SCR-Beschichtung und das Abgasrückführventil mit Abgasrückführungskühler der Niederdruck Abgasrückführung. [18]

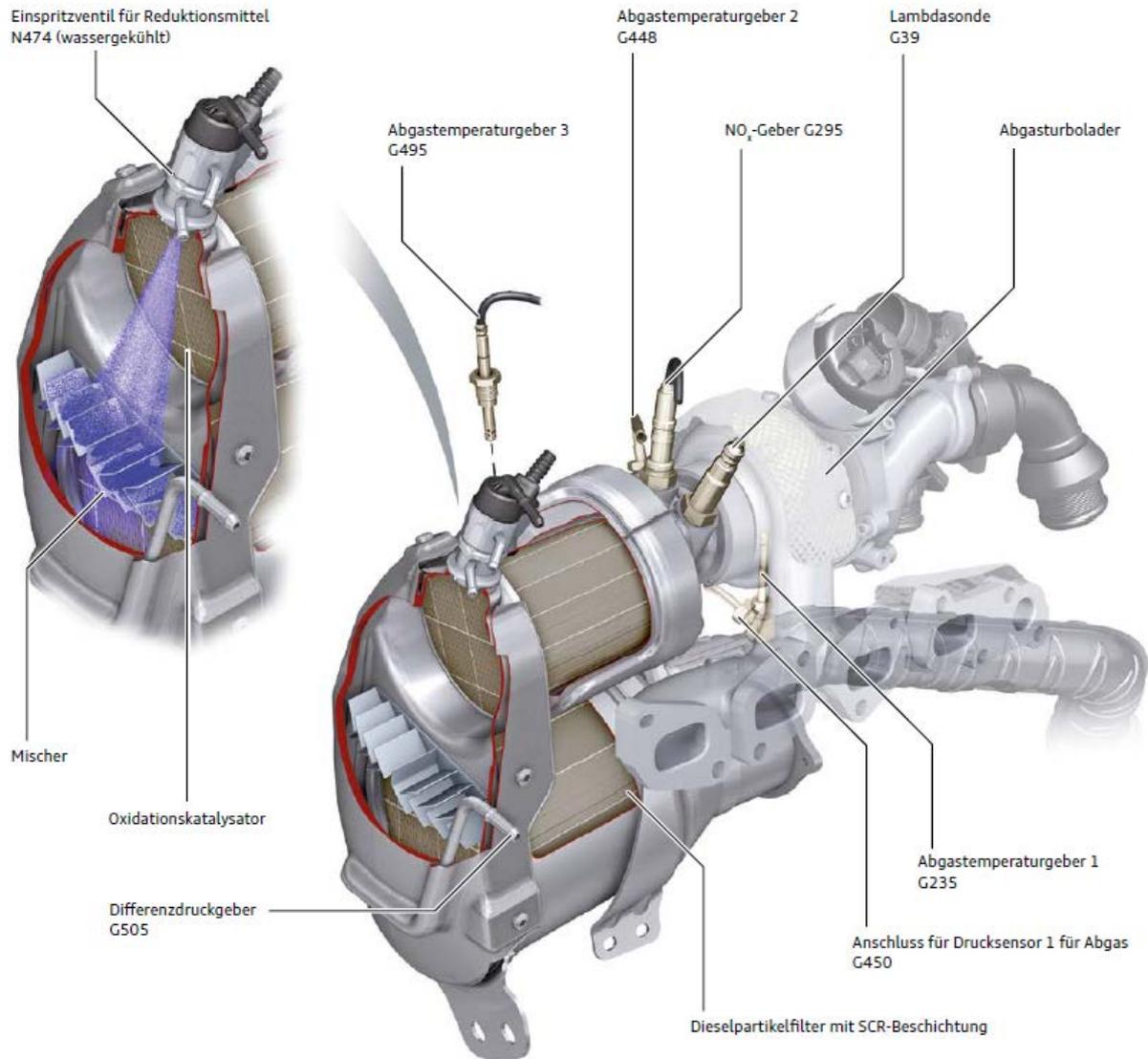


Abbildung 3-9: Abgasreinigungsmodul, Audi A4 Avant [18]

### 3.4 Messdatenerfassung

Die Messdatenerfassung erfolgte mittels des PEMS, beschrieben in Kapitel 3.2 und über die OBD-Schnittstelle im Fahrzeug mittels der Diagnosesoftware VCDS von der Firma Ross Tech. Über die OBD-Schnittstelle wurde unter anderem die Temperatur vor SCR, mittels des Abgastemperatursensor 3, und die NO<sub>x</sub>-Konzentration mittels des NO<sub>x</sub>-Gebers aufgezeichnet. Die Position beider Sensoren am Abgasreinigungsmodul ist in Abbildung 3-9 ersichtlich. In der nachfolgenden Tabelle sind die in weiterer Folge verwendeten Messgrößen aufgelistet.

Messgröße	Einheit	Messsystem
Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h	GPS
Fahrzeuggeschwindigkeit	km/h	VCDS
Seehöhe (GPS)	m	GPS
Abgasmassenstrom	kg/h	EFM
NO <sub>x</sub> -Konzentration (Tailpipe)	ppm	PEMS
NO <sub>x</sub> -Konzentration EO	ppm	VCDS
Abgastemperatur vor SCR-Kat	°C	VCDS
CO <sub>2</sub> -Konzentration	%	PEMS

Tabelle 3-2: Verwendete Messgrößen

### 3.5 Durchführung der RDE Messfahrten

Im Zuge dieser Arbeit wurden insgesamt fünf Messfahrten durchgeführt. Es wurden jeweils zwei Messfahrten auf den Routen Arzberg und Deutschlandsberg durchgeführt. Die Route Rechberg wurde einmal befahren. Eine genaue Beschreibung der gefahrenen Routen ist in 3.1 ersichtlich.

Als Fahrstil wurde bei allen Fahrten aggressiv gewählt. Der Fahrstil aggressiv bezieht sich darauf, dass versucht wurde Emission-provozierend zu fahren. In diesem Zusammenhang bedeutet aggressiv, dass unter größtmöglicher Gaspedalstellung möglichst früh in den nächst höheren Gang geschaltet wird. Dadurch wird das langsame Ansprechverhalten des Turboladers ausgenutzt und es können Betriebspunkte an der Vollastkurve erreicht werden. Dies führt zu einer hohen Stickoxidemission. Zusätzlich sei noch erwähnt, dass aufgrund von Starkregen bei der Route Rechberg der aggressive Fahrstil nicht über die ganze Route möglich war.

Die RDE-Messfahrten wurden mit 90% der maximalen Zuladung des Fahrzeuges durchgeführt. Dies führte zu einer Gesamtmasse des Fahrzeugs während der RDE-Messfahrten von 2052kg.

Bei allen Messfahrten befand sich der Lichtschalter in der Stellung „Auto“, somit war das Tagfahrlicht eingeschaltet. Die Klimaanlage wurde auf 22°C eingestellt und die Temperatur- und Lüftungsregelung befand sich in der Stellung „Auto“. Zusätzlich war das Radio eingeschaltet, ansonsten waren keine weiteren Verbraucher während der Messfahrten aktiv.

### 3.6 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit den nachfolgend beschriebenen Auswertetools und Formeln.

#### 3.6.1 ERMES Tool

Mit dem ERMES-Tool werden, aus den mit dem PEMS gemessenen Emissionskonzentrationen und dem gemessenen Abgasstrom, Emissionsmassenströme berechnet. Die Berechnung erfolgt mit dem sogenannten  $u_{Gas}$ -Faktor. Die nachfolgende Tabelle zeigt die unterschiedlichen  $u_{Gas}$ -Faktoren für die einzelnen emissionsrelevanten Komponenten.

Emissionskomponente	$u_{Gas}$ -Faktor
NO <sub>x</sub>	0.001586
CO <sub>2</sub>	0.001517
CO	0,000966
HC	0.000482

Tabelle 3-3:  $u_{Gas}$ -Faktoren der unterschiedlichen Emissionskomponenten [19]

In Gleichung (3-1) ist die Berechnung des NO<sub>x</sub>-Massenstroms ersichtlich. Die Berechnung der Massenströme für die anderen Emissionskomponenten erfolgt analog mit den jeweiligen Konzentrationen und dem jeweiligen  $u_{Gas}$ -Faktor

$$\dot{m}_{NO_x} = \dot{m}_{Abgas} * c_{NO_x} * u_{Gas\_NO_x} \quad (3-1) [19]$$

$$u_{Gas} = \frac{\text{Molanzahl Gaskomponente}}{\text{Molanzahl Abgas}} \quad (3-2) [19]$$

$\dot{m}_{NO_x}$	[g/s]	Massenstrom NO <sub>x</sub>
$\dot{m}_{Abgas}$	[kg/s]	Abgasmassenstrom
$c_{NO_x}$	[ppm]	Konzentration NO <sub>x</sub>
$u_{Gas\_NO_x}$	[-]	Gasfaktor für NO <sub>x</sub>

Zugleich erfolgt die Berechnung der Steigung, aus dem mittels GPS aufgezeichneter Seehöhe in jedem Zeitschritt.

Die gemessenen Rohemissionen werden mittels einer variablen und konstanten Zeitverschiebung der auftretenden Motorleistung zugeordnet, da diese aufgrund der Messstrecke und dem instationären Massenstrom einen variablen zeitlichen Versatz zur Motorleistung haben.

### 3.6.2 ECE Tool

Mit dem ECE-Tool erfolgt die Überprüfung der Gültigkeit der RDE-Fahrzyklen nach den in Kapitel 2.3.1 beschriebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen.

Neben den Daten aus dem PEMS können als Eingangsgrößen auch Daten, die mittels VCDS aufgezeichnet wurden, verwendet werden.

### 3.6.3 Durchgeführte Berechnungen

Der NO<sub>x</sub>-Massenstrom Engine Out (EO) wird mit Gleichung (3-1) berechnet. Mit diesem und dem NO<sub>x</sub> Massenstrom Engine Out Tailpipe (EoT), welcher mittels des ERMES-Tools berechnet wird, kann die Konvertierungsrate des SCR-Katalysators mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung berechnet werden.

$$\eta_{SCR} = 1 - \frac{\dot{m}_{NOx_{EoT}}}{\dot{m}_{NOx_{EO}}} \quad (3-3)$$

$\eta_{SCR}$	[-]	Konvertierungsrate
$\dot{m}_{NOx_{Tailpipe}}$	[g/s]	Massenstrom NO <sub>x</sub> EoT
$\dot{m}_{NOx_{EO}}$	[g/s]	Massenstrom NO <sub>x</sub> EO

Die Berechnung der Raumgeschwindigkeit erfolgt mit Gleichung (3-4)

$$\dot{v}_{Gas} = \frac{\dot{V}_{Gas}}{V_{Kat}} \quad (3-4)$$

$\dot{v}_{Gas}$	[1/h]	Raumgeschwindigkeit
$\dot{V}_{Gas}$	[m <sup>3</sup> /h]	Abgas-Volumenstrom
$V_{Kat}$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen des Katalysators

Die normierte Motordrehzahl berechnet sich mit Gleichung (3-5) und die normierte Motorleistung mit Gleichung (3-6)

$$n_{norm} = \frac{n - n_{idle}}{n_{rated} - n_{idle}} \quad (3-5)$$

$$P_{norm} = \frac{P}{P_{rated}} \quad (3-6)$$

$n_{norm}$	[-]	Normierte Motordrehzahl
$n_{idle}$	[U/min]	Leerlaufdrehzahl des Motors
$n_{rated}$	[U/min]	Nennndrehzahl des Motors
$n$	[U/min]	Aktuelle Motordrehzahl

---

$P_{norm}$	[-]	Normierte Motorleistung
$P$	[kW]	Aktuelle Motorleistung
$P_{rated}$	[kW]	Nennleistung des Motors

## 4 Simulation

In diesem Kapitel wird auf die Simulation der Emissionskomponenten und die zur Simulation genutzte Software PHEM Passenger car and Heavy duty Emission Model eingegangen. Die Simulation wurde für drei Fahrzeuge mit unterschiedlichen Volumen des SCR-Katalysators durchgeführt, um den Einfluss von diesem bei unterschiedlichen Fahrprofilen auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen zu untersuchen. Die Eingangsdaten von den verwendeten Fahrzeugen stammen aus einem Projekt der FVT & ACEA (Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik und European Automobile Manufacturer's Association), welches sich mit dem Potential zur Abschätzung zukünftiger NO<sub>x</sub>-Emissionen mit unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssystemen befasste, sowie aus vorangegangenen Arbeiten.

### 4.1 Simulationstool PHEM

Die Simulationssoftware PHEM berechnet in sekundlicher Auflösung, die für ein vorgegebenes Fahrprofil benötigte Fahrzeugleistung aus dem Fahrwiderstand und den Getriebeverlusten. Mit dem Reifendurchmesser und dem Übersetzungsverhältnis des Getriebes und einem hinterlegten Schaltmodell wird die Motordrehzahl simuliert. Mit der Fahrzeugleistung und der Motordrehzahl werden aus normierten Kennfeldern die Emissionen interpoliert.

In Abbildung 4-1 ist der prinzipielle Ablauf einer Simulation mit PHEM ersichtlich.

Ein Fahrzyklus und die Fahrzeugdaten dienen als Eingangsgrößen zur Berechnung der Motorleistung und Drehzahl. Im Fahrzyklus werden in 1Hz Auflösung die Fahrgeschwindigkeit, die Steigung bzw. das Gefälle und optional die Drehzahl oder die Getriebestufe angegeben. Wird keine Getriebestufe angegeben, wird diese mittels einem im PHEM hinterlegten Schaltmodell berechnet. Als Fahrzeugdaten werden unter anderem die Motordaten, das Motorkennfeld, die Vollast- und Schleppkurve, Fahrwiderstände, Übersetzungsverhältnis vorgegeben.

Zusätzlich kann mit PHEM das Abgassystem simuliert werden. Als Eingangsgrößen hierfür werden unter anderen die unterschiedlichen Module (Turbolader, DOC, SCR), deren Temperatur zum Start der Simulation, Abkühlkurven, Konvertierungskennfelder, geometrischen Abmessungen, die Art der Strömung, thermodynamischen Eigenschaften sowie die Umgebungstemperatur definiert.

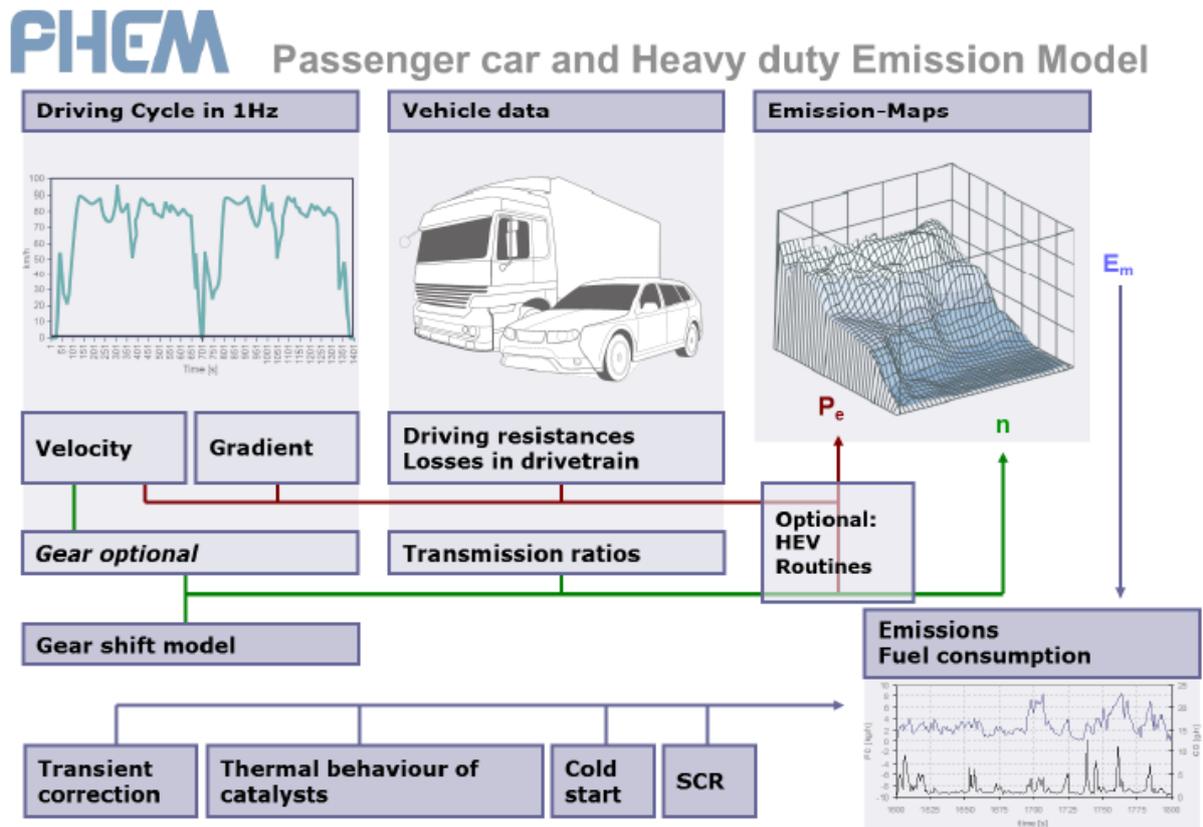


Abbildung 4-1: Simulations-Schema PHEM

Anhand von gemessenen Emissionen können des Weiteren Emissionskennfelder erstellt werden. Durch Zuordnung der gemessenen Emissionen an die entsprechende Leistung und Drehzahl wird ein Kennfeld der einzelnen Abgaskomponenten erzeugt. Ebenfalls muss die Gaslaufzeit berücksichtigt werden, die Gaslaufzeit ist die Zeit, welche das Abgas von Motorausstritt bis zum Messgerät benötigt. Weiters können mit den berechneten Emissionskennfeldern Fahrzeugsimulationen durchgeführt werden.

## 4.2 Simulationsmodell in PHEM

Im nachfolgenden Kapitel werden die Modelle der simulierten Fahrzeuge im PHEM erklärt.

### 4.2.1 VW Golf

Bei dem ersten simulierten Fahrzeug handelt es sich um einen VW Golf mit einer Nennleistung von 81kW und einem motornahen SCR-Katalysator mit einem Volumen von 3.5 Liter. Die Eingangsdaten des simulierten Fahrzeugs stammen aus einem Projekt der FVT & ACEA, welches sich mit dem Potential zur Abschätzung zukünftiger  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssystemen befasste.

In der nachfolgenden Abbildung sind die verwendeten veh, map, fld und exs-Dateien ersichtlich.

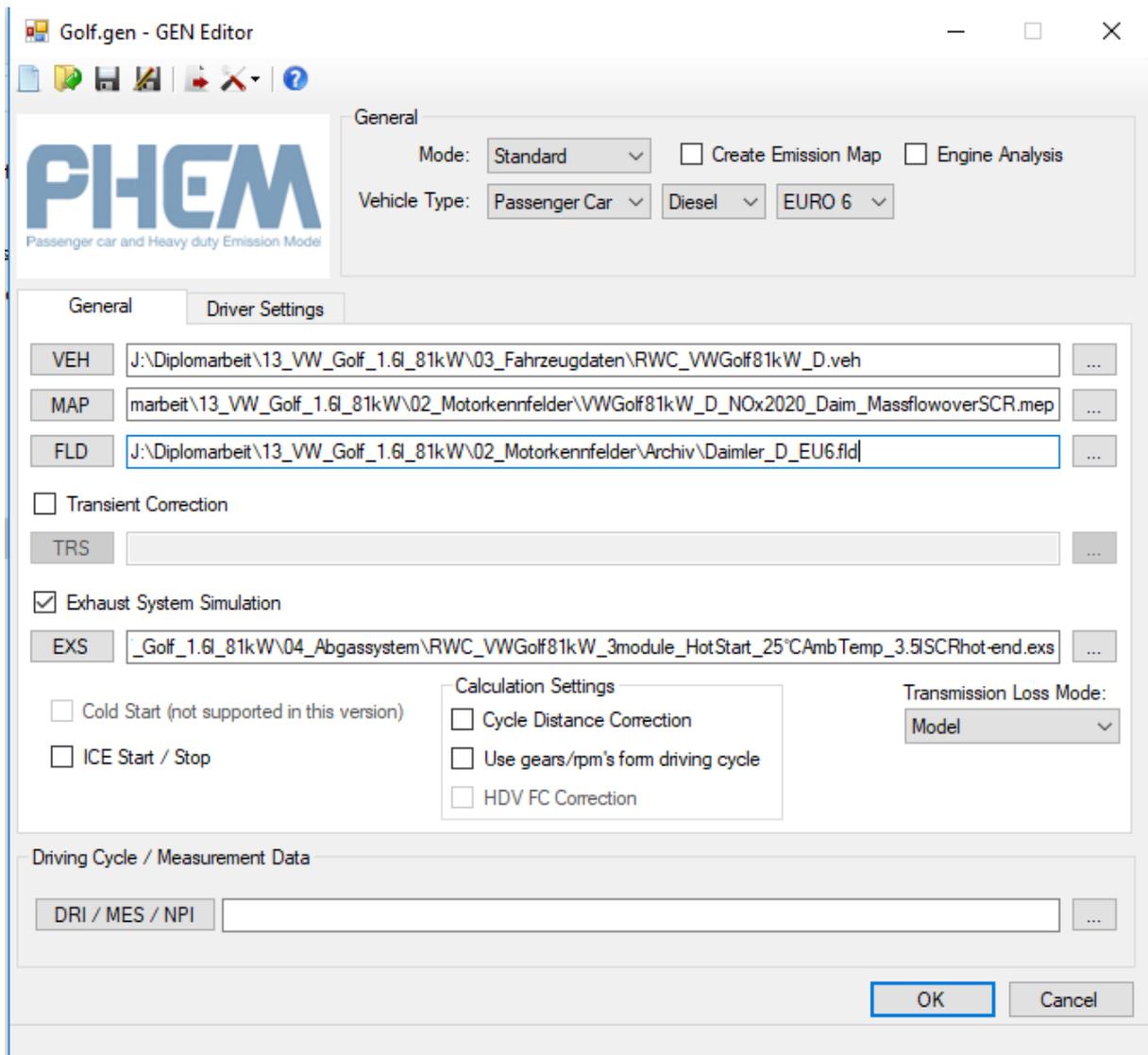


Abbildung 4-2: Verwendete veh, mep, fld und exs-Dateien für die Simulation des VW Golfs

Das simulierte Fahrzeug hat eine Nennleistung von 81 kW bei einer Nenndrehzahl von  $3500 \text{ min}^{-1}$ . Die Masse des Fahrzeuges beträgt 1770 kg. Die weiteren Daten des simulierten Fahrzeuges sind in Abbildung 4-3 ersichtlich. Im der map-Datei sind in tabellarischer Form das Verbrauchs- und die Emissionskennfelder hinterlegt. Die Vollastkurve und Schleppekurve des verbauten Motors sind in der fld-Datei hinterlegt.

**Mass**  
 Mass: 1770 [kg]  
 Loading: 0 [kg]  
 Red. Mass Wheels: 42.2 [kg]  
 Wheel diameter (dyn): 0.614 [m]  
 Drag coefficient: 0.3042 [-]  
 Cross sectional area: 2.18 [m<sup>2</sup>]

**Rolling resistance factors**  
 Fr 0: 0.006565421 [-]  
 Fr 1: 0.00014513 [s/m]  
 Fr 2: 0 [s/m]<sup>2</sup>  
 Fr 3: 0 [s/m]<sup>3</sup>  
 Fr 4: 0 [s/m]<sup>4</sup>

**Engine**  
 Rated engine power: 81 [kW]  
 Rated engine speed: 3500 [rpm]  
 Idling engine speed: 700 [rpm]  
 Inertia: 0.535 [kgm<sup>2</sup>]

**Gear shift parameters**  
 Heavy Duty: Fast, Eco  
 Up: 0.73, 0.45 [-]  
 Down: 0.51, 0.4 [-]  
 Share: 0, 0 [-]  
 Share mixed: 1 [-]  
 Ref. velocity: 0 [km/h]

**Light Duty / Passenger Car**  
 Down, Up  
 A: 0.18, 0.3 [-]  
 B: 0.28, 0.3 [-]  
 C: 0.46, 0.4 [-]

**Cross Wind Correction**  
 No Correction

**Auxiliaries**  

ID	Type	Input File

 Paux normalized: 0.01481 [-]

**Retarder**  
 Type: None  
 Ratio: 0 [-]

**Transmission**  
 Inertia: 0.059 [kgm<sup>2</sup>]

Gear	Ratio	Efficiency Map
A	1	
01	13.78	
02	7.09	
03	4.32	
04	2.98	
05	2.28	
06	0	
07	0	
08	0	
09	0	
10	0	
11	0	

 Loss factor: 0.3 [-] (Transmission Loss Model only)

Abbildung 4-3: Fahrzeugdaten des simulierten VW Golf

Die Daten des Abgassystems sind in der exs-Datei hinterlegt. Das Abgassystem des VW Golf besteht aus drei Modulen. Das erste Modul ist der Turbolader, das zweite der Oxidationskatalysator und der Dieselpartikelfilter. Das dritte Modul ist der SCR-Katalysator, dieser hat ein Volumen von 3.5 Liter. In Abbildung 4-4 ist das NO<sub>x</sub>-Konvertierungskennfeld des SCR-Katalysators ersichtlich. Dieses zeigt, dass die höchste Konvertierungsrate bei einem Massenstrom kleiner als 0.06 kg/s und einer Temperatur zwischen 390°C und 430°C ist. Bei Temperaturen größer 430°C fällt die Konvertierungsrate stark ab.

Die Simulationen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 25°C durchgeführt. Die Temperaturen der einzelnen Module bei Start der Simulationen betrugen 190°C für den Turbolader und den Oxidationskatalysator, 135°C für den SCR-Katalysator.

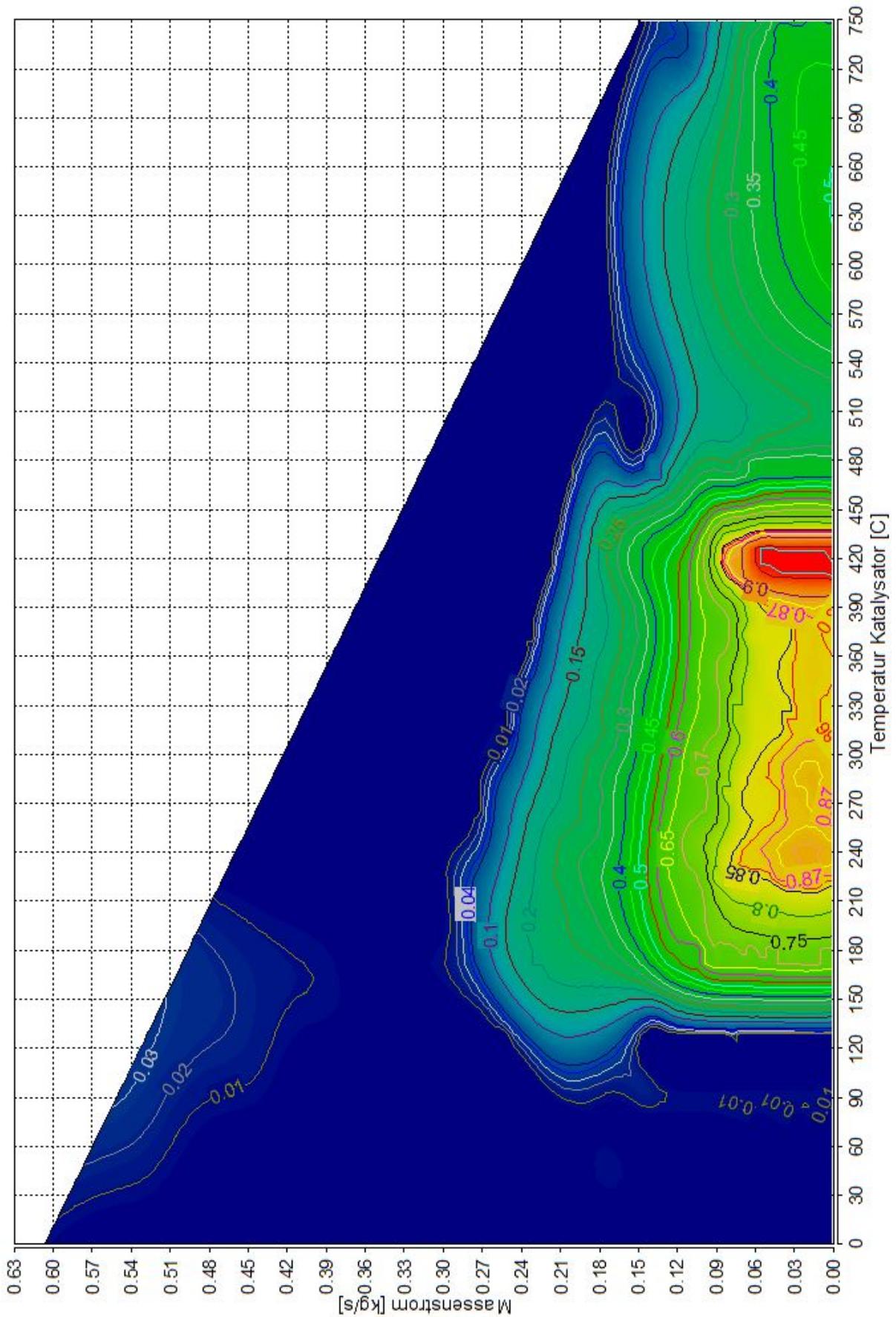


Abbildung 4-4: NO<sub>x</sub>-Konvertierungskennfeld 3,5 l SCR

### 4.2.2 Mercedes Sprinter

Bei dem zweiten simulierten Fahrzeug handelt es sich um einen Mercedes Sprinter mit einer Leistung von 95 kW und einem motornahen SCR-Katalysator mit einem Volumen von 6 Liter. Die Eingangsdaten des simulierten Fahrzeugs stammen wie schon für den VW Golf aus einem Projekt der FVT & ACEA, welches sich mit dem Potential zur Abschätzung zukünftiger NO<sub>x</sub>-Emissionen mit unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssystemen befasste.

In der nachfolgenden Abbildung sind die verwendeten veh, map, fld und exs-Dateien ersichtlich.

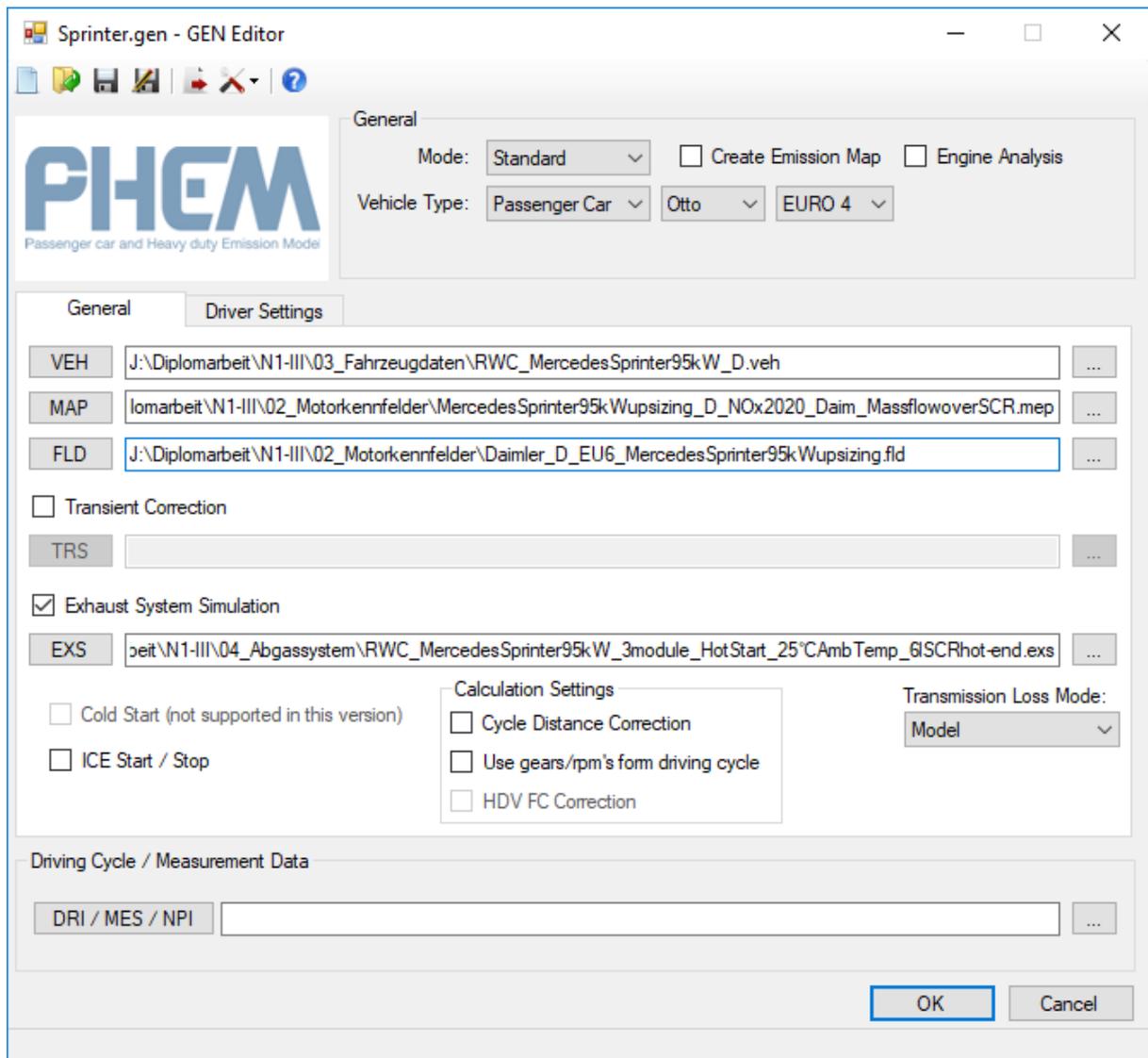


Abbildung 4-5: Verwendete veh, mep, fld und exs-Dateien für die Simulation des Mercedes Sprinter

Das simulierte Fahrzeug hat eine Nennleistung von 95 kW bei einer Nenndrehzahl von 3500 min<sup>-1</sup>. Die Masse des Fahrzeuges beträgt 3270 kg. Die weiteren Daten des simulierten Fahrzeugs sind in Abbildung 4-6 ersichtlich. Im der map-Datei sind in tabellarischer Form das Verbrauchs- und die Emissionskennfelder hinterlegt. Die Vollastkurve und Schleppkurve des verbauten Motors sind in der fld-Datei hinterlegt.

The screenshot shows the 'VEH Editor' window for a Mercedes Sprinter. The interface is divided into several sections for parameter input:

- Vehicle Properties:** Mass (3270 [kg]), Loading (0 [kg]), Red. Mass Wheels (72.6 [kg]), Wheel diameter (dyn) (0.69 [m]), Drag coefficient (0.4064 [-]), Cross sectional area (4.4 [m<sup>2</sup>]).
- Rolling resistance factors:** Fr 0 (0.01325677 [-]), Fr 1 (0 [s/m]), Fr 2 (0 [s/m]<sup>2</sup>), Fr 3 (0 [s/m]<sup>3</sup>), Fr 4 (0 [s/m]<sup>4</sup>).
- Engine:** Rated engine power (95 [kW]), Rated engine speed (3500 [rpm]), Idling engine speed (700 [rpm]), Inertia (0.627 [kgm<sup>2</sup>]).
- Gear shift parameters:**
  - Heavy Duty: Up (Fast: 0.73, Eco: 0.45 [-]), Down (Fast: 0.51, Eco: 0.4 [-]), Share (0, 0 [-]), Share mixed (1 [-]), Ref. velocity (0 [km/h]).
  - Light Duty / Passenger Car: Down/Up (A: 0.18/0.3 [-], B: 0.28/0.3 [-], C: 0.46/0.4 [-]).
- Cross Wind Correction:** No Correction (dropdown).
- Auxiliaries:** Table with columns ID, Type, Input File. Includes a 'Paux normalized' field (0.04409 [-]).
- Retarder:** Type (None), Ratio (0 [-]).
- Transmission:** Inertia (0.069 [kgm<sup>2</sup>]), Loss factor (0.3 [-]).
- Efficiency Map Table:**

Gear	Ratio	Efficiency Map
A	3.923	
01	5.076	
02	2.61	
03	1.518	
04	1	
05	0.791	
06	0.675	
07	0	
08	0	
09	0	
10	0	
11	0	

Abbildung 4-6: Fahrzeugdaten des simulierten Mercedes Sprinter

Die Daten des Abgassystems sind in der exs-Datei hinterlegt. Das Abgassystem des Mercedes Sprinter besteht aus drei Modulen. Das erste Modul ist der Turbolader, das zweite der Oxidationskatalysator und der Dieselpartikelfilter. Das dritte Modul ist der SCR-Katalysator, dieser hat ein Volumen von 6 Liter. In Abbildung 4-4 ist das NO<sub>x</sub>-Konvertierungskennfeld des SCR-Katalysators ersichtlich. Dieses zeigt, dass die höchste Konvertierungsrate bei einem Massenstrom kleiner als 0.15 kg/s und einer Temperatur zwischen 390 °C und 430 °C ist. Bei Temperaturen größer 430 °C fällt die Konvertierungsrate stark ab.

Die Simulationen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C durchgeführt. Die Temperaturen der einzelnen Module bei Start der Simulationen betragen 190 °C für den Turbolader und den Oxidationskatalysator, 135 °C für den SCR-Katalysator.

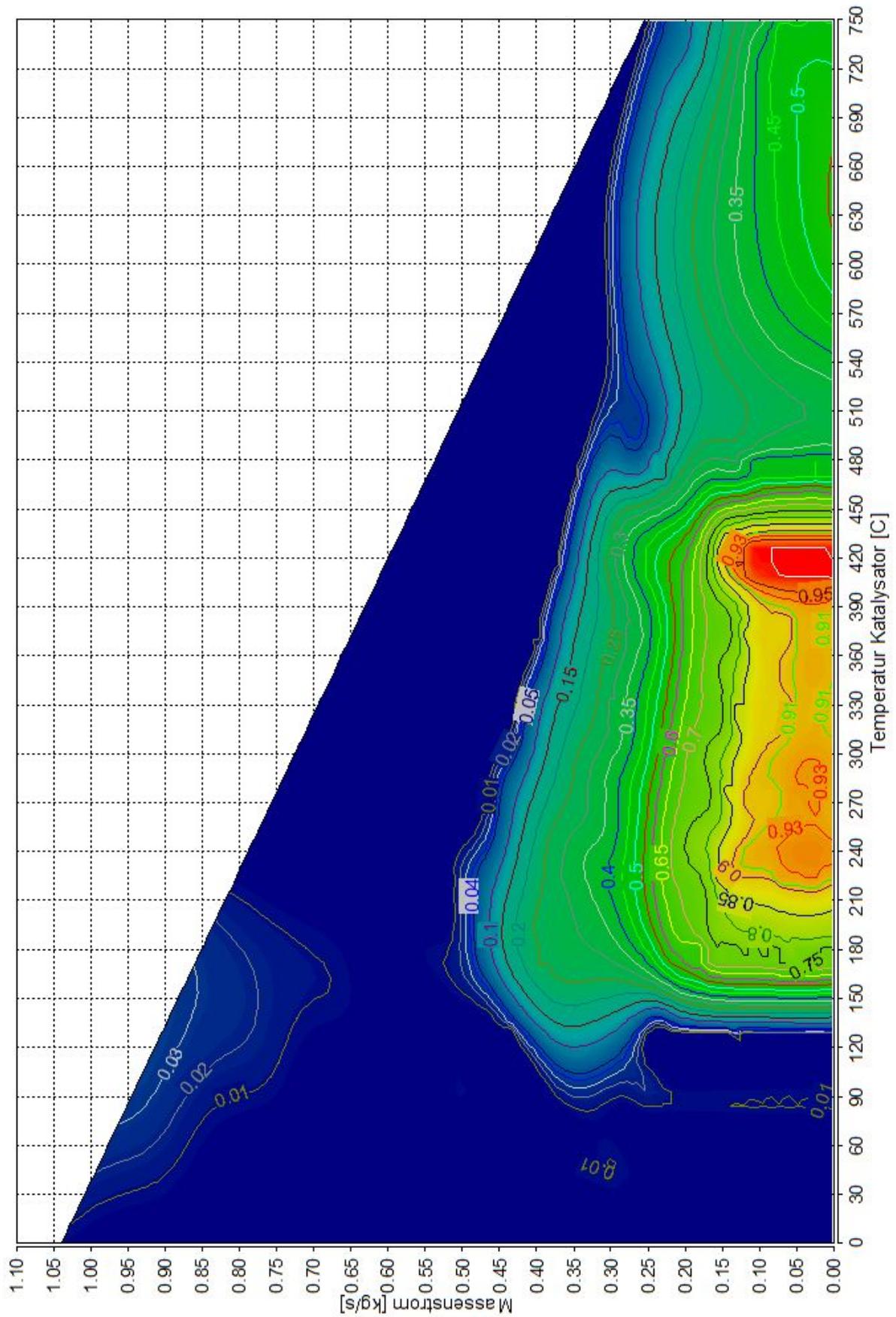


Abbildung 4-7: NO<sub>x</sub>-Konvertierungskennfeld des 6 Liter SCR

### 4.2.3 Audi A4

Bei dem dritten simulierten Fahrzeug handelt es sich um den in Kapitel 3.3 beschriebenen Fahrzeug. Die Erstellung des Simulationsmodells erfolgte in einer früheren Masterarbeit. [21] Aufbauend auf diesen Daten wurde das Simulationsmodell um die Messdaten der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messfahrten erweitert.

In der nachfolgenden Abbildung sind die für die Simulation der Messfahrten und HBEFA-Zyklen verwendeten veh, map, fld und exs-Dateien ersichtlich.

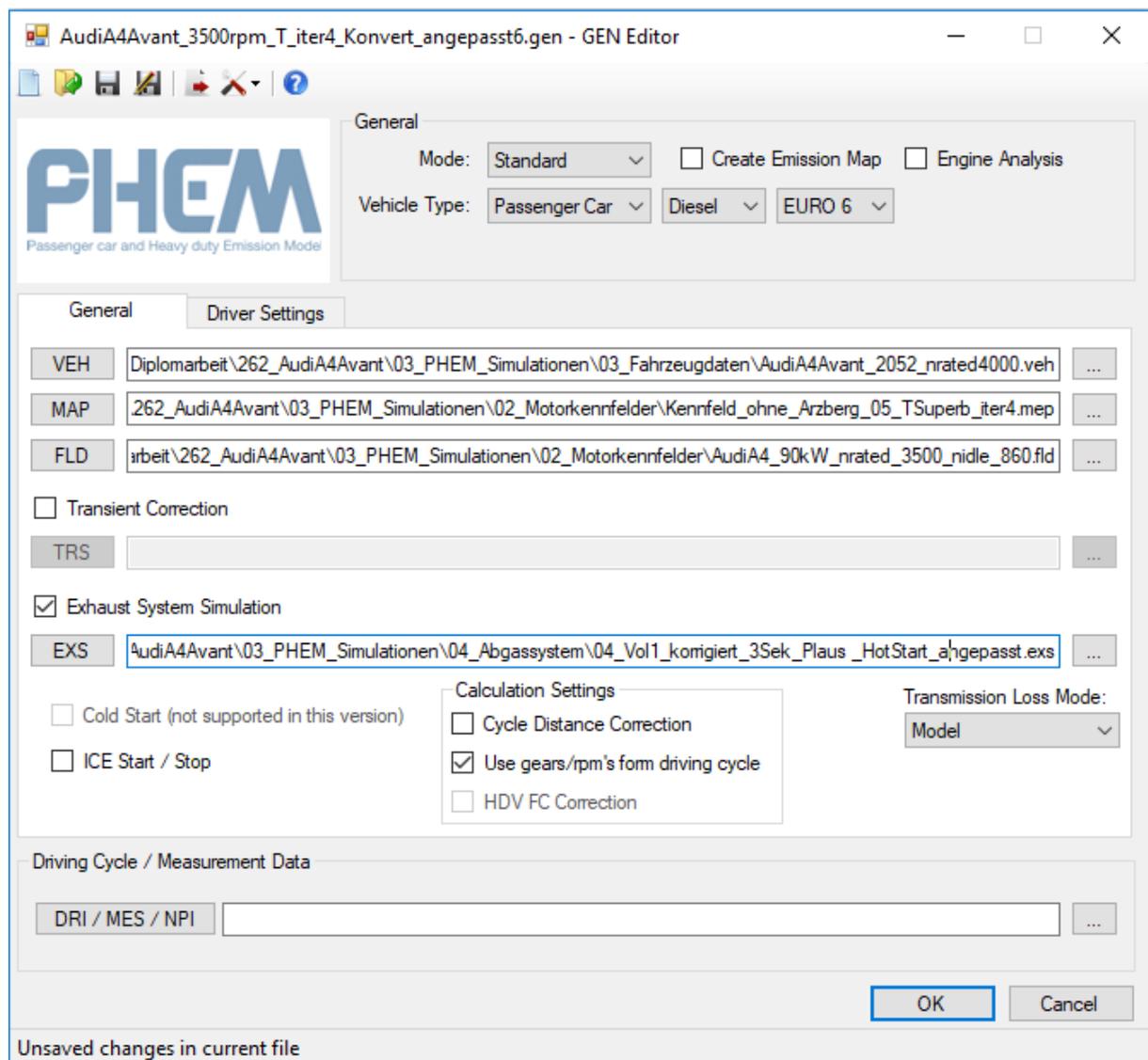


Abbildung 4-8: Verwendete veh, mep, fld und exs-Dateien für die Simulation des Audi A4 Avant

Die Fahrzeugdaten sind in Tabelle 3-1 und in nachfolgender Abbildung ersichtlich. Die Erstellung des in der map-Datei hinterlegten Motorkennfeldes ist in Kapitel 4.2.3.1 beschrieben

The screenshot shows the 'VEH Editor' window for 'AudiA4Avant\_2052\_nrated4000.veh'. The interface is divided into several sections:

- Mass:** Mass (2052 [kg]), Loading (0 [kg]), Red. Mass Wheels (51.21 [kg]), Wheel diameter (dyn) (0.652 [m]), Drag coefficient (0.4152141 [-]), Cross sectional area (2.2 [m²]).
- Rolling resistance factors:** Fr 0 (0.00809576 [-]), Fr 1 (3.01836E-05 [s/m]), Fr 2 (0 [s/m]²), Fr 3 (0 [s/m]³), Fr 4 (0 [s/m]⁴).
- Engine:** Rated engine power (90 [kW]), Rated engine speed (3500 [rpm]), Idling engine speed (860 [rpm]), Inertia (0.9246 [kgm²]).
- Gear shift parameters:** Heavy Duty (Fast/Eco), Light Duty / Passenger Car (Down/Up), Share mixed (1 [-]), Ref. velocity (0 [km/h]).
- Transmission:** Inertia (0.1015 [kgm²]), Loss factor (0.3 [-]).
- Table:**

Gear	Ratio	Efficiency Map
A	3.33333	
01	3.77777...	
02	1.952	
03	1.27586...	
04	0.96969...	
05	0.75675...	
06	0.625	
07	0	
08	0	
09	0	
10	0	
11	0	
- Auxiliaries:** Table with columns ID, Type, Input File.
- Retarder:** Type (None), Ratio (1 [-]).

Abbildung 4-9: Fahrzeugdaten des simulierten Audi A4 Avant

Die Daten des Abgassystems sind in der exs-Datei hinterlegt. Das Abgassystem des Audi A4 Avant besteht aus drei Modulen. Das erste Modul ist der Turbolader, das zweite der Oxidationskatalysator und der Dieselpartikelfilter. Das dritte Modul ist der SCR-Katalysator, dieser hat ein Volumen von 2 Liter. In Kapitel 4.2.3.2 ist die Anpassung des SCR-Konvertierungskennfelds beschrieben.

#### 4.2.3.1 Motorkennfelderstellung

Für die Simulation eines Fahrzeuges mit PHEM, wird ein Emissionskennfeld benötigt. Dieses kann wiederum bei Kenntnis der Emissionen, Motordrehzahl und Motorleistung mittels PHEM berechnet werden.

Ein Emissionskennfeld kann grundsätzlich mittels drei verschiedener Varianten erzeugt werden:

- Messungen am Motorprüfstand (Emissionen, Motordrehzahl und Motorleistung werden direkt gemessen)
- Messungen am PKW-Rollenprüfstand (Emissionen, Motordrehzahl und Radleistung direkt gemessen, aus Radleistung kann die Motorleistung berechnet werden)
- RDE-Messungen (Emissionen und Motordrehzahl gemessen, Messung der Radleistung mit Hilfe einer Drehmomentmessfelge möglich)

Da bei RDE-Messfahrten die Radleistung aufgrund der hohen Kosten einer Drehmomentmessfelge meistens nicht mitgemessen wird, ist eine Rückrechnung von dieser auf die Motorleistung nicht möglich. Da jedoch die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Motordrehzahl bekannt ist, kann die Motorleistung mit Hilfe der CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode berechnet werden.

Bei der CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolationsmethode wird mittels der gemessenen Motordrehzahl und der gemessenen CO<sub>2</sub>-Emission aus einem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld die Motorleistung interpoliert. Beispielhaft ist dies in Abbildung 4-10 dargestellt.

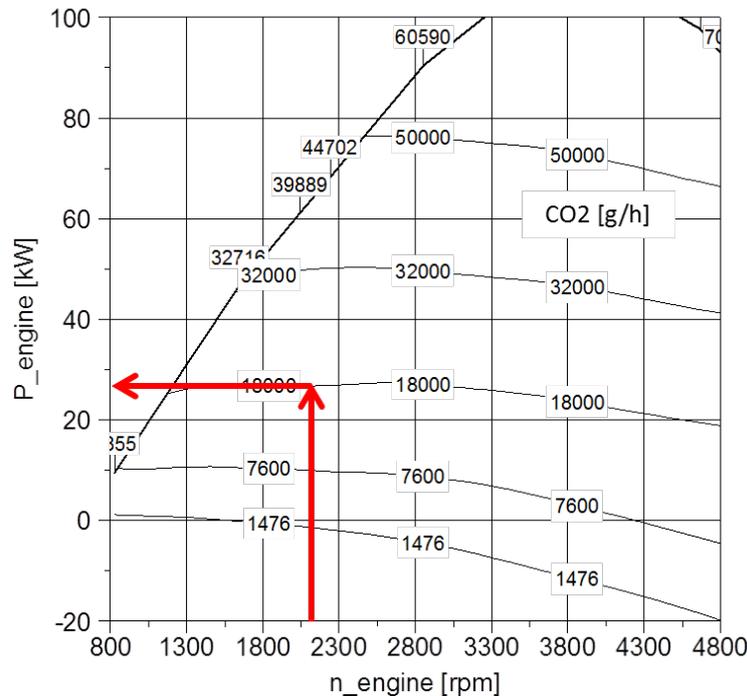


Abbildung 4-10: Beispiel für die Interpolation der Motorleistung aus einem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld [20]

Für die Erstellung des Emissionskennfeldes mittels PHEM sind neben dem generischen CO<sub>2</sub>-Kennfeld auch die Vollast- und Schleppkurve des Fahrzeuges, sowie die in den RDE-Fahrten gemessenen Emissionen notwendig.

Folgende Einschränkungen und Annahmen wurden für die Erstellung des Emissionskennfeldes getroffen:

- Da die Schleppkurve des im Fahrzeug verbauten Motors nicht bekannt war, wurde hierfür eine Schleppkurve, die die durchschnittliche Motortechnologie eines EU6 Fahrzeuges repräsentiert, verwendet.
- Die ND-AGR wurde nicht berücksichtigt, d.h. die NO<sub>x</sub>-Emission wurde mit der NO<sub>x</sub>-Konzentration, welche mit dem fahrzeugeigenen NO<sub>x</sub>-Sensor vor dem SCR-Katalysator gemessen wurde (siehe Abbildung 3-9) und dem Massenstrom, welcher mit dem PEMS gemessen wurde berechnet.
- Die HC, CO, NO Emissionen entsprechen End of Tailpipe Werten.
- Kaltstart Emissionen wurden nicht berücksichtigt, d.h. es wurden nur Emissionen zur Kennfelderstellung herangezogen ab einer Kühlmitteltemperatur von 70°C oder nach 300 sec ab Beginn der Messung, je nachdem was früher eintrat.
- Zur Erstellung des Emissionskennfeldes wurden die RDE-Messfahrten, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden und RDE-Messfahrten aus einer früheren Arbeit verwendet.
- Es wurde eine Kennfeldraasterung von 20x20 verwendet

In der nachfolgenden Abbildung ist das mittels PHEM erstellte NO<sub>x</sub>-Kennfeld ersichtlich.

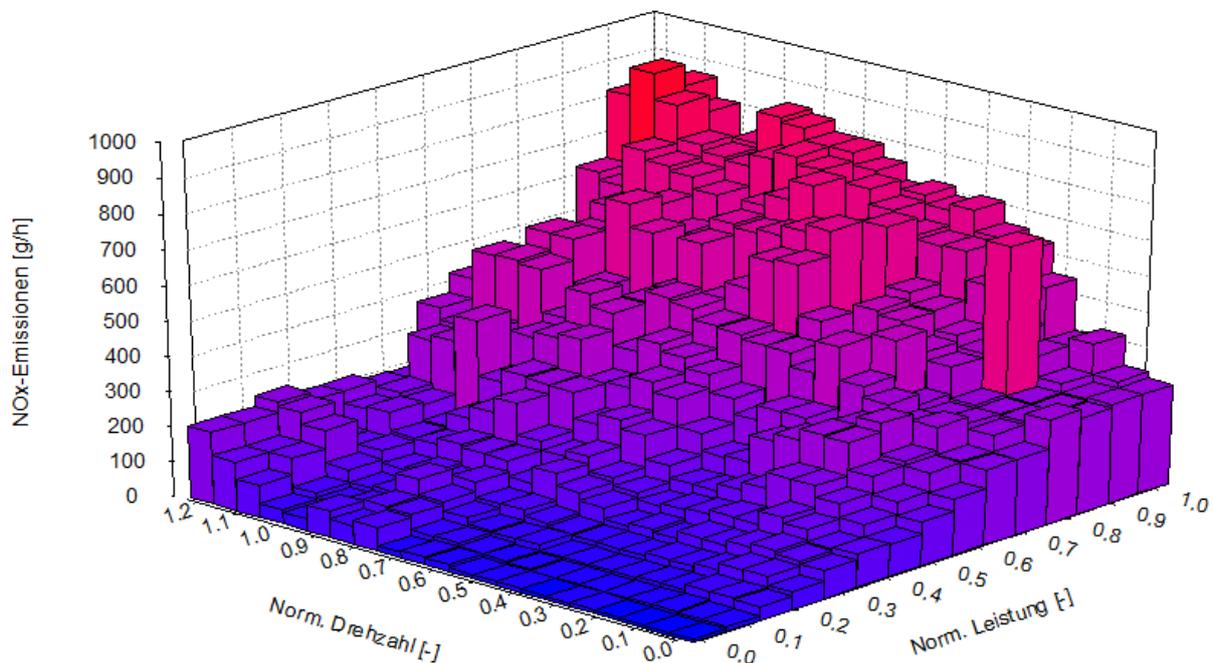


Abbildung 4-11: Mittels PHEM erstelltes NO<sub>x</sub>-Emissionskennfeld

Die Erstellung des Temperaturkennfeldes erfolgt durch Messung von Stationärpunkten am Rollenprüfstand. Die Betriebspunkte werden hierzu solange konstant gehalten bis sich die Bauteiltemperaturen annähernd konstant verhalten. PHEM errechnet eine quasi-stationäre Temperatur nach dem Turbolader anhand der Messdaten eines Thermoelements nach dem Turbolader.

Aufgrund einer zeitlich begrenzten Verfügbarkeit des gemessenen Fahrzeuges, konnte eine Messung von Stationärpunkten nicht durchgeführt werden. Es wurde deswegen ein Temperaturkennfeld eines Fahrzeuges aus dem VW Konzern mit baugleichem Motor verwendet. Das Temperaturkennfeld dieses Fahrzeuges ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich.

Bei den ersten Simulationen der gefahrenen RDE-Messfahrten stellte sich jedoch heraus, dass speziell die bei hohen Lasten und niedriger Drehzahl simulierten Temperaturen höher als die bei den RDE-Messfahrten gemessenen Temperaturen sind, ersichtlich in nachfolgender Abbildung.

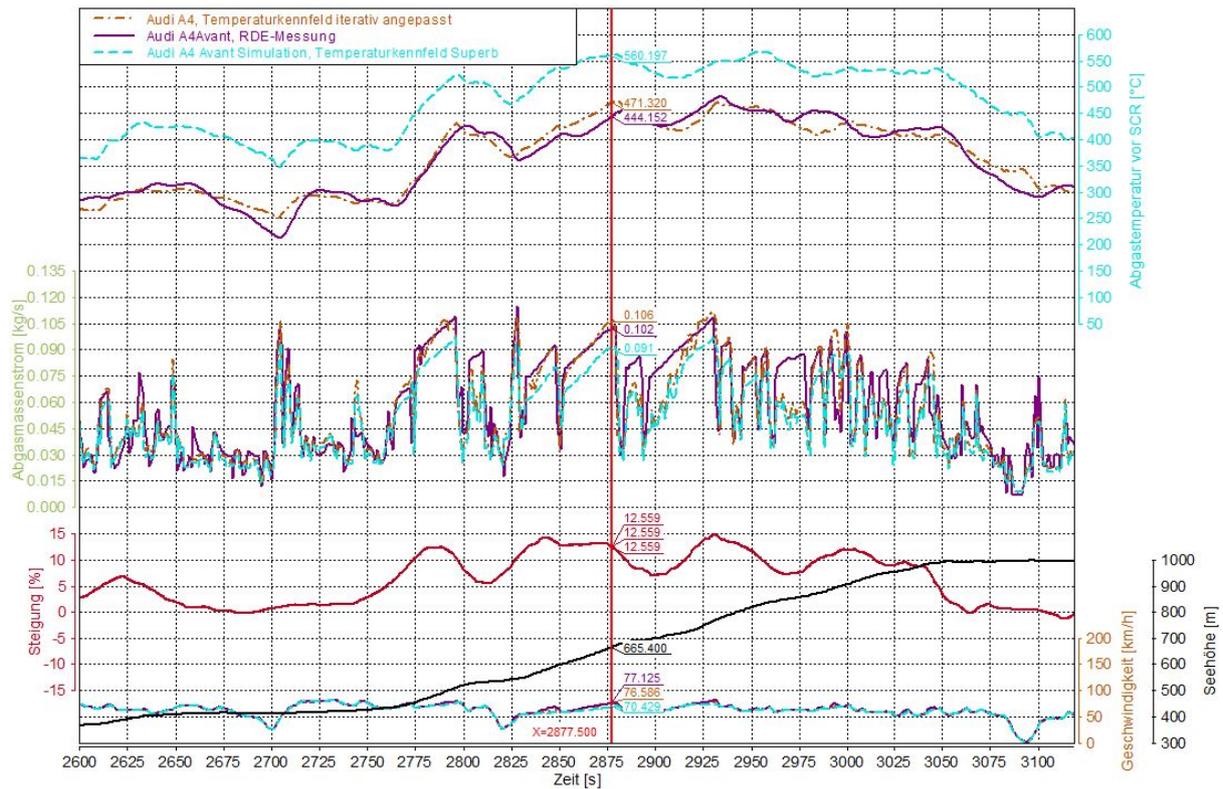


Abbildung 4-12: Vergleich Abgastemperatur Simulation und Messung des Audi A4

Es wurde deswegen eine manuelle Anpassung des Temperaturkennfeldes vorgenommen, dabei wurde die Temperatur in diesen Bereichen abgesenkt, ersichtlich in Abbildung 4-14.

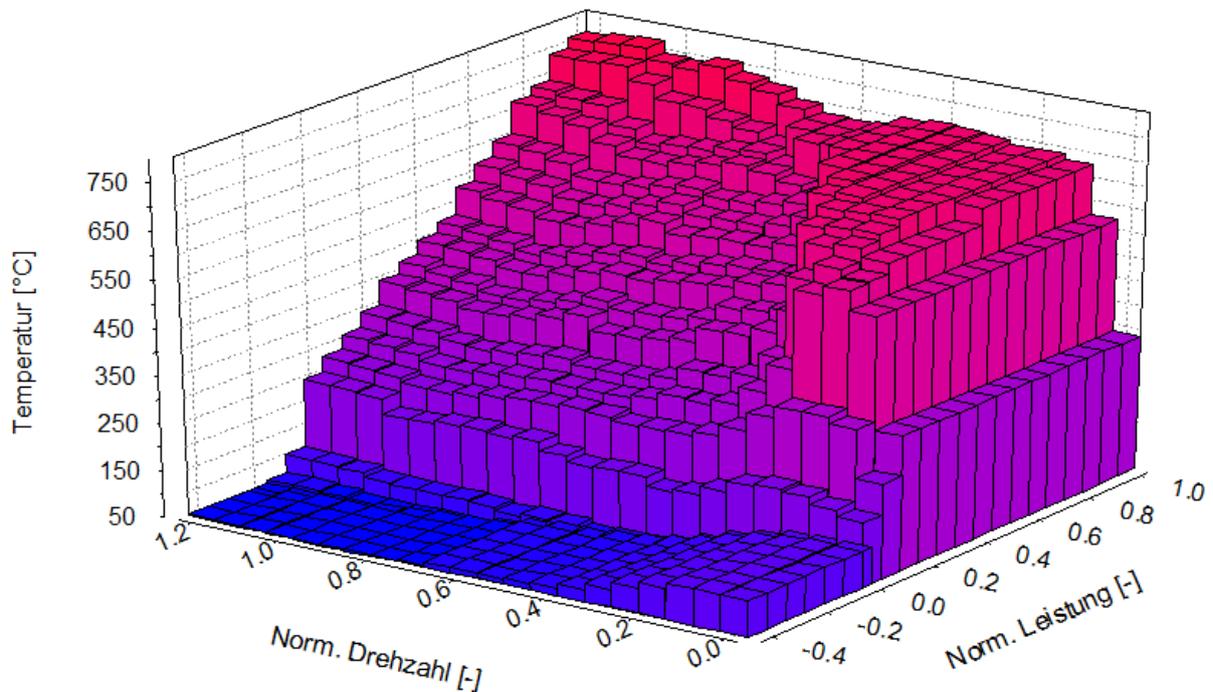


Abbildung 4-13: Temperaturkennfeld des baugleichen Motors im Skoda Superb

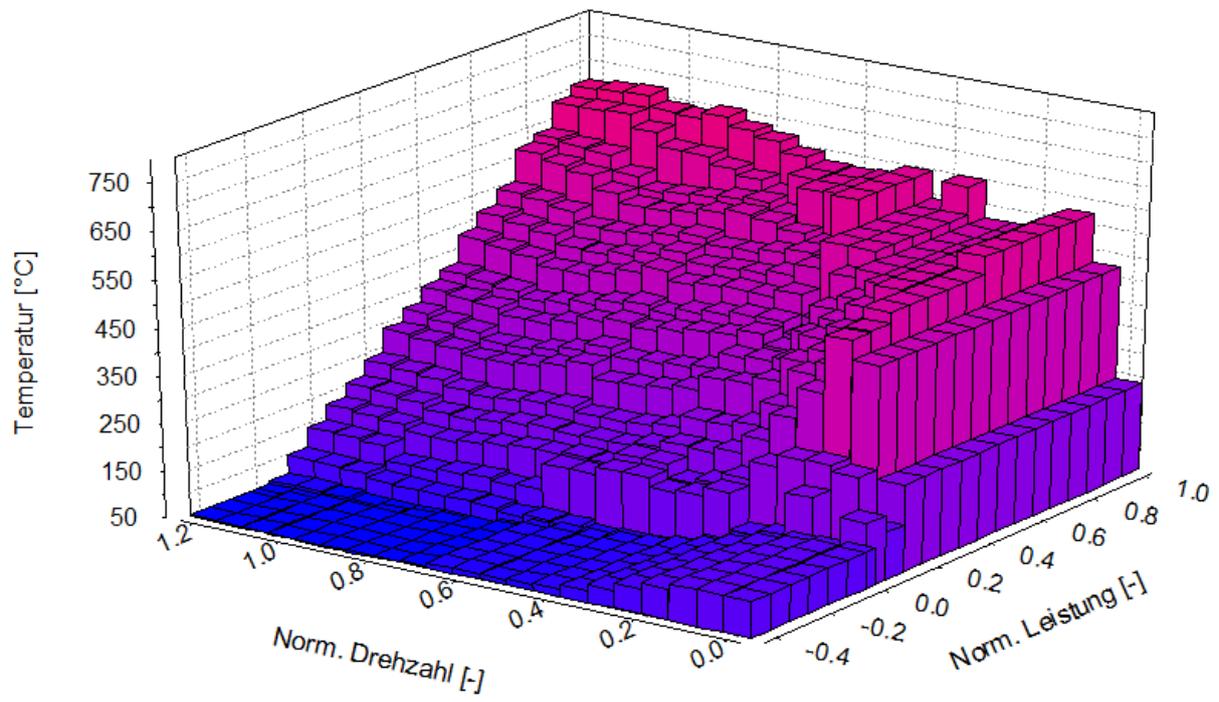


Abbildung 4-14: Angepasstes Temperaturkennfeld

### 4.2.3.2 Anpassung des SCR-Konvertierungskennfeldes

Die Erstellung des SCR-Konvertierungskennfeldes erfolgte im Zuge einer früheren Arbeit. [21] Als Eingangsdaten zur Kennfelderstellung wurden, die im Zuge der früheren Arbeit während den RDE-Fahrten gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen vor und nach dem SCR-Katalysator verwendet. Die Erstellung des SCR-Konvertierungskennfeldes erfolgte mit PHEM. Für die Beschreibung der Methodik und der genauen Vorgehensweise bei der Erstellung sei auf [21] verwiesen. In Abbildung 4-16 ist dieses Kennfeld ersichtlich.

Wie in nachfolgender Abbildung ersichtlich, stellte sich bei Nachsimulation der RDE-Messfahrten auf der Route Deutschlandsberg heraus, dass in den Extrempunkten, wie sie auf dieser Route vorhanden sind, dass vorherig erstellte Kennfeld nicht definiert ist.

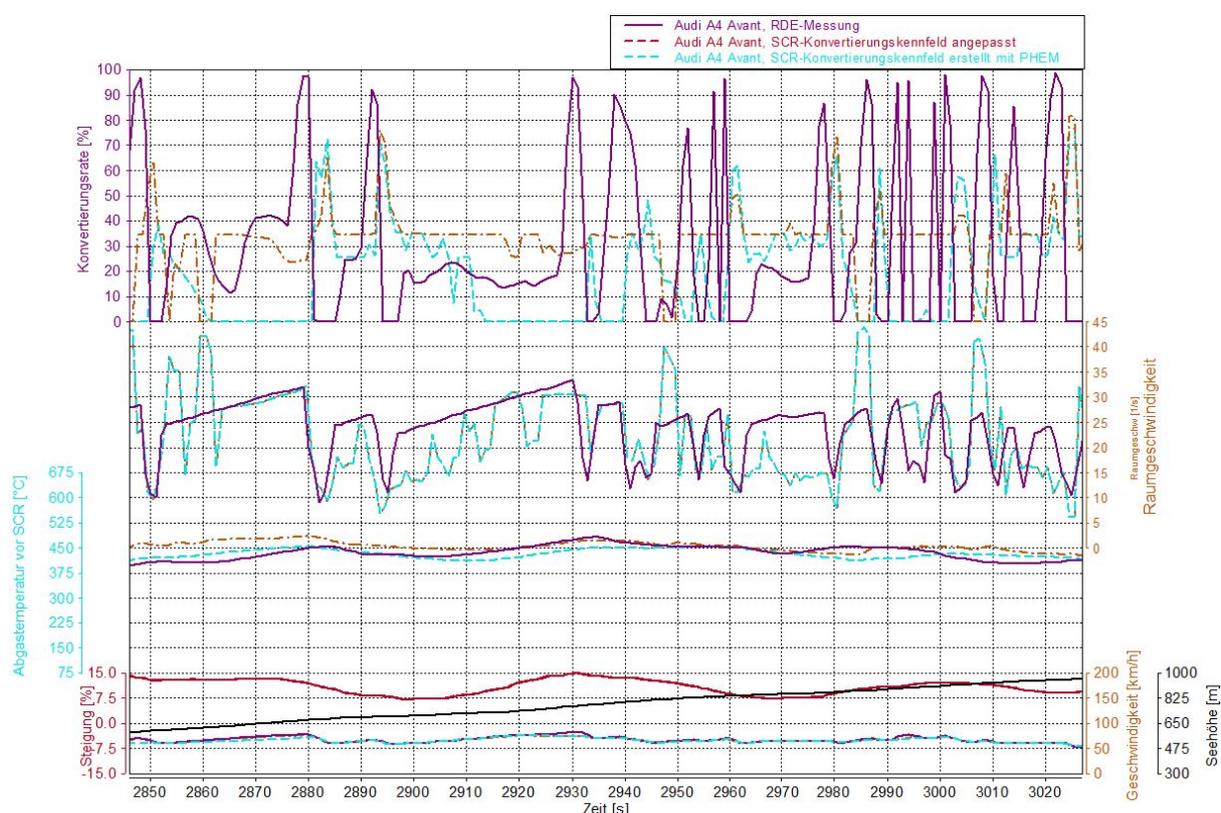


Abbildung 4-15: Vergleich SCR-Konvertierungsrate Simulation und Messung des Audi A4

In Abbildung 4-17 ist das angepasste Konvertierungskennfeld ersichtlich. Die Anpassung erfolgte manuell in den nicht definierten Bereichen des Kennfeldes auf Konvertierungsraten von 25% bis 35%. Mit dieser Anpassung sind nur mehr leicht erhöhte NO<sub>x</sub>-Emission bei den Simulationen gegenüber den Messungen auf den Deutschlandsberg Routen vorhanden, dargestellt in Kapitel 3.1.3.

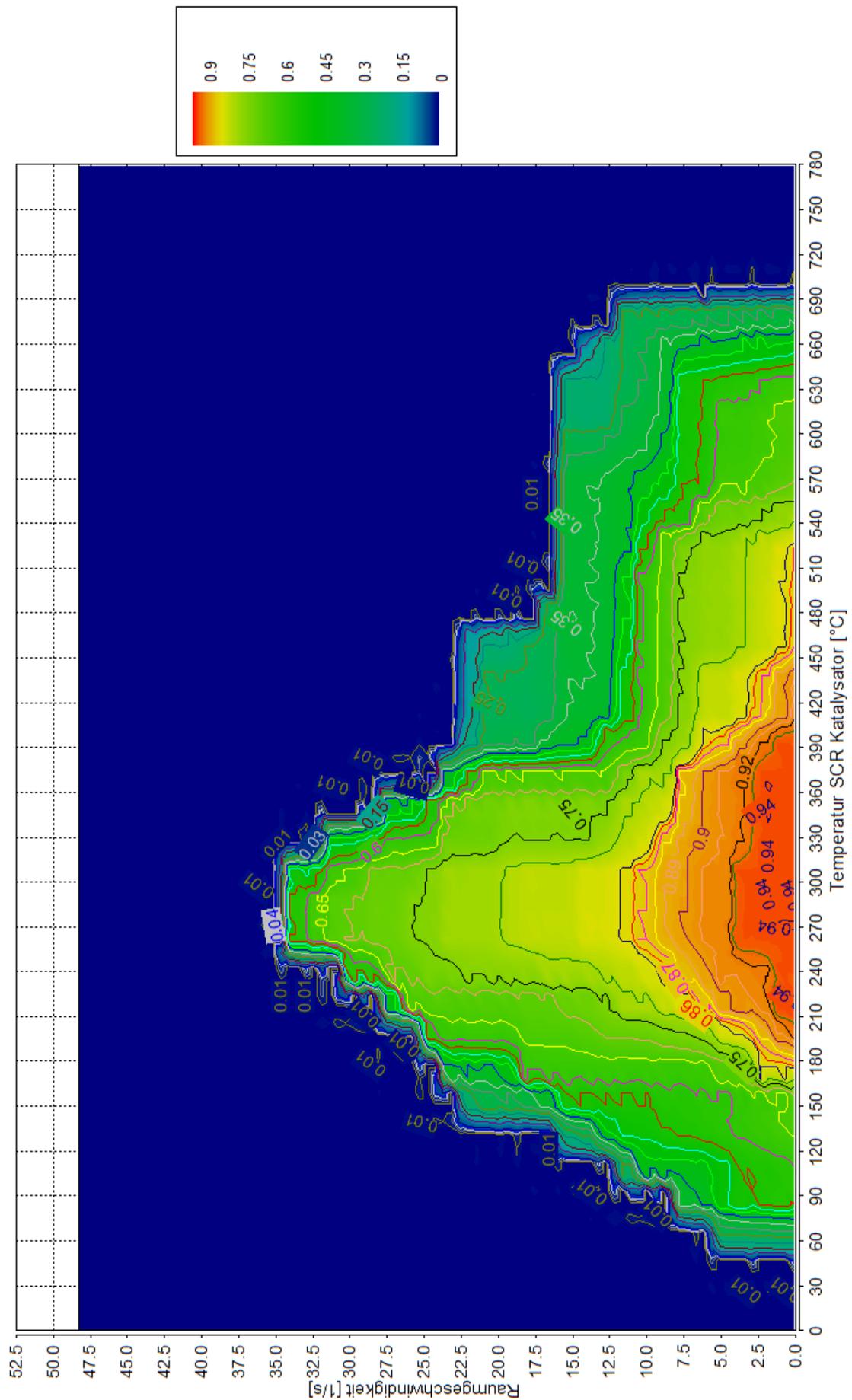


Abbildung 4-16: Im Zuge von [21] erstelltes SCR-Konvertierungskennfeld

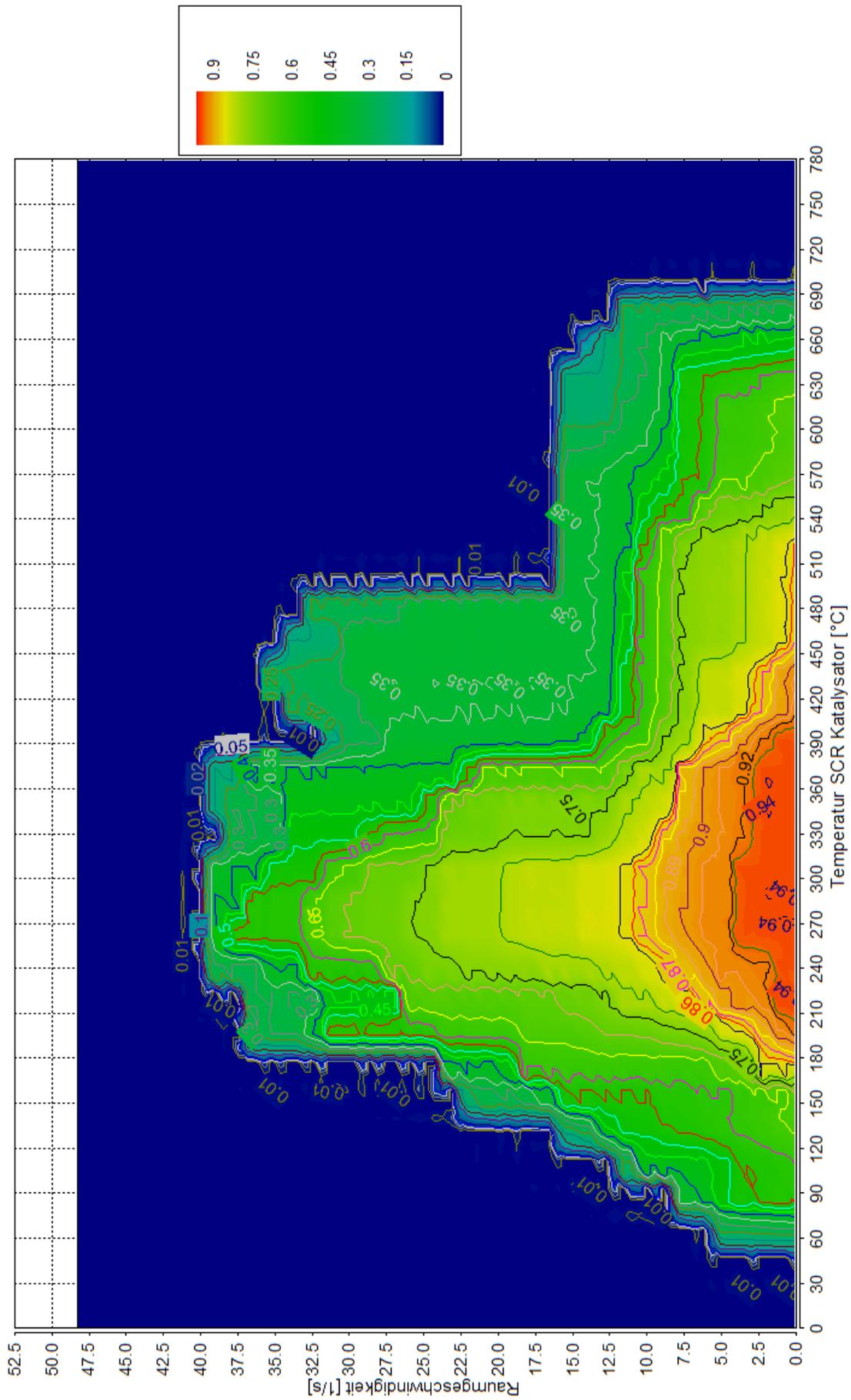


Abbildung 4-17: Angepasstes SCR-Konvertierungskennfeld

### 4.3 Simulation der Höhenprofile

Um den Einfluss des Höhenprofils eines RDE Zyklus auf die NO<sub>x</sub> Emissionen bzw. die Konvertierungsrate des SCR Katalysators zu untersuchen, wurde im ersten Schritt eine Rechteckfunktion als Höhenprofil mit konstanter Geschwindigkeit simuliert. Eine konstante Geschwindigkeit wurde gewählt um Einflüsse der Beschleunigung auf das Simulationsergebnis zu vermeiden. Der Simulation wurde für jeden der drei Abschnitte, Urban, Rural und Highway getrennt durchgeführt. Als Geschwindigkeiten wurden die Durchschnittsgeschwindigkeiten der jeweiligen Bereiche von früheren RDE Messfahrten gewählt.

#### 4.3.1 Simulation mit Schaltmodell PHEM

In einem ersten Schritt wurde eine Rechteckfunktion für eine Steigung und Gefälle von 0.5% bis 15% in 0.5 % Schritten vorgegeben. Als Obergrenze wurden eine Steigung bzw. Gefälle von 15% gewählt, da Steigungen bzw. Gefälle über 15% in den realen Fahrten kaum auftraten.

Die Simulation der Rechteckfunktion erfolgte für Periodenlängen von 36, 72, 90, 120, 180, 360, 480, 720, 1080 und 1440 Sekunden.

Als Geschwindigkeiten wurden 45km/h für den Stadtteil (Urban), 70km/h für den Landstraßenteil (Rural) 100km/h für den Autobahnteil (Highway) im RDE-Zyklus gewählt. Diese Geschwindigkeiten entsprechen ungefähr den Durchschnittsgeschwindigkeiten der jeweiligen Teile der RDE-Zyklen, welche am Institut durchgeführt wurden.

Die Steigungen, bei denen das jeweilige Fahrzeug die vorgegebene Geschwindigkeit nicht mehr erreicht bzw. nicht mehr konstant halten konnte, wurden in der Auswertung nicht mehr berücksichtigt.

Die Simulation erfolgte nur für die Fahrzeuge VW Golf und Mercedes Sprinter, da zu diesem Zeitpunkt noch kein Simulationsmodell für den Audi A4 zu Verfügung stand.

#### 4.3.2 Simulation mit Gangvorgabe

Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Simulation, mit dem im PHEM hinterlegten Schaltmodell, wurde im nächsten Schritt eine manuelle Gangvorgabe mit nachfolgenden Kriterien vorgenommen:

- Bergauf wurde der höchstmögliche Gang vorgegeben bei dem die Geschwindigkeit bei der jeweiligen Steigung konstant gehalten werden konnte
- Bergab wurde der höchstmögliche Gang vorgegeben bei dem die Motorbremswirkung ausreichend ist um die Geschwindigkeit bei der jeweiligen Steigung konstant zu halten
- Es erfolgt kein Schalten in den ersten Gang bergab, d.h. bei nicht ausreichender Motorbremswirkung im zweiten Gang um die Geschwindigkeit konstant zu halten, erfolgt eine Bremsung mit der Wirkbremse

Die Simulation erfolgte für dieselben Geschwindigkeiten, Fahrzeuge und Steigungen wie im vorherigen Kapitel beschrieben. Ausgehend von den Ergebnissen aus der Simulation, mit dem im PHEM hinterlegten Schaltmodell, wurde die Simulation mit manueller Gangvorgabe für folgende Periodenlängen durchgeführt

- 36 Sekunden
- 180 Sekunden
- 360 Sekunden
- 720 Sekunden
- 1440 Sekunden

#### **4.4 Simulation der RDE Routen**

Die Simulation, der in Kapitel 3.1 beschriebenen RDE-Routen, erfolgte mit allen drei genannten Fahrzeugen. Für die Fahrzeuge VW Golf und Mercedes Sprinter wurde sowohl das im PHEM hinterlegte Schaltmodell verwendet und es erfolgte zusätzlich eine manuelle Gangvorgabe nach den in Kapitel 4.3.2 genannten Kriterien. Für das Fahrzeug Audi A4 wurde, die während der Messfahrten aufgezeichnete, Drehzahl als Eingangsgröße verwendet.

Des Weiteren entsprach die vorgegebene Geschwindigkeit der in den Messfahrten gefahrenen Geschwindigkeiten und die Steigung, der mit ERMES Tool berechneten Steigung aus dem GPS-Signal.

#### **4.5 Einfluss konstanter und variabler Steigungsprofile**

In Messungen am Prüfstand und in Simulationen werden öfters konstante Fahrbahnsteigungen unterstellt, speziell, wenn kein genaues Höhenprofil der Route verfügbar ist. Ziel dieses Teils der Arbeit war es, den Einfluss einer solchen Vereinfachung auf die Emissionsergebnisse zu analysieren.

Dafür wurden 35 unterschiedliche Teilbereiche mit einer Dauer von fünf bis zehn Minuten aus den gemessenen RDE-Routen extrahiert. Wie schon zuvor, bei der Simulation der RDE Routen, wurde als Eingangsgröße, die in den Messfahrten aufgezeichnete Geschwindigkeit und bei der Simulation des Audi A4 auch die aufgezeichnete Drehzahl verwendet. Für die Fahrzeuge VW Golf und Mercedes Sprinter wurde das in PHEM hinterlegte Schaltmodell verwendet.

In ersten Schritt wurde als Eingangsgröße für den Straßengradienten die mit dem ERMES Tool berechnete, also die zeitaufgelöst gemessene, Steigung verwendet.

Als Vergleich wurde jeweils der mittlere Straßengradient konstant über den Teilzyklus vorgegeben. Die mittlere, konstante Steigung bzw. das konstante Gefälle entsprachen dem arithmetischen Mittelwert aller in diesem Teilbereich auftretenden Steigungen bzw. Gefälle.

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen simulativen Untersuchung präsentiert. Danach erfolgt die Diskussion der RDE Messergebnissen sowie ein Vergleich der Messergebnisse zur Simulation der RDE Routen. Die Simulation erfolgte mit den in Kapitel 4.2 Simulationsmodellen. Im letzten Unterkapitel erfolgt eine Gegenüberstellung von Zyklen mit konstanter Längsneigung zu Zyklen mit realer Längsneigung.

### 5.1 Simulationsergebnisse mit PHEM Schaltmodell

Im Folgenden werden die Ergebnisse des in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Simulationsmodell beschrieben. Die Simulation wurde mit den in Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.2 Fahrzeugen durchgeführt. Des Weiteren wird nur auf die Ergebnisse des simulierten VW Golfs mit einem motornahen 3.5 Liter SCR-Katalysator im Genaueren eingegangen, da die in diesem Kapitel diskutierten Ergebnisse auch für das zweite simulierte Fahrzeug, Mercedes Sprinter, gültig sind.

#### 5.1.1 VW Golf

Im Zuge der Auswertung hat sich herausgestellt, dass sich aufgrund der Einflüsse des Schaltmodells keine Aussage über den Zusammenhang von Steigung und der Konvertierungsrate des SCR-Katalysators treffen lässt. In Abbildung 5-1 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung dargestellt. Die Werte der Konvertierungsrate entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen.

Die genannte Abbildung zeigt die Konvertierungsrate über die Steigung für den Stadtteil. Es zeigt sich für die vom PHEM Schaltmodell gewählten Gänge, speziell in den Bergabphasen, kein nachvollziehbares Muster. So wurde z.B: bei einer Steigung bzw. Gefälle von 6 % vom Schaltmodell der 3. Gang bergab gewählt, bei einem Gefälle von 6.5% der 4. Gang und bei einem Gefälle von 7% wieder der 3. Gang gewählt.

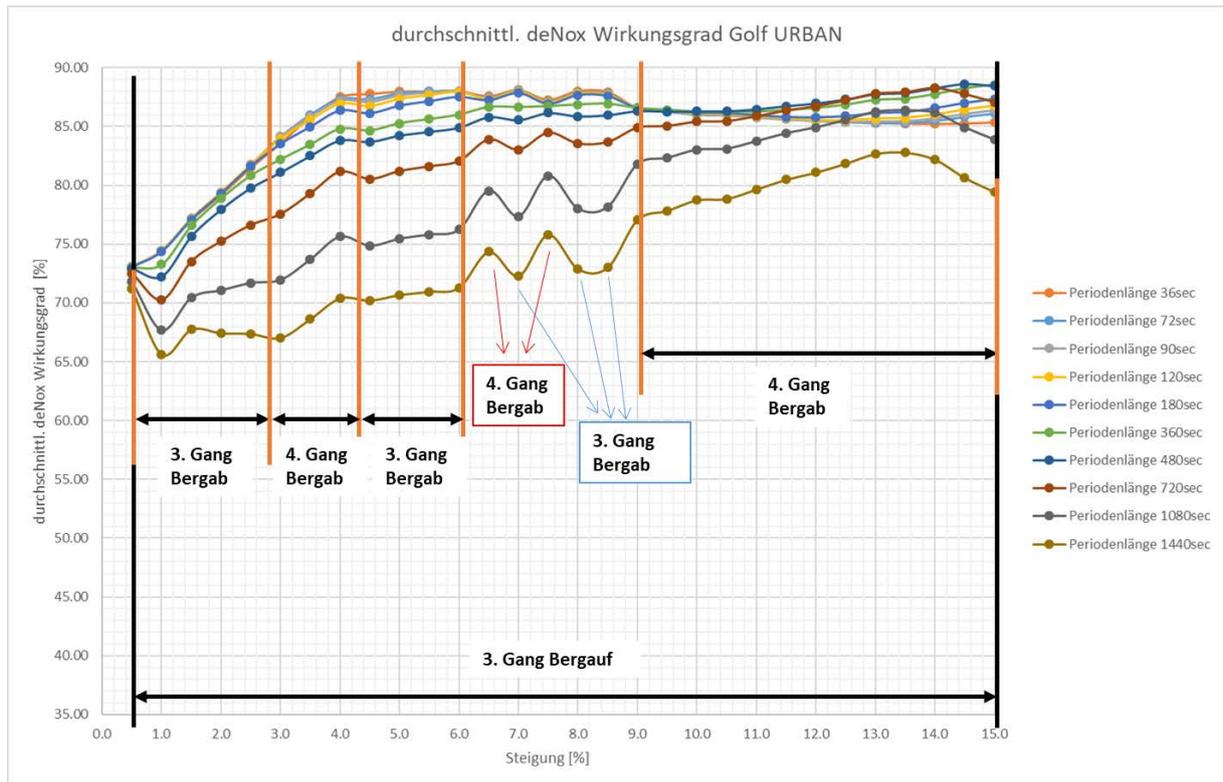


Abbildung 5-1: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Stadtteil, VW Golf

In Abbildung 5-2 zeigt sich, dass bei einem Gefälle von 6% und 7% aufgrund des vom Schaltmodell gewählten 3. Gangs gegenüber einem Gefälle von 6.5% mit dem vom Schaltmodell gewählten 4. Gangs, der Abgasmassenstrom wegen der höheren Motordrehzahl größer ist. Dies führt zu einer stärkeren Auskühlung des SCR-Katalysators und infolge zu einer niedrigeren Konvertierungsrate in der Bergabphase.

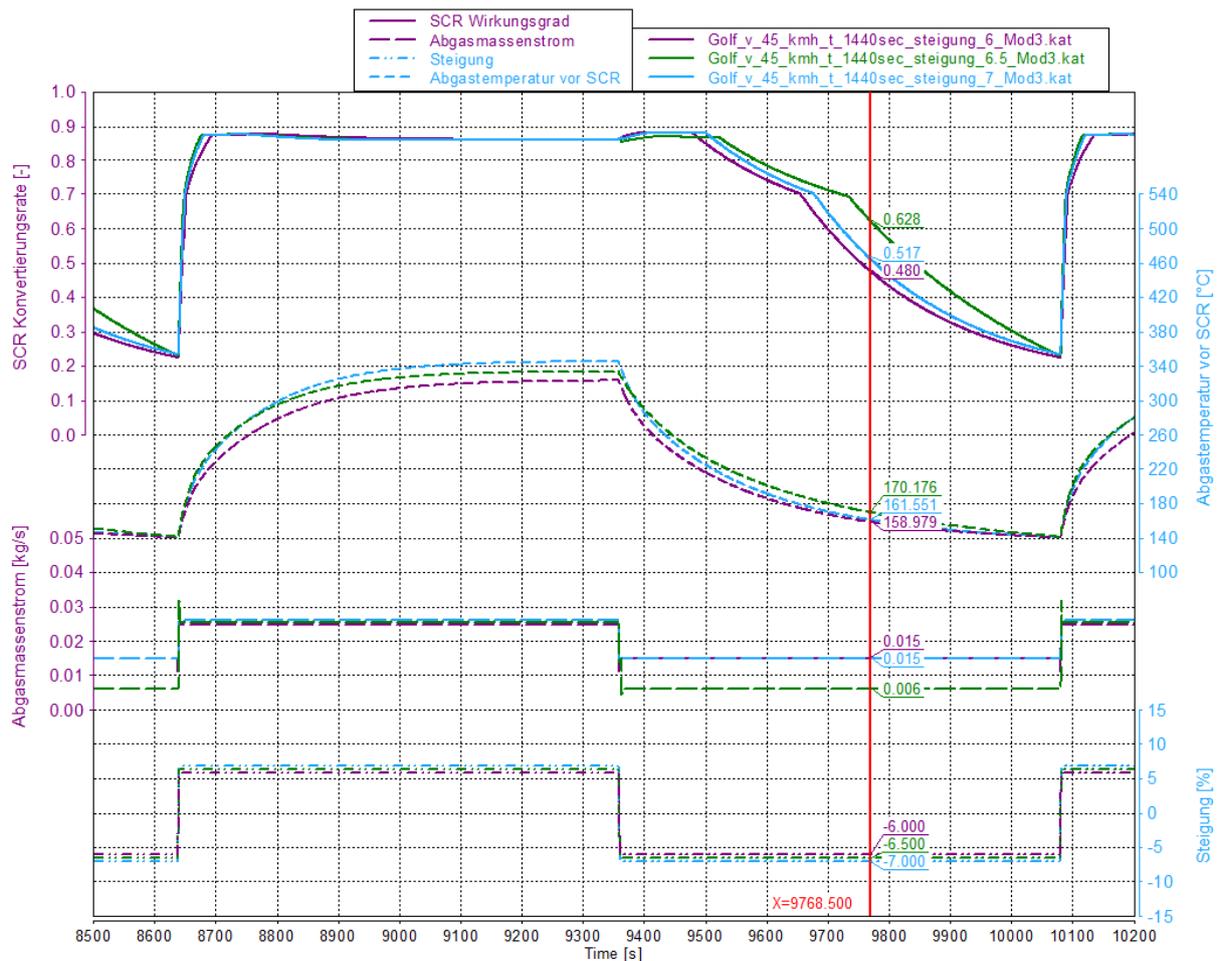


Abbildung 5-2: Vergleich der Konvertierungsraten, Abgasmassenstrom und Abgastemperatur bei einer Steigung bzw. Gefälle von 6%, 6.5% und 7%, Stadtteil, VW Golf

In Abbildung 5-4 sind die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT in Abhängigkeit der Steigung dargestellt. Die Werte der  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen. Es zeigt sich, dass die in Abbildung 5-2 diskutierten Ausführungen keinen Einfluss auf die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT haben, da diese nur während des Schubbetriebs in der Bergabphase auftreten. Ersichtlich ist dies in Abbildung 5-3.

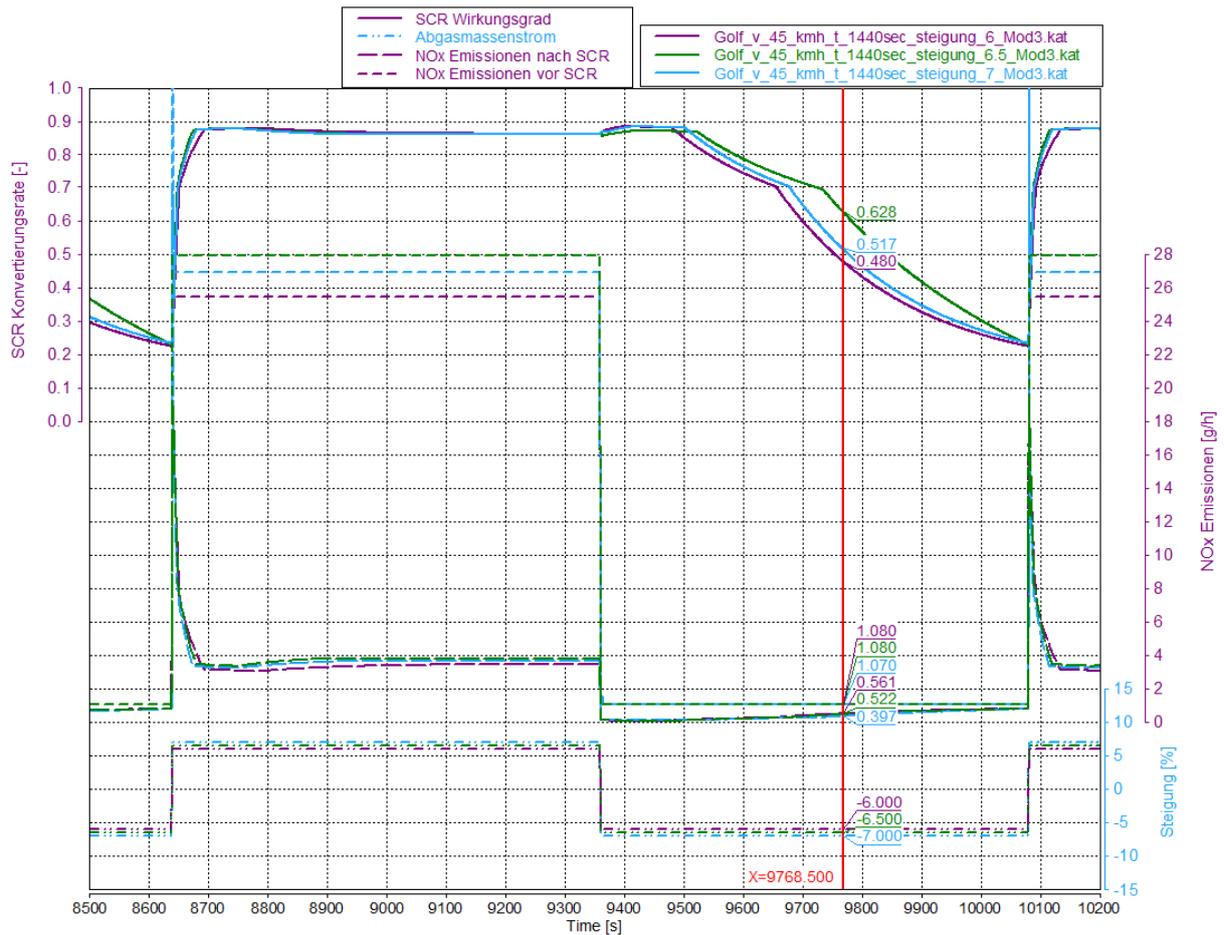


Abbildung 5-3: Vergleich der Konvertierungsrate und NO<sub>x</sub> Emissionen bei einer Steigung bzw. Gefälle von 6%, 6.5% und 7%, Stadtteil, VW Golf

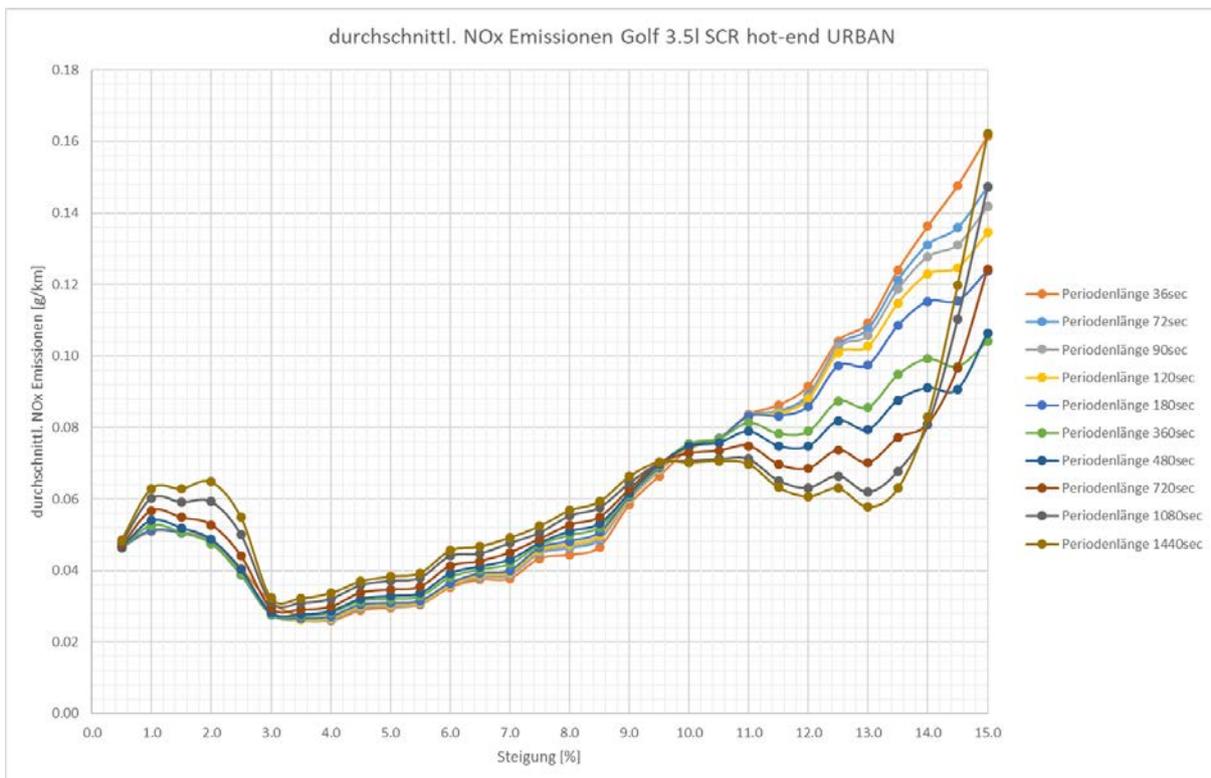


Abbildung 5-4: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Stadtteil, VW Golf

Des Weiteren zeigt sich in Abbildung 5-4, dass die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT bei Steigungen bzw. Gefälle von 0.5 % bis 2 % größer sind als bei 3 %. Bei einer Steigung von 0.5 % ist auf Grund der niedrigeren Abgastemperatur die Konvertierungsrate niedriger als bei den Steigungen von 2 % und 3 % und somit sind auch die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT größer, ersichtlich in Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6. Bei einem Gefälle von 0.5 % ist die Konvertierungsrate jedoch größer als bei 2 % und bei 3 % wegen der höheren Motorleistung und in weiterer Folge der Abgastemperatur, ersichtlich in Abbildung 5-7. Jedoch sind dadurch auch die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT höher.

Bei einem Gefälle von 2 % ist die Konvertierungsrate größer als bei 3 % wegen der höheren Abgastemperatur, jedoch sind die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT bei einem Gefälle von 2 % größer als bei 3 % auf Grund des niedrigeren Ganges und höherer Motorleistung.

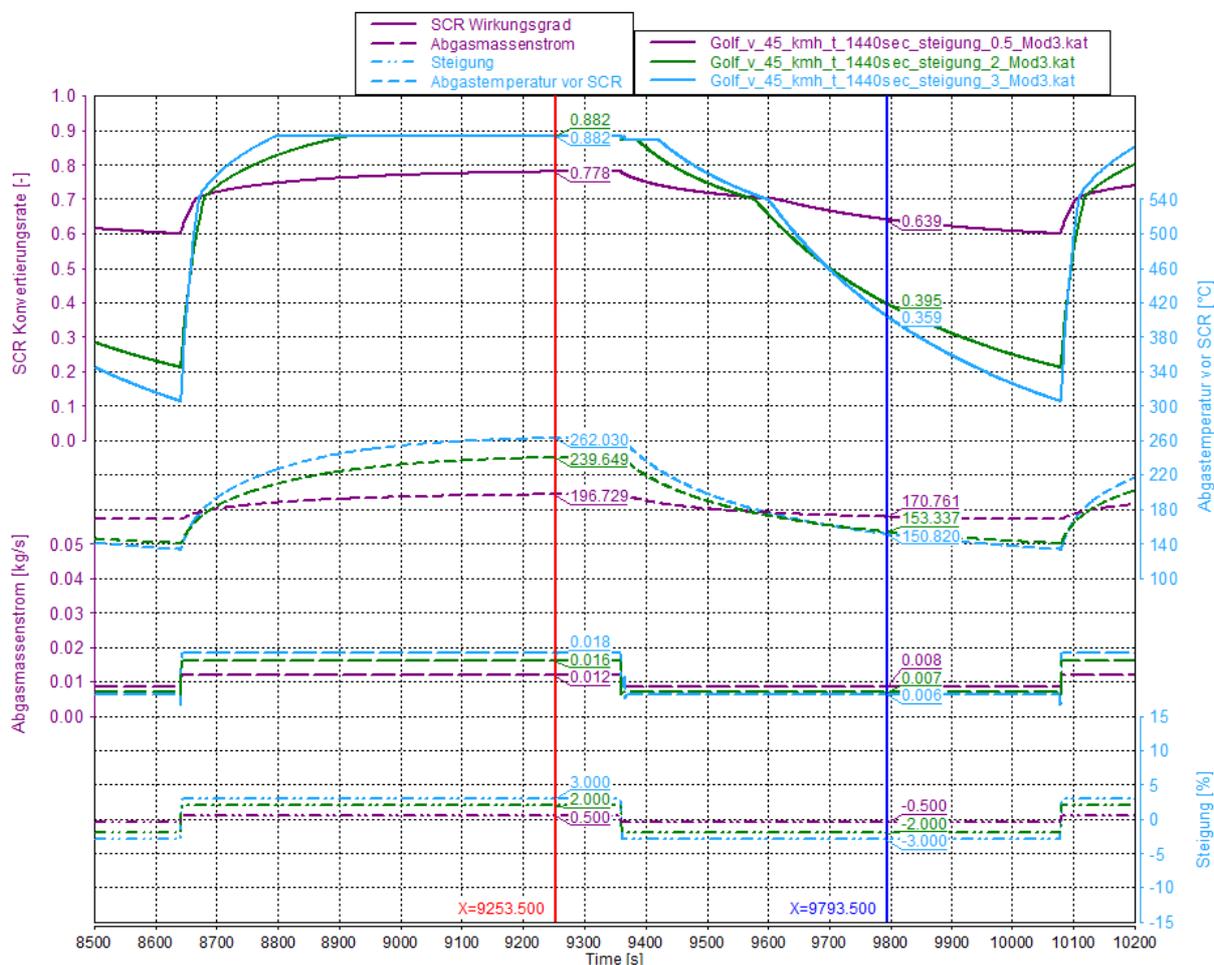


Abbildung 5-5: Vergleich der Konvertierungsraten, Abgasmassenstrom und Abgastemperatur bei einer Steigung bzw. Gefälle von 0.5%, 2.0% und 3.0%, Stadtteil, VW Golf

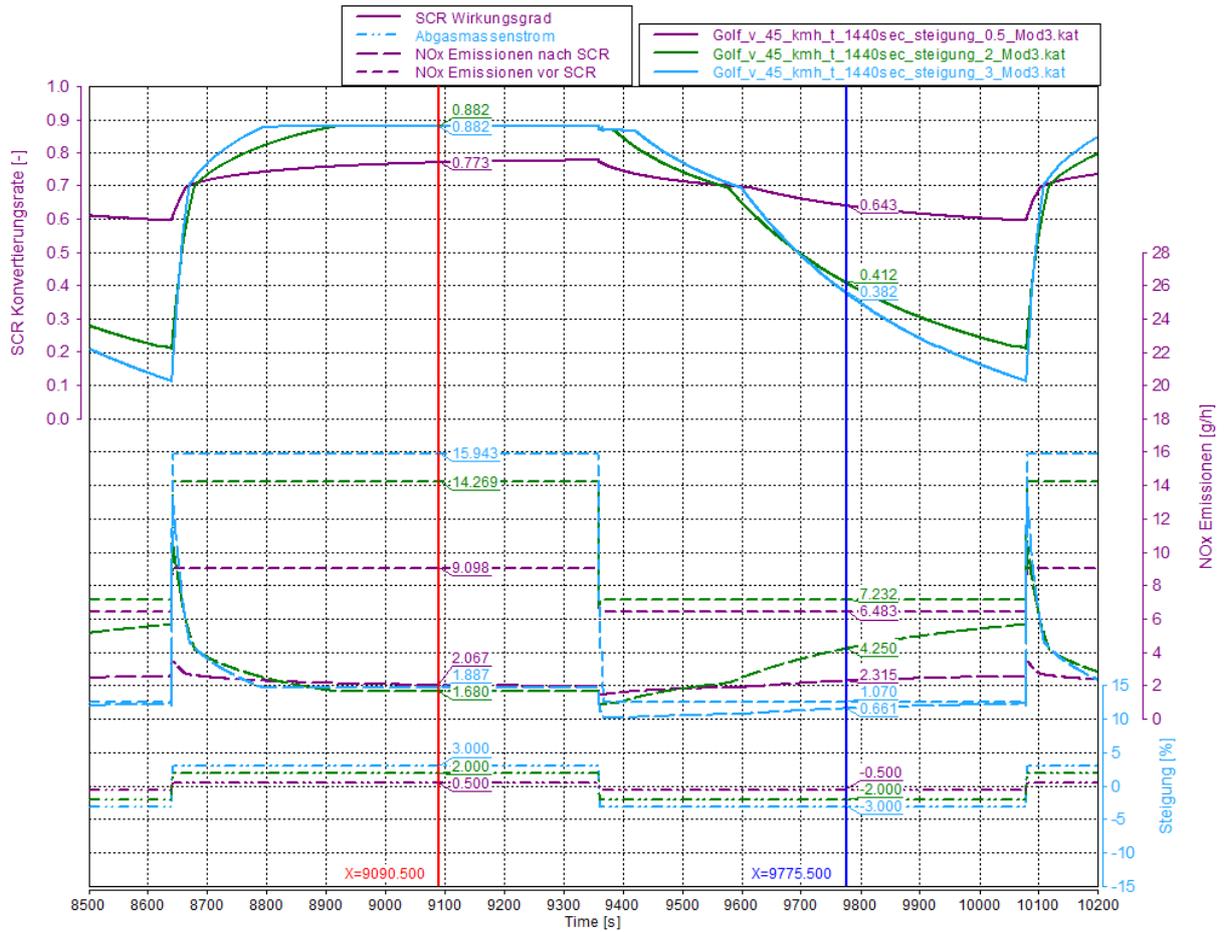


Abbildung 5-6: Vergleich der Konvertierungsrate und NO<sub>x</sub> Emissionen, bei einer Steigung bzw. Gefälle von 0.5%, 2.0% und 3.0%, Stadtteil, VW Golf



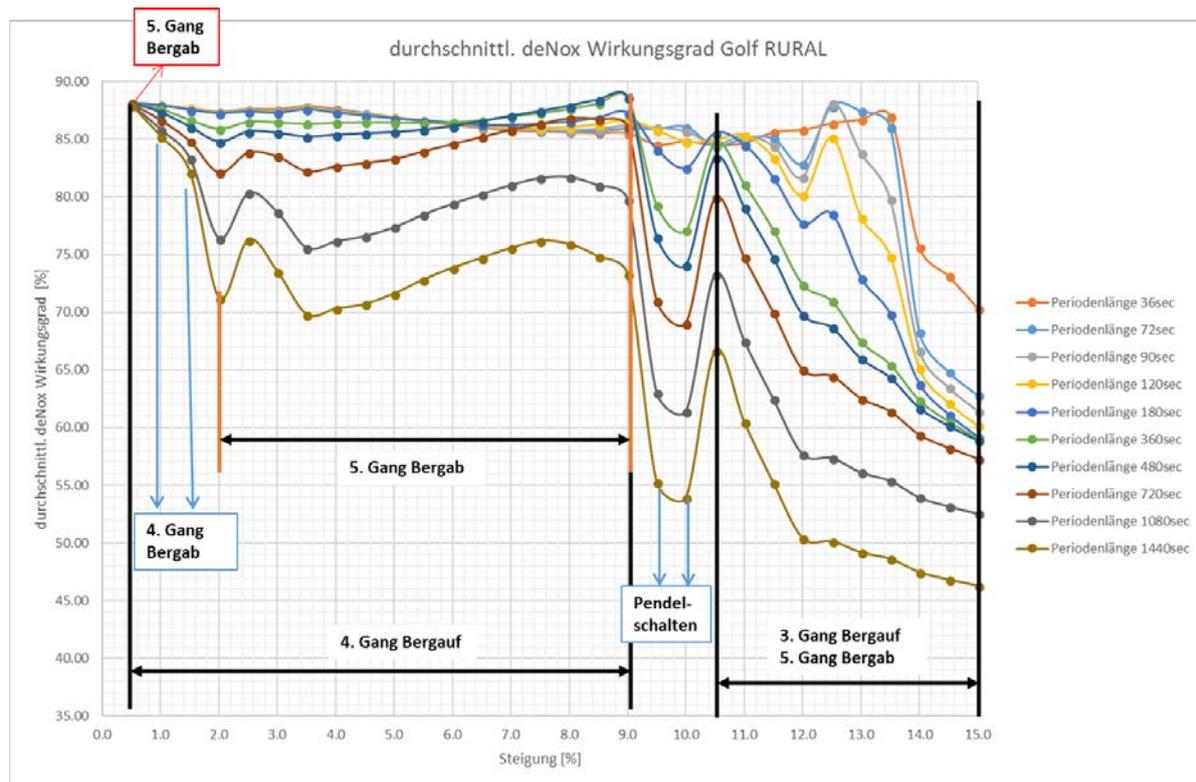


Abbildung 5-8: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Überlandteil, VW Golf

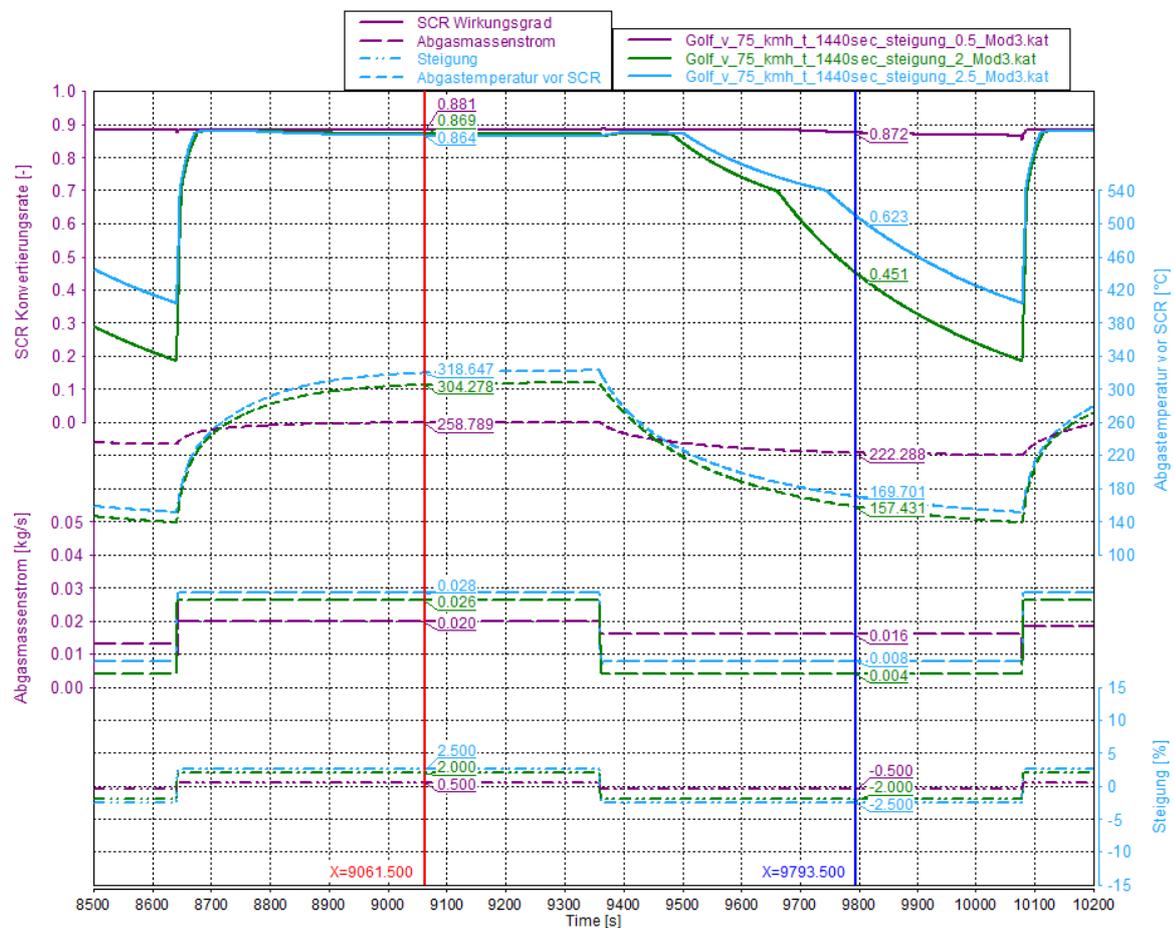


Abbildung 5-9: Vergleich der Konvertierungsraten, Abgasmassenstrom und Abgastemperatur bei einer Steigung bzw. Gefälle von 0.5%, 2.0% und 3.0%, Überlandteil, VW Golf

In Abbildung 5-10 sind die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT im Überlandteil in Abhängigkeit der Steigung dargestellt. Die Werte der  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen. Es zeigt sich, dass die zuvor diskutierten Ergebnisse bei den Steigungen von 2 % und 2.5 % keine Auswirkungen auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen EoT haben.

Das in Abbildung 5-11 dargestellte Pendelschalten führt dazu, dass die vorgegebene Geschwindigkeit nicht mehr erreicht wird, zu einer Erhöhung der Abgastemperatur und somit zu einem sinken der Konvertierungsrate und erhöhten  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT.

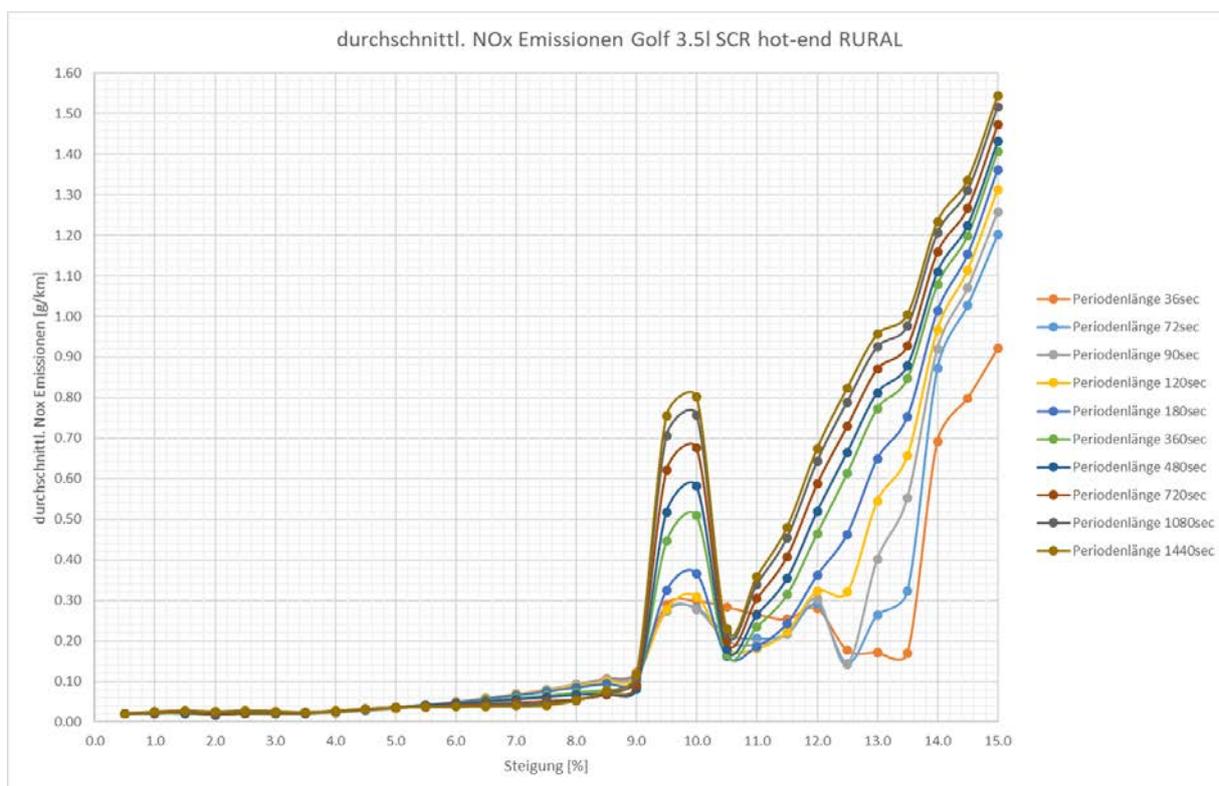


Abbildung 5-10: Durchschnittliche  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT über der Steigung, Überlandteil, VW Golf

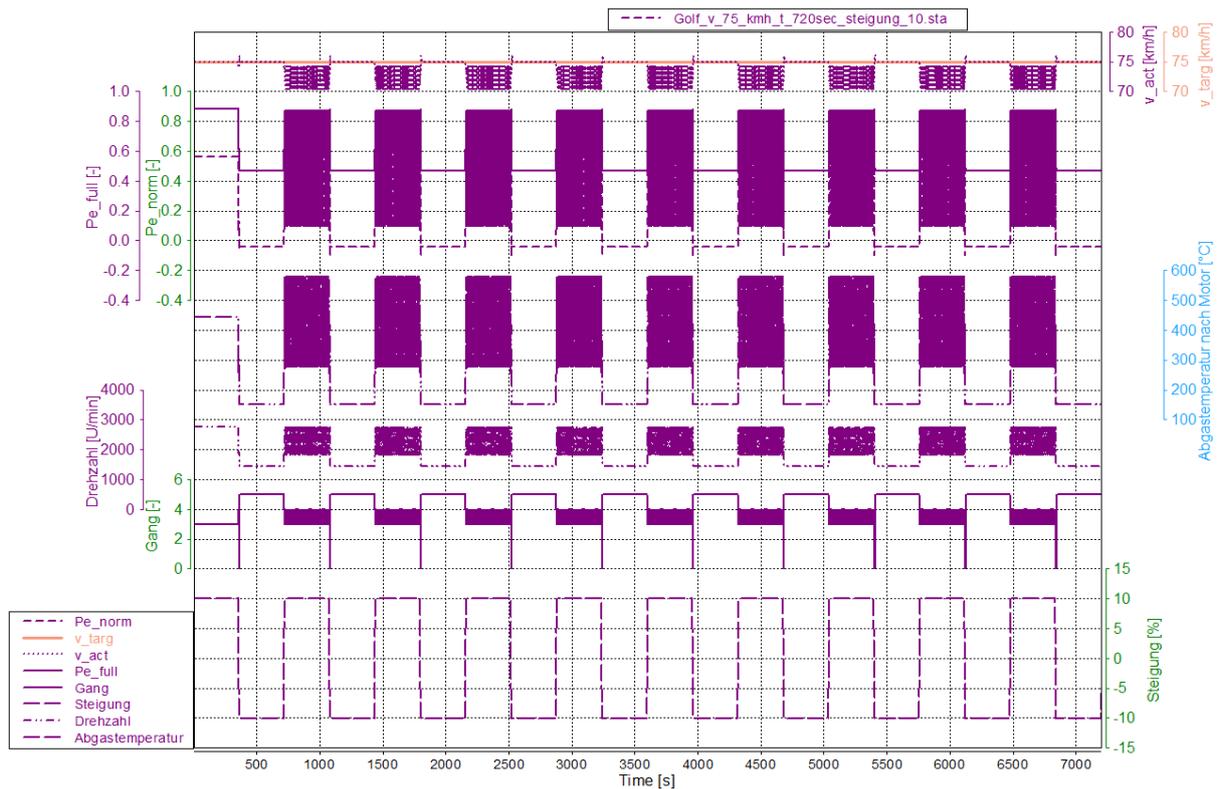


Abbildung 5-11: Pendelschalten bei einer Steigung von 10 %

In Abbildung 5-12 ist die durchschnittliche Konvertierungsrate im Autobahnteil über die Steigung dargestellt. Ab einer Steigung von 10,5 % konnte die vorgegebene Geschwindigkeit nicht mehr erreicht werden, deshalb wurde die Simulation abgebrochen. Es zeigt sich, dass die Konvertierungsrate mit größer werdender Steigung sinkt. Dies ist zurückzuführen auf die steigenden Abgastemperaturen und dem steigenden Abgasmassenstroms in der Bergaufphase, dargestellt in Abbildung 5-13.

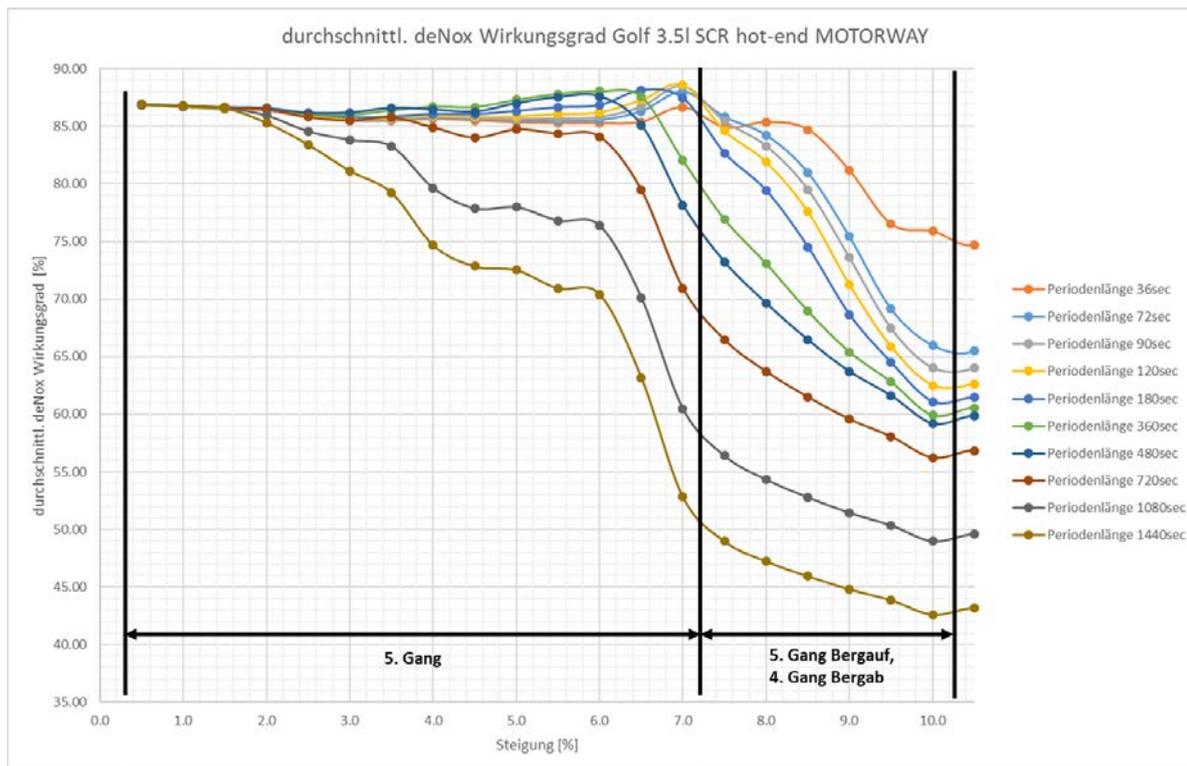


Abbildung 5-12: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Autobahnteil, VW Golf

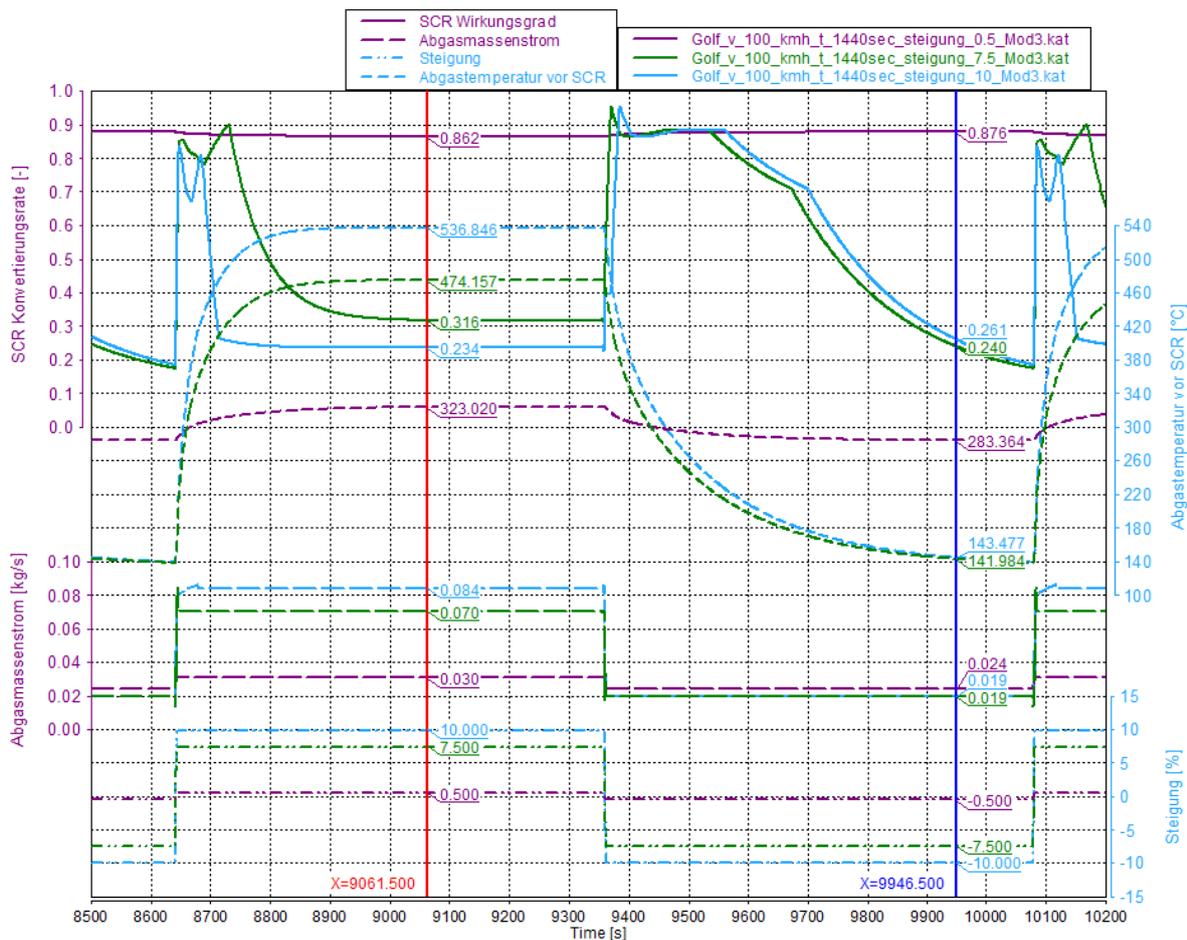


Abbildung 5-13: Vergleich der Konvertierungsraten, Abgasmassenstrom und Abgastemperatur bei einer Steigung bzw. Gefälle von 0.5%, 7.5% und 10%, Autobahnteil, VW Golf

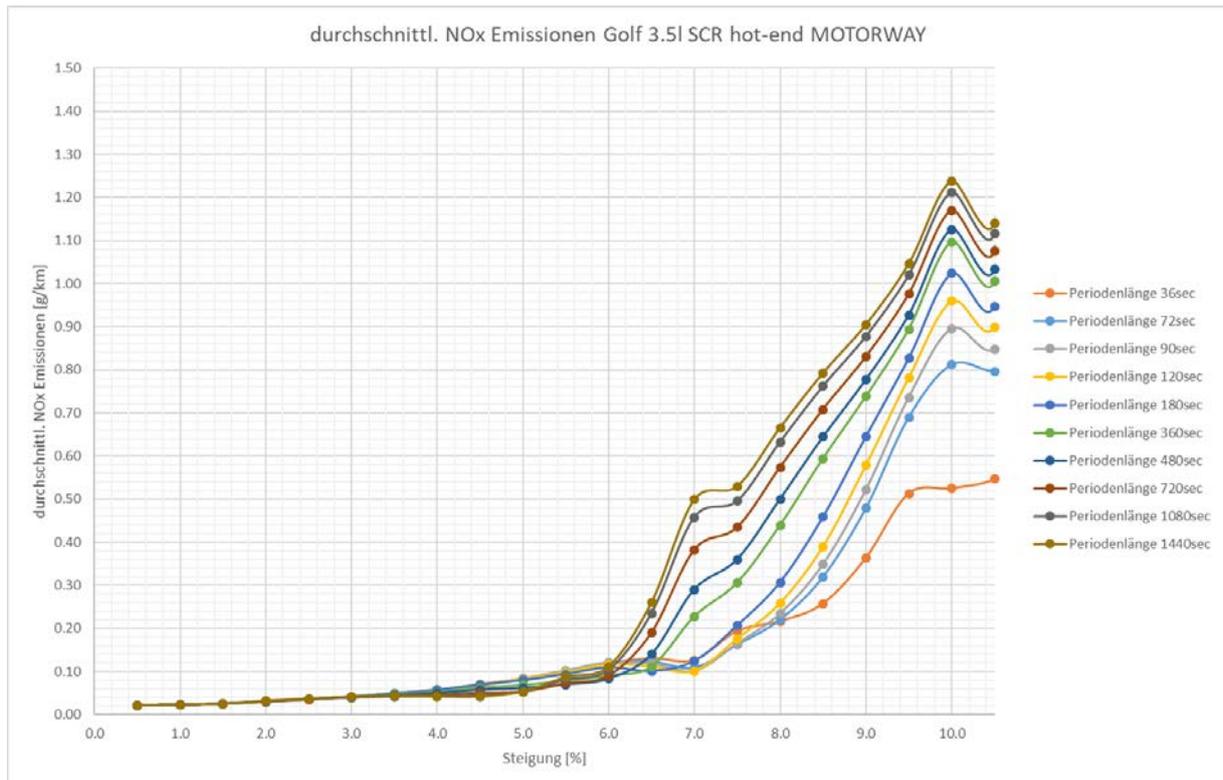


Abbildung 5-14: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Autobahnteil, VW Golf

In Abbildung 5-14 sind die durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT im Autobahnteil über die Steigung dargestellt. Es zeigt sich, dass die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT mit größer werdender Steigung steigen. Das ist zurückzuführen auf die steigenden NO<sub>x</sub> Emissionen EoT auf Grund der steigenden Motorleistung und der sinkenden Konvertierungsrate in der Bergaufphase, dargestellt in Abbildung 5-15.

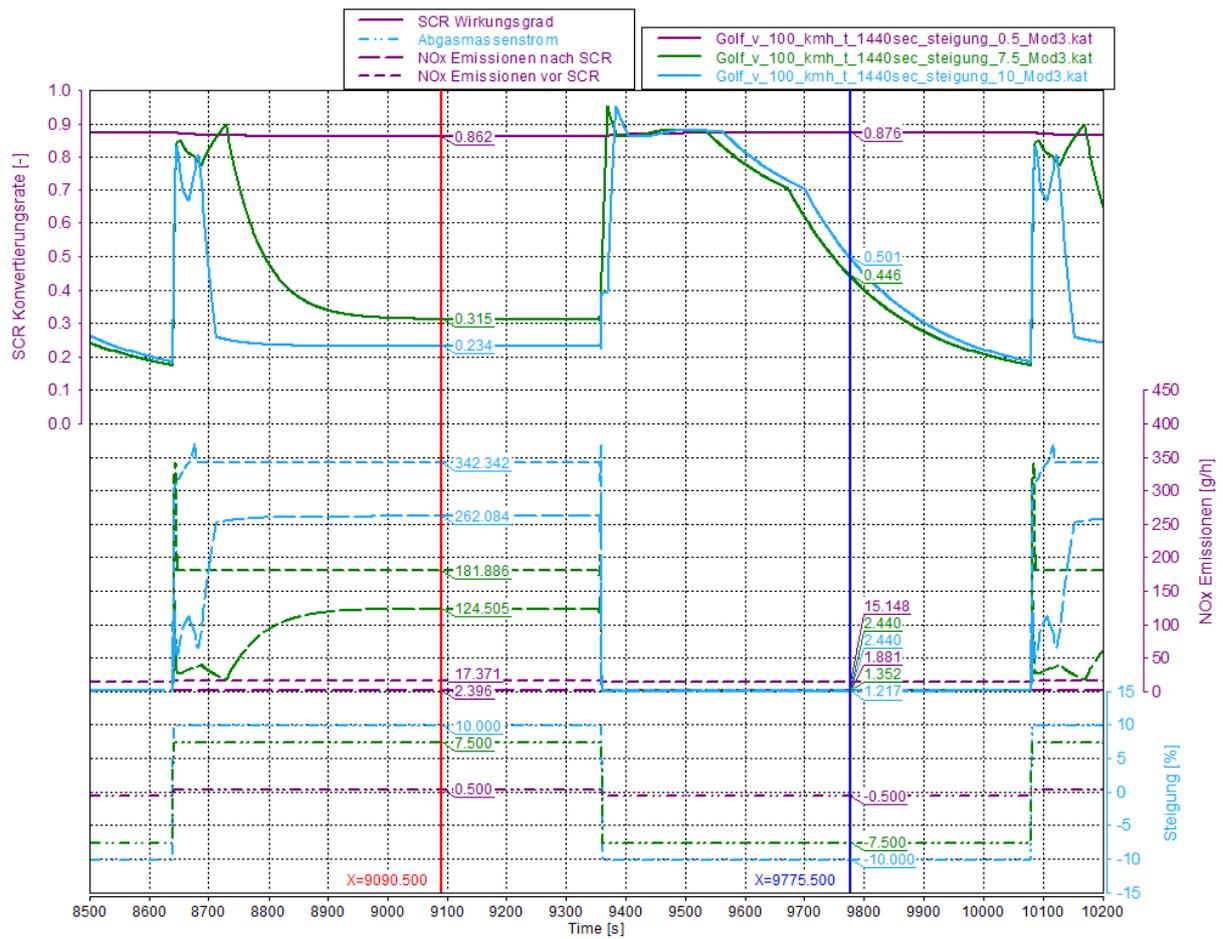


Abbildung 5-15: Vergleich der Konvertierungsrate und NO<sub>x</sub> Emissionen bei einer Steigung bzw. Gefälle von 0.5%, 7.5% und 10%, Autobahnteil, VW Golf

## 5.2 Simulationsergebnisse mit Gangvorgabe

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 5.1 erfolgte die in Kapitel 4.3.2 beschriebene Simulation der Höhenprofile mit realitätsnaher manueller Vorgabe der Gänge. Dies bedeutet, dass in Steigungen ein Schalten in den niedrigeren Gang erst bei nicht mehr Erreichen der vorgegebenen Geschwindigkeit bzw. der Vollastlinie und in Gefällen kein Schalten in einen höheren Gang durchgeführt wird. Des Weiteren wurde die Simulation nur mehr für die Periodenlängen 36 Sekunden, 180 Sekunden, 360 Sekunden 720 Sekunden und 1440 Sekunden durchgeführt, da sich gezeigt hat, dass die Ergebnisse der weiteren simulierten Periodenlängen innerhalb der minimalen und maximalen simulierten Periodenlänge sind. Die Simulation erfolgte wiederum für die Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.2 beschriebenen Fahrzeuge.

### 5.2.1 VW Golf

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation mit Gangvorgabe für den VW Golf mit einem motornahen 3.5 Liter SCR-Katalysator erläutert.

In Abbildung 5-16 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung für den Urbanteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Werte der Konvertierungsrate entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen. Es ist ersichtlich, dass bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden bis 720 Sekunden die Konvertierungsrate bis zu einer Steigung bzw. Gefälle von 3.5 % ansteigt, danach erfolgt bei 4 % ein Abfall der Konvertierungsrate. Der Anstieg ist auf eine steigende Abgastemperatur und einen steigenden Abgasmassenstrom mit größer werdender Steigung zurückzuführen, ersichtlich in Abbildung 5-17. Der Abfall bei 4% ist dem Schalten in einen niedrigeren Gang in der Bergabphase geschuldet, da hierdurch der Abgasmassenstrom ansteigt und dadurch die Temperatur im SCR Katalysator sinkt.

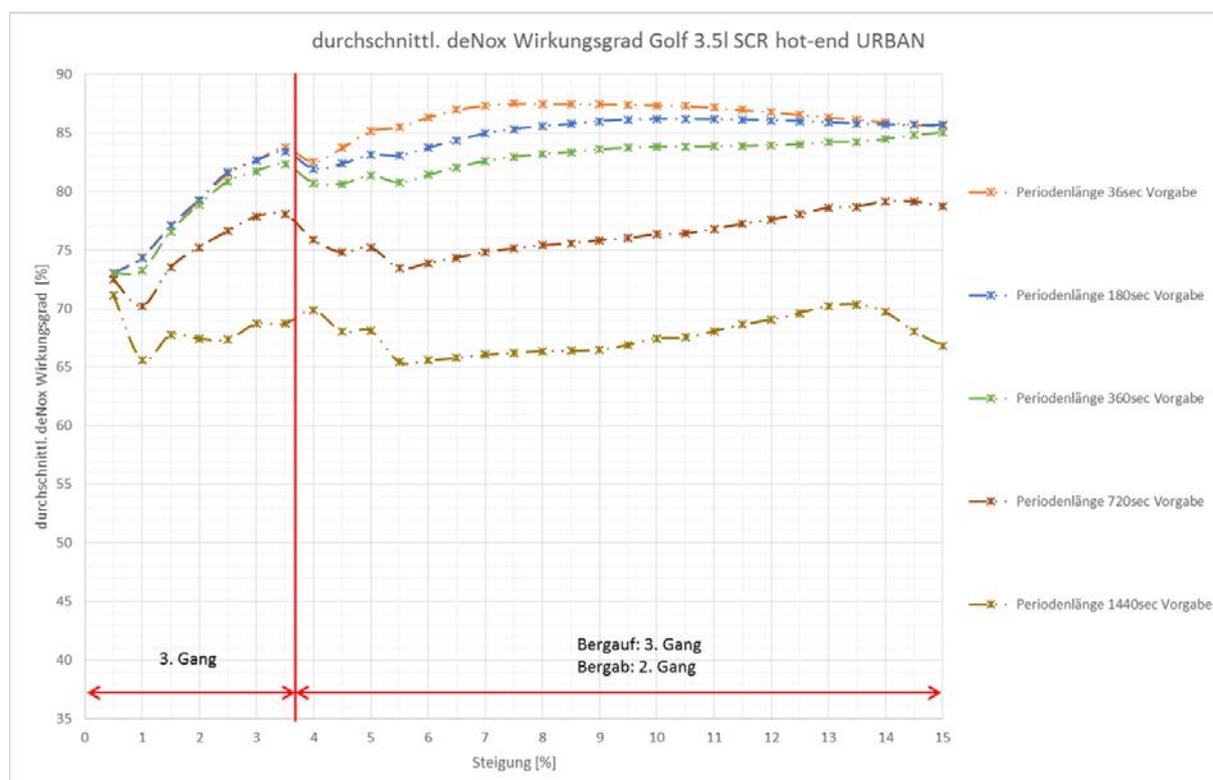


Abbildung 5-16: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Stadtteil, VW Golf

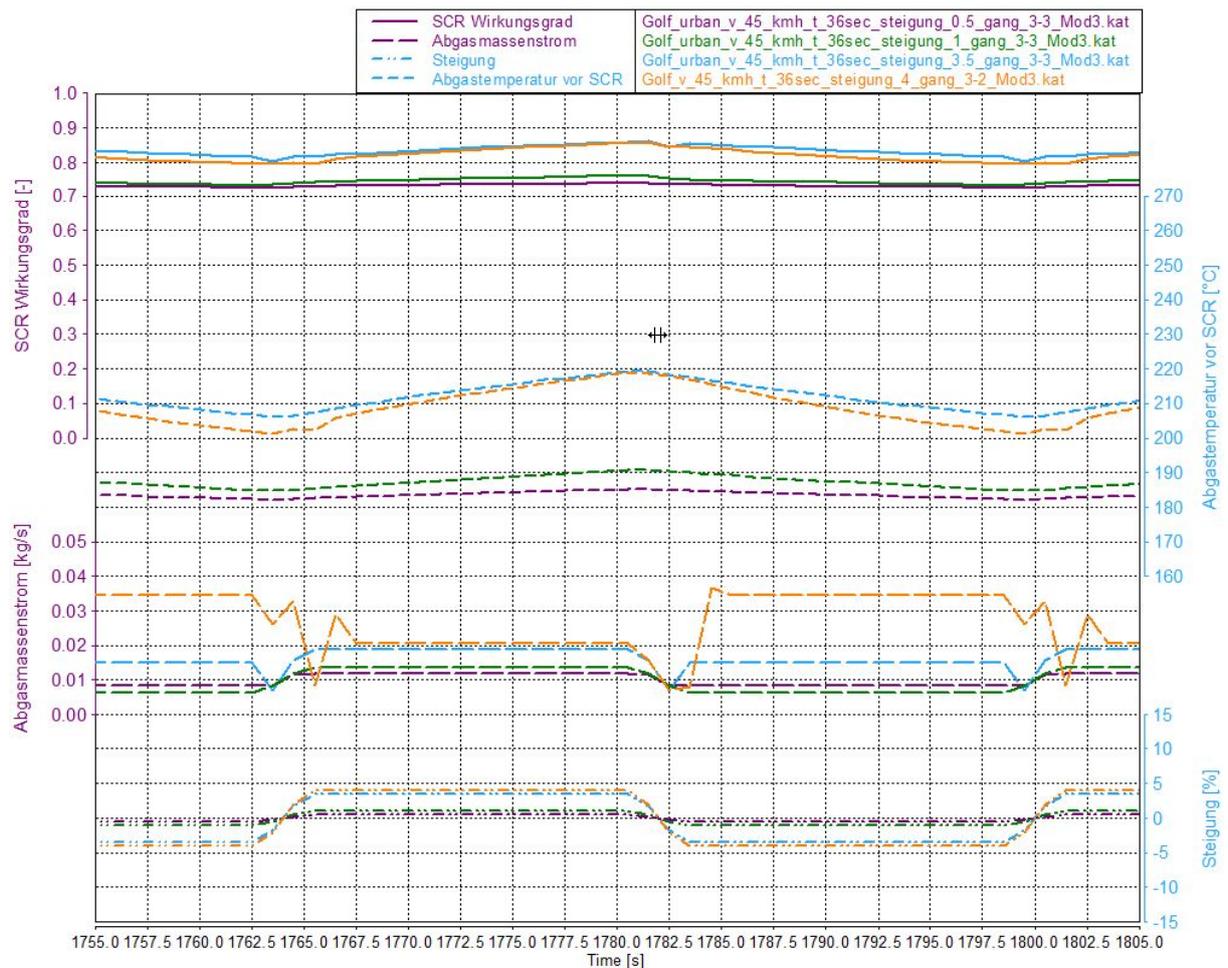


Abbildung 5-17: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 0.5 %, 1 %, 3.5 % und 4 %, Periodenlänge 36 sec, Stadtteil

Bei einer Periodenlänge von 1440 Sekunden kommt es bei Steigungen ab 1 % zu einem Abfall der Konvertierungsrate gegenüber einer Steigung von 0.5 % aufgrund der größeren Abkühlung des Abgases in der Bergabphasen gegenüber kürzeren Periodenlängen, ersichtlich in Abbildung 5-18. Ab einer Steigung von 1.5 % wird dies durch eine steigende Abgastemperatur und einen steigenden Massenstrom und somit einer steigenden Konvertierungsrate in der Bergaufphase kompensiert.

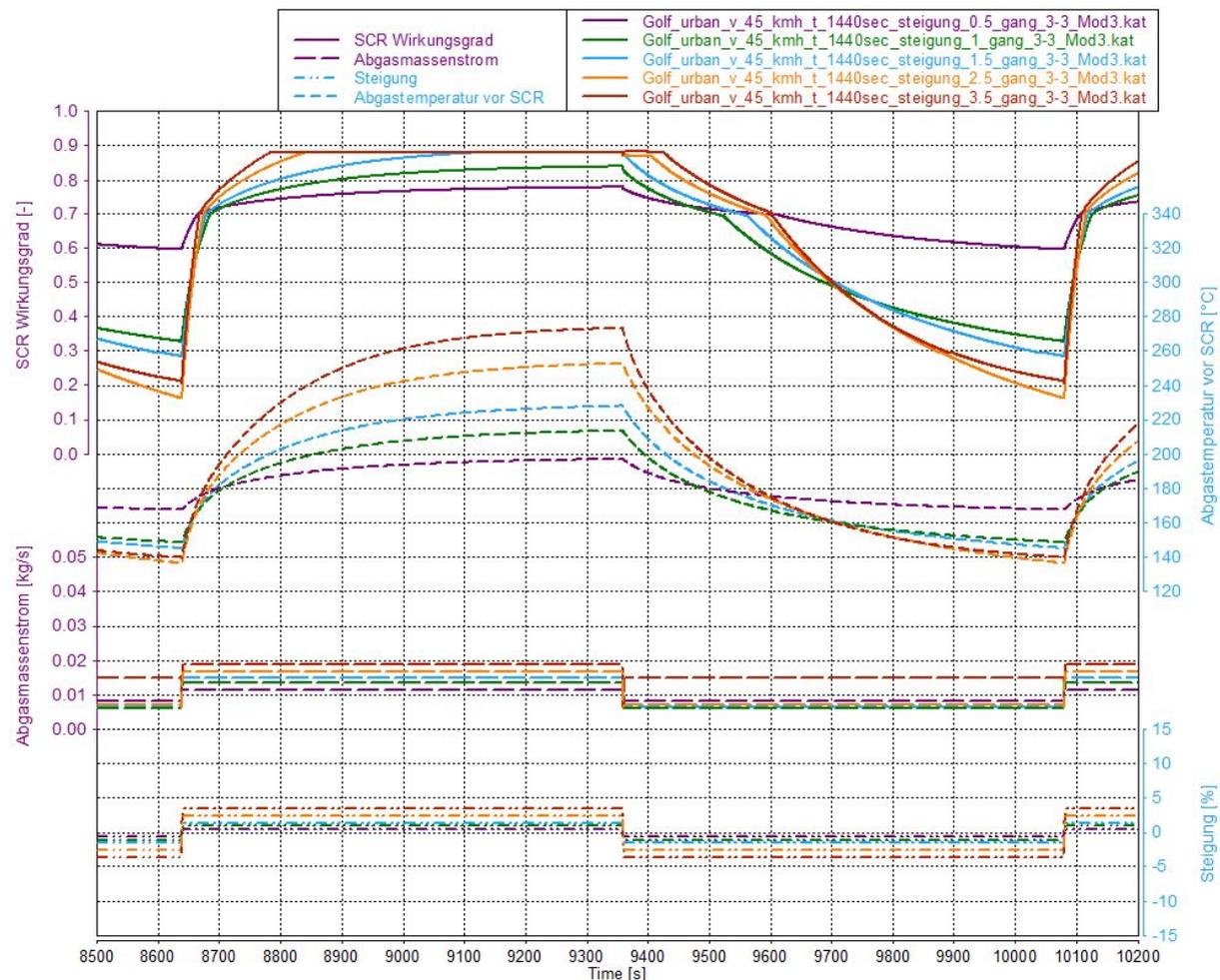


Abbildung 5-18: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2.5 % und 3.5 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

Bei Periodenlängen bis 180 Sekunden nimmt die Konvertierungsrate ab einer Steigung von 4.5 % bis 7.5 % zu. Dies geschieht aufgrund der zunehmenden Abgastemperatur. Ab einer Steigung von 8% ist die Konvertierungsrate annähernd konstant. Ab einer Periodenlänge von 360 Sekunden haltet dieser Effekt bis zu einer Steigung von 15 % an und kompensiert die mit zunehmenden Gefälle sinkenden Konvertierungsrate, welche ab einem gewissen Gefälle, das mit zunehmender Periodenlänge geringer wird, konstant wird, da die minimale Abgastemperatur in der Schubphase erreicht wird, dargestellt in Abbildung 5-19.

In Abbildung 5-16 ist weiters dargestellt, dass die Konvertierungsrate bei Steigungen größer 13.5 % und Periodenlängen größer 720 Sekunden an ihr Maximum gelangt und wieder sinkt, da Abgastemperaturen größer 420°C erreicht werden, ersichtlich im Konvertierungskennfeld in Abbildung 4-4.

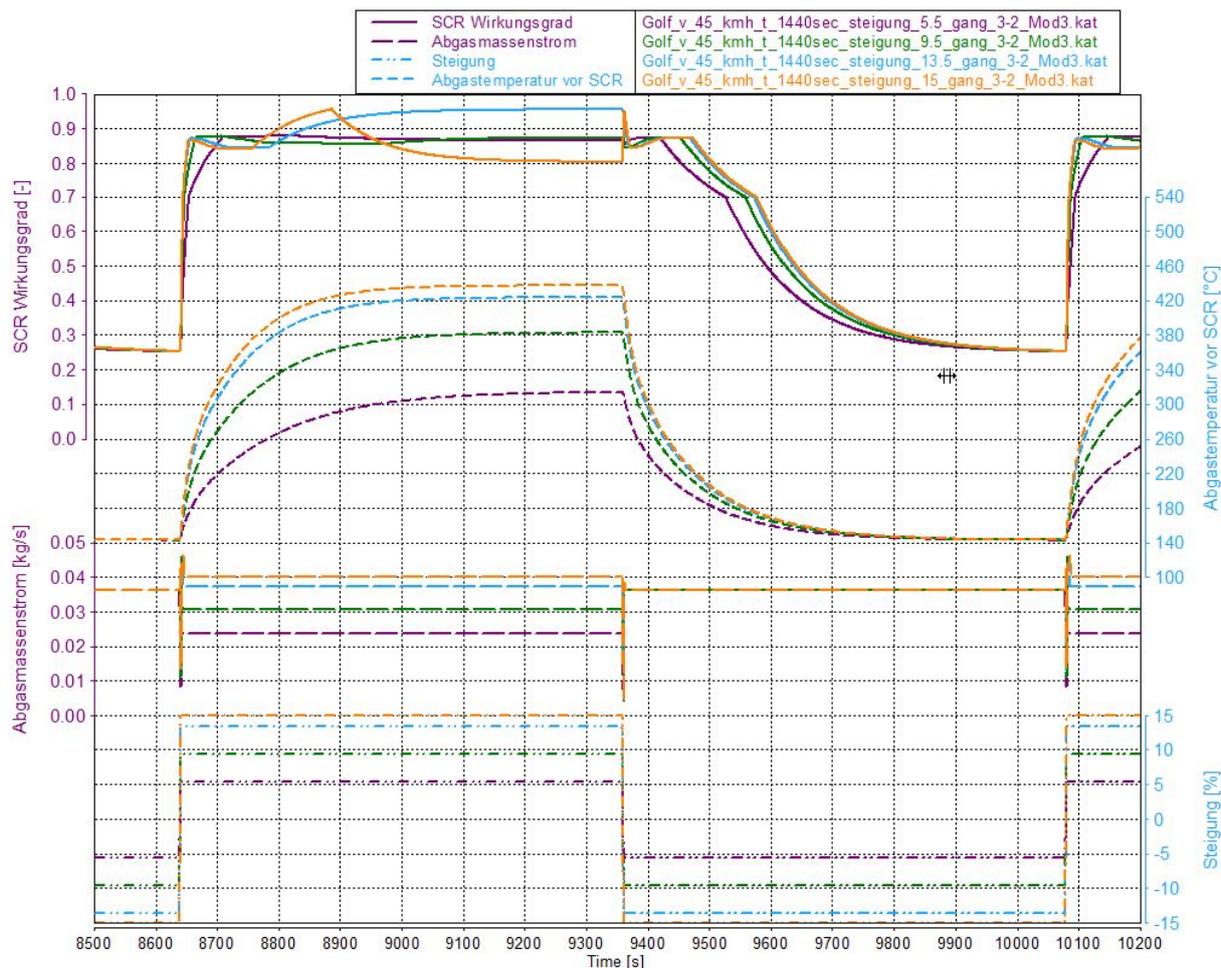


Abbildung 5-19: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 5.5 %, 9.5 %, 13.5 % und 15 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

In Abbildung 5-20 sind die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT (End of Tailpipe) in Abhängigkeit der Steigung für den Stadtteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Werte der  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen. Es ist ersichtlich, dass bei einem Gefälle von 1.5 % zu einem Anstieg der  $\text{NO}_x$  Emission EoT kommt, aufgrund der sinkenden Konvertierungsrate, infolge der sinkenden Abgastemperatur bei annähernd konstanten Rohemissionen, dargestellt in Abbildung 5-18 und Abbildung 5-21

Mit größer werdendem Gefälle sinken die Rohemissionen da der Motor in den Schubbetrieb geht, dies führt trotz einer sinkenden Konvertierungsrate zu geringeren  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT. Bei einem Gefälle von 4% erfolgt ein Schaltvorgang in den 2. Gang, dies führt zu einer Erhöhung der Motorleistung in der Bergabphase, in welcher dadurch die Rohemissionen steigen und infolge der geringen Konvertierungsrate auch die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT. Ab einem Gefälle von 5.5 % befindet sich der Motor wieder im Schubbetrieb, die Rohemissionen sinken wieder und infolge auch die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT. Dies ist dargestellt in Abbildung 5-22.

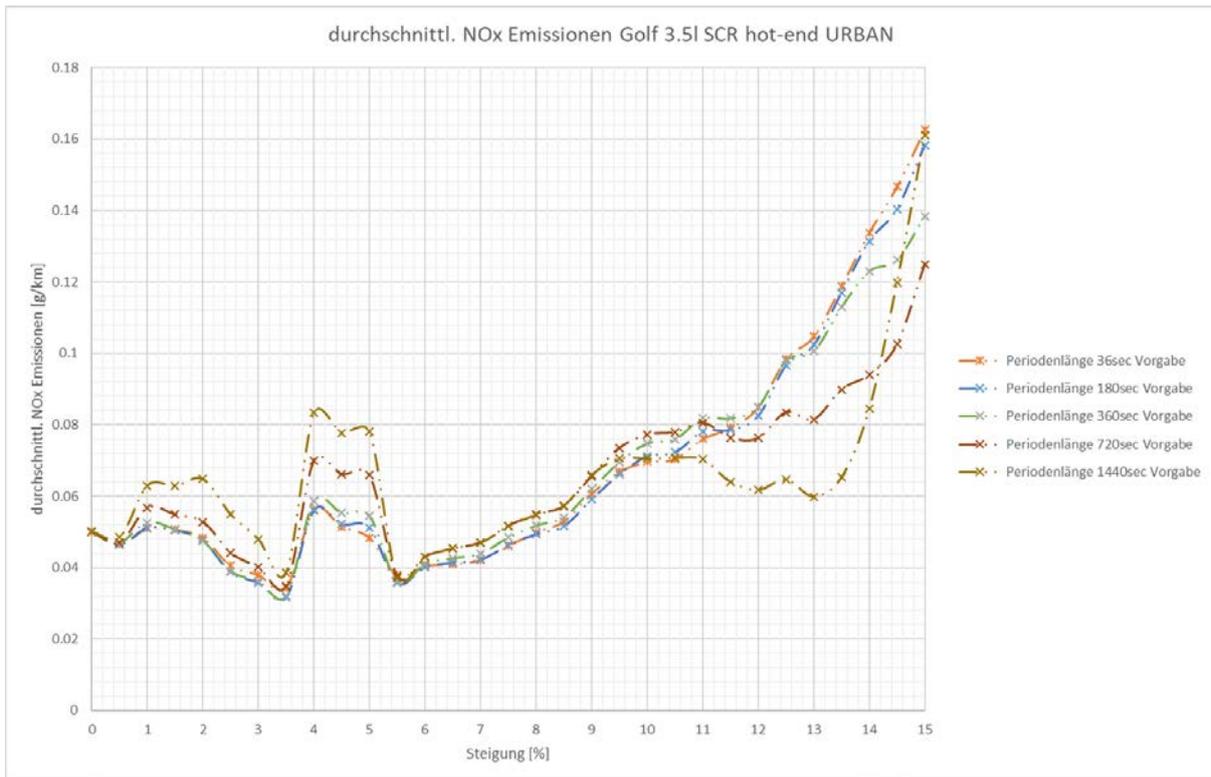


Abbildung 5-20: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Stadtteil, VW Golf

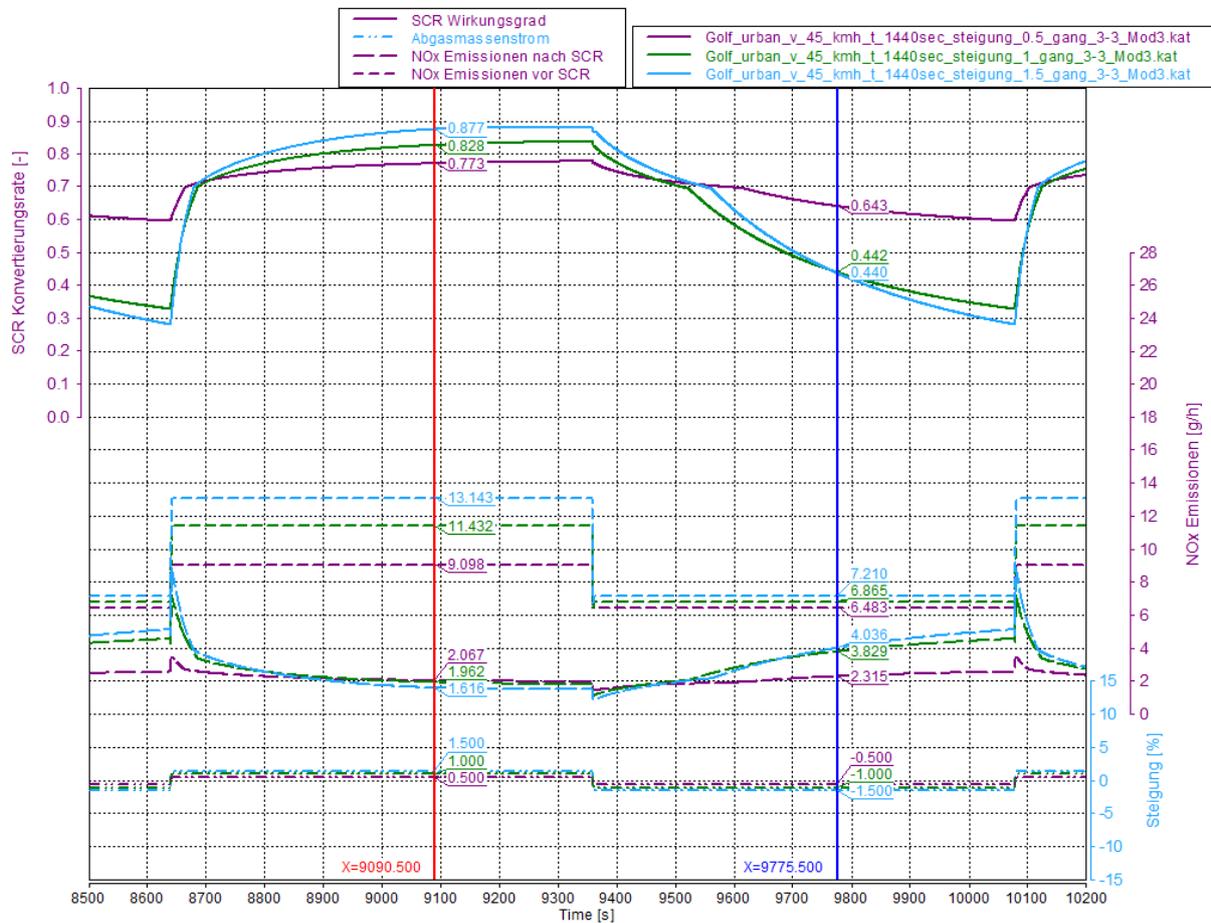


Abbildung 5-21: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 0.5 %, 1 %, und 1.5 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

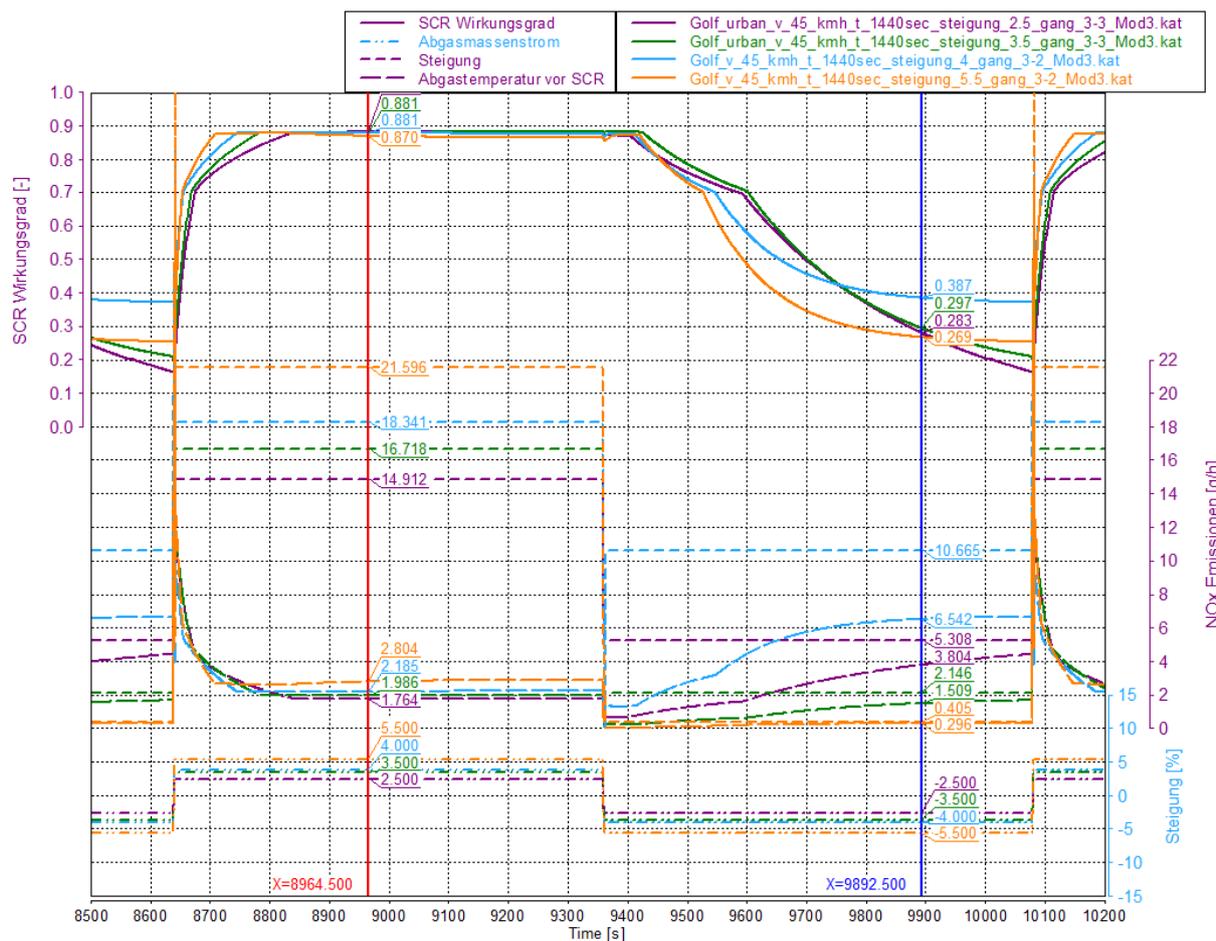


Abbildung 5-22: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 2.5 %, 3.5 %, 4 %, und 5.5 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

Des Weiteren ist in Abbildung 5-20 erkennbar, dass die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT bei größeren Periodenlängen ab einer Steigung von 12 % niedriger sind als bei kurzen Periodenlängen. Dies ist zurückzuführen auf die erhöhten Rohemissionen des Motors in der Beschleunigungsphase am Beginn der Steigung, welche bei kürzeren Periodenlängen stärker ins Gewicht fällt als bei Längeren, dargestellt in der Abbildung 5-23 und Abbildung 5-24. Bei einer Steigung von 15% beträgt die Beschleunigungsphase knapp 10 Sekunden, in dieser sind die Rohemissionen fast doppelt so hoch wie bei konstanter Geschwindigkeit. Dieser Effekt wirkt sich bei kurzen Periodenlängen stärker für die durchschnittlichen Emissionen aus, als bei längeren

Der starke Anstieg der NO<sub>x</sub> Emissionen EoT ab Steigungen von 13 % und Periodenlänge größer 720 Sekunden ist auf die in Abbildung 5-19 erläuterten Zusammenhänge zurückzuführen.

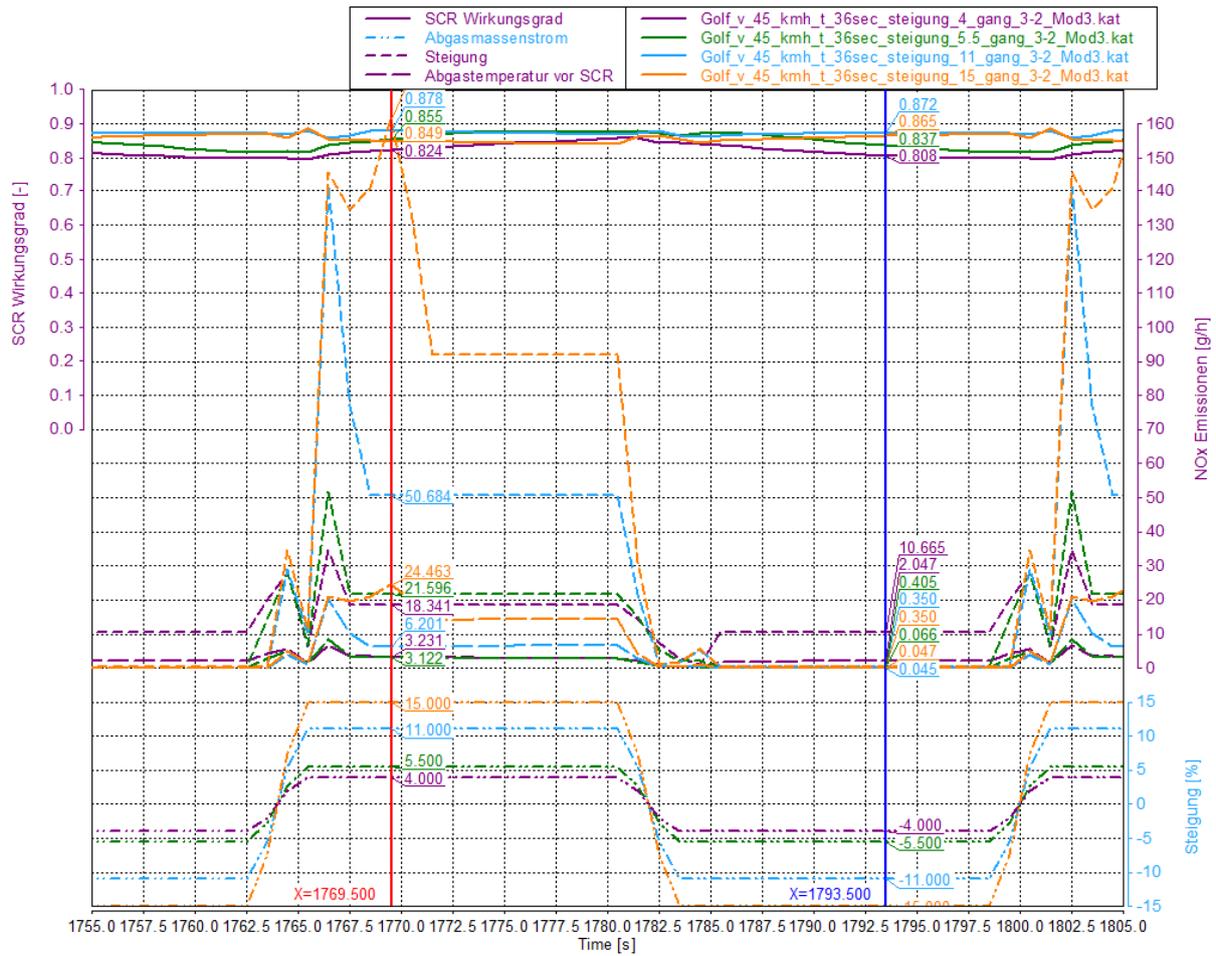


Abbildung 5-23: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 4 %, 6.5 %, 11 %, und 15 %, Periodenlänge 36 sec, Stadtteil

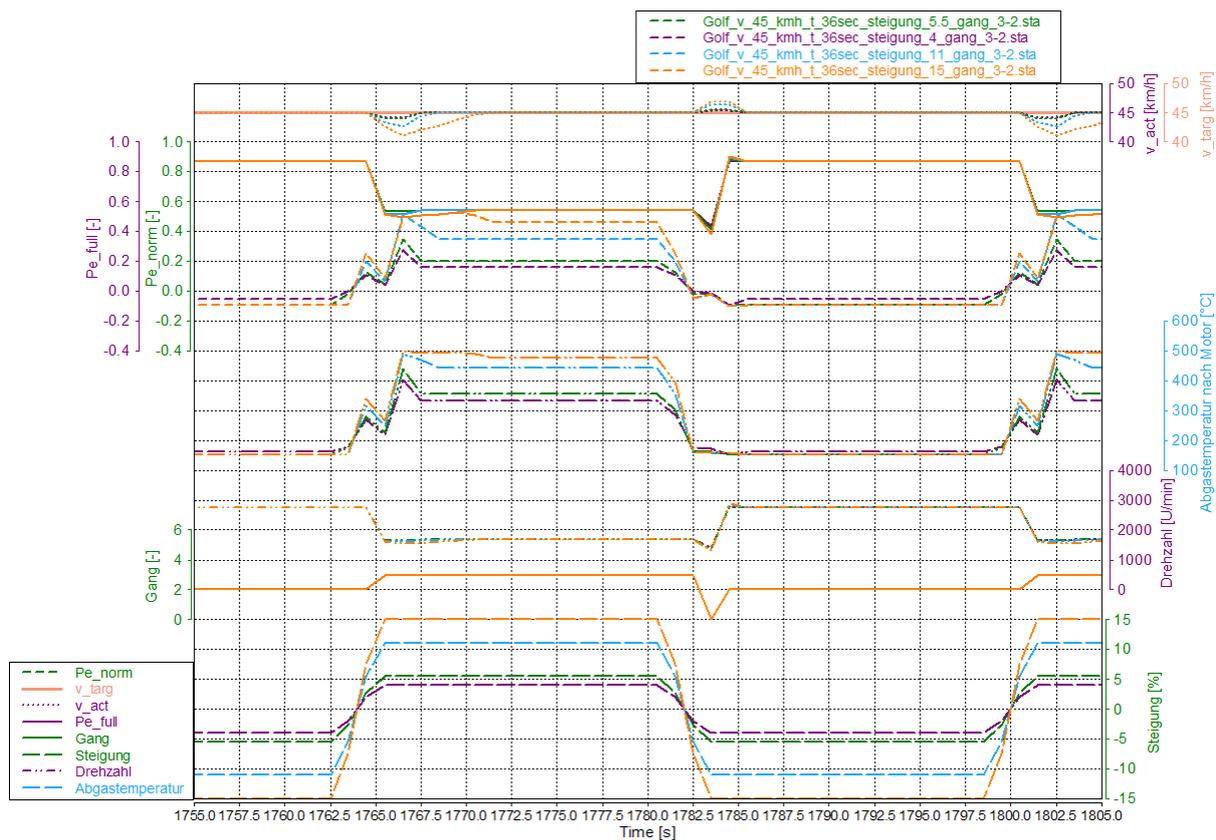


Abbildung 5-24: Vergleich der Motorleistung, Drehzahl und Gang bei einer Steigung von 4 %, 5,5 %, 11 %, und 15 %, Periodenlänge 36 sec, Stadtteil

In Abbildung 5-25 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung für den Überlandteil eines RDE Zyklus dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Steigungen bis 3,5% und Periodenlängen bis 360 Sekunden die Konvertierungsrate annähernd konstant ist, da sich aufgrund der kurzen Periodenlängen und der geringen Steigung bzw. Gefälle kein nennenswerter Anstieg der Abgastemperatur und des Massenstroms ergibt. Bei Periodenlängen größer 360 Sekunden kommt es bei den genannten Steigungen zu einem Abfall der Konvertierungsrate infolge des Absinkens der Abgastemperatur in der Bergabphase, wie bereits in Abbildung 5-18 erläutert.

Bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden sinkt die Konvertierungsrate zwischen Steigungen von 4 % und 11 % leicht ab, infolge des sich mit größer werdender Steigung erhöhenden Abgasmassenstroms. Währenddessen in diesem Bereich bei längeren Periodenlängen die Konvertierungsrate ansteigt. Dies ist zurückzuführen auf den in Abbildung 5-21 beschriebenen Effekte. Mit zunehmender Steigung wird die optimale Abgastemperatur für die Konvertierung von  $\text{NO}_x$  immer früher überschritten, bei einer Periodenlänge von 720 Sekunden bereits bei 8%, und es kommt dadurch zu einem Abfall der Konvertierungsrate, veranschaulicht in Abbildung 5-19. In der Bergabphase tritt der bereits in Abbildung 5-19 erörterte Effekt auf.

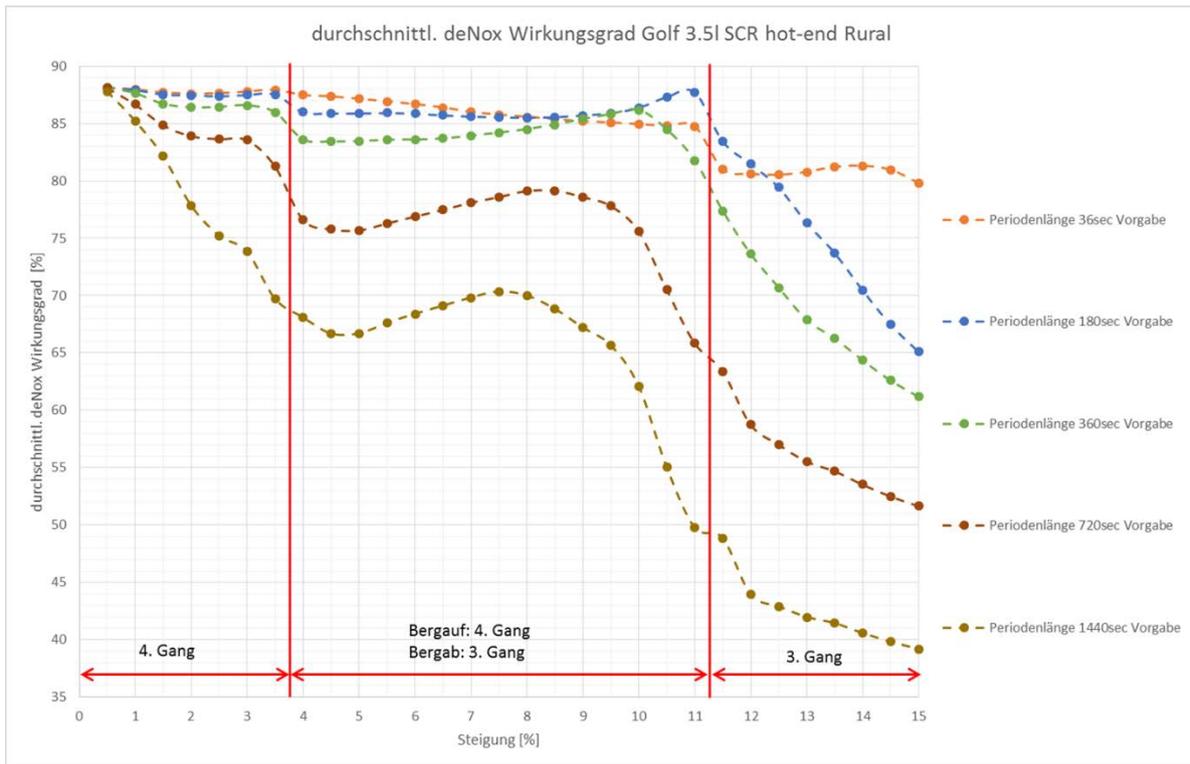


Abbildung 5-25: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Überlandteil, VW Golf

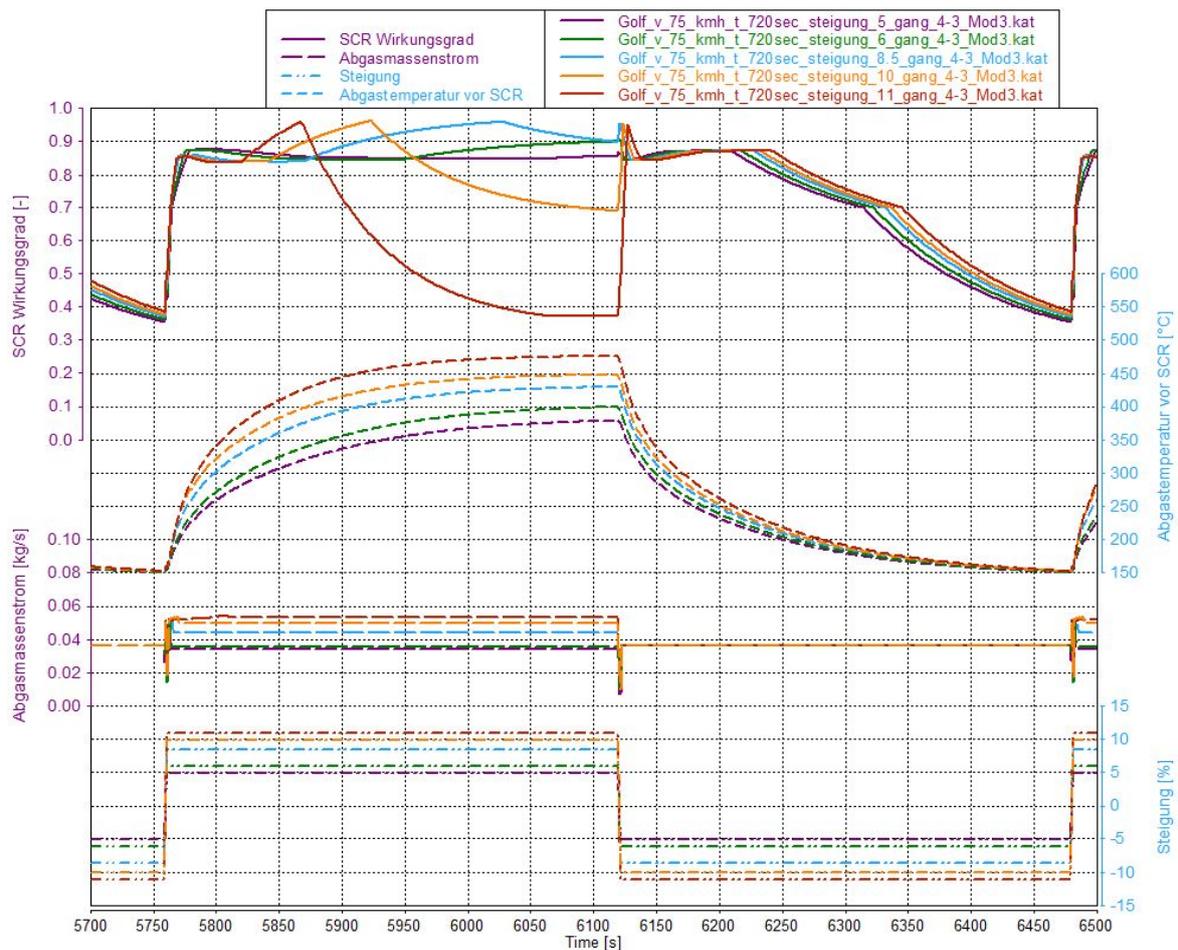


Abbildung 5-26: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 5 %, 6 %, 8.5 %, 10 % und 11 %, Periodenlänge 720 sec, Überlandteil

In Abbildung 5-27 sind die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT in Abhängigkeit der Steigung für den Überlandanteil eines RDE Zyklus dargestellt. Es zeigt sich das zu erwartende Verhalten, mit zunehmender Steigung steigt die zum konstant halten der vorgegebenen Geschwindigkeit benötigte Motorleistung und die Konvertierungsrate des SCR Katalysators sinkt und somit steigen die NO<sub>x</sub>-Emissionen an.

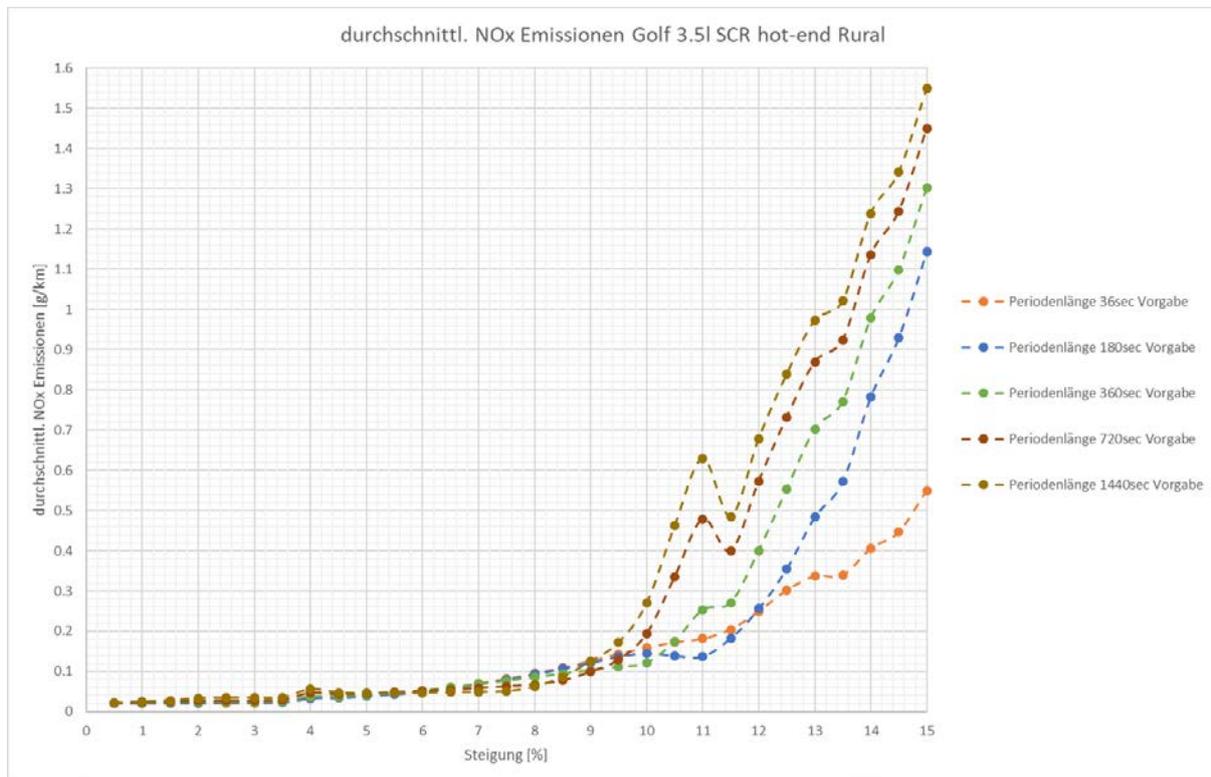


Abbildung 5-27: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Überlandteil, VW Golf

Bei Periodenlängen größer 720 Sekunden und einer Steigung von 11.5% sinken die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT gegenüber einer Steigung von 11 % ab, dies kann durch den Schaltvorgang von dem 4. Gang in den 3. Gang erklärt werden. Bei 11 % Steigung im 4. Gang wird der Motor an der Vollastlinie betrieben, dargestellt in Abbildung 5-28. Dies führt zu einem Anstieg der NO<sub>x</sub> Rohemissionen und somit auch zu einem Anstieg der Emissionen nach dem SCR Katalysator. Im Gegensatz hierzu wird bei 11.5 % Steigung im 3. Gang nur etwa 75 % der Vollast abgerufen, was zu niedrigeren Rohemissionen und in weiterer Folge zu niedrigeren Emissionen nach dem SCR Katalysator führt, erkennbar in Abbildung 5-29. Die Konvertierungsrate ist für beide Steigungen nahezu ident, aufgrund ähnlicher Abgastemperaturen.

Ab einer Steigung von 12 % erfolgt wieder der erwartete Anstieg der NO<sub>x</sub> Emissionen.

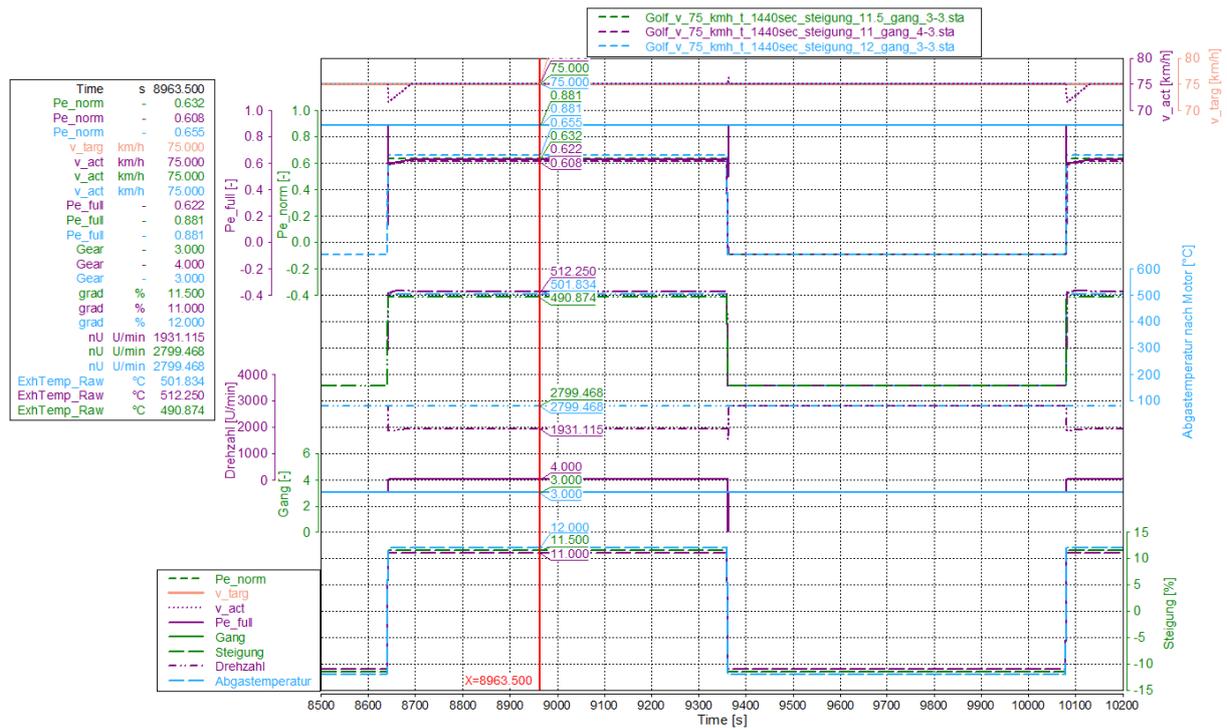


Abbildung 5-28: Vergleich der Motorleistung, Drehzahl und Gang bei einer Steigung von 11 %, 11.5 %, und 12 %, Periodenlänge 1440 sec, Überlandteil

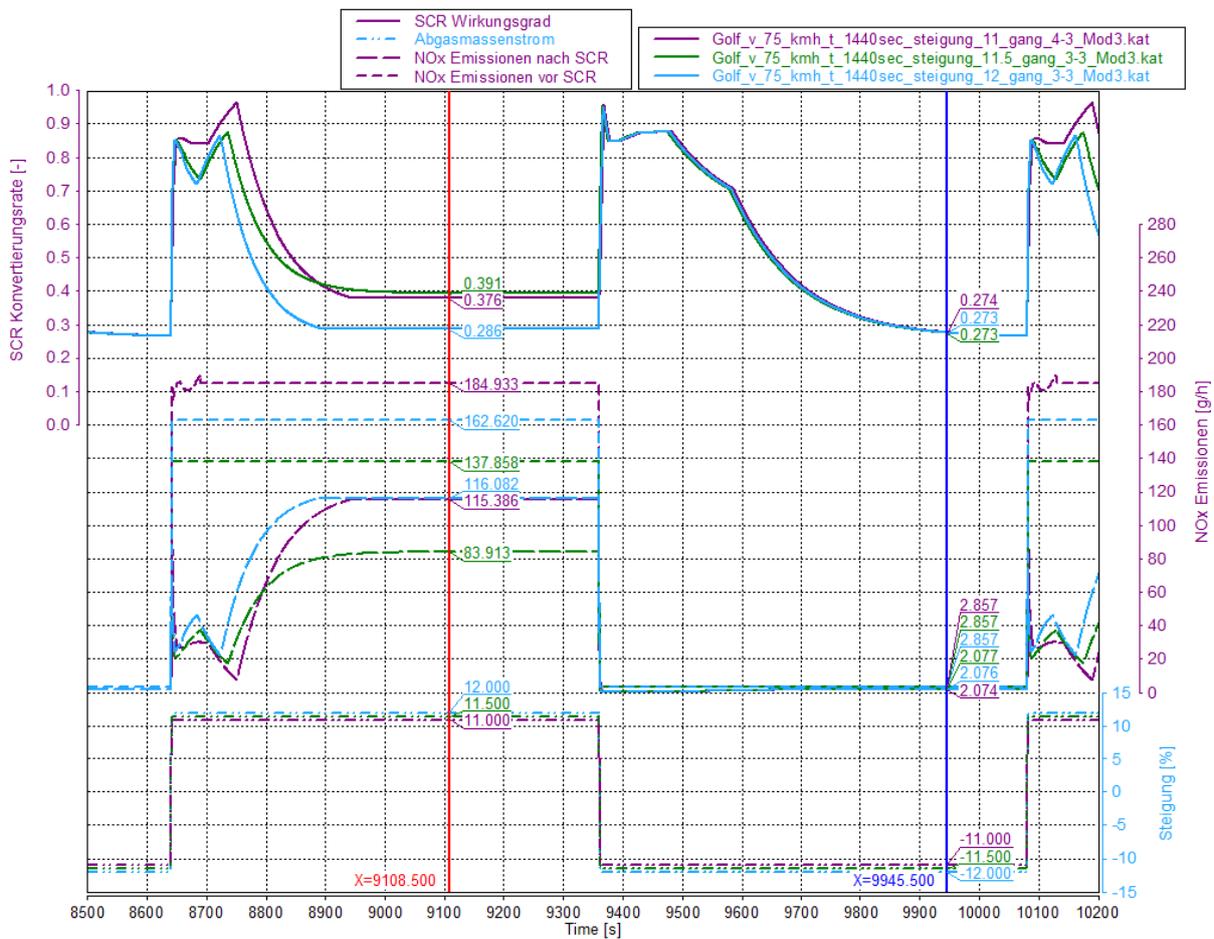


Abbildung 5-29: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 11 %, 11.5 % und 12 %, Periodenlänge 1440 sec, Überlandteil

In Abbildung 5-30 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung für den Autobahnteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Simulation wurde bei 12.5 % Steigung abgebrochen, da bei größeren Steigungen die vorgegebene Geschwindigkeit nicht mehr erreicht wird.

Es zeigt sich für die Konvertierungsrate, das schon für den Überlandteil erläuterte Verhalten. Bei Periodenlängen bis 180 Sekunden und Steigungen bis 7 % ist die Konvertierungsrate annähernd konstant, da sich die Abgastemperaturen zwischen 260 °C und 380 °C bewegen. In diesem Bereich ist die Konvertierungsrate annähernd konstant, ersichtlich im Konvertierungskennfeld in Abbildung 4-4. Durch den Schaltvorgang vom 5. Gang in den 4. Gang bei einer Steigung von 7.5 % und bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden kommt es zu einem Anstieg des Abgasmassenstroms welches zu einem Absinken der Konvertierungsrate führt. Von einer Steigung von 7.5 % bis 10 % ist Konvertierungsrate wiederum konstant, da sich die Abgastemperatur in einem Bereich von 300 °C bis 420 °C bewegt in dem die Konvertierungsrate im Kennfeld wiederum konstant ist. Die Änderung im Abgasmassenstrom ist in diesem Bereich vernachlässigbar. Ab einer Steigung von 10.5 % steigt die Abgastemperatur über 420°C, was zu einem Sinken der Konvertierungsrate führt, dieses Verhalten wurde bereits in Abbildung 5-26 erläutert. Mit länger werdender Periodenlänge wandert der Punkt an dem die Konvertierungsrate absinkt zu kleineren Steigungen, da die Zeit in dem der Motor mit hoher Motorleistung und somit mit Abgastemperaturen von über 420 °C betrieben anteilmäßig größer wird.

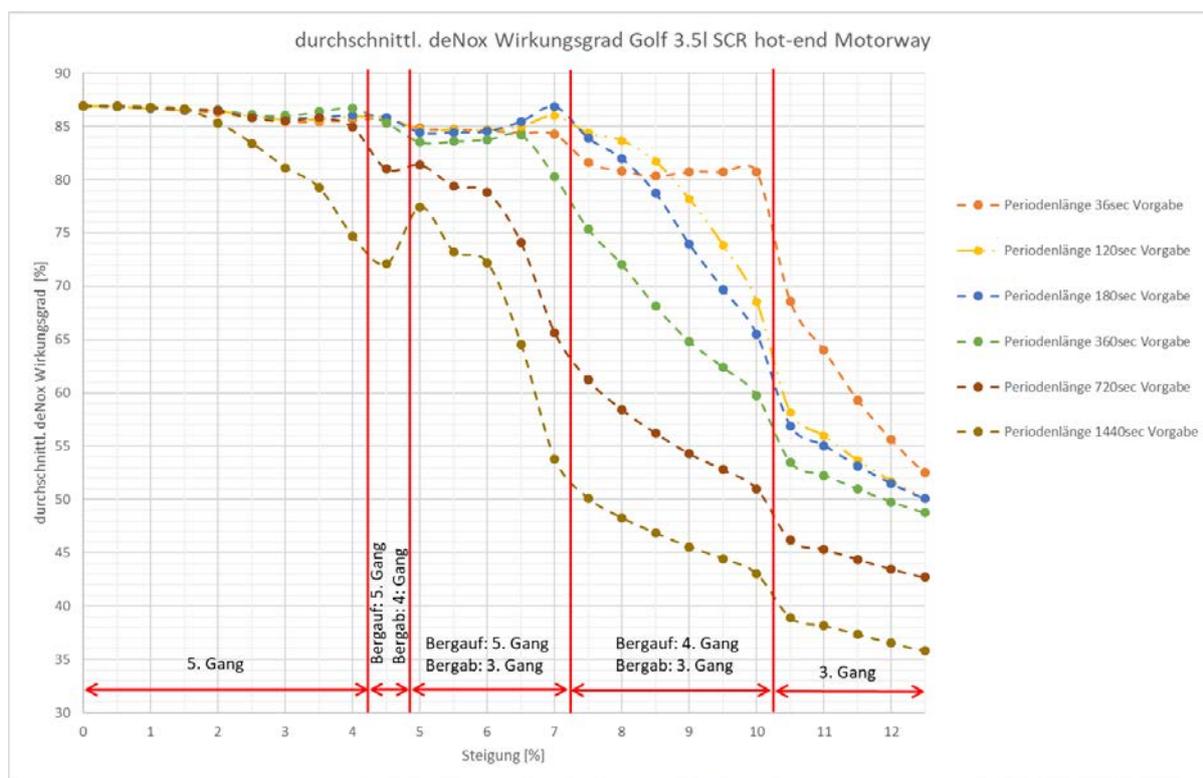


Abbildung 5-30: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Autobahnteil, VW Golf

Der Anstieg der Konvertierungsrate bei Periodenlängen größer 720 Sekunden und bei einer Steigung von 5 % gegenüber einer Steigung von 4.5 % ist auf eine niedrigere Abgastemperatur bei der Steigung von 4.5% zurückzuführen, erkennbar in Abbildung 5-31. In dem auftretenden Temperaturbereich von 140 °C bis 160 °C fällt die Konvertierungsrate stark ab, dargestellt im

Konvertierungskennfeld in Abbildung 4-4.

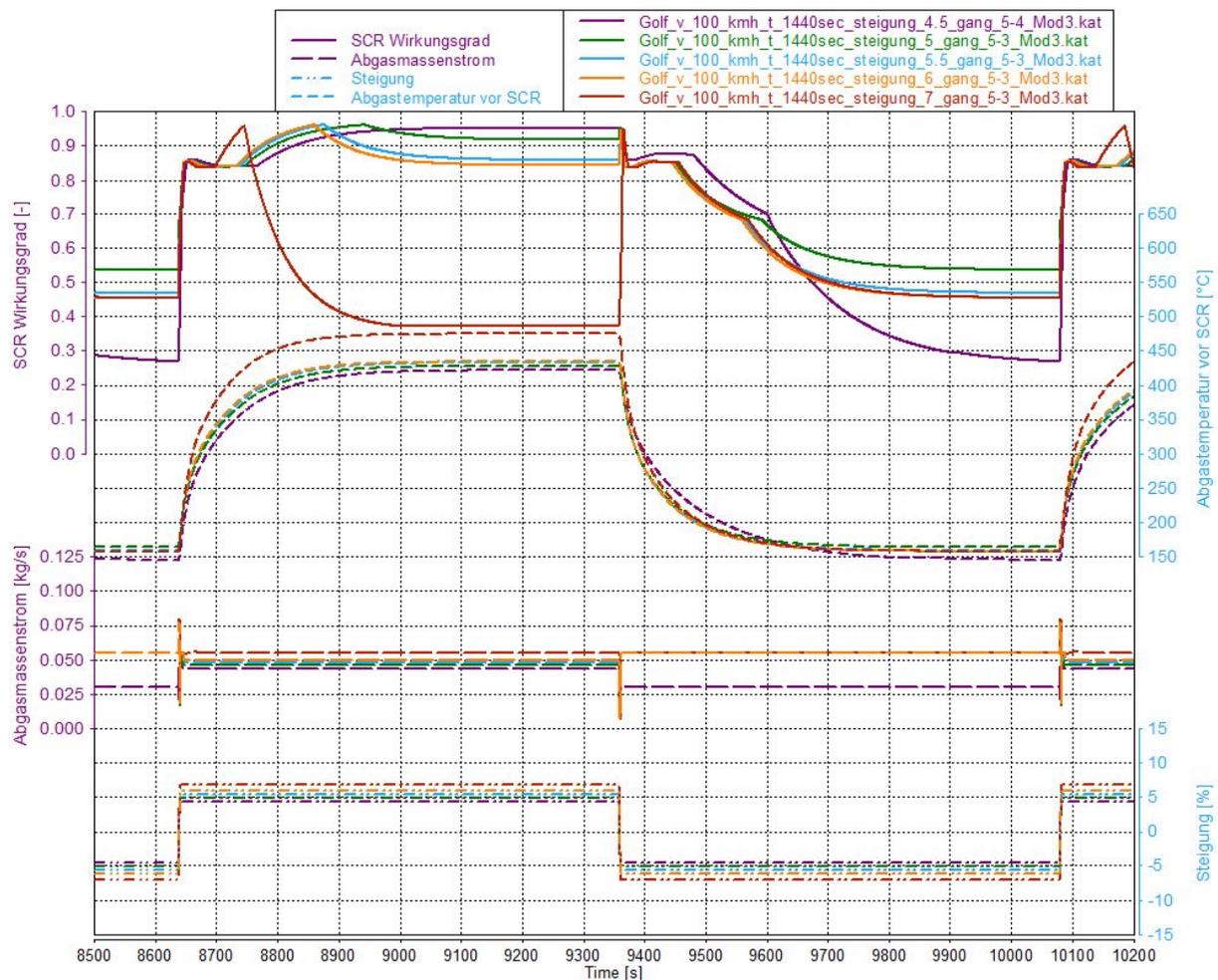


Abbildung 5-31: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 4.5 % 5 %, 5,5 %, 6 % und 7 %, Periodenlänge 1440 sec, Überlandteil

In Abbildung 5-32 sind die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT in Abhängigkeit der Steigung für den Autobahnanteil eines RDE Zyklus dargestellt. Wie schon beim Überlandteil des RDE Zyklus stellt sich der zu erwartende Verlauf der Emissionen ein. Mit zunehmender Steigung steigt die benötigte Motorleistung um die vorgegebene Geschwindigkeit konstant zu halten und mit ihr auch die Rohemissionen des Motors. Zusammen mit der abfallenden Konvertierungsrate des SCR Katalysators ergeben sich steigende NO<sub>x</sub> Emissionen EoT.

Der Sprung der NO<sub>x</sub> Emissionen bei einer Steigung von 10.5 % ist auf den durch das Schalten vom 4. Gang in den 3. Gang veränderten Lastpunkt des Motors, indem es zu erhöhten Rohemissionen des Motors kommt, zurückzuführen. Dies ist ersichtlich in Abbildung 5-33.

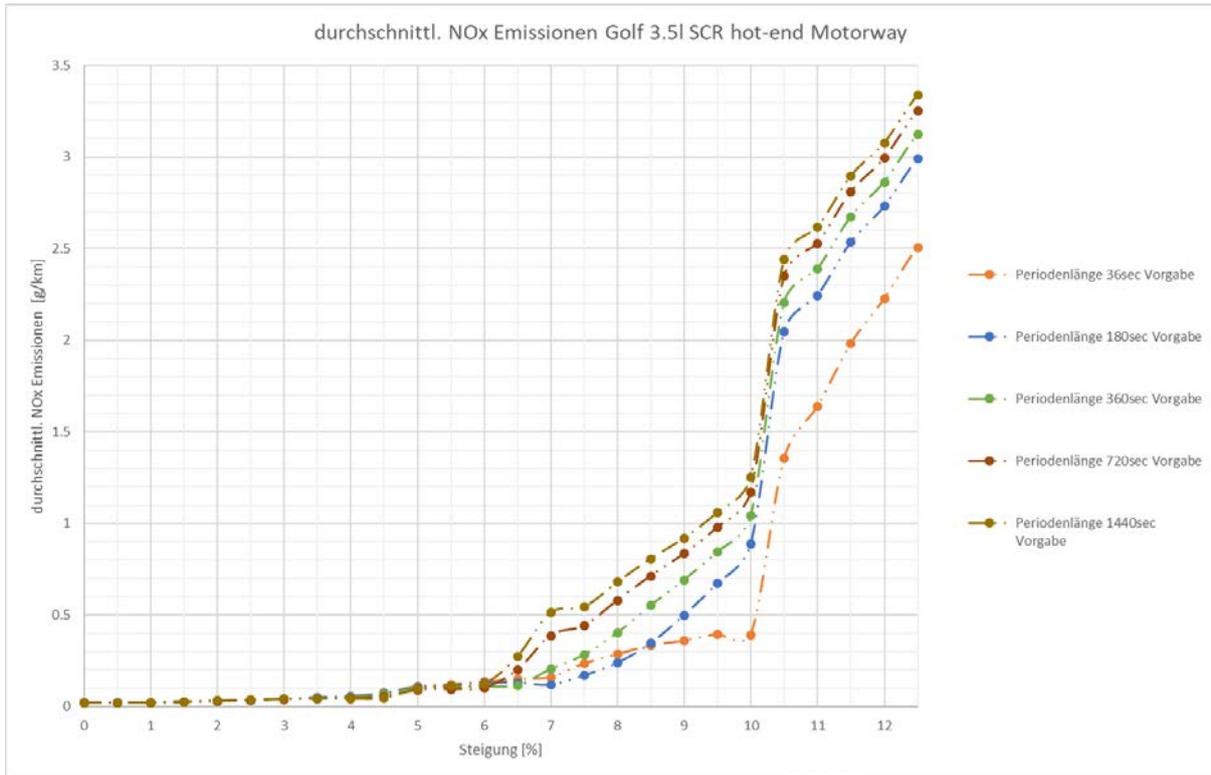


Abbildung 5-32: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen über der Steigung, Autobahnteil, VW Golf

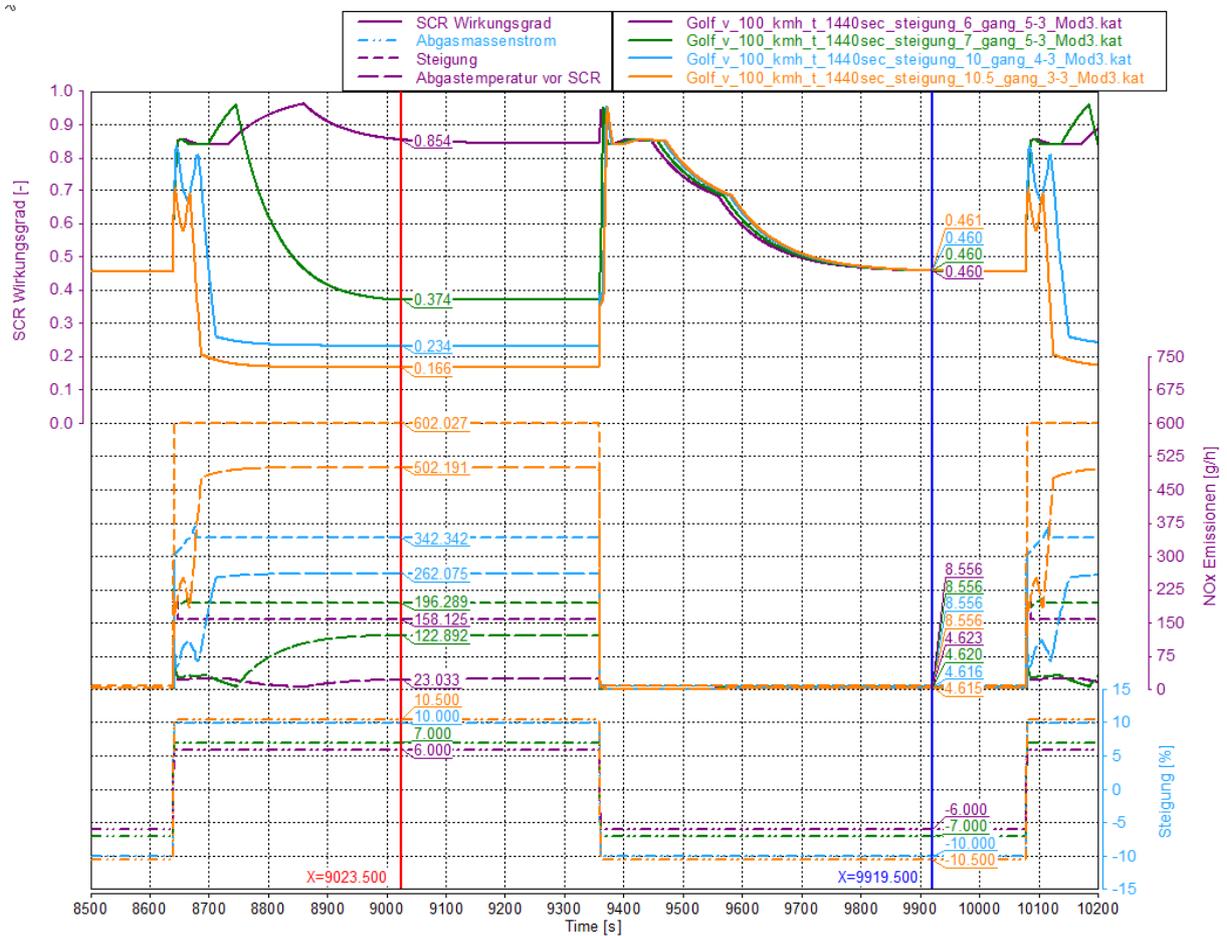


Abbildung 5-33: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 6 %, 7 %, 10 % und 10.5 %, Periodenlänge 1440 sec, Überlandteil

## 5.2.2 Mercedes Sprinter

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation mit Gangvorgabe für den Mercedes Sprinter mit einem motornahem 6 Liter SCR-Katalysator erläutert.

In Abbildung 5-34 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung für den Urbanteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Werte der Konvertierungsrate entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen. Es zeigt sich bei Periodenlängen bis 180 Sekunden und Steigungen bis 5 % eine annähernd konstante Konvertierungsrate aufgrund eines Massenstroms von 0.03 kg/s bis 0.06 kg/s und einer Temperatur von 240 °C bis 300°C. Wie im SCR-Kennfeld in Abbildung 4-7 ersichtlich, ist in diesem Bereich die Änderung der Konvertierungsrate minimal. Ab einer Periodenlänge größer 180 Sekunden kommt es in diesem Steigungsbereich zu einem Abfall der Konvertierungsrate, welcher mit steigender Steigung bzw. Gefälle zunimmt. Dies ist auf eine weiter absinkende Temperatur in der Bergabphase aufgrund der längeren Periodendauer zurückzuführen. Dargestellt sind die genannten Zusammenhänge in der Abbildung 5-35 und Abbildung 5-36.

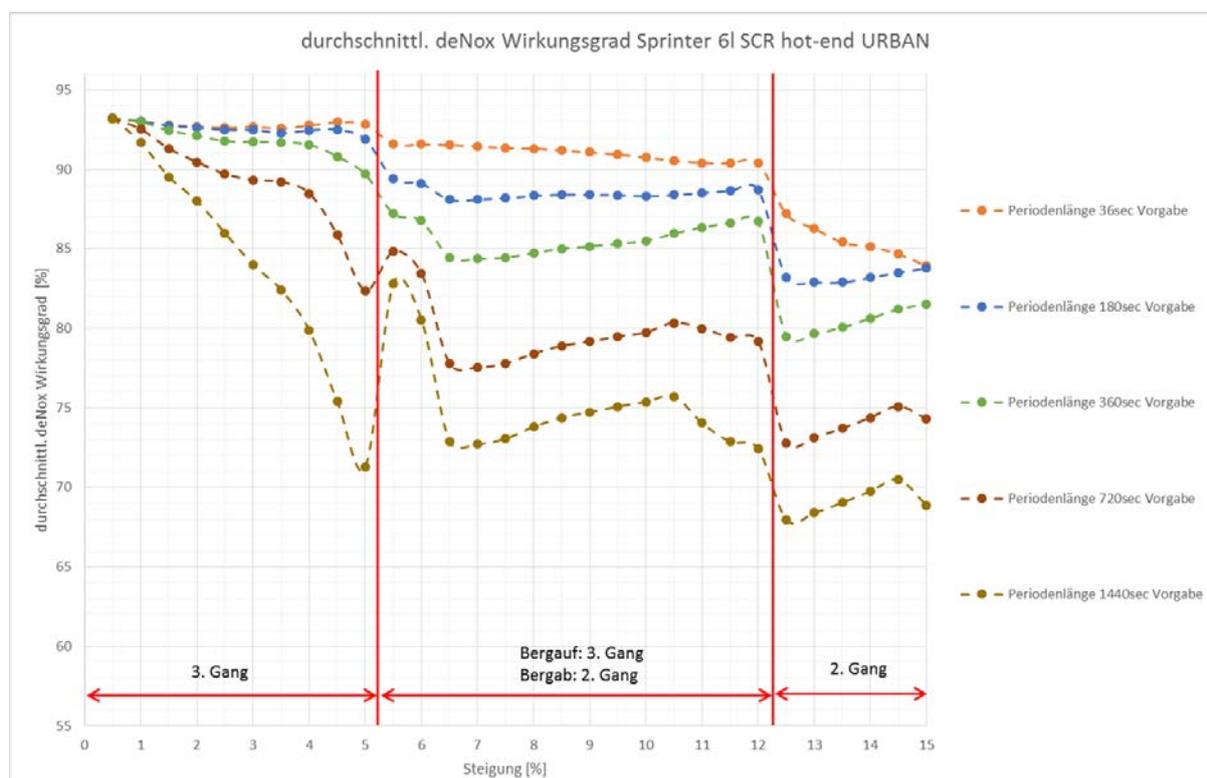


Abbildung 5-34: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Stadtteil, Sprinter

Bei einer Steigung von 5,5 % und Periodenlängen kleiner 720 Sekunden kommt es zu einem Abfall der Konvertierungsrate wegen des höheren Massenstroms aufgrund des Schaltens in den 2. Gang in der Bergabphase, dargestellt in Abbildung 5-35. Ab einer Periodenlänge von 720 Sekunden kommt es im Gegensatz hierzu zu einem Anstieg der Konvertierungsrate infolge der höheren Abgastemperatur im 2. Gang. Dies wirkt sich erst bei einer längeren Periodendauer aus, da es durch die höhere Abgastemperatur zu einer geringeren Abkühlung des SCR-Katalysators in der Bergabphase kommt, dargestellt in Abbildung 5-36.

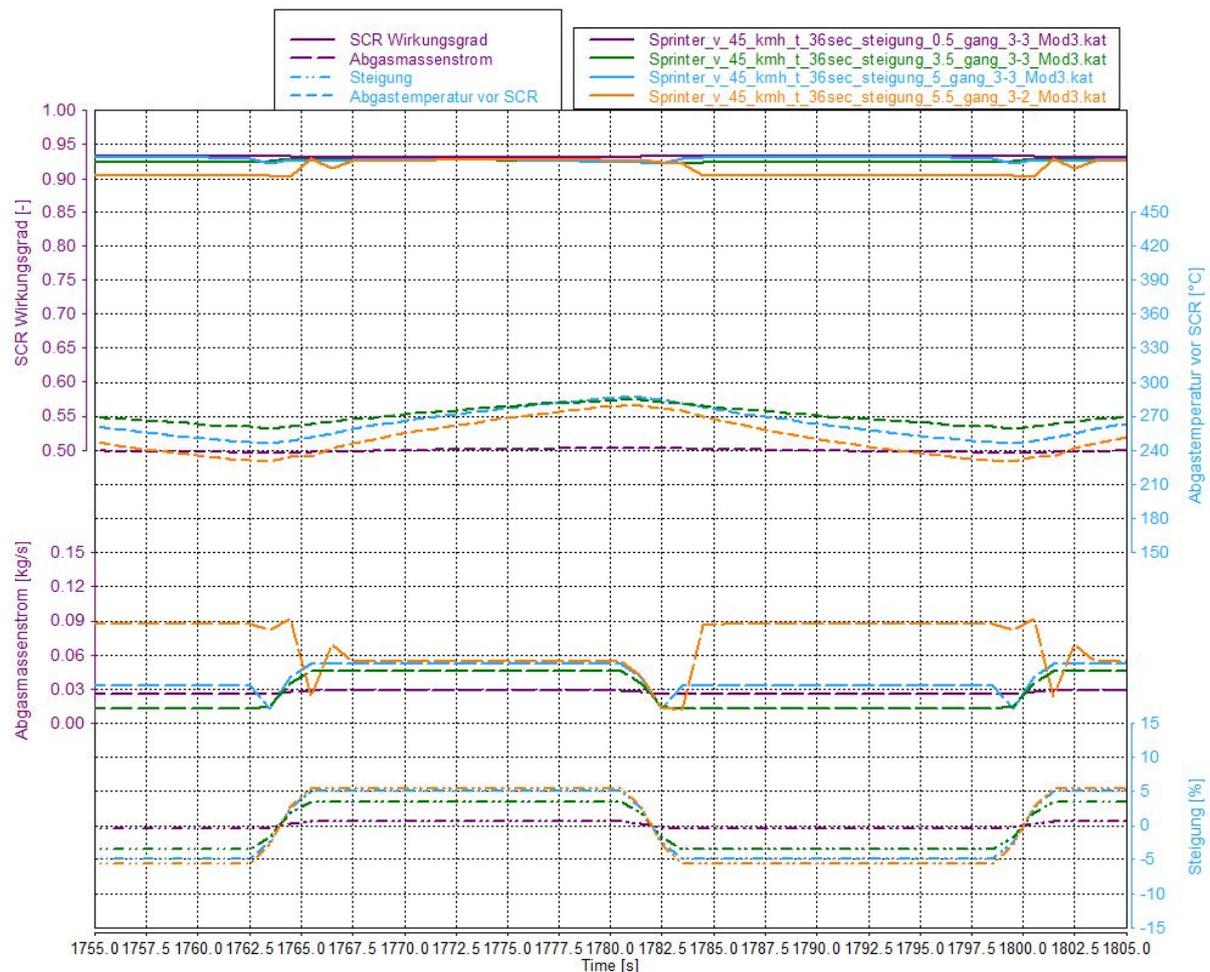


Abbildung 5-35: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 0.5 %, 3.5 %, 5 % und 5.5 %, Periodenlänge 36 sec, Stadtteil

Des Weiteren ist in Abbildung 5-34 zu erkennen, dass es bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden und Steigungen zwischen 5.5 % und 15 % zu einem Abfall der Konvertierungsrate kommt. Dieser ist auf den mit zunehmender Steigung größer werdenden Abgasmassenstrom in der Beraufphase zurückzuführen. Der starke Abfall der Konvertierungsrate bei 12.5 % Steigung lässt sich durch das Schalten in den 2. Gang erklären, da es dadurch zu einer Erhöhung des Abgasmassenstromes kommt. Dargestellt wird dies in Abbildung 5-37.

Bei Periodenlängen ab 720 Sekunden und Steigungen von 5.5 % bis 6 % erfolgt ein starker Abfall der Konvertierungsrate infolge einer sinkenden Abgastemperatur in der Bergabphase und somit einer stärkeren Auskühlung des SCR Katalysators in dieser.

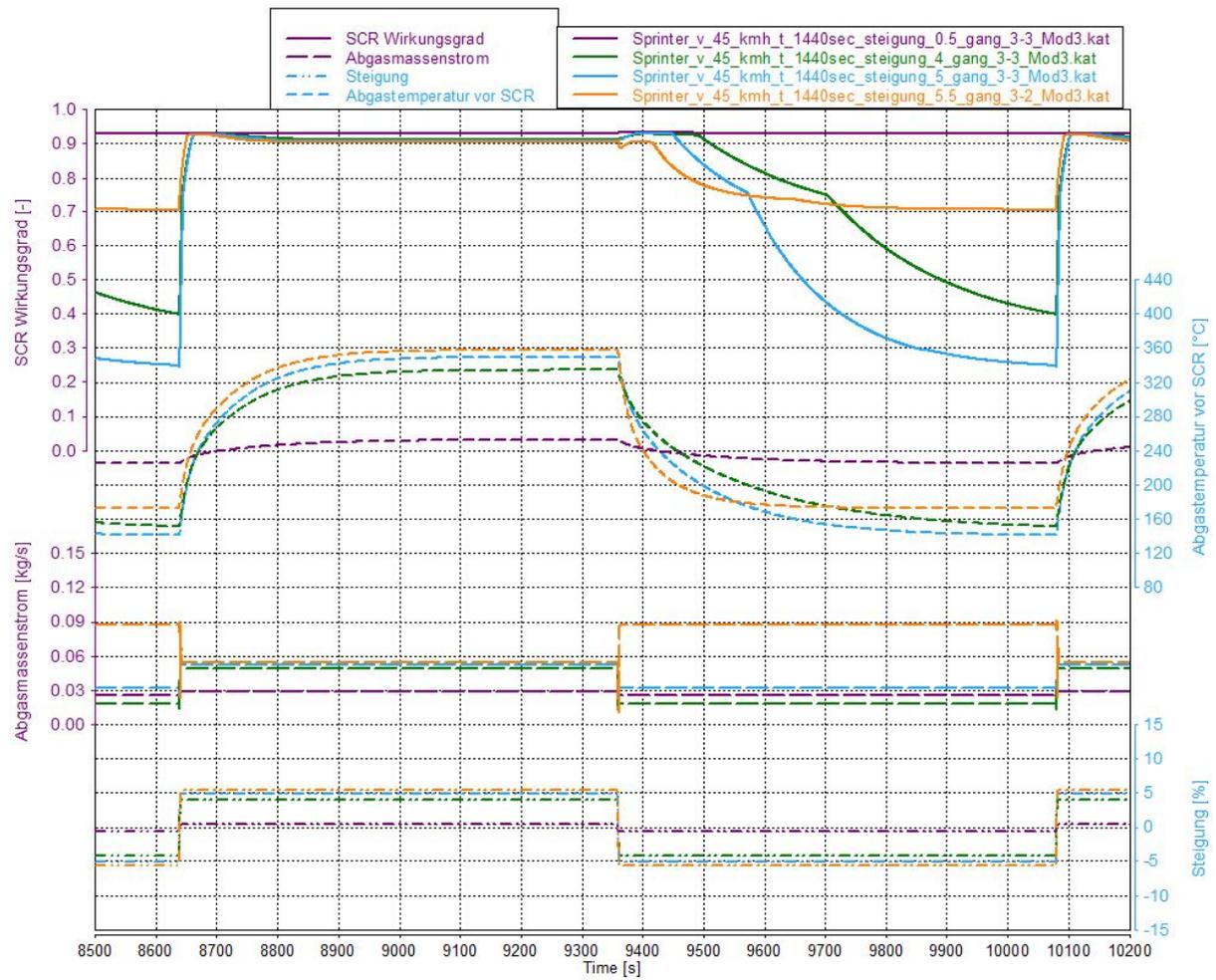


Abbildung 5-36: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 0.5 %, 4 %, 5 % und 5.5 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

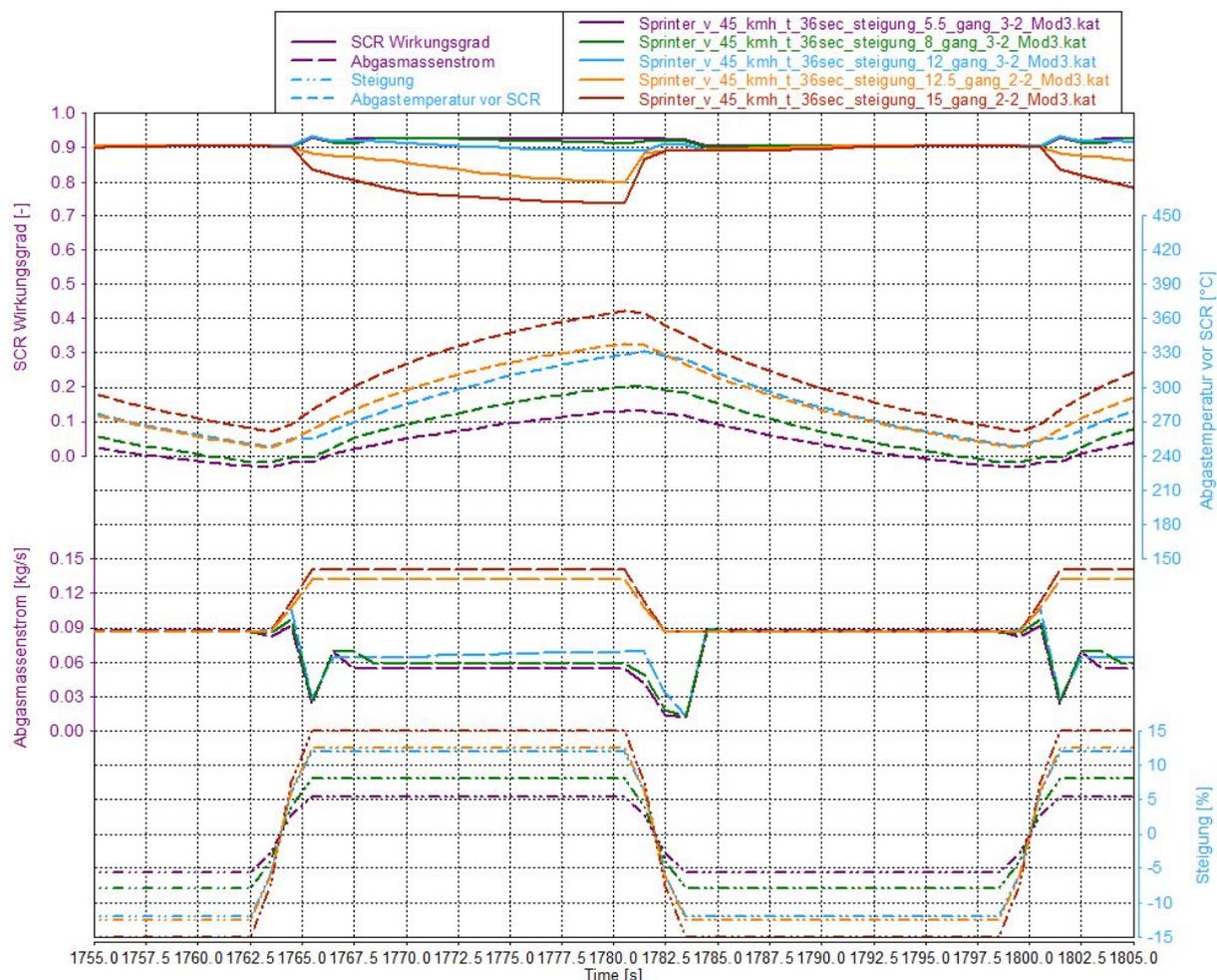


Abbildung 5-37: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 5.5 %, 8 %, 12 %, 12.5 % und 15 %, Periodenlänge 36 sec, Stadtteil

Ab Periodenlängen größer 180 Sekunden kommt es zwischen einer Steigung von 6.5 % und 12 %, bei Periodenlängen größer 360 Sekunden bis 10.5 %, zu einem Anstieg der Konvertierungsrate infolge der mit größer werdender Steigung steigenden Abgastemperatur in der Bergaufphase, veranschaulicht in Abbildung 5-38. Dies ist auf eine steigende Motorleistung zurückzuführen. Der Abfall der Konvertierungsrate ab 11 % Steigung und Periodenlängen lässt sich auf das Erreichen einer Abgastemperatur größer 420°C zurückzuführen. Ab dieser sinkt die Konvertierungsrate ab, ersichtlich im Konvertierungskennfeld in Abbildung 4-7.

Der starke Abfall der Konvertierungsrate bei 12.5 % Steigung lässt sich, wie schon bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden, durch das Schalten in den 2. Gang erklären, da es dadurch zu einer Erhöhung des Abgasmassenstromes kommt. Ab einer Steigung von 13 % steigt, im Gegensatz zu einer Periodenlänge von 36 Sekunden, die Konvertierungsrate mit zunehmender Steigung an. Dies geschieht infolge der höheren Abgastemperatur aufgrund der längeren Periodendauer. Durch dies wird wie schon zuvor für eine Steigung von 6.5 % bis 10.5 % in der Bergaufphase das Optimum der Konvertierung erreicht, dargestellt für eine Periodenlänge von 1440 Sekunden in Abbildung 5-39.

Die Konvertierungsrate ist infolge der niedrigeren Abgastemperaturen bei Periodenlängen größer 180 Sekunden geringer als bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden, obwohl bei Periodenlängen größer 180 Sekunden die Konvertierungsrate in der Bergaufphase höher ist.

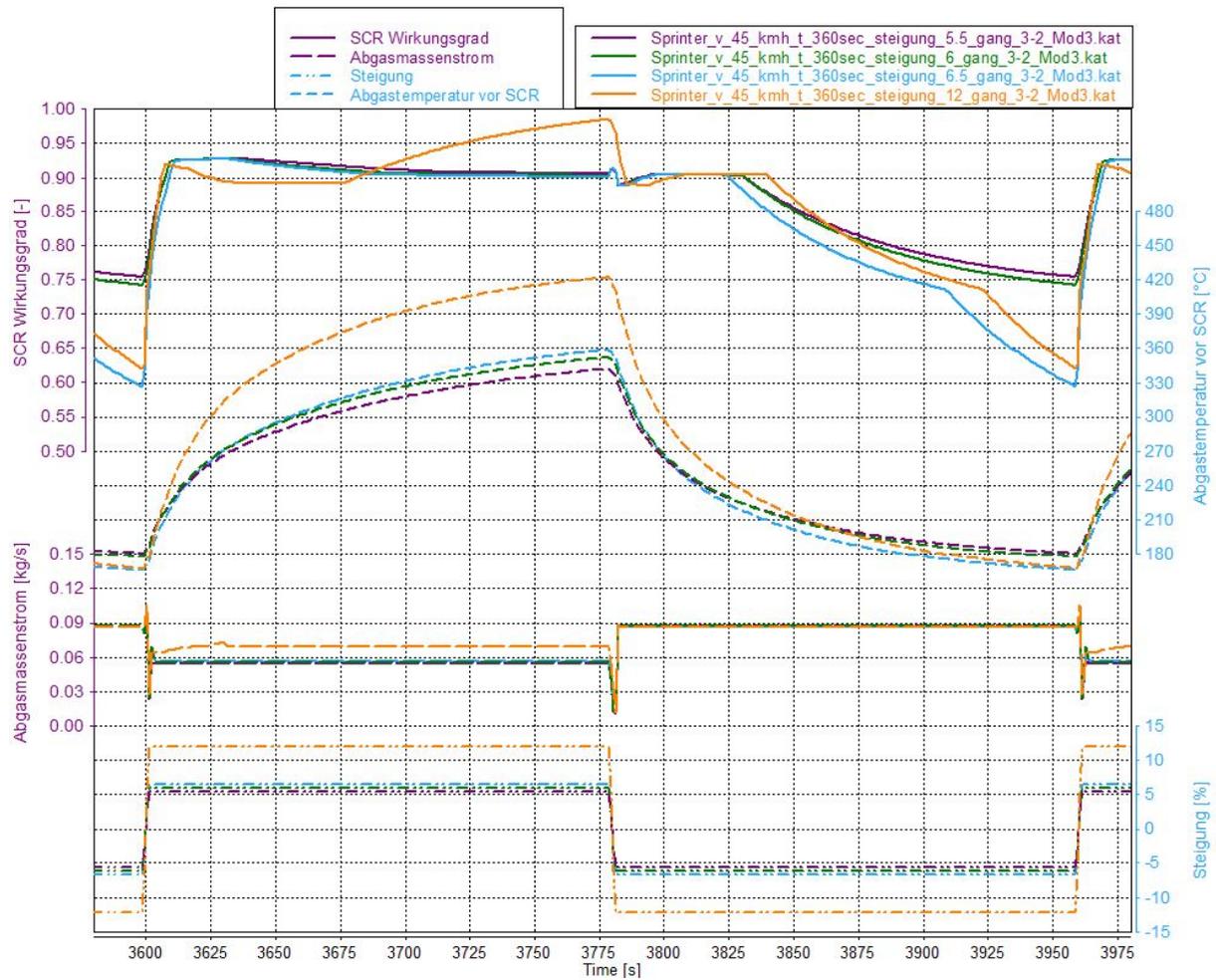


Abbildung 5-38: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 5.5 %, 6 %, 6.5 % und 12 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

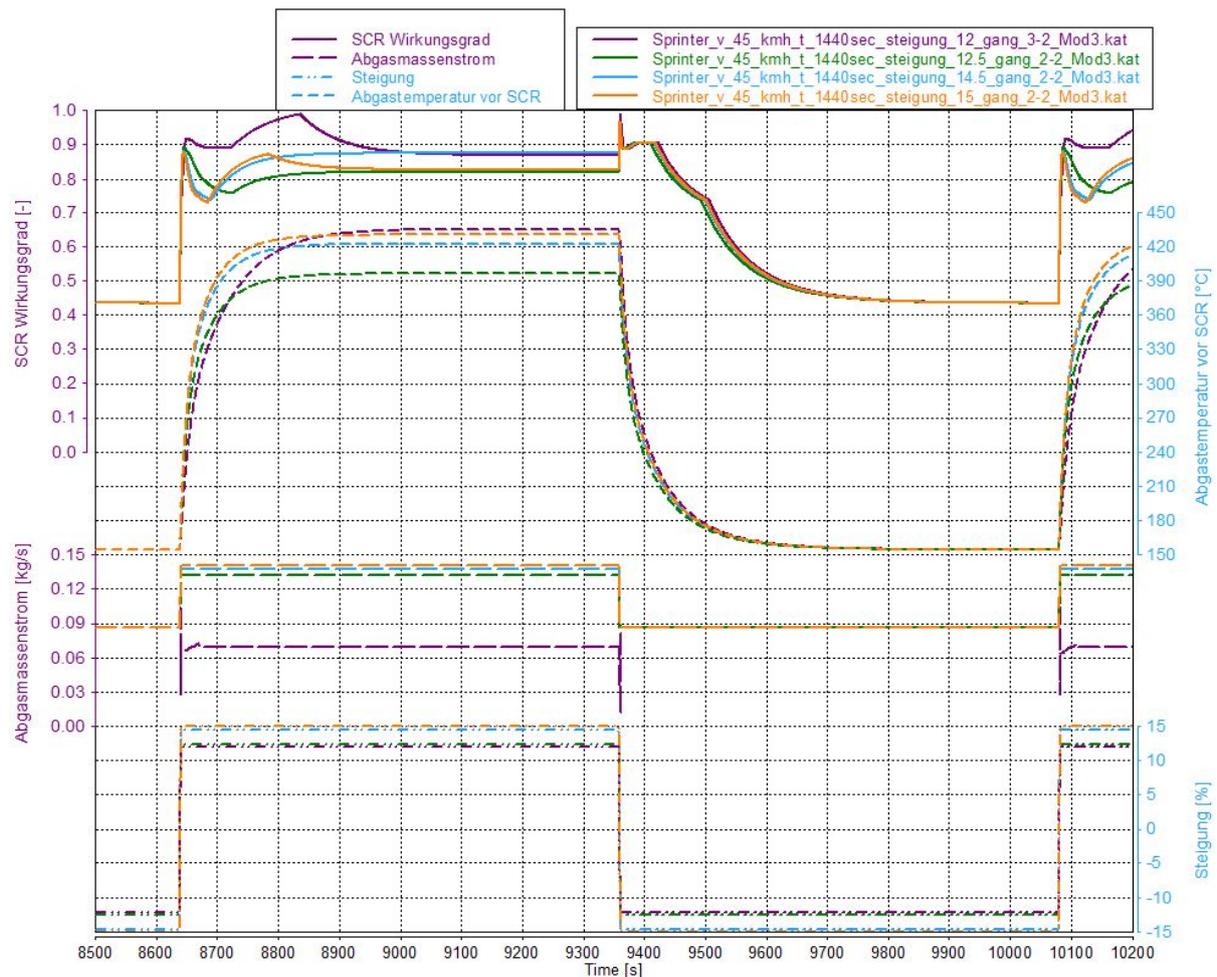


Abbildung 5-39: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 12 %, 12.5 % 14.5 % und 15 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

In Abbildung 5-40 sind die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT in Abhängigkeit der Steigung für den Stadtteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Werte der  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT entsprechen dem arithmetischen Mittelwert über zehn Perioden. Für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts wurden nur Perioden mit eingeschwungen Zustand herangezogen.

Es ist ersichtlich, dass bis zu einem Gefälle von 5 % die  $\text{NO}_x$  Emission EoT annähernd konstant bleiben. Dies lässt sich aus den bereits in Abbildung 5-35 erläuterten Zusammenhänge ableiten.

Bei einem Gefälle von 5.5 % erfolgt ein Schaltvorgang in den 2. Gang, dies führt zu einer Erhöhung der Motorleistung in der Bergabphase, in welcher dadurch die Rohemissionen steigen und infolge der geringen Konvertierungsrate auch die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT. Ab einem Gefälle von 7.5 % befindet sich der Motor wieder im Schubetrieb, die Rohemissionen sinken wieder und infolge auch die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT. Dies ist dargestellt in Abbildung 5-41.

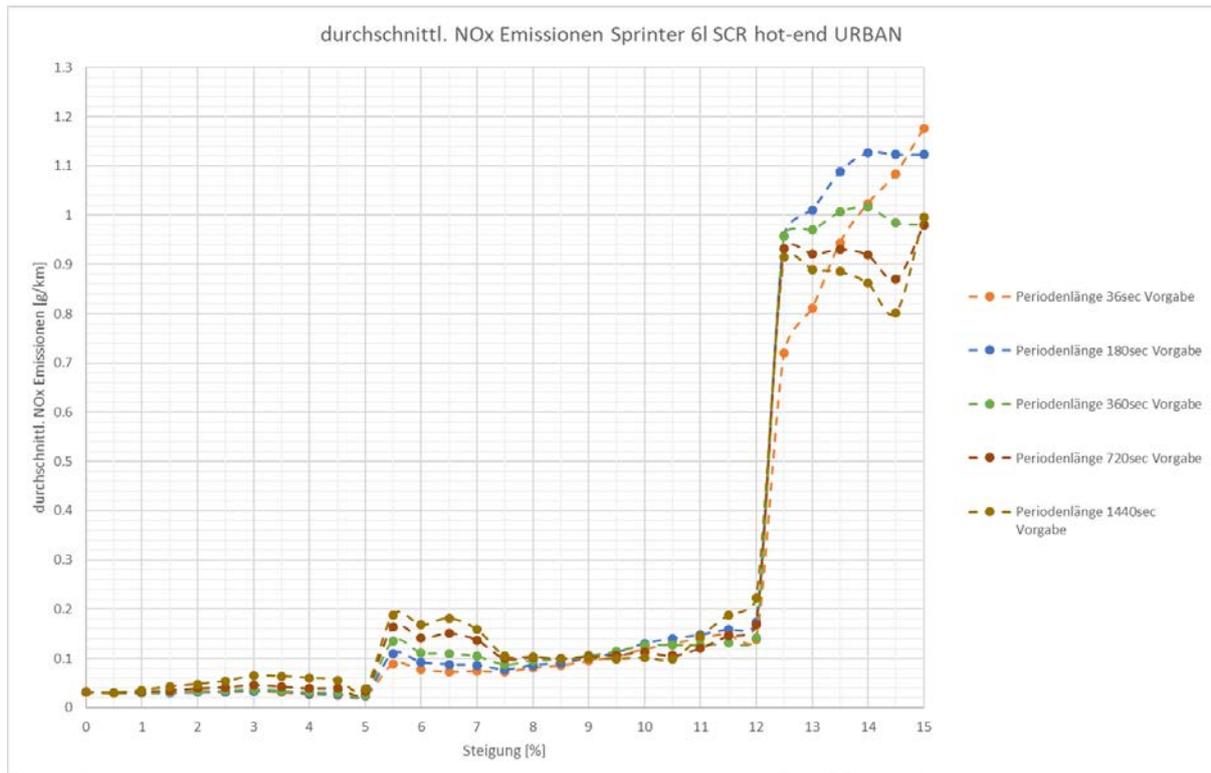


Abbildung 5-40: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Stadtteil, Sprinter

Des Weiteren ist in Abbildung 5-40 erkennbar, dass die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT zwischen 7.5 % und 12 % Steigung, aufgrund der steigenden benötigten Motorleistung um die vorgegebene Geschwindigkeit konstant zu halten, steigen. Bei einer Steigung von 12.5 % kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der NO<sub>x</sub> Emissionen EoT infolge des Schaltens in den 2. Gang. Durch diesen Schaltvorgang verändert sich der Betriebspunkt des Motors, welches zu einem Anstieg der Rohemissionen führt, dargestellt in der Abbildung 5-42 für eine Periodenlänge von 36 Sekunden und in der Abbildung 5-43 für eine Periodenlänge von 1440 Sekunden.

Ab einer Steigung von 12.5 % sind NO<sub>x</sub> Emissionen bei längerer Periodendauer höher als bei kurzen Periodenlängen. Dies ist zurückzuführen auf die höhere Konvertierungsrate in der Bergaufphase bei längeren Periodenlängen wie bereits zuvor in der Abbildung 5-37 und Abbildung 5-39 erläutert.

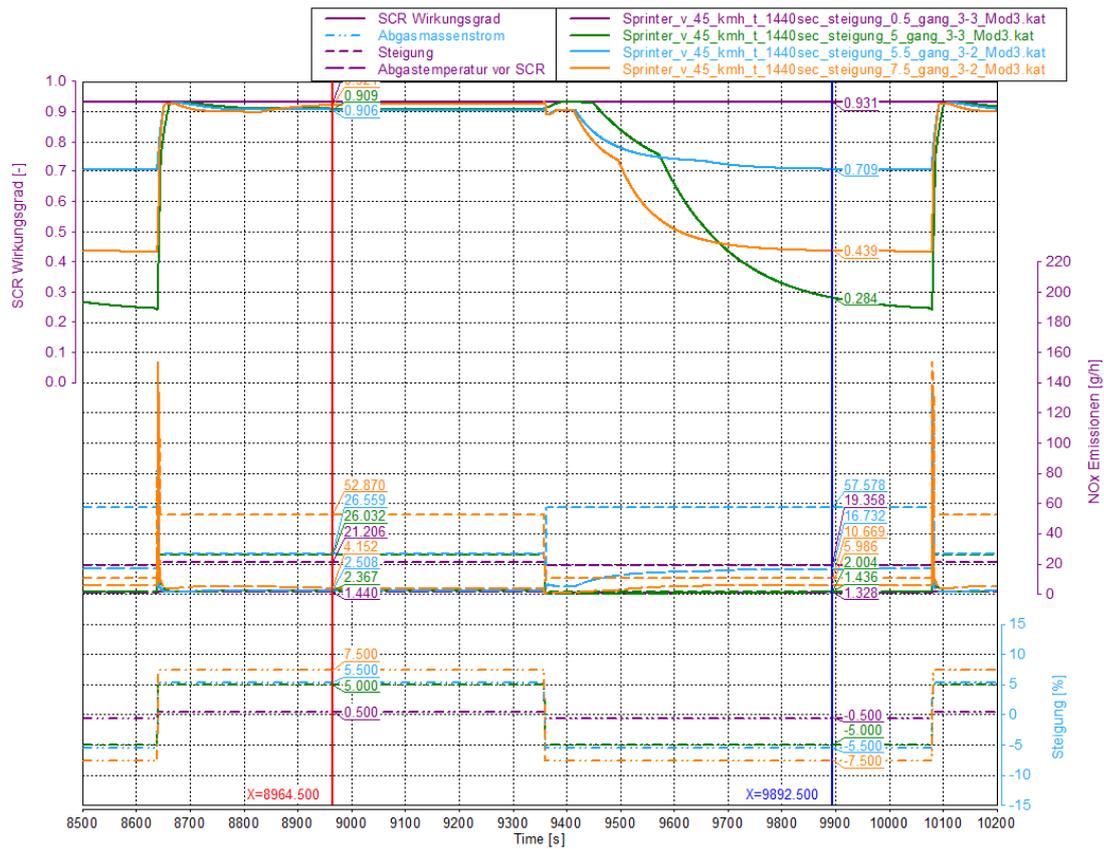


Abbildung 5-41: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 0.5 %, 5 %, 5.5 %, und 7.5 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

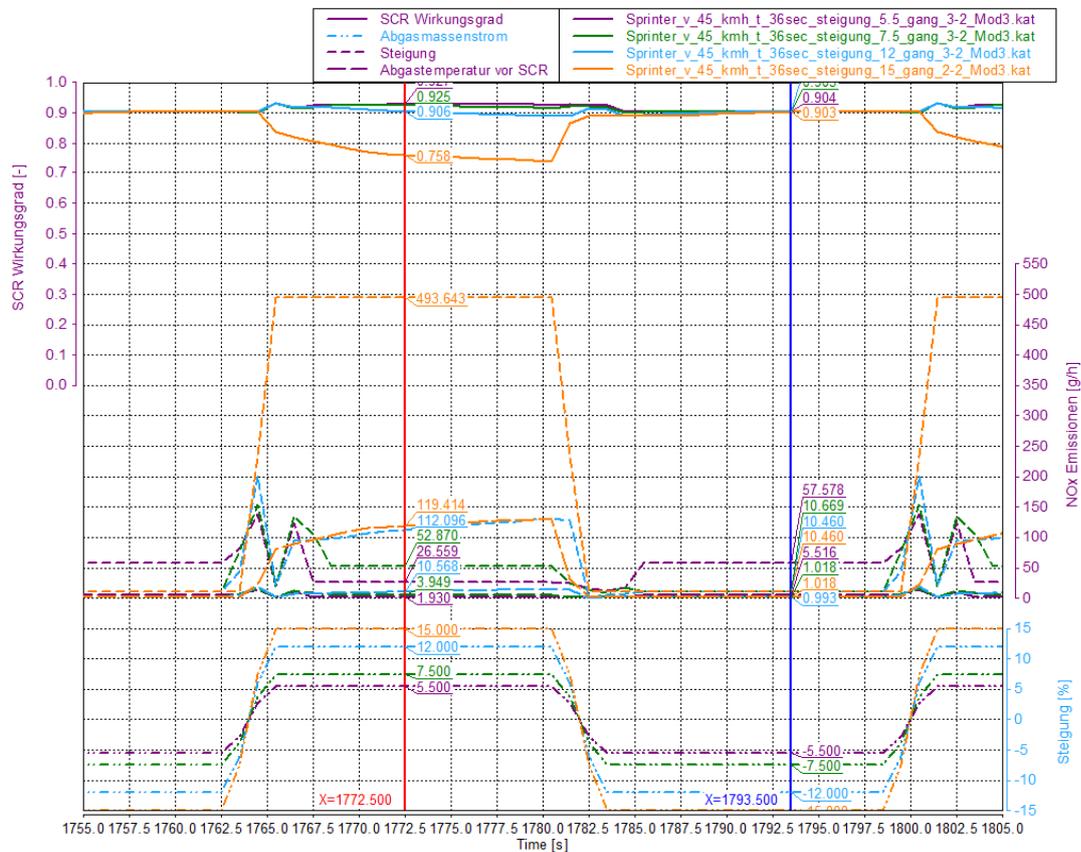


Abbildung 5-42: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 7.5 %, 12 %, 12.5 %, und 15 %, Periodenlänge 36 sec, Stadtteil

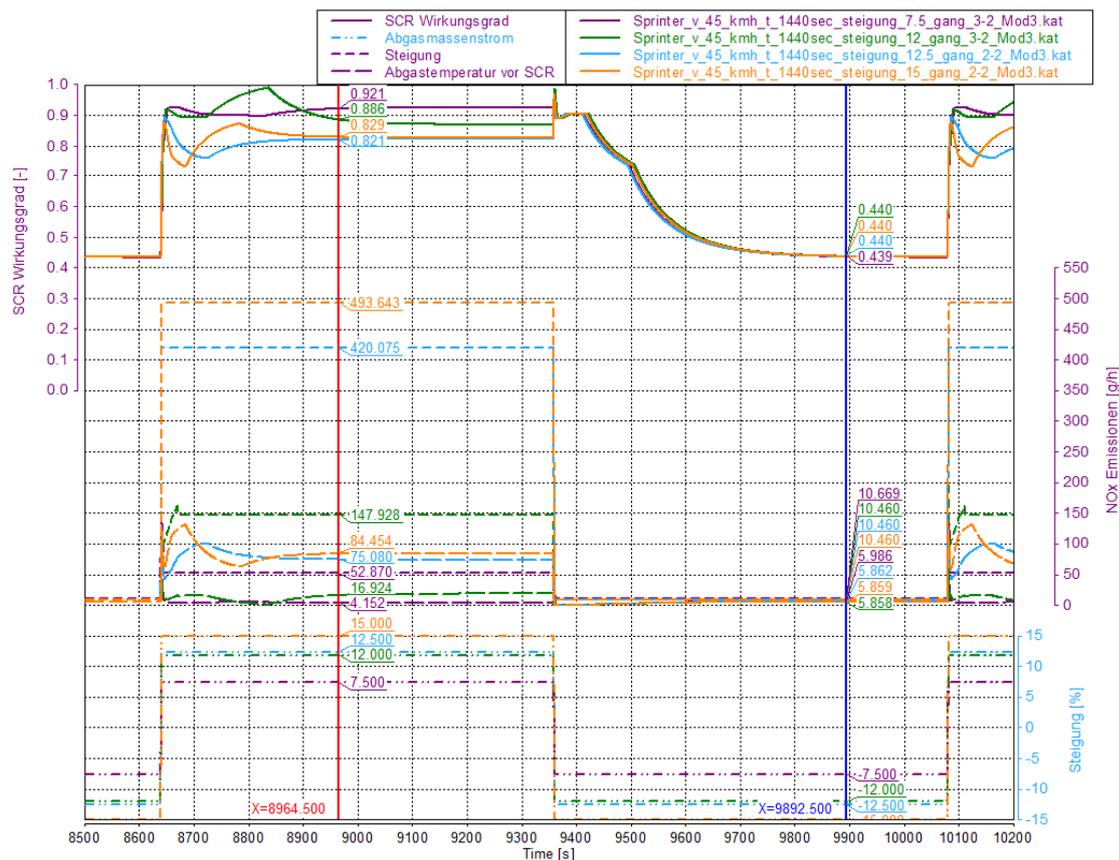


Abbildung 5-43: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 7.5 %, 12 %, 12.5 %, und 15 %, Periodenlänge 1440 sec, Stadtteil

In Abbildung 5-44 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung für den Überlandteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Simulation wurde bei einer Steigung von 11 % abgebrochen, da ab dieser Steigung die vorgegebene Geschwindigkeit von 75 km/h nicht mehr erreicht wurde und mit der Dauer der Bergaufphase zu einer konstanten Geschwindigkeitsabnahme kommt und somit zu einem Abfall der Motorleistung und in weiterer Folge zu einem Anstieg der Konvertierungsrate kommt, dargestellt in Abbildung 5-45.

Des Weiteren zeigt sich bei Periodenlängen bis 720 Sekunden und Steigungen bis 4.5%, bei einer Periodenlänge von 36 Sekunden bis 6.5 % Steigung eine annähernd konstante Konvertierungsrate aufgrund eines Massenstroms von 0.04 kg/s bis 0.07 kg/s und einer Temperatur von 300°C bis 400°C. Wie im SCR-Kennfeld in Abbildung 4-7 ersichtlich ist, ist in diesem Bereich die Änderung der Konvertierungsrate minimal.

Der Anstieg der Konvertierungsrate bei einer Periodenlänge von 180 Sekunden und 360 Sekunden und einer Steigung von 5.5 % bis 6.5 % ist auf die bereits in Abbildung 5-38 erläuterten Zusammenhänge zurückzuführen.

Der Abfall der Konvertierungsrate bei Periodenlängen bis 360 Sekunden und der Steigung von 7 % ist durch eine Erhöhung des Abgasmassenstroms durch den Schaltvorgang von dem 4. Gang in den 3. Gang erklärbar. Danach kommt es zu einem Anstieg der Konvertierungsrate infolge der steigenden Abgastemperatur in der Bergaufphase, bevor die Konvertierungsrate wiederum abfällt, da die Abgastemperatur 430°C, welche das Ende des optimalen Bereichs der Konvertierung darstellt, überschreitet. Dies ist ersichtlich in Abbildung 5-46 sowie im Konvertierungskennfeld in Abbildung 4-7.

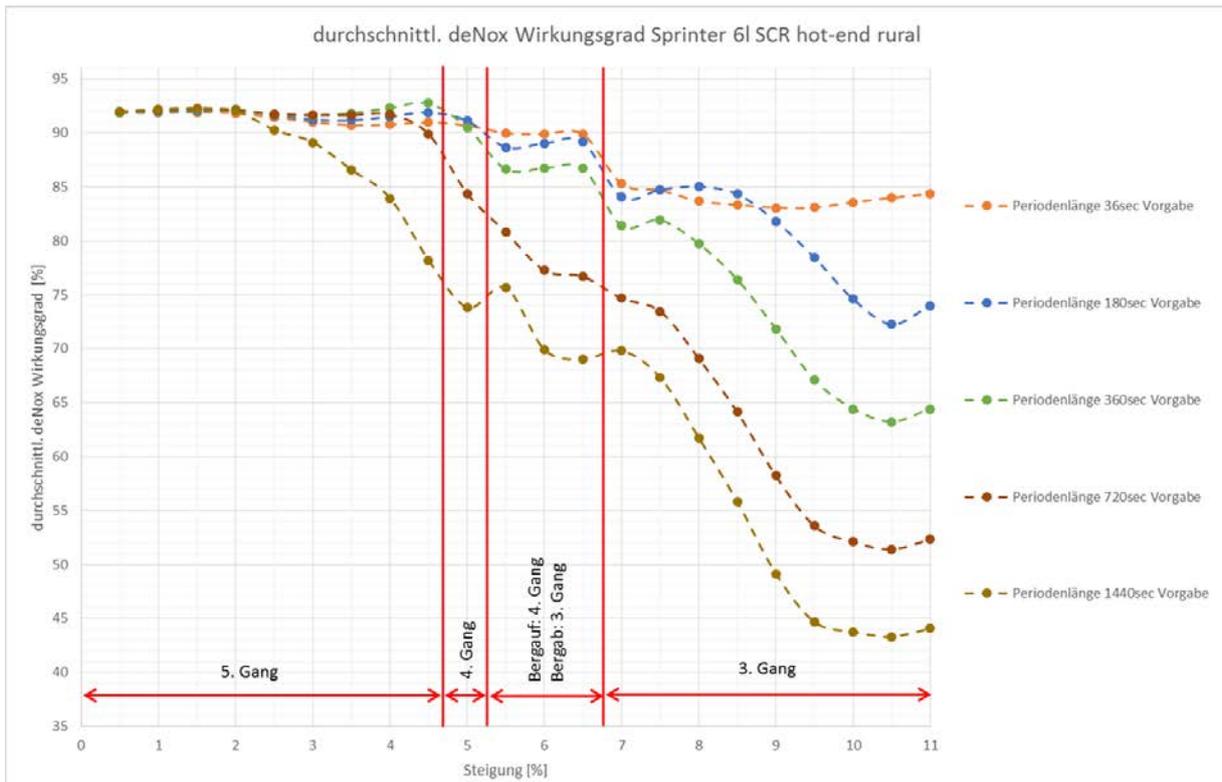


Abbildung 5-44: Durchschn. Konvertierungsrate über der Steigung, Überlandteil, Sprinter

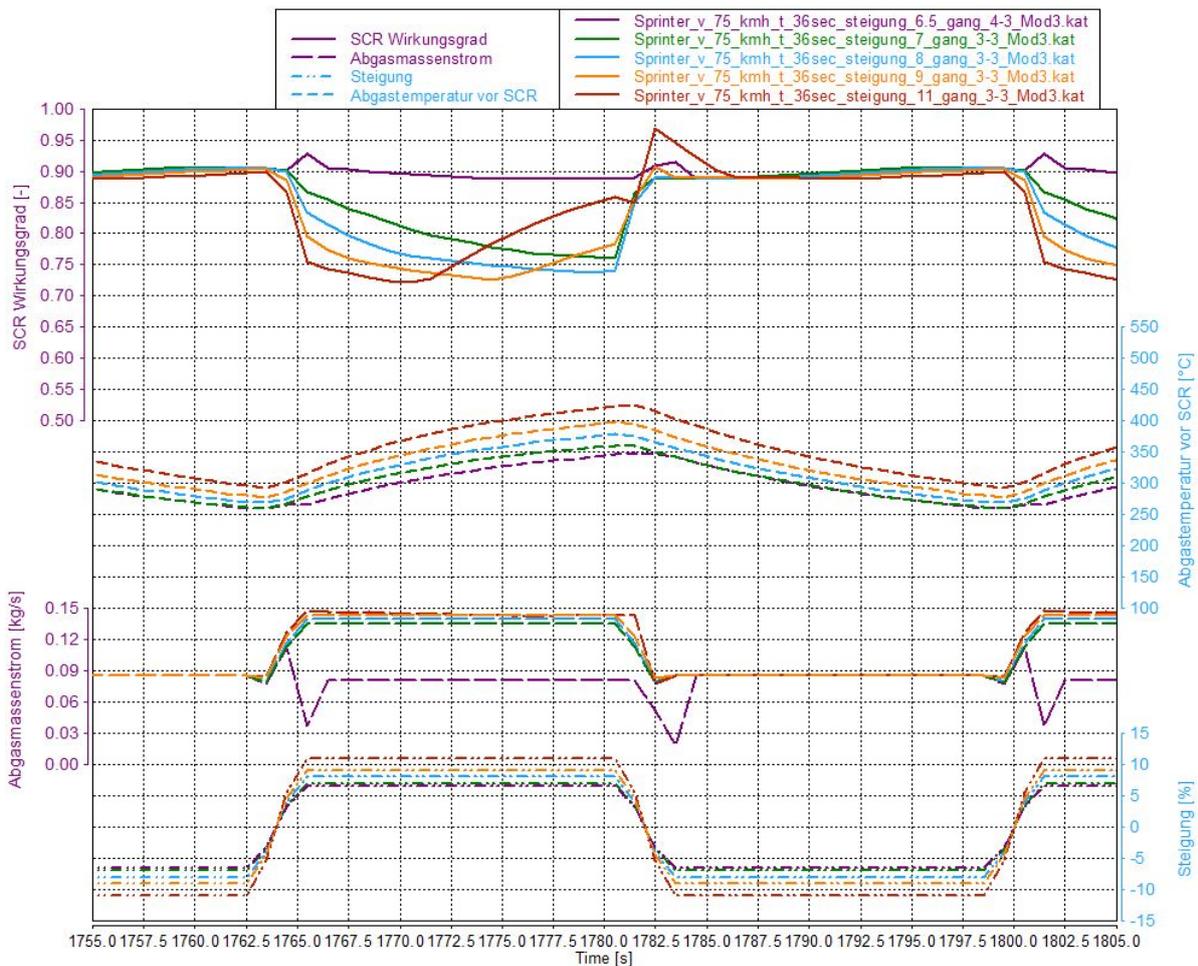


Abbildung 5-45: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 6.5 %, 7 %, 8 %, 9 % und 11 %, Periodenlänge 36 sec, Überlandteil

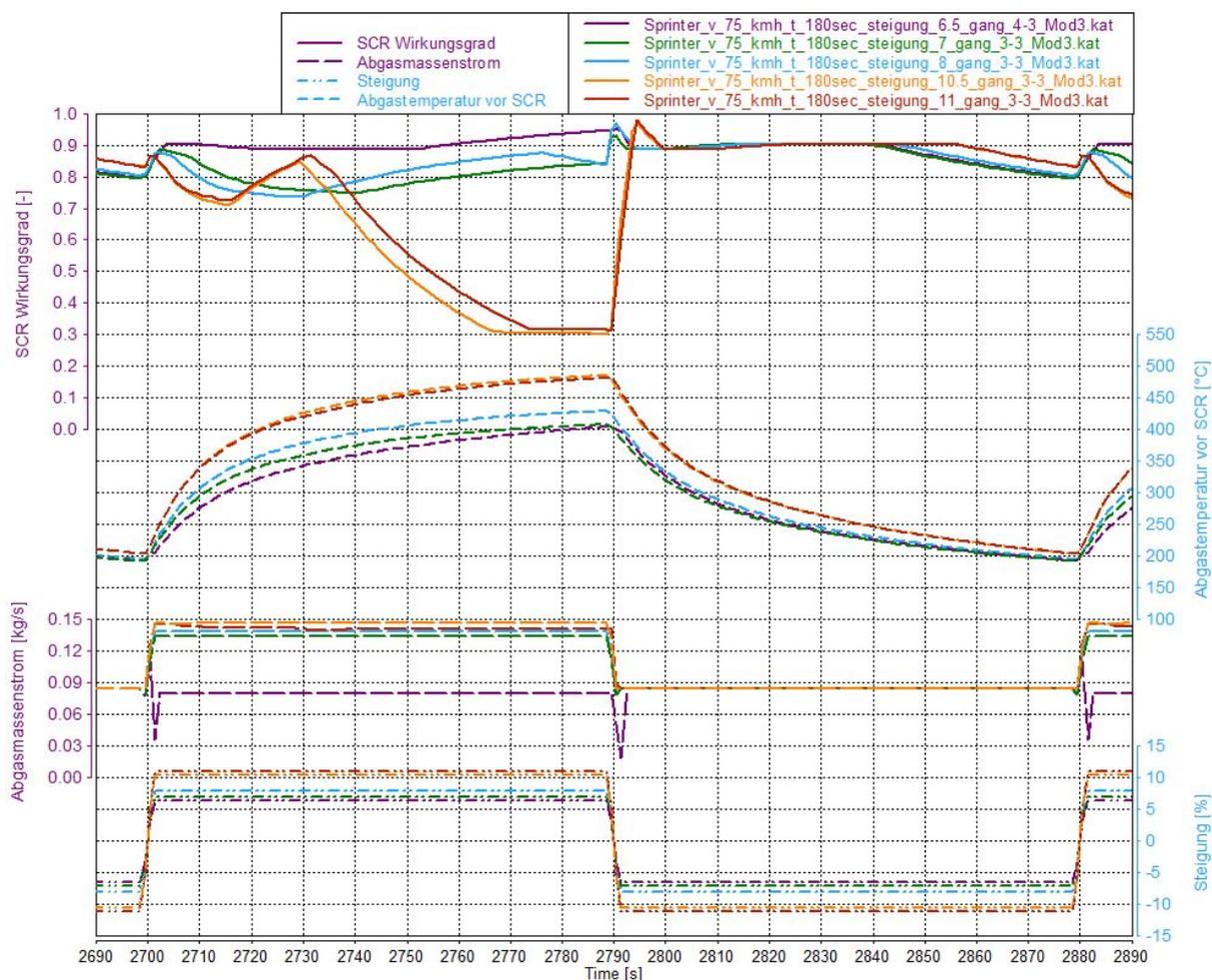


Abbildung 5-46: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 6.5 %, 7 %, 8 %, 9 % und 11 %, Periodenlänge 180 sec, Überlandteil

Bei einer Periodenlänge von 1440 Sekunden kommt es zu einem Absinken der Konvertierungsrate ab einer Steigung bzw. Gefälle von 2.5% aufgrund der Auskühlung des SCR Katalysators infolge der längeren Periodendauer, ersichtlich in Abbildung 5-47. Der Anstieg der Konvertierungsrate bei 5.5 % Steigung ist auf die bereits für Abbildung 5-36 erläuterten Zusammenhänge zurückzuführen. Bei der Periodenlänge von 1440 Sekunden und Steigungen von 6 % bis 6.5 % erfolgt ein starker Abfall der Konvertierungsrate infolge einer sinkenden Abgastemperatur in der Bergabphase und somit einer stärkeren Auskühlung des SCR Katalysators in dieser. Der Anstieg der Konvertierungsrate bei einer Steigung von 7 % sowie der darauffolgende Abfall ist auf die für Abbildung 5-46 erläuterten Zusammenhänge zurückzuführen.

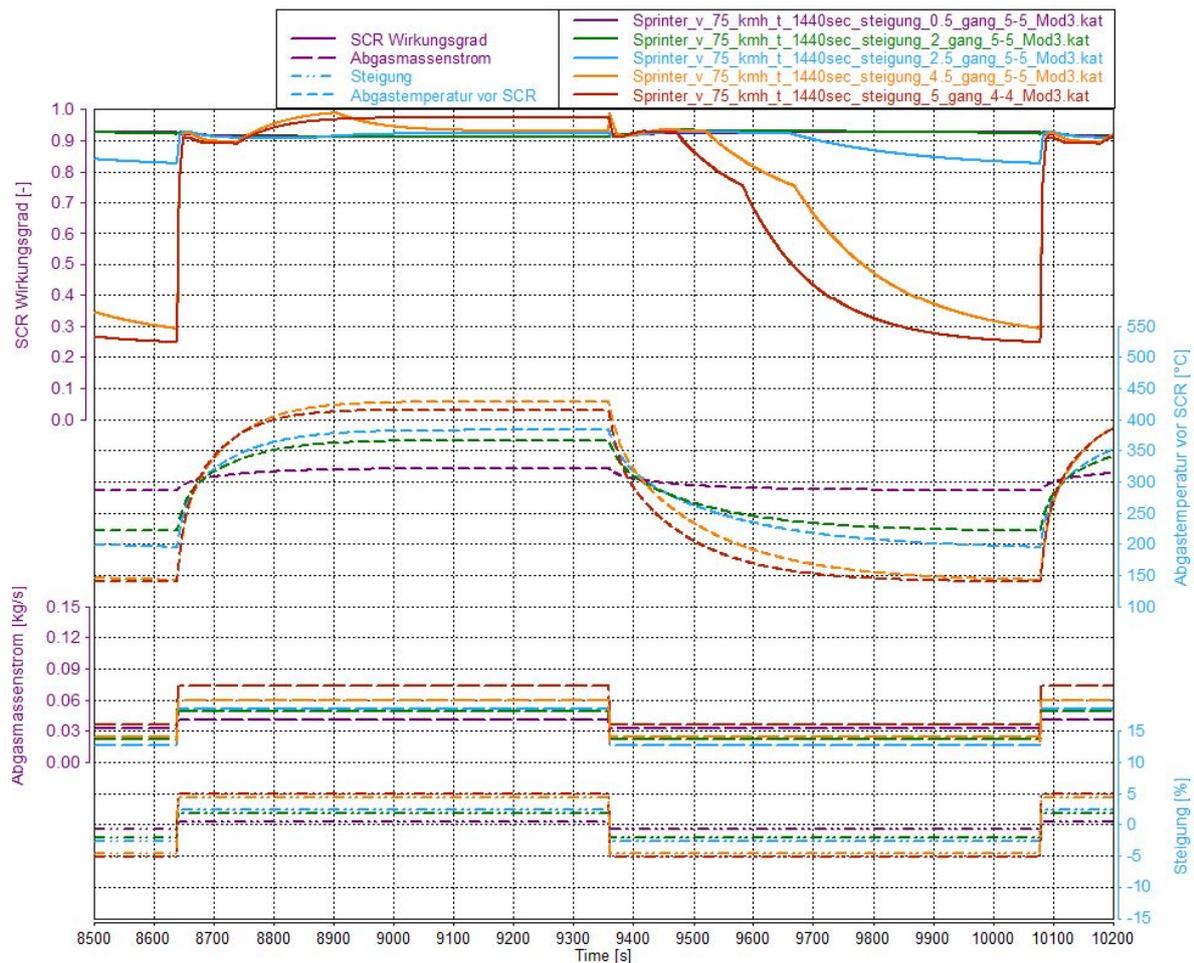


Abbildung 5-47: Konvertierungsrate, Abgastemperatur und Abgasmassenstrom bei Steigungen von 0.5 %, 2 %, 2.5 %, 4.5 % und 5 %, Periodenlänge 1440 sec, Überlandteil

In Abbildung 5-48 sind die  $\text{NO}_x$  Emissionen EoT in Abhängigkeit der Steigung für den Überlandteil eines RDE Zyklus dargestellt. Bis zu einer Steigung von 6.5 % kommt es nur zu einem geringen Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen EO, infolge der Lastpunktverschiebung aufgrund des Schaltvorgangs vom 4. Gang in den 3. Gang. Dies führt zusammen mit der sinkenden Konvertierungsrate zu einem ebenso sprunghaften Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Emissionen EoT. Dargestellt ist dieses Verhalten in Abbildung 5-49.

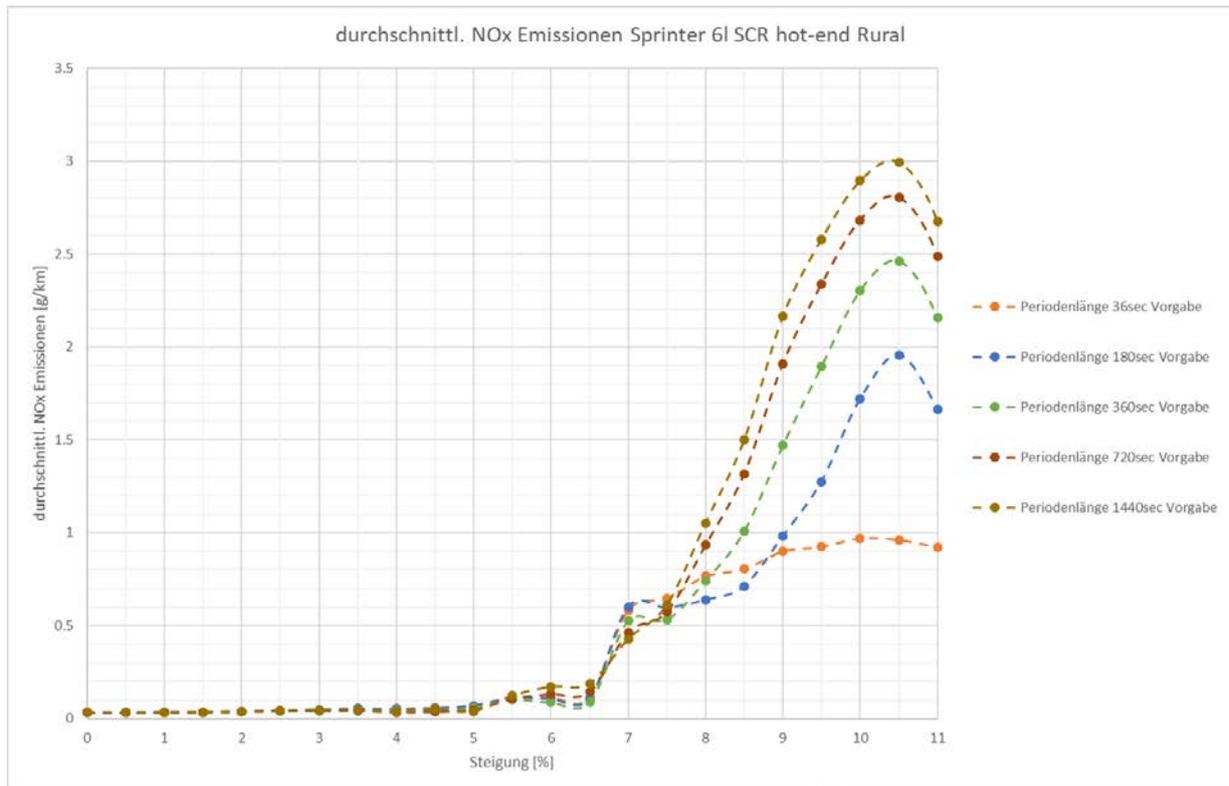


Abbildung 5-48: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Überlandteil, Sprinter

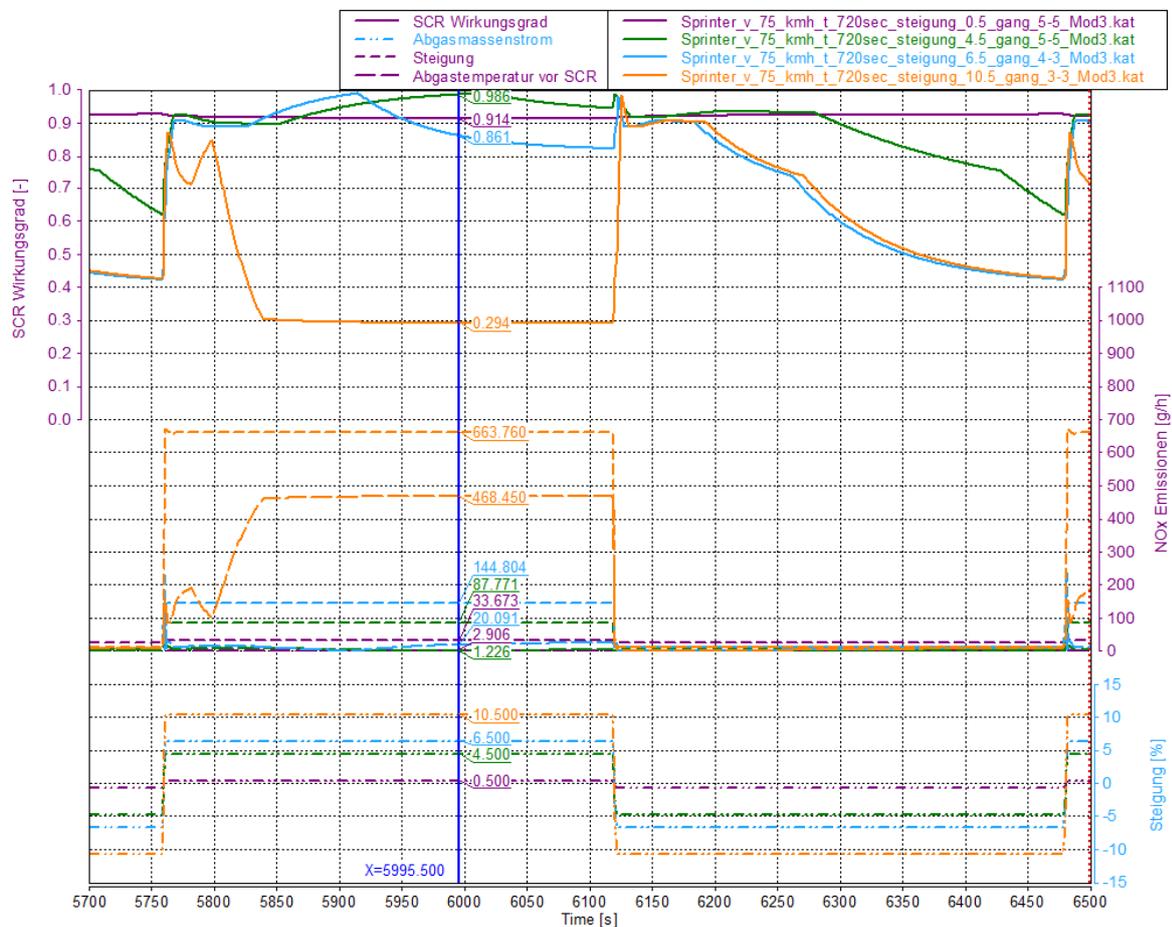


Abbildung 5-49: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 7.5 %, 12 %, 12.5 %, und 15 %, Periodenlänge 720 sec, Ruralteil

In Abbildung 5-50 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Steigung für den Autobahnteil eines RDE Zyklus dargestellt. Die Simulation wurde bei einer Steigung von 5 % abgebrochen, da ab dieser Steigung die vorgegebene Geschwindigkeit von 100 km/h nicht mehr erreicht wurde.

Es zeigt sich, dass die Konvertierungsrate bis 3.5 % und bei Periodenlängen ab 360 Sekunden bis 2.5 % annähernd konstant ist, da sich die Abgastemperatur und der Abgasmassenstrom sich im Bereich der größten Konvertierungsrate im Konvertierungskennfeld, ersichtlich in Abbildung 4-7, bewegen. Danach folgt ein Anstieg der Abgastemperatur über 430°C, welches ein Absinken der Konvertierungsrate zur Folge hat, dargestellt in Abbildung 5-46.

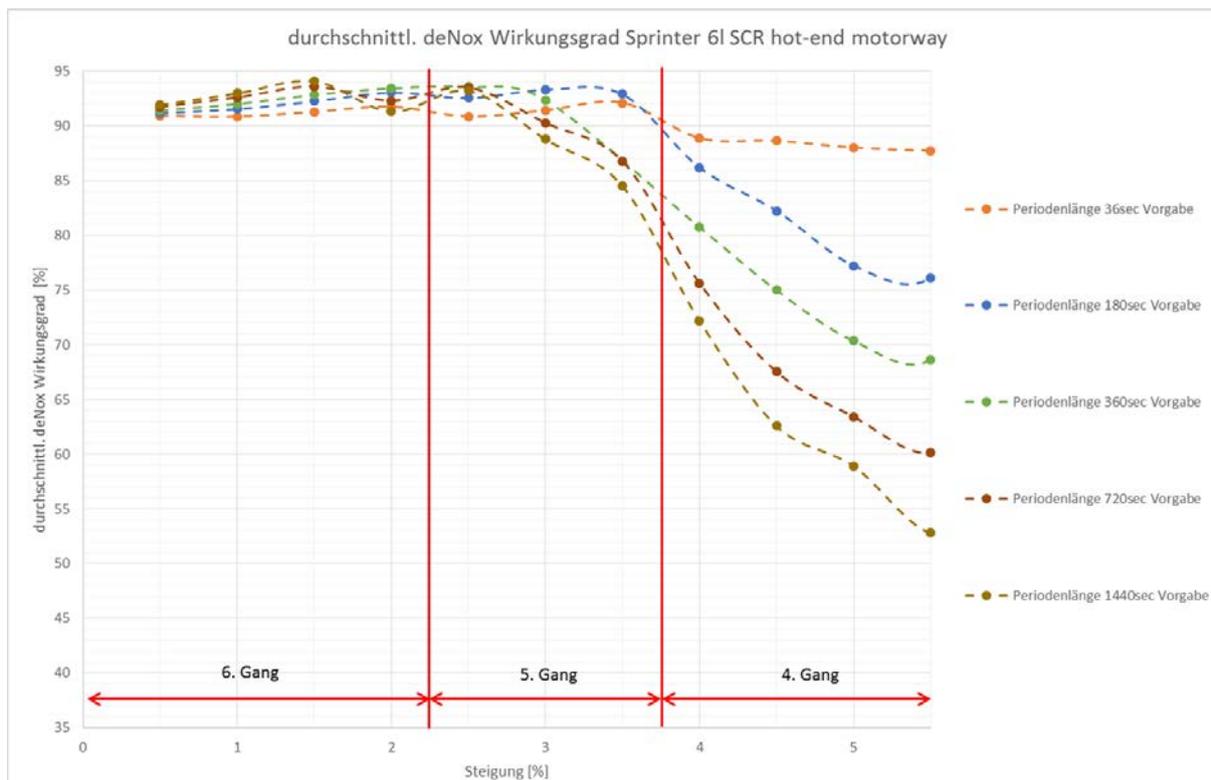


Abbildung 5-50: Durchschnittliche Konvertierungsrate über der Steigung, Autobahnteil, Sprinter

In Abbildung 5-51 sind die NO<sub>x</sub> Emissionen EoT in Abhängigkeit der Steigung für den Autobahnteil eines RDE Zyklus dargestellt. Es zeigt sich, dass zu erwartende Verhalten. Bei annähernd konstanter Konvertierungsrate, erfolgt nur ein geringer Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen EoT, infolge der steigenden NO<sub>x</sub>-Emissionen EO. Mit abfallender Konvertierungsrate und steigender Motorleistung kommt es zu einem Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emission EoT. Dargestellt ist dieses Verhalten in Abbildung 5-52.

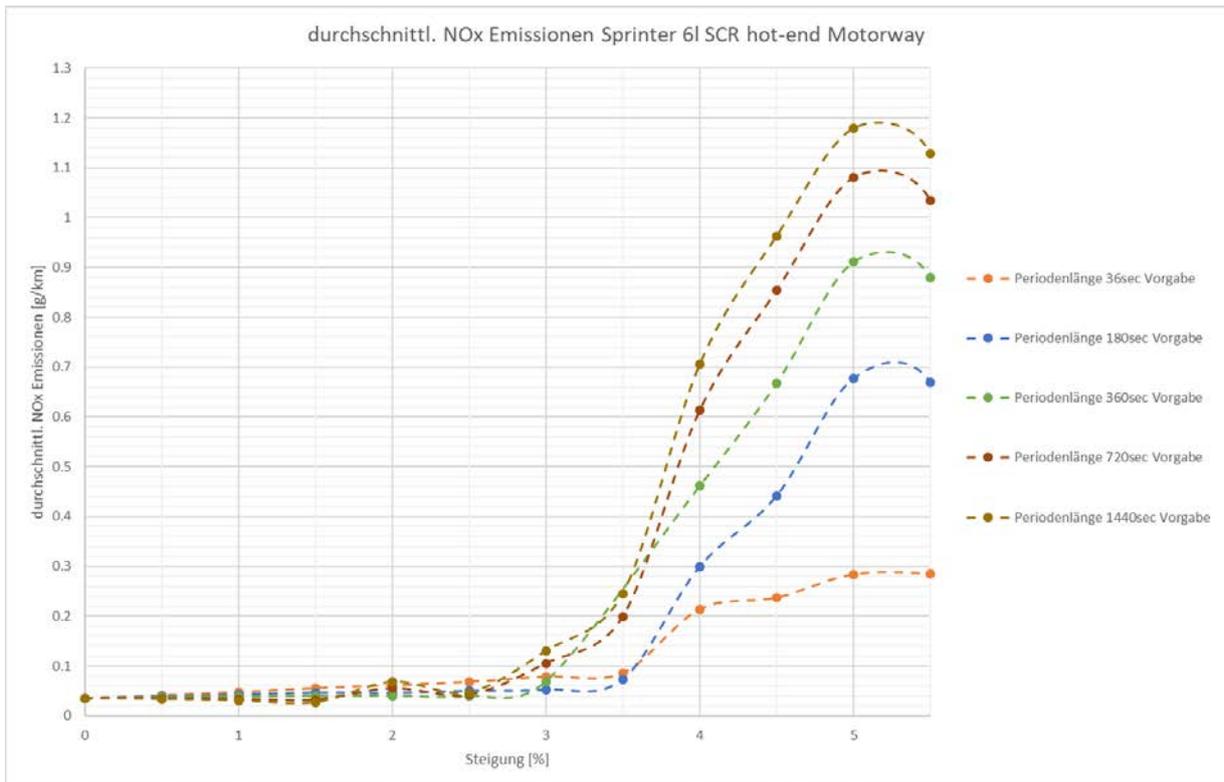


Abbildung 5-51: Durchschnittliche NO<sub>x</sub> Emissionen EoT über der Steigung, Autobahnteil, Sprinter

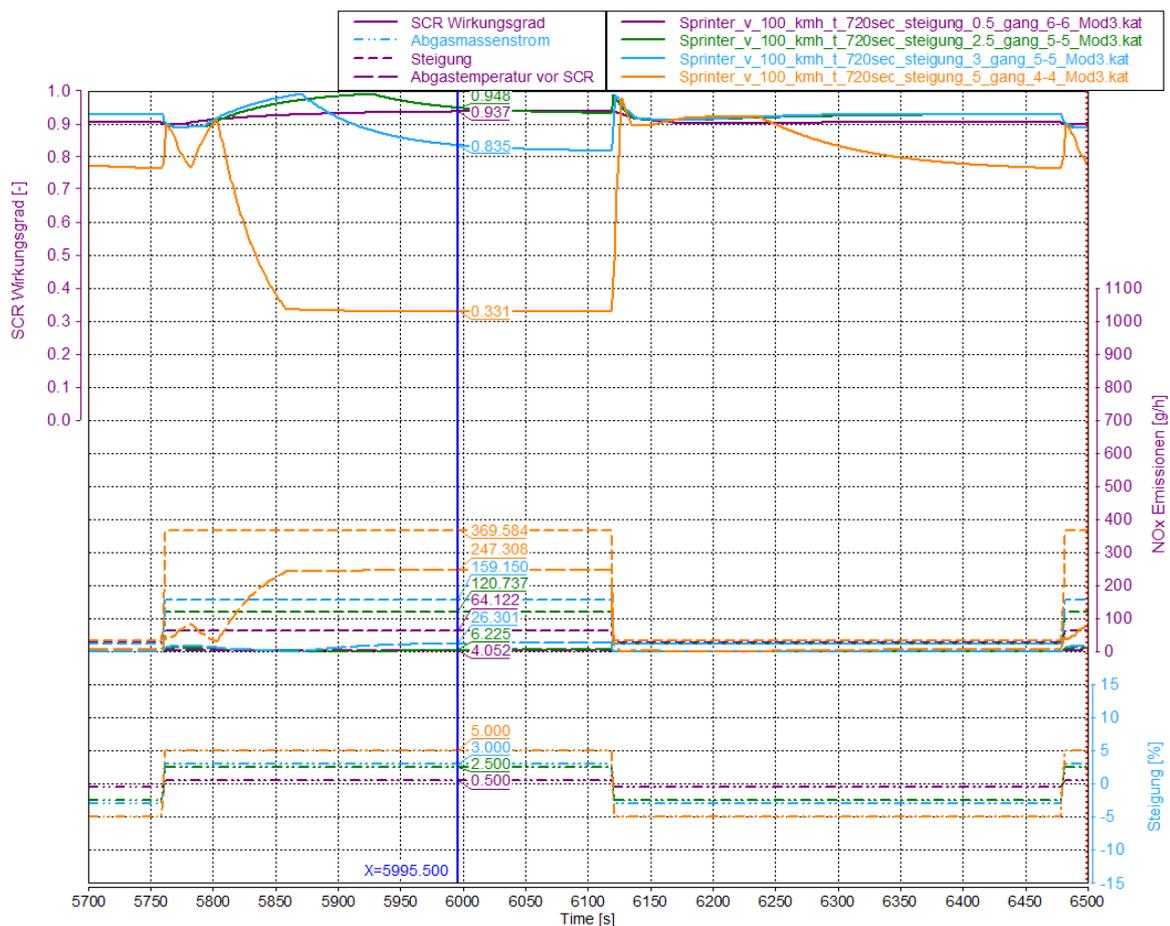


Abbildung 5-52: Konvertierungsrate, NO<sub>x</sub> Emissionen bei Steigungen von 0.5 %, 2.5 %, 3 %, und 5 %, Periodenlänge 720 sec, Autobahnteil

### 5.3 RDE Messungen mit Audi A4 Avant

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen RDE-Messfahrten erläutert. Es erfolgt eine Analyse der Messdaten nach den in Kapitel 2.3.1 genannten Randbedingungen sowie eine Analyse des Einflusses des Höhenprofils. Die Messfahrten wurden auf den in Kapitel 3.1 genannten Routen und mit dem in Kapitel 3.3 genannten Fahrzeug durchgeführt. Zur Analyse und Auswertung wurden die in Kapitel 3.6 genannten Programme und Formeln verwendet.

Des Weiteren erfolgt in diesem Kapitel eine Detailanalyse der Konvertierungsrate des SCR-Katalysators in einzelnen Streckenabschnitten der Route

	ArzbergSCR_05	ArzbergSCR_06	ArzbergSCR_01	DLBGSCR_01	DLBGSCR_02
Trip duration (T)	OK	OK	OK	OK	OK
Trip length (U)	OK	OK	OK	OK	OK
Trip length (R)	OK	OK	OK	OK	OK
Trip length (M)	OK	OK	OK	OK	OK
Percentage distance (U)	OK	OK	OK	OK	OK
Percentage distance (R)	OK	OK	OK	OK	OK
Percentage distance (M)	OK	OK	OK	OK	OK
Percentage stops (U)	OK	Invalid	OK	OK	OK
Ignition idle (T)	OK	OK	OK	OK	OK
Coldstart idle (T)	OK	OK	OK	OK	OK
Coldstart vmean (T)	OK	OK	OK	OK	OK
Coldstart vmax (T)	OK	OK	OK	OK	OK
Mean v (U)	OK	OK	OK	OK	OK
Mean v (M)	OK	OK	OK	OK	OK
v > 100 (M)	OK	OK	OK	OK	OK
v > 145 (M)	OK	OK	OK	OK	OK
AccRes (T)	OK	OK	OK	OK	OK
95 percentile v*apost0.1 (T)	OK	OK	OK	OK	Invalid
95 percentile v*apost0.1 (U)	OK	OK	OK	OK	OK
95 percentile v*apost0.1 (R)	OK	OK	OK	OK	Invalid
95 percentile v*apost0.1 (M)	OK	OK	OK	OK	Invalid
Mean RPA (T)	OK	OK	OK	OK	OK
Mean RPA (U)	OK	OK	OK	OK	OK
Mean RPA (R)	OK	OK	OK	OK	OK
Mean RPA (M)	OK	OK	OK	OK	OK
Altitude (T)	Ok (Extended)				
Temperature (T)	Ok (Moderate)				
Cumulated altitude [m/100 km]	1170.9	1097.44	905.11	1791.19	1758.47
CO2 (T) [g/km]	155.506	139.513	137.507	165.274	162.933
Verbrauch (T) [l/100km]	5.916	5.308	5.882	6.286	6.199
PN (T) [# /km]	1.002E+12	2.060E+09	2.018E+09	4.035E+09	1.820E+10
CO (T) [mg/km]	66	67	53	42	72
Verbrauch (T) [l/100km]	5.916	5.308	5.882	6.286	6.199
NOx (T) [mg/km]	366	287	108	698	687
NO (T) [mg/km]	276	198	86	550	533
SCR conversion rate (T) [%]	59	66	80	51	51

Tabelle 5-1: Übersicht über die Gültigkeit und Emissionen der RDE-Messfahrten

In Tabelle 5-1 ist eine Übersicht der Gültigkeitsparameter und Emissionen sowie der SCR-Konvertierungsrate der einzelnen gefahrenen Routen dargestellt. Es wurde jeweils zweimal die Route Arzberg (ArzbergSCR\_05, ArzbergSCR\_06) und Deutschlandsberg (DLBGSCR\_01, DLBGSCR\_02) sowie einmal die Route Rechberg (ArzbergSCR\_01) gefahren. In der Tabelle ist ersichtlich, dass beide Fahrten auf der Deutschlandsberg-Route aufgrund der kumulierten Höhe, welche größer als die erlaubten 1200 m/100km ist, ungültig sind. Des Weiteren sind bei der Messfahrt DLBSCR\_02 die erlaubten Beschleunigungswerte im Überland-, und Autobahnteil überschritten worden. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen überschreiten bei den Messfahrten ArzbergSCR\_05, ArzbergSCR\_06, DLBGSCR\_01 und DLBGSCR\_02 die erlaubten NO<sub>x</sub>-

Emissionen von 168 mg/km. Dies ist einerseits auf den aggressiven Fahrstil, erläutert in Kapitel 3.5, und auf das Höhen- bzw. Steigungsprofil der Routen zurückzuführen.

In Abbildung 5-53 sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen, die Konvertierungsrate, die normierte Leistung, die verfügbare Volllastleistung, die Steigung, die Seehöhe und die Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt.

Die Berechnung der Konvertierungsrate erfolgte mit Formel (3-3), hierzu musste die Kurve der NO<sub>x</sub>-Emission vor dem SCR-Katalysator zeitlich verschoben werden, da es infolge der unterschiedlichen Messsysteme, VCDS und PEMS, zu einem zeitlichen Versatz der Verläufe gekommen ist. Die zeitliche Verschiebung erfolgte so, dass die Amplituden der einzelnen Verläufe übereinstimmen. Trotzdem konnte nicht in allen Punkten eine exakte Übereinstimmung der Amplituden aufgrund der unterschiedlichen Signallaufzeiten und Ansprechverhalten der Sensoren erreicht werden. Bei Punkten in denen eine unplausible Konvertierungsrate berechnet wurde, größer als 100 % oder kleiner als 0 %, wurde diese auf den Wert Null gesetzt. Aus den genannten Gründen können keine exakten Werte der Konvertierungsrate genannt werden, sondern es ist nur möglich eine Tendenz dieser abzuleiten.

Die Berechnung der normierten Motorleistung und Volllastleistung erfolgte mit der in Kapitel 4.2.3.1 beschriebenen CO<sub>2</sub>-Leistungsinterpolation mittels PHEM.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen EoT, welche in PPM mittels PEMS gemessen wurde, wurde mit in Kapitel 3.6.1 beschriebenen ERMES Tool ausgewertet. Des Weiteren wurde mit diesem Programm auch die Steigung berechnet.

In Abbildung 5-53 und Abbildung 5-54 ist neben den bereits zuvor genannten Verläufen auch die Abgastemperatur vor dem SCR-Katalysator und der Abgasmassenstrom für ein Teilstück der Deutschlandsbergroure dargestellt. Es zeigt sich, dass sich schon bei einem Gefälle von durchschnittlich 4 % in dem für ca. 25 Sekunden Schubbetrieb herrscht zu einer relevanten Auskühlung des SCR-Katalysators kommt. Dies hat zur Folge, dass am Beginn der Steigung die Konvertierungsrate gering ist und es ca. 20 Sekunden dauert bis ein Konvertierungsrate größer 80 % erreicht wird.

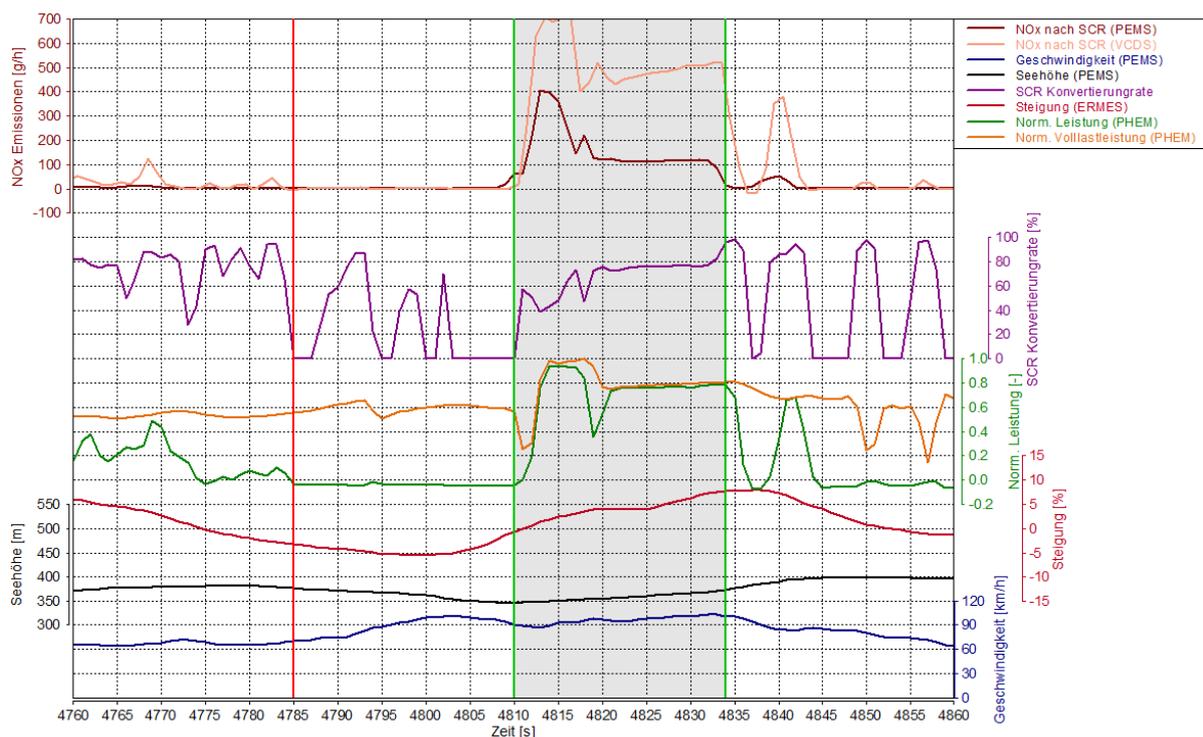


Abbildung 5-53: NO<sub>x</sub> Emissionen, Konvertierungsrate in einem Teilstück der

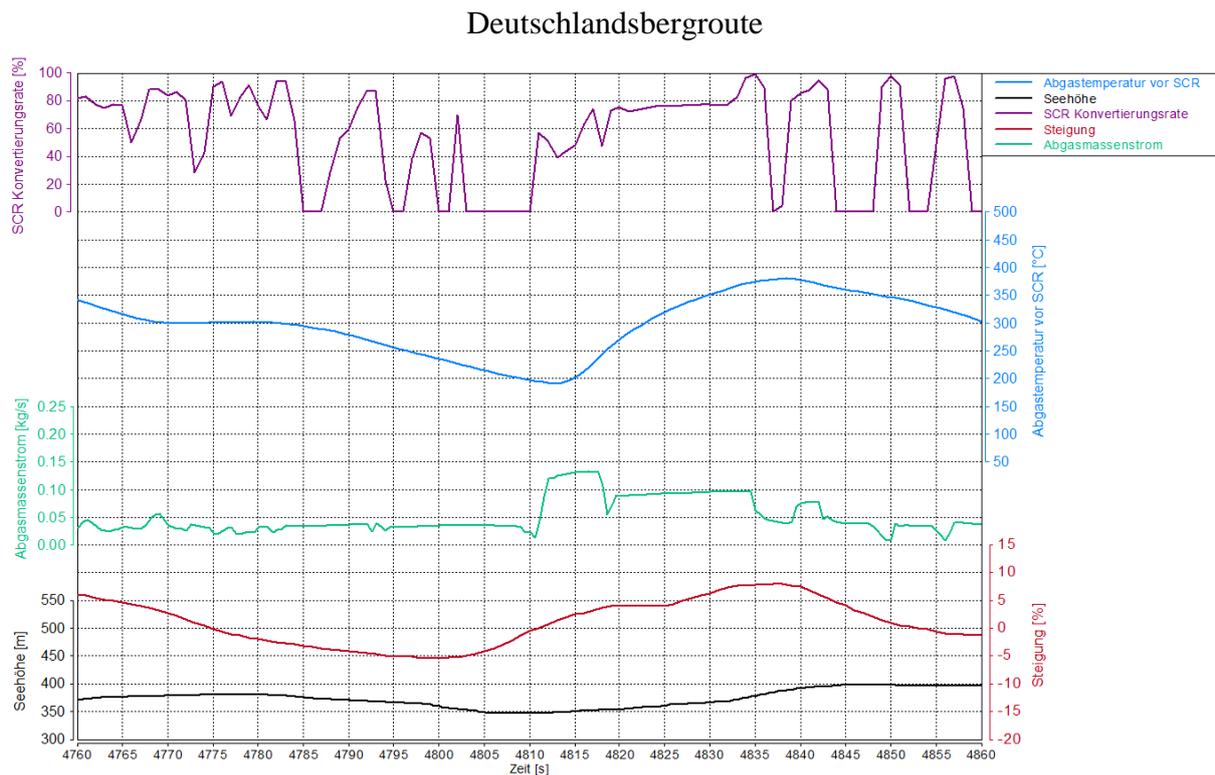


Abbildung 5-54: Konvertierungsrate, Abgastemperatur vor dem SCR-Katalysator, Abgasmassenstrom in einem Teilstück der Deutschlandsbergroute

In der Abbildung 5-55 und Abbildung 5-56 sind die bereits zuvor genannten Verläufe für das Teilstück Deutschlandsberg-Trahhütten ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Konvertierungsrate infolge der steigenden Abgastemperatur aufgrund der dauerhaft abgerufenen Vollastleistung stark absinkt. Ab Sekunde 3690 erfolgt ein Anstieg der Konvertierungsrate, da die Abgastemperatur wieder absinkt, da es zu keinem dauerhaften Abrufen der Vollastleistung mehr kommt. Die Ausschläge der Konvertierungsrate z.B. bei Sekunde 3620 ist auf die zuvor genannte Synchronisation der gemessenen NO<sub>x</sub>-Emissionen zurückzuführen.



In der Abbildung 5-57 und Abbildung 5-58 sind die bereits zuvor genannten Verläufe für ein Teilstück der Arzbergroute dargestellt. In diesen ist Absinken der Abgastemperatur auf 64 °C nach einem Schubbetrieb des Motors über 500 Sekunden in einem durchschnittlichen Gefälle von 5% ersichtlich. Bei der nachfolgenden Beschleunigung zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie schon zuvor in Abbildung 5-53 und Abbildung 5-54 diskutiert.

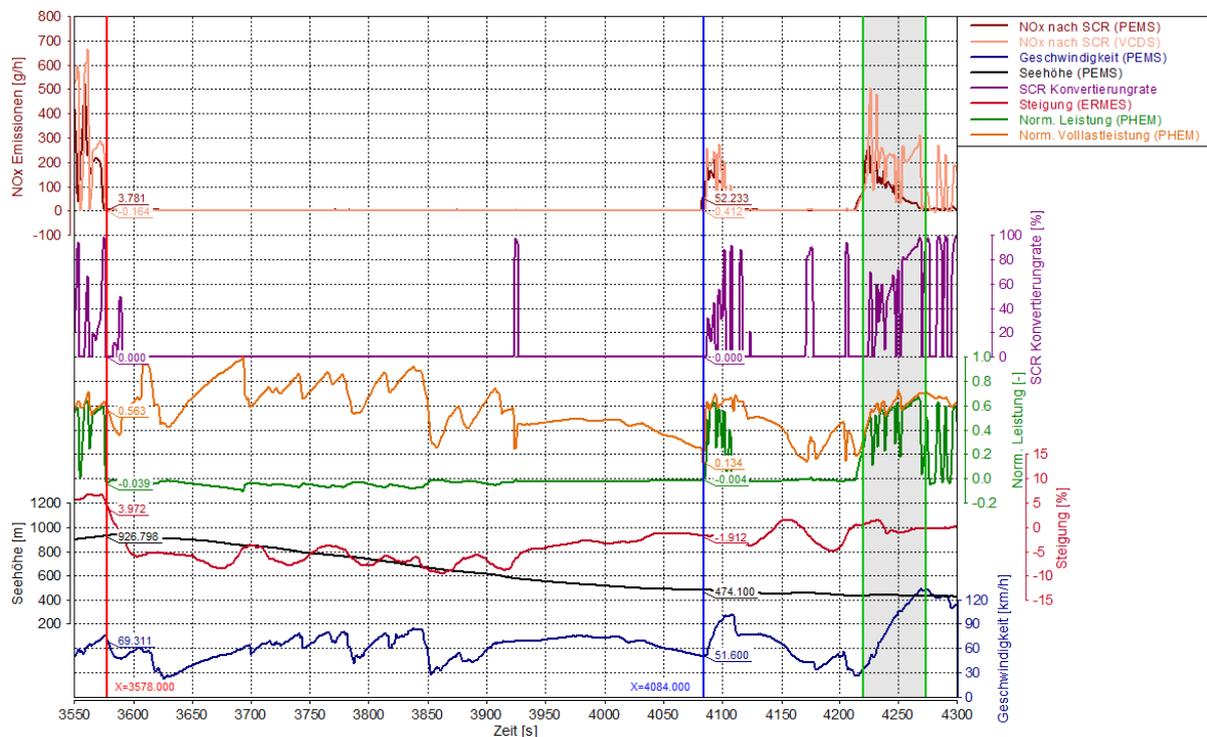


Abbildung 5-57: NO<sub>x</sub> Emissionen, Konvertierungsrate in einem Teilstück der Arzbergroute

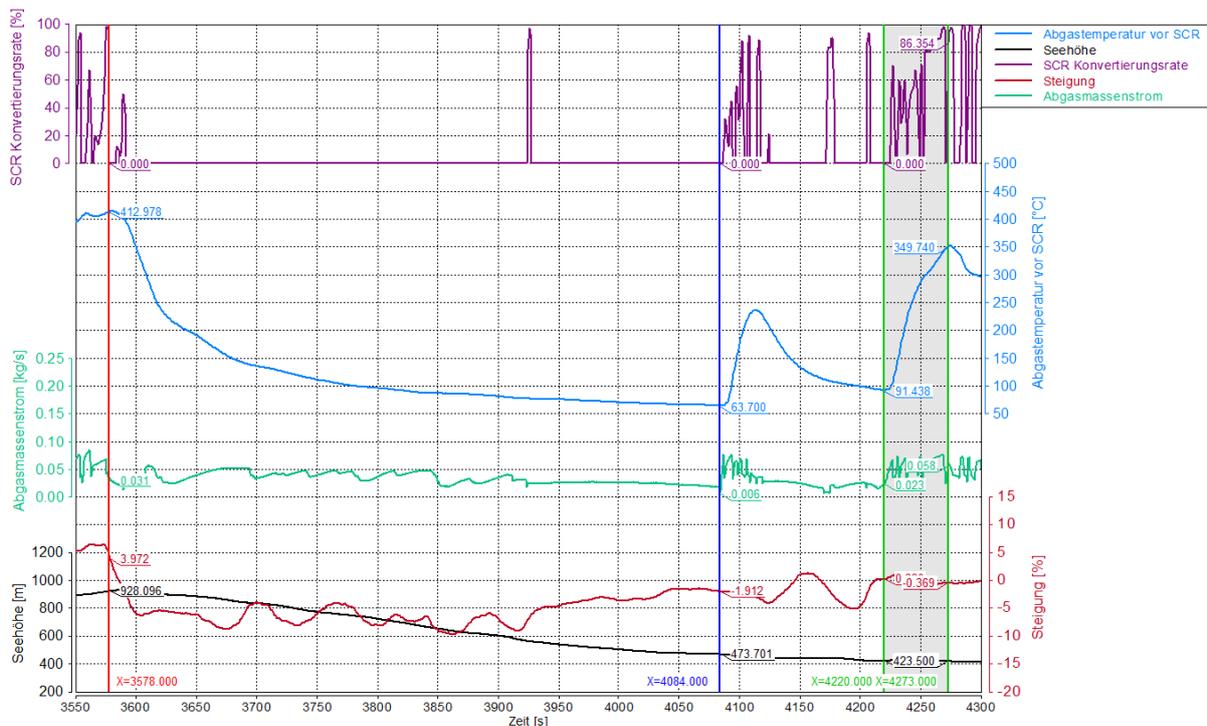


Abbildung 5-58: Konvertierungsrate, Abgastemperatur vor dem SCR-Katalysator, Abgasmassenstrom in einem Teilstück der Arzbergroute

## 5.4 Gegenüberstellung der Messergebnisse und Simulationsergebnisse der RDE Routen

In diesem Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der Mess- und Simulations-Ergebnisse der durchgeführten Messfahrten. Die Simulation wurde für die in Kapitel 4.2 beschriebenen Fahrzeuge durchgeführt. Die im dri-File vorgegebenen Geschwindigkeiten und Steigungen entsprechen den mittels PEMS gemessenen Geschwindigkeiten und der anhand, der mittels GPS aufgezeichnet Höhen, mit ERMES berechneten Steigung. Zur Simulation wurde das in PHEM hinterlegte Gangschaltmodell verwendet.

Route	Messung		Simulation					
	Audi A4 Avant		Audi A4 Avant		VW Golf		Mercedes Sprinter	
	NO <sub>x</sub> Emissionen	Konvertierungsrate						
ArzbergSCR_01	108 mg/km	80%	222 mg/km	70%	76 mg/km	81%	124 mg/km	86%
ArzbergSCR_05	366 mg/km	59%	325 mg/km	65%	109 mg/km	79%	179 mg/km	85%
ArzbergSCR_06	287 mg/km	66%	291 mg/km	69%	113 mg/km	79%	181 mg/km	85%
DLBGSCR_01	698 mg/km	51%	715 mg/km	50%	246 mg/km	68%	335 mg/km	76%
DLBGSCR_02	687 mg/km	51%	807 mg/km	45%	306 mg/km	63%	304 mg/km	78%

Tabelle 5-2: Übersicht über die NO<sub>x</sub>-Emissionen EoT und mittlerer SCR-Konvertierungsrate

In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse der Simulation für die NO<sub>x</sub>-Emissionen und die über die Route gemittelte SCR-Konvertierungsrate aufgeführt. Die Konvertierungsrate wurde anhand der in Kapitel 3.6.3 erläuterten Formel berechnet. Es zeigt sich, dass die Simulationsergebnisse der NO<sub>x</sub>-Emissionen für den Audi A4 Avant durchwegs höher als die gemessenen Emissionen. Dies ist auf die in Kapitel 4.2.3.2 genannte Problematik zurückzuführen und konnte trotz iterativer Anpassung des Konvertierungskennfeldes in den unbestimmten Bereichen im Kennfeld, welche speziell bei der Deutschlandsbergrouete und der Rechbergrouete auftreten nicht kompensiert werden.

Des Weiteren ist ersichtlich, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen für die Fahrzeuge VW Golf und Mercedes Sprinter erheblich geringer und die Konvertierungsrate erheblich größer sind als die für den Audi A4 Avant gemessenen.

Dies ist auf die höheren Abgastemperaturen im Schubetrieb des Motors und somit höhere Temperatur des SCR-Katalysators am Ende des Schubetriebs, bei den Fahrzeuge VW Golf und Mercedes Sprinter gegenüber dem Audi A4, zurückzuführen. In Abbildung 5-59 ist dies für eine Schubphase von ca. 25 Sekunden dargestellt. Während es im Zuge der Messung zu einem Absinken der Abgastemperatur um ungefähr 150 °C kommt, bleibt die Abgastemperatur für die simulierten Fahrzeuge annähernd konstant. Somit ist auch die Konvertierungsrate am Beginn der Steigung höher als in der Messung. Zusätzlich erkennbar ist dieses Verhalten auch in Abbildung 5-60, in dieser ist ein Schubetrieb des Motors über 500 Sekunden dargestellt, während die Abgastemperatur vor dem SCR-Katalysators, von einem ähnlichen Ausgangswert in der Messung und Simulation, in der Messung auf unter 63°C absinkt, sinkt sie in der Simulation auf 175 °C ab. Dies hat eine höhere Konvertierungsrate des SCR-Katalysators während der ersten Beschleunigung nach dem Schubetrieb zu Folge. Zusätzlich ist für den Verlauf der Konvertierungsrate in der Simulation ein sprunghafter Anstieg dieser ersichtlich, während diese in der Messung, einen mit der Abgastemperatur kontinuierlichen Anstieg aufweist.

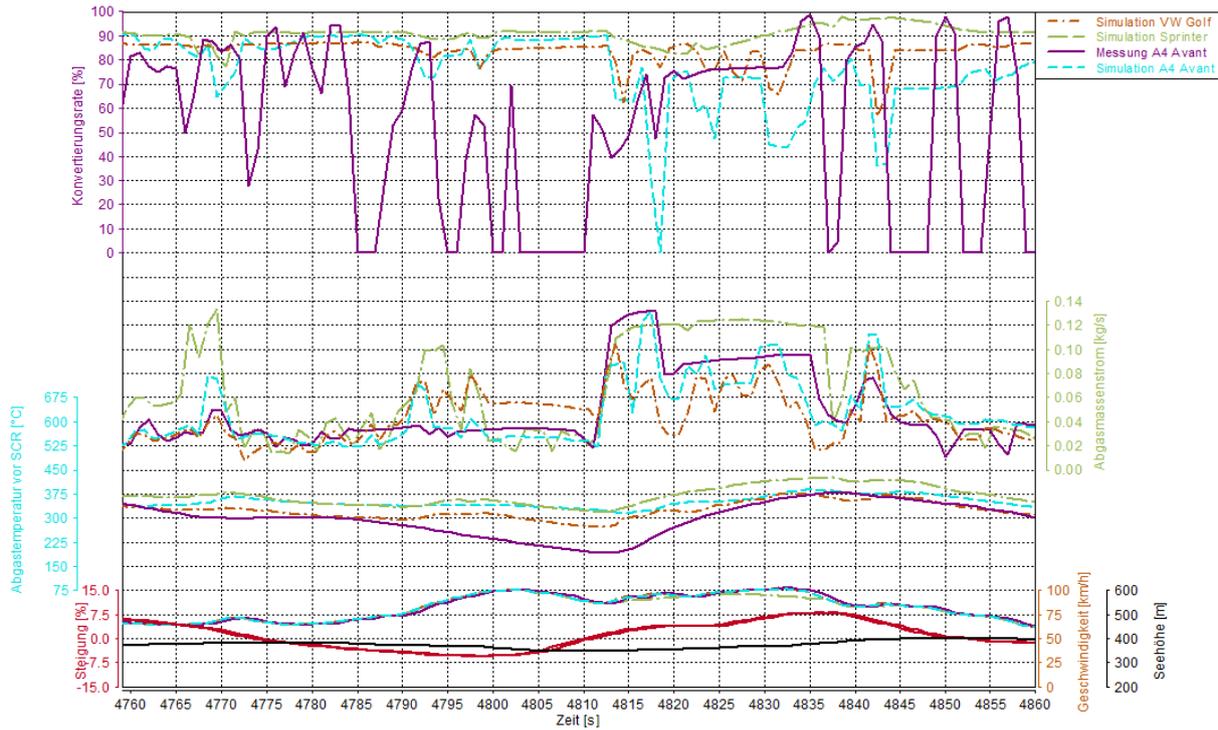


Abbildung 5-59: Gegenüberstellung der Abgastemperaturen und Konvertierungsrate bei einem Schubetrieb über 25 Sekunden mit anschließender Beschleunigung

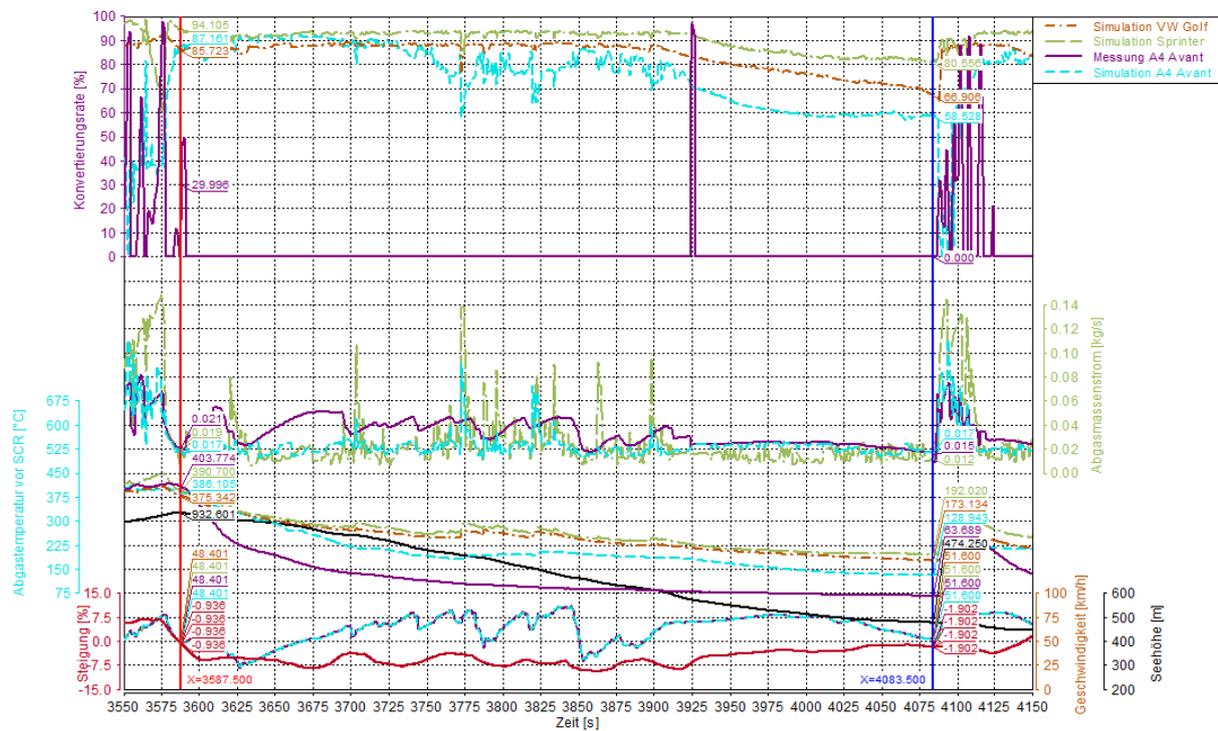


Abbildung 5-60: Gegenüberstellung der Abgastemperaturen und Konvertierungsrate bei einem Schubetrieb über 500 Sekunden mit anschließender Beschleunigung

Andererseits sind die geringeren NO<sub>x</sub>-Emissionen für die Fahrzeuge VW Golf und Mercedes Sprinter auf die durchwegs höhere Konvertierungsrate in den Bergaufphasen bei ähnlichen Abgastemperaturen vor dem SCR-Katalysator zurückzuführen, wie in Abbildung 5-61 dargestellt.

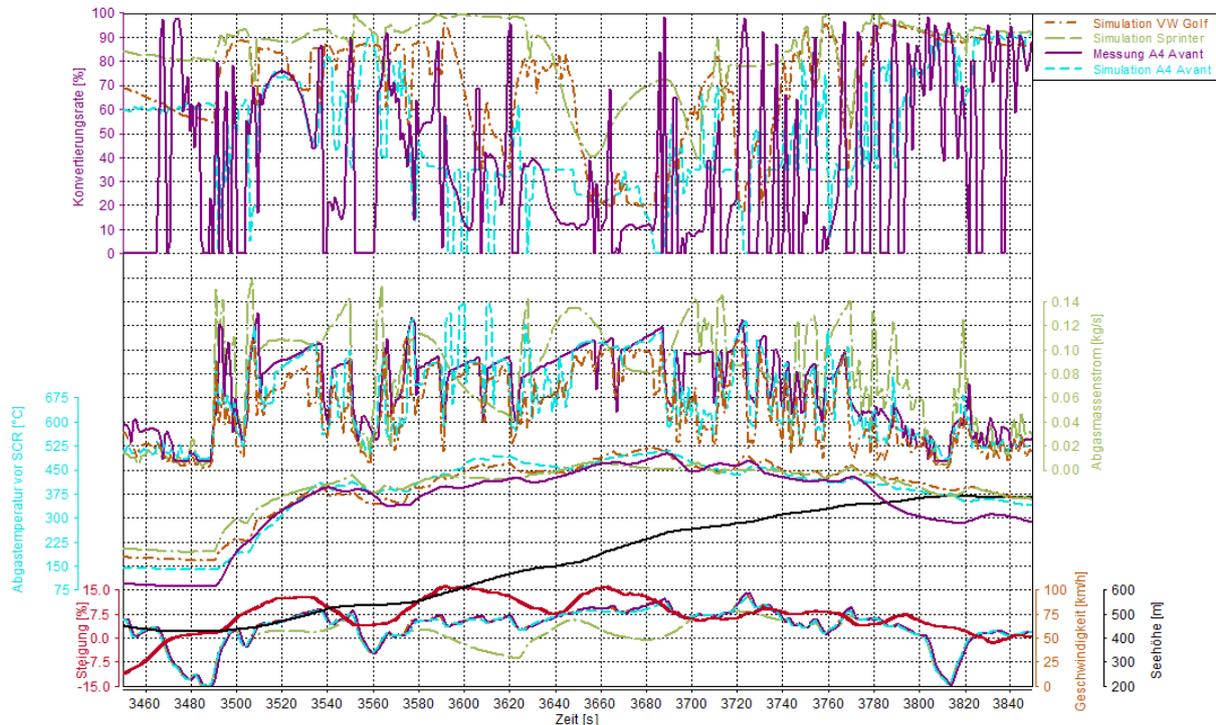


Abbildung 5-61: Gegenüberstellung der Abgastemperaturen und Konvertierungsrate bei einem Schubetrieb über 500 Sekunden mit anschließender Beschleunigung

## 5.5 Gegenüberstellung der Simulation mit konstanter und realer Steigung

In diesem Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der Emissionen für die Sub-Zyklen mit konstanter Längsneigung und denselben Zyklen mit realer Längsneigung. Zu diesem Zweck wurden 35 Teilbereiche mit der gefahrenen Geschwindigkeit und der Steigung aus den Messfahrten extrahiert. Zur Simulation der Zyklen mit konstanter Steigung wurde die durchschnittliche Steigung der jeweiligen Teilbereiche berechnet und dieser sekundlich im dri-File vorgegeben, siehe Kapitel 4.5. Die Simulation wurde mit den in Kapitel 4.2 beschriebenen Fahrzeugen durchgeführt.

In Abbildung 5-62 ist die Abweichung der NO<sub>x</sub>-Emissionen zwischen Zyklen mit konstanter Längsneigung und realer Längsneigung in Prozent dargestellt. Eine positive Abweichung bedeutet, dass die Emissionen bei dem Zyklus mit realer Längsneigung höher sind als bei dem Zyklus mit konstanter Längsneigung. Eine negative Abweichung bedeutet das die Emissionen bei dem Zyklus mit realer Längsneigung niedriger sind als bei dem Zyklus mit konstanter Längsneigung. Es zeigt sich, dass bei den Fahrzeugen VW Golf und Mercedes Sprinter (N1) die Abweichung mit zunehmender Längsneigung größer wird. Die maximale Abweichung beträgt bei dem Fahrzeug VW Golf über 70 % und beim Mercedes Sprinter über 50 %.

Bei dem Fahrzeug Audi A4 Avant steigt die Abweichung jedoch nur geringfügig mit zunehmender Steigung, die maximale Abweichung beträgt wie schon beim Mercedes Sprinter über 50 %.

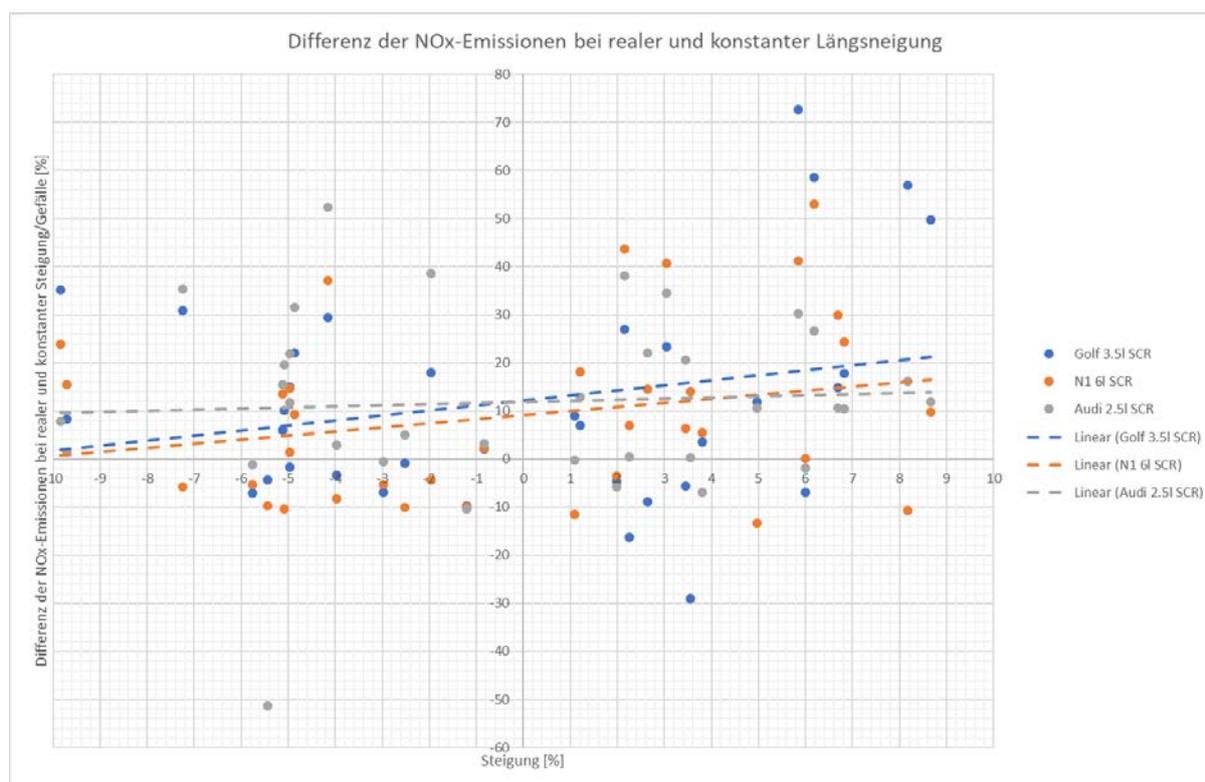


Abbildung 5-62: Gegenüberstellung der Zyklen mit konstanter Steigung und Zyklen mit realer Steigung

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zuge der Auswertung hat sich herausgestellt, dass sich bei Verwendung des Schaltmodells im Simulationstool PHEM keine sichere Aussage über den Zusammenhang von Steigung und der Konvertierungsrate des SCR-Katalysators treffen lässt. Dies ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen, der Haupteinflussfaktor sind die unplausiblen Schaltvorgänge in den Bergabphasen. Mit zunehmender Steigung wird in einem höheren Gang geschaltet, anstatt die Motorbremswirkung in einem niedrigeren Gang auszunutzen. Damit ergeben sich bei starkem Gefälle zu niedere Motordrehzahlen und Abgasvolumenströme, was zu einem zu geringen Abkühlen des Katalysators führt. Andererseits tritt bei Steigung Pendelschalten auf, welches ebenso den Abgasvolumenstrom und die Abgastemperatur beeinflusst und einen Abfall der Konvertierungsrate bewirkt.

Bei der im zweiten Schritt durchgeführten Simulation mit manueller Gangvorgabe konnte ein klarer Zusammenhang der Steigung und Konvertierungsrate gefunden werden. Es hat sich ergeben, dass es zu einem Anstieg der Konvertierungsrate bei dem VW Golf mit zunehmender Steigung infolge steigender Abgastemperaturen kommt. Aufgrund der höheren Abgastemperaturen bei dem Mercedes Sprinter kann dieser Effekt nicht beobachtet werden, anstatt dessen kommt es zu einem Abfall der Konvertierungsrate mit zunehmender Steigung, da die Abgastemperatur über die Temperatur der besten Konvertierung steigt. Dieser Effekt tritt bei beiden Fahrzeugen mit zunehmender Periodenlänge und Steigung für den Rural- und Motorway-Anteil ebenso auf.

Für die NO<sub>x</sub>-Emissionen EoT hat sich gezeigt, dass diese Emissionen bis zu einer gewissen Steigung, welche je nach Fahrzeug, Urban-, Rural-, und Motorway-Anteil unterschiedlich ist nur leicht steigen. Danach kommt es zu einem sprunghaften Anstieg dieser. Dieser Anstieg tritt bei beiden Fahrzeugen nach einem Schaltvorgang in den 3. Gang auf, da bei diesem die NO<sub>x</sub>-Emissionen EO stark ansteigen. Dies führt zusammen mit der sinkenden Konvertierungsrate zu diesem sprunghaften Anstieg. Hintergrund ist, dass bei die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen bei niedriger Drehzahl nahe der Motorvollastkurve in den verwendeten Motorkennfeldern am größten sind.

Diese Findungen sollten in einer experimentellen Untersuchung überprüft werden, weshalb zwei weitere RDE-Routen, zusätzlich zu den Standard-RDE-Routen der TU Graz, gesucht wurden. Die Route Rechberg (Arzberg modifiziert) hat sich als nicht vielversprechend hinsichtlich der Auswirkung auf die SCR-Konvertierungsrate bewiesen. Mit der Route Deutschlandsberg und der Route Arzberg konnte hingegen aufgrund der Topographie ein Auskühlverhalten und ein Wiederaufheizverhalten des SCR-Katalysators festgestellt werden. Die Route Deutschlandsberg ist in ihrer Form wie sie im Zuge dieser Arbeit befahren wurde nicht RDE konform, stellte sich aber für die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen, als geeignet dar.

Es hat sich gezeigt, dass ein relevantes Auskühlen des Katalysators im Realbetrieb schon bei viel kürzeren Periodenlängen und geringeren Steigung eintritt als durch die Simulation berechnet wurde. Des Weiteren hat sich aufgrund der Messanordnung, Aufzeichnung der NO<sub>x</sub>-Rohemissionen mittels VCDS und Messung der EoT-Emissionen mittels PEMS gezeigt, dass eine sekundliche Berechnung der Konvertierungsrate im Zuge der Auswertung nicht möglich ist, sondern nur eine Tendenz abgelesen werden konnte. Dies lässt sich auf das unterschiedliche Ansprechverhalten und die unterschiedlichen Signallaufzeiten der unterschiedlichen Messsysteme zurückzuführen.

Darüber hinaus konnte bei der anschließenden Simulation der gemessenen Routen mit dem in einer vorherigen Diplomarbeit erstellten Simulationsmodell des Audi A4 festgestellt werden, dass eine Übernahme des Temperaturkennfeldes eines Fahrzeugs mit baugleichen Motor zu sehr ungenauen Simulationsergebnissen führen kann. In diesem Fall waren die Abgastemperaturen aus dem verwendeten Kennfeld nahe der Vollastlinie des Motors um bis

zu 100°C höher waren als die gemessenen und auch die in der Simulation im Schubbetrieb auftretenden Temperaturen waren höher als in der Messung. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass das SCR-Konvertierungskennfeld, wenn es aus den Rollentests im ERMES und CADC Zyklus bedatet wird, für die auf der Deutschlandsbergrouete auftretenden Raumgeschwindigkeiten und Abgastemperatur in den Randbereichen unzureichend definiert ist.

Anschließend erfolgte eine simulative Untersuchung der NO<sub>x</sub>-Emissionen von Zyklen mit konstanter Längsneigung im Vergleich zu den Zyklen mit realer Längsneigung. Dabei konnte eine mit der Steigung zunehmende Abweichung zwischen den unterschiedlichen Zyklen festgestellt werden. Mit zunehmender Steigung wurde bei den Zyklen mit realer Längsneigung eine bis zu 70 % höhere NO<sub>x</sub>-Emission als bei Zyklen mit konstanter Längsneigung festgestellt. In Messungen auf Rollenprüfständen und in der Simulation von Real World Zyklen sollte also möglichst auch das reale Höhen- bzw. Steigungsprofil verwendet werden.

## Literatur

- [1] Mollenhauer, K., Tschöke, H.: Handbuch Dieselmotor, 3. Auflage Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-540-72164-2, 2012
- [2] Reif K.: Dieselmotor-Management, 5. Auflage Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-2179-9, 2012
- [3] van Basshuysen, R., Schäfer F.: Handbuch Verbrennungsmotor, 8. Auflage Springer Fachmedien Wiesbaden, ISBN 978-3-658-10902-8, 2017
- [4] Pischinger, R; Klell, M.; Sams, Th.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. 3. Auflage. In der Reihe: List, H. (Hrsg.): Der Fahrzeugantrieb. Springer Verlag Wien New York, ISBN 9783211992760, 2009
- [5] Sams, Th.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil 1. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2010
- [6] Hausberger, St.; Schüssler, M.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil 2, Technische Universität Graz, 2009
- [7] Hausberger, St.; Schüssler, M.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz Teil 2 SCR, Technische Universität Graz, 2012
- [8] Reif K.: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren, 1. Auflage Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [9] Volkswagen AG, Selbststudienprogramm 526 - Die Dieselmotoren-Baureihe EA288 mit Abgasnorm EU6, 2014
- [10] VERORDNUNG (EU) 2016/427 DER KOMMISSION vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)
- [11] VERORDNUNG (EU) 2016/646 DER KOMMISSION vom 20. April 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)
- [12] VERORDNUNG (EU) 2017/1154 DER KOMMISSION vom 7. Juni 2017 zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission und der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 und der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf Emissionen leichter Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge im praktischen Fahrbetrieb (Euro 6)
- [13] IVT, TU Graz (Rexeis, Hausberger, Lipp, Matzer), Anforderungen an die RDE Gesetzgebung für PKW und schwere Nutzfahrzeuge, Campus Sursee, 2016.

- [14] Keller M., de Haan P.: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1, Dokumentation, INFRAS Bern/Heidelberg/Graz/Essen, 2014
- [15] AVL List GmbH: AVL Gas PEMS und AVL Gas PEMS IX, Product Guide, 2016
- [16] AVL List GmbH: AVL M.O.V.E PN PEMS iS, Product Guide 2015
- [17] Audi AG: Produktkatalog Audi A4/S4, 2016
- [18] Audi AG, Selbststudienprogramm 622 - Audi clean diesel 2. Generation, 2013
- [19] VERORDNUNG (EU) 2017/1151 DER KOMMISSION vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission
- [20] C. Matzer, S. Hausberger, M. Rexeis, M. Opetnik, M. Ramsauer, O. Mogg and F. Weger, Update of Emission Factors for EURO 6 Diesel Passenger Cars for the HBEFA; 2017
- [21] Ramsauer M., Messung und Simulation des Emissionsverhaltens eines Euro 6 Diesel-PKW's bei RDE-Fahrten und in Stausituationen, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2017