



Alexander Hoffmann BSc

Alterungseffekte auf das Emissionsverhalten von Euro 6d-Temp Fahrzeugen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur (Dipl.-Ing.)
Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Lukas Landl BSc
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Juni 2021



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

Vorwort

In erster Linie gilt mein Dank Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger. Er hat es mir ermöglicht, eine Diplomarbeit im Bereich Emissionsforschung am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) durchzuführen.

Im Weiteren bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Lukas Landl BSc für die tatkräftige Unterstützung während der gesamten Tätigkeit sowie die zusätzlich erworbenen Praxiserfahrungen.

Großer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Dr.techn. Claus Uwe Matzer BSc für die Hilfe im Bereich der Simulationsrechnungen.

Weiters möchte ich mich noch bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik für die gute Zusammenarbeit in allen Bereichen bedanken.

Zum Schluss gilt ein herzliches Dankeschön meinen Eltern Brigitte Hoffmann und Rudolf Wiry, die mir den Weg des Studierens ermöglicht und mich jederzeit unterstützt sowie motiviert haben.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VI
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	IX
ZUSAMMENFASSUNG	X
ABSTRACT	XI
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEME	2
2.1.1 <i>Dreiwegekatalysator</i>	2
2.1.2 <i>NO_x-Speicher-katalysator</i>	4
2.1.3 <i>Selektive katalytische Reduktion</i>	6
2.1.4 <i>Partikelfilter</i>	8
2.2 ALTERUNG VON ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEMEN	13
2.2.1 <i>Thermische Alterung</i>	14
2.2.2 <i>Chemische Alterung</i>	15
2.2.3 <i>Mechanische Alterung</i>	16
2.3 ABGASGESETZGEBUNG	17
3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	18
3.1 VERSUCHSFAHRZEUGE	18
3.2 VERSUCHSAUFBAU	20
3.2.1 <i>PEMS</i>	20
3.2.2 <i>Rollenprüfstand</i>	22
3.3 TESTZYKLEN	23
3.3.1 <i>WLTC</i>	23
3.3.2 <i>ERMES</i>	24
3.3.3 <i>RDE</i>	25
3.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	26
3.5 MESSERGEBNISSE	27
3.5.1 <i>BMW 216d GranTourer</i>	27
3.5.2 <i>Renault Grand Scenic</i>	40
4 SIMULATION	42
4.1 PHEM	42
4.2 KENNFELDERSTELLUNG	42
4.2.1 <i>BMW 216d GranTourer 110 tkm</i>	43
4.2.2 <i>BMW 216d GranTourer 216 tkm</i>	45
4.2.3 <i>BMW 216d GranTourer Differenzkennfelder</i>	47
4.2.4 <i>Renault Grand Scenic</i>	49
4.3 LÄNGSDYNAMIKSIMULATION	51
4.3.1 <i>BMW 216d GranTourer 110 tkm</i>	53
4.3.2 <i>BMW 216d GranTourer 216 tkm</i>	55
4.3.3 <i>BMW 216d GranTourer Vergleich der Längsdynamiksimulationen</i>	57
4.3.4 <i>Renault Grand Scenic</i>	61
4.4 SIMULATION DER DIESELPARTIKELFILTER REGENERATION	63
4.4.1 <i>Kennfeldmethode BMW 216d GranTourer 110 tkm</i>	63
4.4.2 <i>Kennfeldmethode BMW 216d GranTourer 216 tkm</i>	69
4.4.3 <i>Methode DPF-Reg.-Messung zu Simulation BMW 216d GranTourer 110 tkm</i>	73
4.4.4 <i>Methode DPF-Reg.-Messung zu Simulation BMW 216d GranTourer 216 tkm</i>	76
4.4.5 <i>Vergleich der Methoden</i>	79
5 ERGEBNISSE	80
6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	81
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	82

TABELLENVERZEICHNIS	86
FORMELVERZEICHNIS	88
LITERATUR	89
ANHANG	91
BMW 216D GRANTOURER RIES DPF-REGENERATIONSFAHRTEN	91
BMW 216D GRANTOURER GESAMTE ARZBERGROUTE.....	92
RENAULT GRAND SCENIC 130 TKM RDE FAHRTEN	93
BMW 216D GRANTOURER 110 TKM EMISSIONSKENNFELDER.....	94
BMW 216D GRANTOURER 216 TKM EMISSIONSKENNFELDER.....	96
RENAULT GRAND SCENIC 130 TKM EMISSIONSKENNFELDER.....	98
LÄNGSDYNAMIKSIMULATION BMW 216D GRANTOURER	100
DPF-REGENERATIONSSIMULATION BMW 216D GRANTOURER	103

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

<i>A</i>	m ²	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
<i>C</i>	ppm	Konzentration
<i>F</i>	N	Kraft
<i>I</i>	kgm ²	Massenträgheitsmoment
<i>K</i>	-	Konvertierungsrate
<i>P</i>	kW	Leistung
<i>P</i>	kW	Leistung
<i>T</i>	K	Kelvin-Temperatur
<i>a</i>	m/s ²	Beschleunigung
<i>f</i>	Hz	Frequenz
<i>g</i>	m/s ²	örtliche Fallbeschleunigung
<i>n</i>	rpm	Drehzahl
<i>r</i>	m	Radius
<i>t</i>	°C	Celsius-Temperatur
<i>t</i>	s	Zeit
<i>v</i>	km/h	Geschwindigkeit

Konstanten

$g_n = 9,8067$	m/s ²	Normfallbeschleunigung
----------------	------------------	------------------------

Griechische Formelzeichen

α	°, rad	Winkel
λ	-	Luftverhältnis, Luftzahl
ρ	kg/m ³	Dichte

Operatoren und Bezeichnungen

Δ	Differenz zweier Größen
----------	-------------------------

Weitere Indices und Abkürzungen

(NH ₂) ₂ CO	Harnstoff
ABS, abs	absolut
AGR	Abgasrückführung
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
Ba(NO ₃) ₂	Bariumnitrat
BaCO ₃	Bariumcarbonat
BaO	Bariumoxid
BaSO ₄	Bariumsulfat
CDPF	Catalyzed Diesel Particulate Filter
Ce	Cer
CeO ₂	Cer(IV)-oxid
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid

cpSi	Cells per Square Inch (Zellen pro Quadratzoll)
CRT	Continuously Regenerating Trap
CVS	Constant Volume Sampling
C _x H _y	Kohlenwasserstoffe
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Dieseloxidationskatalysator)
DPF	Dieselpartikelfilter
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Abgasrückführung)
ERMES	European Research On Mobile Emission Sources
EU	Europäische Union
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
GPF	Gasoline Particulate Filter (Ottopartikelfilter)
GPS	Global Positioning System
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HC	Kohlenwasserstoffe
HNCO	Isocyansäure
i	Laufvariable (1, 2, ..., k)
IVT	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
j	Laufvariable (1, 2, ..., k)
La ₂ O ₃	Lanthanoxid
max	maximal
min	minimal
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH ₃	Ammoniak
NMHC	Nonmethane Hydrocarbons
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
NSC	NO _x Storage Catalyst (NO _x -Speicherkatalysator)
O ₂	Sauerstoff
OBD	On Board Diagnose
Pd	Palladium
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
PM	Partikelmasse
PN	Partikelanzahl
Pt	Platin
RDE	Real Driving Emissions
Rh	Rhodium
SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
THC	Total Hydrocarbons
TU	Technische Universität
TUG	Technische Universität Graz
TWC	Three Way Catalyst (Dreiwegekatalysator)

WLTC	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle
ZDDP	Zink-Dialkyldithiophosphat
Zr	Zirconium
ZrO ₂	Zirconium(IV)-oxid

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.

Alexander Hoffmann

Graz, 15.6.2021

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Alterungseffekten auf das Emissionsverhalten von Euro 6d-Temp Fahrzeugen. Dafür wurden zwei Dieselfahrzeuge und ein Ottofahrzeug mit hohen Laufleistungen auf ihr Emissionsverhalten untersucht.

Alle Fahrzeuge wurden den gleichen Testkriterien und -zyklen unterzogen, um die Messergebnisse unverfälscht vergleichbar zu machen. Zu den gefahrenen Testzyklen zählen Rollentests (WLTC...Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle, ERMES V9 (ERMES...European Research On Mobile Emission Sources)) und Fahrzyklen im Realbetrieb. Als Messinstrumente wurden die Systeme FTIR (Fourier Transform Infrarot Spektroskopie), Rollenprüfstandsgeräte auf Basis einer CVS-Anlage (CVS...Constant Volume Sampling) und PEMS (Portable Emissions Measurement System) eingesetzt.

Anschließend wurden die Messdaten aufbereitet und in geeigneter Weise präsentiert. Verglichen wurden die gemessenen Emissionswerte zusätzlich mit den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten. Weiters flossen noch die Messwerte der Typprüfung in die Analyse ein. Daraus wurden Alterungsfaktoren für bestimmte Laufleistungen herausgearbeitet.

Im darauffolgenden Teil wurden Emissionskennfelder mittels PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) erstellt. Diese ermöglichen es, Veränderungen im Emissionsverhalten der einzelnen Fahrzeuge zu erkennen. Daraus konnten Kennfeldbereiche quantifiziert werden, die sich mit steigender Laufleistung verschlechtern.

Mit den erhaltenen Emissionskennfeldern wurden Längsdynamiksimulationen durchgeführt. Dazu mussten im ersten Schritt geeignete Fahrzeugparameter für alle Fahrzeuge gefunden werden. Diese Fahrzeugdaten wurden mittels Validierung überprüft. Mit den bestätigten Fahrzeugparametern konnten realistische Längsdynamiksimulationen durchgeführt werden. Aus diesen Ergebnissen wurden wieder Alterungsfaktoren abgeleitet.

Der letzte Teil beschäftigt sich mit der Erstellung eines DPF-Regenerationsmodells (DPF...Dieselpartikelfilter). Dazu wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt. In der ersten Methode wurde ein kennfeldbasierter Ansatz herangezogen. Es wurde versucht, mit Kennfeldvergleichen Änderungsfaktoren der Emissionswerte zu berechnen. Diese wurden dann mit HBEFA-Datenbankwerten (HBEFA...Handbuch für Emissionsfaktoren) verglichen. Der zweite Ansatz ist eine Gegenüberstellung zwischen DPF-Regenerationsmessung und Nachsimulation im Normalbetrieb. Die Resultate wurden analog zur ersten Variante begutachtet.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der gasförmige Schadstoffausstoß mit der Laufleistung der Fahrzeuge steigt. Bei den Partikelwerten (Partikelmasse und -anzahl) konnte eine Verbesserung über die Laufzeit festgestellt werden.

Abstract

This thesis deals with ageing effects on the emission behaviour of Euro 6d-Temp vehicles. Therefore, two diesel vehicles and one petrol vehicle with high mileage were tested for their emission behaviour.

All vehicles were subjected to the same test criteria and cycles in order to make the measurement results comparable without distortion. The test cycles include rolling tests (WLTC...Worldwide harmonised Light Duty Test Cycle, ERMES V9 (ERMES...European Research On Mobile Emission Sources)) and real-world driving cycles. The FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy), the measurement systems on basis of a CVS system (CVS...Constant Volume Sampling) and PEMS (Portable Emissions Measurement System) were used as measuring instruments.

The measurement data was then processed and presented in a suitable manner. The measured emission values were also compared with the legally prescribed limit values. Furthermore, the measured values of the type test were included in the analysis. From this, ageing factors for certain mileages were worked out.

In the following part, emission maps were created using PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model). These enable changes in the emission behaviour of the individual vehicles to be recognised. From this, it was possible to quantify characteristic map areas that deteriorate with increasing mileage.

With the emission maps obtained, longitudinal dynamic simulations were carried out. In the first step, suitable vehicle parameters had to be found for all vehicles. These vehicle data were then checked by means of validation. With the confirmed vehicle parameters, realistic longitudinal dynamic simulations could be carried out. Ageing factors were again derived from these results.

The last part deals with the creation of a DPF-regeneration model (DPF...Diesel Particulate Filter). Two different approaches were chosen for this purpose. In the first method, a map-based approach was used. An attempt was made to use map comparisons to calculate change factors for the emission values. These were then compared with database values (HBEFA...Handbook for Emission Factors). The second approach is a comparison of a DPF-regeneration measurement and a post-simulation in normal driving conditions. The results were then assessed in the same way as the first approach.

The results showed that the gaseous pollutant emissions increase with the mileage of the vehicles. For the particulate values (particulate mass and number), an improvement over the running time was observed.

1 Einleitung

Der menschliche Ausstoß an Schadstoffen ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Dies ist nicht primär auf den Verkehr zurückzuführen, er hat aber einen Anteil daran. Die Motoren der heutigen Generation sind durch geeignete Betriebsstrategien, innere Emissionsminimierung, wie Niederdruck- und Hochdruck-AGR (AGR...Abgasrückführung) aber vor allem durch die Abgasnachbehandlungssysteme schadstoffärmer und umweltfreundlicher als deren Vorgängergenerationen. Durch die Gesetzeslage sind Fahrzeuge bei der Typprüfung einer Reihe von Emissionstests ausgesetzt. Die Fahrzeuge müssen die Emissionsgrenzwerte mit 160 tkm noch einhalten, wobei hier ein Erhöhungsfaktor auf die Grenzwerte aufgerechnet wird.

Katalysatoren und Filtereinheiten arbeiten in schwierigen Umgebungsbedingungen, wie hohen Temperaturschwankungen, die zu großen Thermospannungen und somit zu mechanischen Belastungen der Systeme führen. Auch die chemische Belastung durch Einlagerungs- und Auslagerungsprozesse beanspruchen die Abgasnachbehandlungssysteme enorm. Zudem kommen noch Fremdstoffe ins Spiel, die aus Motorölen oder Kraftstoffen resultieren, welche Speichereinheiten der Katalysatoren besetzen können.

Um all diese Schädigungsmechanismen in Summe an Fahrzeugen quantifizieren zu können, wurden in dieser Arbeit drei Fahrzeuge mit hohen Laufleistungen untersucht. Die Fahrzeuge wurden mehreren Emissionsmessfahrten unterzogen und parallel dazu wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. Aus den experimentellen und berechneten Ergebnissen wurden Alterungsfaktoren und Verschlechterungs- bzw. Verbesserungsfaktoren berechnet.

Des Weiteren sind noch DPF-Regenerationssimulationen von Dieselfahrzeugen erarbeitet worden, um den Einfluss einer DPF-Regeneration in Bezug auf das normale Emissionsverhalten zu untersuchen.

Am Ende der Arbeit wurden sämtlich erhaltene Ergebnisse diskutiert und in weiterer Folge Schlussfolgerungen und ein Ausblick über alle wichtigen Erkenntnisse erstellt.

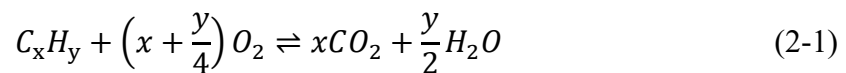
2 Theoretische Grundlagen

2.1 Abgasnachbehandlungssysteme

Abgasnachbehandlungssysteme haben in den letzten Jahren immer mehr an Priorität dazugewonnen. Diese maßgebliche Steigerung der Entwicklung in emissionsmindernde Systeme ist hauptsächlich auf das veränderliche Klima und die Luftgüte zurückzuführen. Aus diesem Grund wurden die Emissionsgrenzwerte und -zyklen in letzter Zeit strikter. Dieser Trend wird auch in Zukunft noch weiter anhalten.

2.1.1 Dreivegekatalysator

Der Dreivegekatalysator ist eines der wichtigsten Abgasnachbehandlungssysteme für einen stöchiometrisch (Luftverhältnis $\lambda = 1$) betriebenen Ottomotor. Wie aus dem Namen schon hervorgeht, konvertiert dieser Katalysator drei Schadstoffkomponenten (CO , C_xH_y , NO_x) zeitgleich mit folgenden Reaktionen. [10]



Diese Reaktionsgleichungen sind im nachstehenden Diagramm (Abbildung 2-1) über dem Luftverhältnis vor und nach Katalysator aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Lambda gleich eins die bestmögliche Konvertierung stattfinden kann, wodurch der Dreivegekatalysator hauptsächlich bei Ottomotoren Anwendung findet. [10]

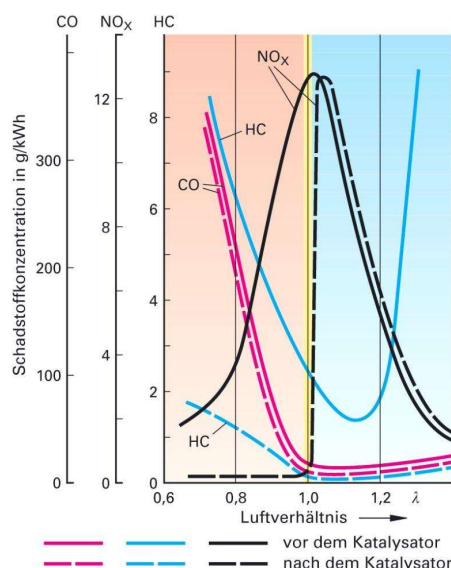


Abbildung 2-1: Schadstoffkonzentrationen über dem Luftverhältnis vor/nach Katalysator [3]

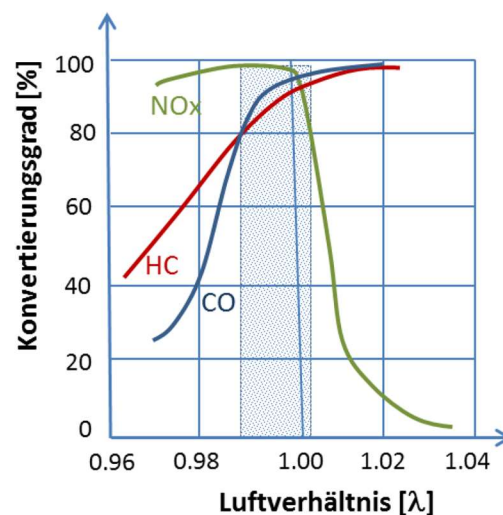


Abbildung 2-2: Konvertierungsrate über dem Luftverhältnis [10]

Die rechte Abbildung (Abbildung 2-2, Seite 2) zeigt den Konvertierungsgrad K (Verhältnis aus der Konzentrationsänderung zur Rohkonzentration einer bestimmten Abgaskomponente). [10]

$$K := \frac{C_{\text{Rohabgas}} - C_{\text{nach Katalysator}}}{C_{\text{Rohabgas}}} \quad (2-4)$$

Neben dem Luftverhältnis hat die Temperatur des Abgases einen entscheidenden Einfluss auf die Konvertierungsrate K . Man spricht von einer „Light-Off-Temperatur“, wenn der Konvertierungsgrad zumindest 50 % erreicht. [10]

Diese Temperaturschwelle sollte nach einem Kaltstart schnellstmöglich erreicht werden um Kaltstartemissionen entgegenzuwirken. Dies geschieht mittels strategischer Eingriffe (durch die Motorsteuerung) oder über diverse Kaltstarteinrichtungen (z.B.: Katalysatorheizung). [10]

Eine übliche Möglichkeit die Kaltstartemissionen gering zu halten wird durch die Einblasung von Sekundärluft realisiert. Bei dieser Art wird der Motor in der Warmlaufphase fett ($\lambda < 1$) betrieben und es wird in der Nähe des Auslassventils, dem Rohabgas Frischluft beigemengt. Dies bewirkt im motornahen Katalysator eine Oxidation von HC, CO und H_2 welche exotherm abläuft und somit eine Temperaturerhöhung ergibt. [10]

Aufbau und Materialien von Dreiwegekatalysatoren

Grundsätzlich werden Katalysatoren in Vollkatalysatoren und Trägerkatalysatoren unterteilt. Erstere bestehen vollständig aus katalytischen Bestandteilen (z.B.: SCR-Katalysatoren) wobei bei den Trägerkatalysatoren die wirkende (katalytische) Schicht, auf Metall- oder Keramikstrukturen aufgetragen wird. [10]

Die Zellanzahl von Keramikatalysatoren liegt bei ca. 400 cpsi (cpsi...Cells per Square Inch (Zellen pro Quadratzoll)). Metallkatalysatoren erreichen 900 cpsi bei Wandstärken von 0,3 mm und bis zu 1000 cpsi bei Wandstärken von 30 μm . [10]

Auf diese Strukturen wird eine Zwischenschicht aufgetragen (Washcoat), welcher die wirkende Oberfläche um ein Vielfaches erhöht. Als Washcoatmaterial verwendet man Aluminiumoxid (Al_2O_3), Ceroxid oder Zirkoniumoxid. Auf diese Zwischenschicht wird der Katalysator aufgebracht, welcher in der Regel Rhodium, Platin oder Palladium ist (Abbildung 2-3). [10]

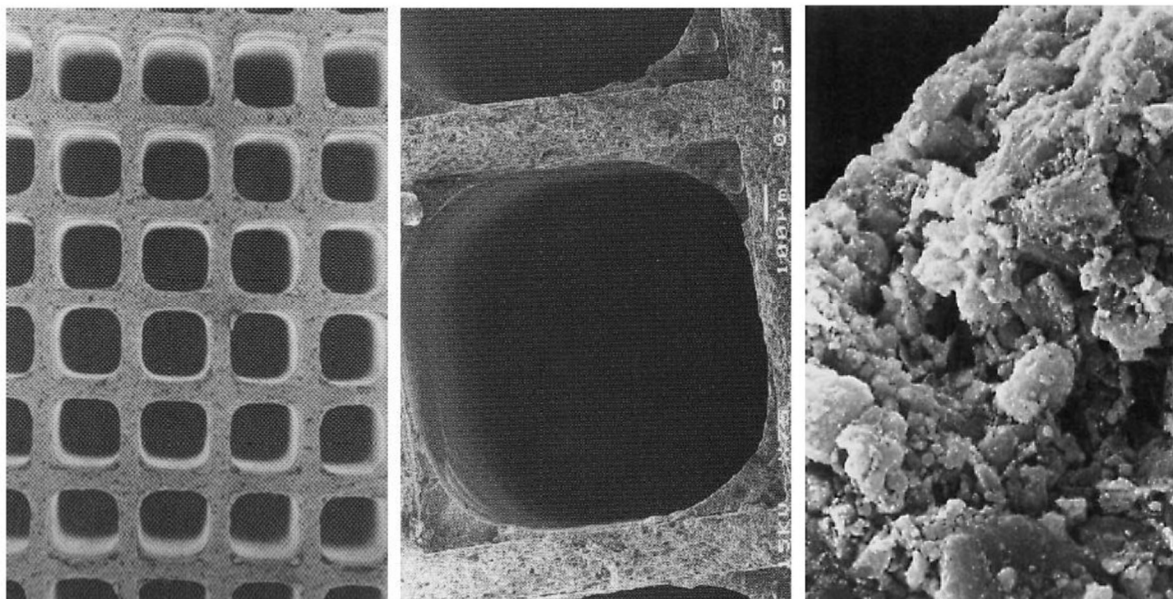


Abbildung 2-3: Wabenstruktur (links), Washcoat (mitte), Katalysatorpartikel (rechts) [6]

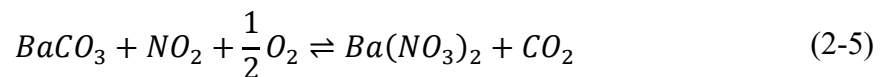
2.1.2 NO_x-Speicherkatalysator

Der NO_x-Speicherkatalysator ist ein Abgasnachbehandlungssystem, welches in Dieselfahrzeugen zur Senkung der NO_x-Emissionen eingesetzt wird. In einem NO_x-Speicherkatalysator erfolgt eine Umwandlung von NO_x in N₂ und CO₂. Dieser Prozess läuft immer in zwei unterschiedlichen Schritten ab. [14]

In der ersten Phase wird NO_x bei Magerbetrieb ($\lambda > 1$) im Speicherkatalysator eingelagert und in einer darauffolgenden Fettphase ($\lambda < 1$) wieder abgebaut und umgewandelt. [14]

NO_x-Einlagerung

Die Oberfläche des Katalysators ist mit Alkali- oder Erdalkalimetallen, in der Regel Bariumnitrat (hohe Temperaturbeständigkeit) beschichtet, welches die Fähigkeit besitzt, mit NO₂ eine reversible Verbindung einzugehen. Zur Einlagerung von NO muss diese Abgaskomponente zuerst in einem Oxidationskatalysator, der entweder vorgeschaltet oder direkt integriert ist, zu NO₂ aufoxidiert werden. [14]

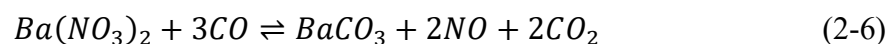


Diese Reaktion kann nur in gewissen Temperaturgrenzen ablaufen. Wenn die Abgastemperatur unter 250 °C fällt, dann ist die Oxidation von NO zu NO₂ zu langsam. Ist die Temperatur jedoch über 450 °C, dann liegt das NO₂ nicht mehr stabil vor. [14]

Die Einlagerungsphase kann auch nicht ewig andauern, da sonst die Speicherfähigkeit stark sinkt und die NO_x-Emissionen steigen würden. Diese Grenze kann durch Modelle oder mittels eines NO_x-Sensors erkannt werden. Normalerweise dauert die Einlagerung zwischen 30 und 300 s. [14]

NO_x-Konvertierung

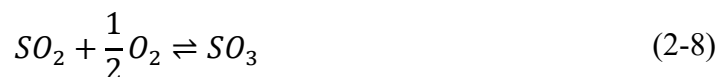
Nach der Einlagerungsphase müssen die im Bariumnitrat gespeicherten NO₂ wieder gelöst werden, um so eine Konvertierung in N₂ und CO₂ zu erzielen. Diese Trennung läuft in einem fetten Betriebspunkt ab (wie oben beschrieben). Das CO ist hierbei der Reaktionspartner und reduziert Bariumnitrat zu N₂ und bildet mit Barium wieder ein Carbonat. Bei der ersten Reaktion entstehen NO und CO₂ die durch eine Rhodium-Beschichtung weiter zu N₂ und CO₂ reagieren (Reaktion (2-7)). [14]



Das Ende einer Konvertierungsphase kann entweder durch geeignete Modelle oder mit einer Lambdasonde erkannt werden. Übliche Auslagerungs- oder Konvertierungsphasen dauern etwa 2 bis 10 s. [14]

Desulfatisierung

Schwefel kann in Kraftstoffen oder Ölen gefunden werden und ist eine starke Belastung für ein NO_x-Speichersystem. Bariumnitrat hat eine höhere Affinität sich mit Schwefeldioxid (SO₂) als mit NO₂ zu binden. Dieses Phänomen führt dazu, dass die Einlagerungsphasen kürzer werden und es zu häufigeren Konvertierungsphasen kommt. Zudem lässt sich das SO₂ durch eine normale Regeneration nicht aus der Bariumnitratverbindung lösen und es kommt zu einem Zuwachsen der Speichereinheit (Reaktion (2-8) und (2-9)). [14]



Aus diesem Grund ist es nötig den Katalysator in regelmäßigen Abständen einer Desulfatisierung zu unterziehen. Dabei wird der Motorbetrieb für 5 min bei Luftmangel betrieben und durch Einspritzstrategien die Abgastemperatur auf über 650 °C angehoben (ähnlich der DPF-Regeneration). Weiters wird in diesem Prozess darauf geachtet, dass der O₂-Gehalt im Abgas gering bleibt. [14]

Eine große Gefahr bei der Desulfatisierung stellt die Entstehung von Schwefelwasserstoff (H₂S) dar, welche bei Rest-O₂ auftreten kann. Schwefelwasserstoff ist höchst giftig. [14]

Aufbau einer Abgasanlage mit NO_x-Speicherkatalysator

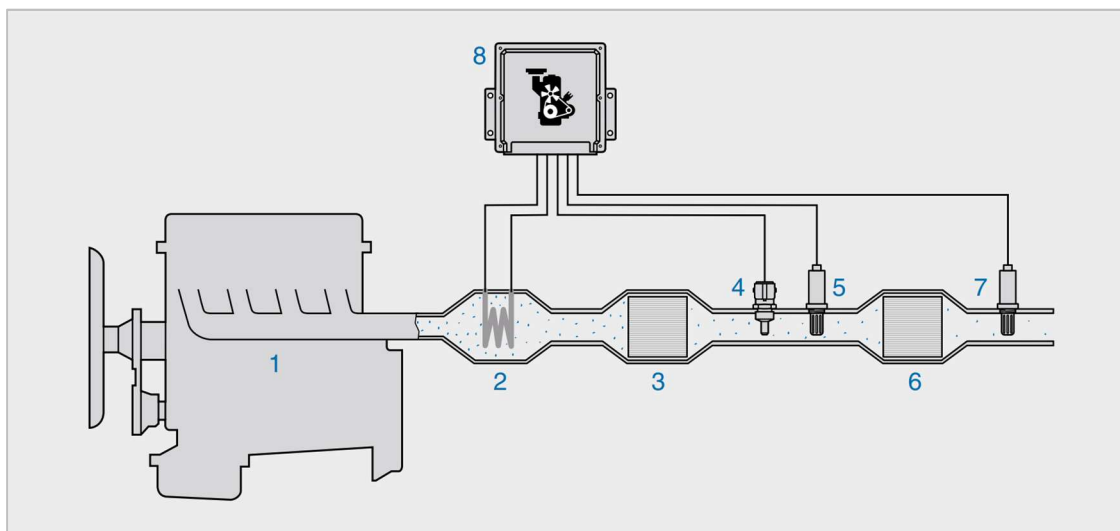


Abbildung 2-4: Aufbau einer Abgasanlage mit NO_x-Speicherkatalysator [14]

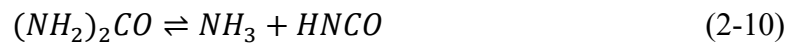
Die Abbildung 2-4 zeigt ein Schema eines Abgassystems mit NO_x-Speicher-Katalysator. Das entstehende Abgas, kommend vom Dieselmotor (1), wird durch eine optionale Abgasheizung (2) weiter zum Oxidationskatalysator transportiert (3), um dort NO zu NO₂ zu oxidieren. Danach wird der Abgaszustand mittels Temperatursensor (4) und Lambdasonde (5) detektiert. Die NO₂-Einlagerung erfolgt im NO_x-Speicher-Katalysator (6). Am Ende des NSC (NO_x-Speicher-Katalysator) misst ein NO_x-Sensor (7) die Konzentration, um die Konvertierungsstartzeit zu erfassen. Alle gemessenen Werte werden im Motorsteuergerät (8) zusammengefasst. [14]

2.1.3 Selektive katalytische Reduktion

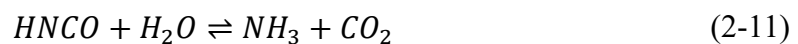
Die selektive katalytische Reduktion (SCR...Selective Catalytic Reduction) ist ein Abgasnachbehandlungssystem, welches zur Reduzierung der Abgaskomponente NO_x eingesetzt wird. Zum Einsatz kommt dieses bei Dieselfahrzeugen. Dieses Verfahren arbeitet, im Gegensatz zum NSC, mit einem von außen zugeführten Reduktionsmittel und bildet dadurch ein kontinuierliches Verfahren. [14]

Es hat sich bewährt als Reaktionsmittel Ammoniak (NH_3) zu verwenden. Die Affinität des NH_3 sich mit dem in Stickoxiden gebundenen Sauerstoff zu verbinden ist bedeutend größer als jene, sich mit dem Sauerstoff anderer Moleküle zu verbinden (z.B.: CO). Allerdings ist Ammoniak giftig und wird somit erst im Katalysator aus Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) gebildet. Diese beiden Reaktionen (Hydrolysereaktion) sind folglich gezeigt. [14]

Thermolyse

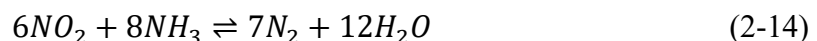
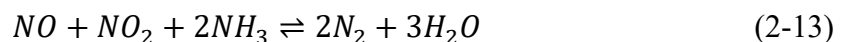
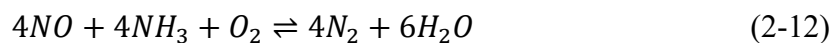


Hydrolyse



Ist die Reaktionsgeschwindigkeit, bei der Hydrolysereaktion, zu gering (Temperatur unter $250\text{ }^\circ\text{C}$), so bilden sich feste Bestandteile. Dies ist durch geeignete Katalysatoren zu unterbinden. [14]

Die Reduktion der Stickoxide erfolgt in drei Schritten:



Bei geringen Abgastemperaturen läuft hauptsächlich die Reaktion (2-13) ab. An der Reaktion ist erkennbar, dass jeweils ein Mol NO und ein Mol NO_2 benötigt werden. Somit muss im unteren Temperaturbereich ($< 200\text{ }^\circ\text{C}$) durch geeignete Oxidationskatalysatoren ein NO/NO_2 -Verhältnis von 1 erreicht werden. [14]

Am Ende des SCR-Systems befindet sich ein NH_3 -Sperrkatalysator, welcher verhindert, dass Ammoniak in die Umwelt gelangt. [14]

Aufbau eines SCR-Systems

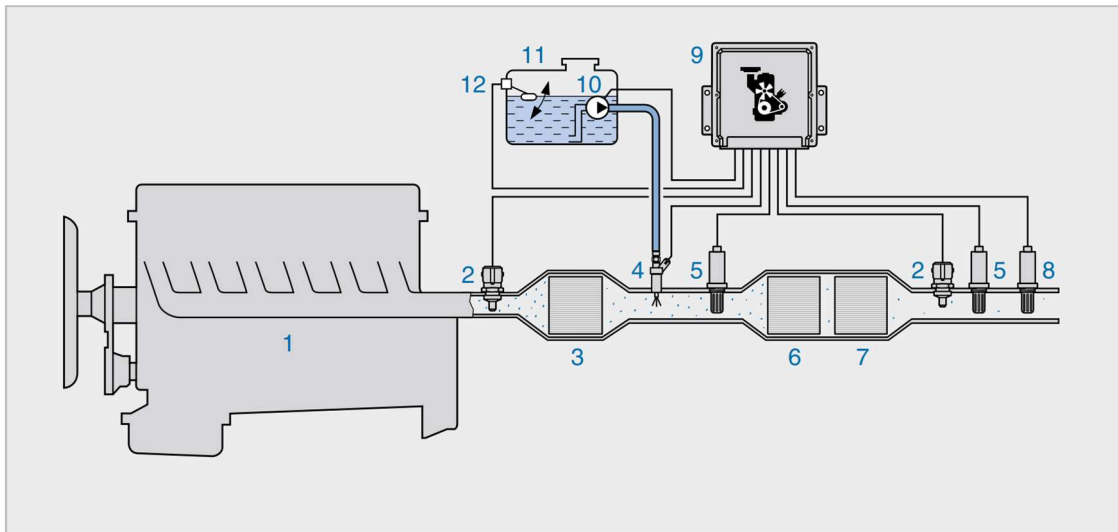


Abbildung 2-5: Aufbau eines SCR-Systems [14]

Das Abgas verlässt den Dieselmotor (1), passiert einen Temperaturfühler (2) und wird im Oxidationskatalysator (3) aufbereitet. Danach wird der Harnstoff, kommend vom Reduktionsmittelbehälter (11) (bestehend aus Füllstandsensoren (12) und Pumpe (10)) über die Einspritzdüse (4) in das Abgas eingespritzt. Das gesamte Gemisch wird dann an einem NO_x -Sensor (5) vorbeigeführt und dem SCR-Katalysator (6) zugeführt. Am Ende des SCR-Systems befindet sich noch der NH_3 -Sperrkatalysator (7). Schlussendlich wird das Abgas noch mittels Temperatursensoren (2), NO_x -Sensoren (5) und NH_3 -Sensoren (8) gemessen. Alle gemessenen Werte werden an das Motorsteuergerät (9) geliefert. [14]

In einer gesamten Abgasanlage eines Personenkraftwagens würde die Integration eines SCR-Moduls folgendermaßen aussehen (Abbildung 2-6). [14]

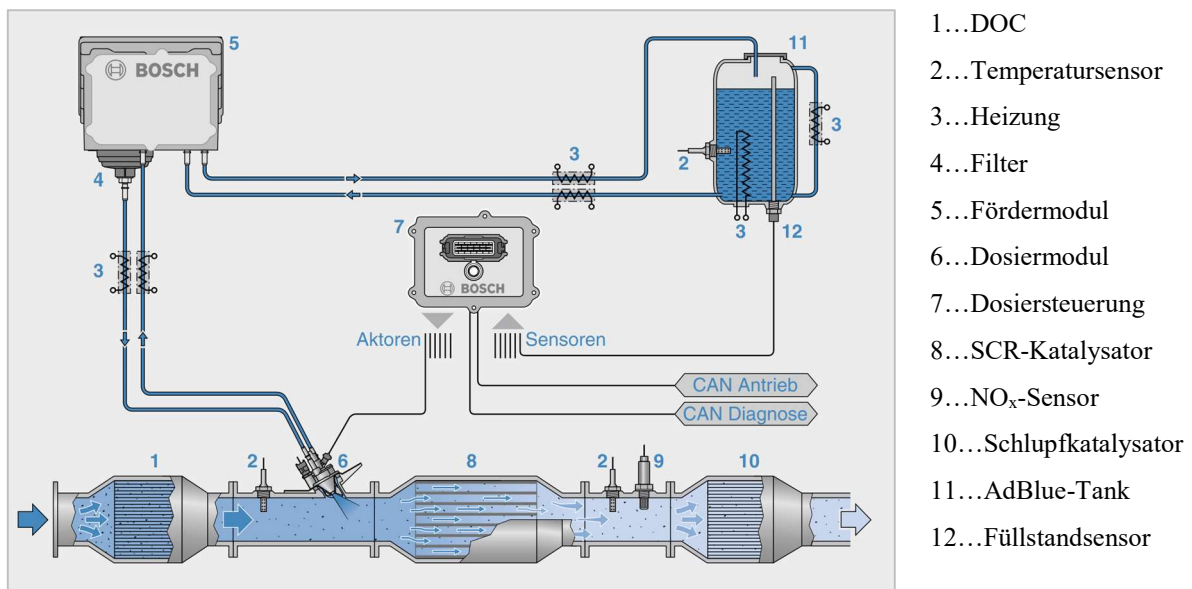


Abbildung 2-6: Abgasanlage zur katalytischen Reduktion [14]

2.1.4 Partikelfilter

Die Partikelmasse zählt schon länger zu den einzuhaltenden Grenzwerten bei der Emissionstypprüfung. Seit der Euro 5b/b+ Emissionsstufe wurde zusätzlich die Partikelanzahl für kompressionsgezündete Verbrennungskraftmaschinen (z.B.: Dieselmotor) reglementiert und mit der Einführung der Euro 6b Emissionsstufe ist auch die Partikelanzahl von fremdgezündeten Verbrennungskraftmaschinen (z.B.: Ottomotor) begrenzt. Dies hat zur Folge, dass der Partikelfilter, wie er schon lange aus Dieselfahrzeugen (DPF...Dieselpartikelfilter) bekannt ist, nun auch Einzug in Fahrzeugen mit Ottomotoren (GPF...Gasoline Particle Filter) erlangt. [8]

Partikelfilter können grundsätzlich in geschlossene und offene Systeme unterteilt werden.

Geschlossene Systeme

Heutzutage kommen großteils Wall-Flow-Monolithfilter zum Einsatz. Hergestellt werden diese meist aus Siliziumcarbid, Cordierit oder Sintermetallen. Siliziumcarbid wird am häufigsten gewählt, da es alle nötigen Kriterien, wie eine hohe thermische Stabilität (Temperaturen von über 1000 °C bei der Regeneration), eine gute Filterwirkung in Bezug auf Asche, Partikelmasse und Partikelanzahl (> 90 %) und einen geringen Abgasgedruck bereitstellt. Die Abbildung 2-7 zeigt einen Wall-Flow-Monolithfilter in schematischer Darstellung. Das Abgas tritt von links in den Partikelfilter ein und wird aufgrund der Verschlussstopfen (in Rot gekennzeichnet) gezwungen durch die porösen Filterwände zu strömen, wobei der Großteil der Partikel abgeschieden wird. Das nahezu partikelfreie Abgas strömt rechts aus dem Filter aus. [8]

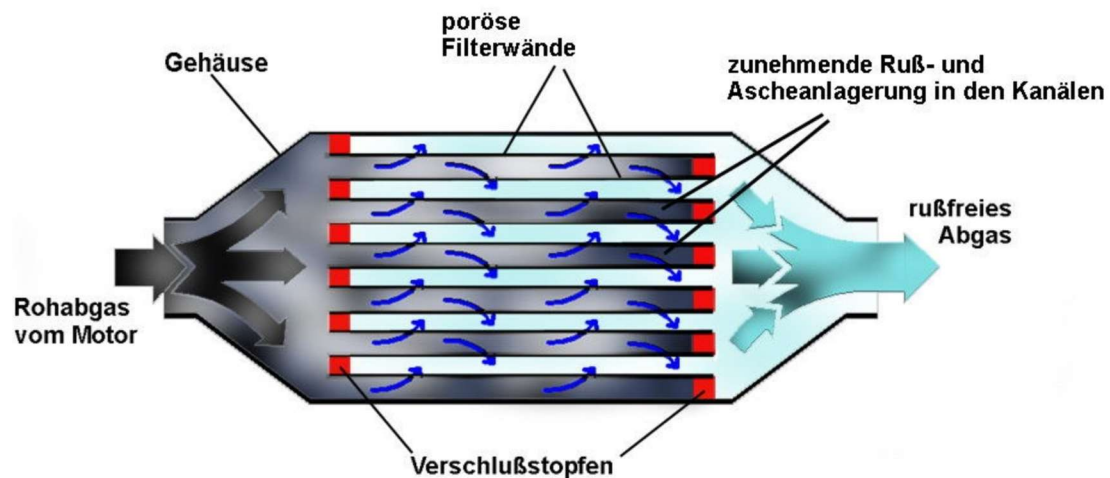


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung eines Partikelfilters [15]

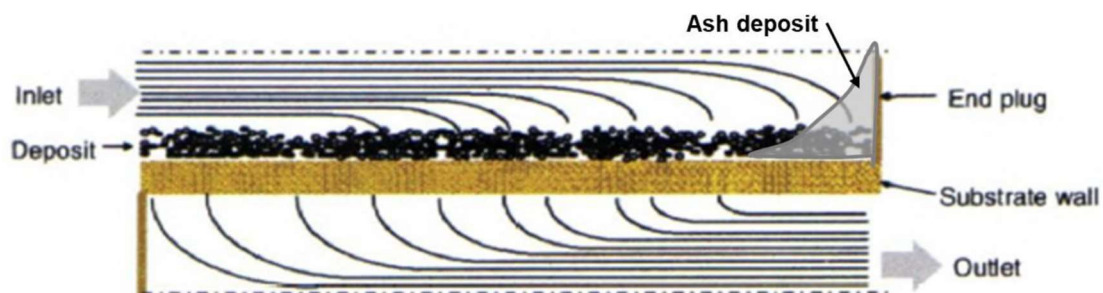


Abbildung 2-8: Ablagerung von Partikeln und Asche [1]

In Abbildung 2-8 (Seite 8) ist die Ablagerung von Partikeln und Asche schematisch gezeigt. Im realen Betrieb wird der Filter ständig mit Partikelmasse beaufschlagt. Dies führt dazu, dass sich immer weniger Freiräume finden, durch die Abgas strömen kann. Als Folge steigt der Abgasgegendruck. Um dem vorzubeugen, muss der Filter in regelmäßigen Abständen regeneriert werden. Wird der Zeitpunkt für eine solche Regeneration zu lange nach hinten verschoben, entstehen aufgrund der großen Partikelmasse sehr hohe Abbrenntemperaturen (über 1000 °C). Solche Temperaturen stellen nicht nur hohe Anforderungen an das Filtersystem, sondern können auch zu Ascheschmelzung (ab 1100 °C) führen, welche den Filter verklebt. [8]

Um die Partikel, die größtenteils aus Kohlenstoff bestehen abzubrennen, ist eine Temperatur von ca. 500 °C nötig. Diese wird allerdings im Normalbetrieb nur selten erreicht. Somit ergeben sich folgende Möglichkeiten, um eine Regeneration einzuleiten. [8]

(1.) Additive im Kraftstoff

Bei der Kraftstoffadditivierung werden dem Kraftstoff metallische Elemente beigemischt, welche im Partikelfilter Reaktionen mit dem Kohlenstoff erlauben. Dies führt zu einer Reinigung des Filters. Ein gravierender Nachteil dieses Verfahrens ist die erhöhte Aschebelastung, die als Folge der Reaktion im Filter zurückbleibt. [8]

(2.) Regeneration mit NO₂

Diese Form der Regeneration setzt auf einen Oxidationskatalysator, welcher vor dem Partikelfilter, oder direkt im Partikelfilter (CDPF...Catalyzed Diesel Particulate Filter) verbaut ist. Dort oxidiert NO zu NO₂. (Gleichung (2-15)). [8]

Oxidationsreaktion



Reaktionen im Partikelfilter



Dieses Verfahren ist auch als Continuously Regenerating Trap (CRT) bekannt. Mit der NO₂-Variante findet die Abbrennreaktion bei einer Temperatur von ca. 280 °C statt. Als Nachteil dieser Form ist die Produktion von NO₂ zu nennen. Grundsätzlich sind die Stickoxide einem Grenzwert unterworfen, jedoch ist NO₂ gesundheitlich weit bedenklicher als NO. Zudem ist auf der Immissionsseite (das Einwirken auf die Umwelt) die NO₂-Belastung limitiert. [8]

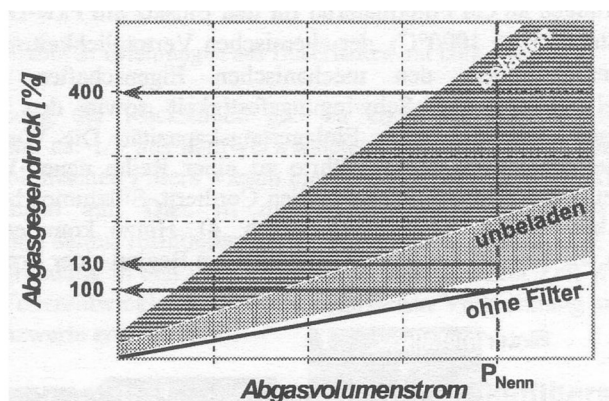


Abbildung 2-9: Abgasgegendruck, Beladungszustand und Abgasvolumenstrom [10]

In Abbildung 2-9 (Seite 9) ist der Abgasgegendruck in Abhängigkeit vom Beladungszustand und Abgasvolumenstrom aufgetragen. An dieser Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass ein beladener Filter (bei Nennleistung) einen doppelt so hohen Abgasgegendruck erzeugt wie ein unbelasteter Filter. Der Abgasgegendruck wird im Fahrzeug gemessen und wenn dieser ein vorgegebenes Limit erreicht, wird eine Zwangsregeneration (in der Regel mit innermotorischen Maßnahmen (z.B.: Nacheinspritzung, thermische Regeneration)) eingeleitet. Strategien für die Regeneration sind im nachstehenden Diagramm (Abbildung 2-10) ersichtlich. [8]

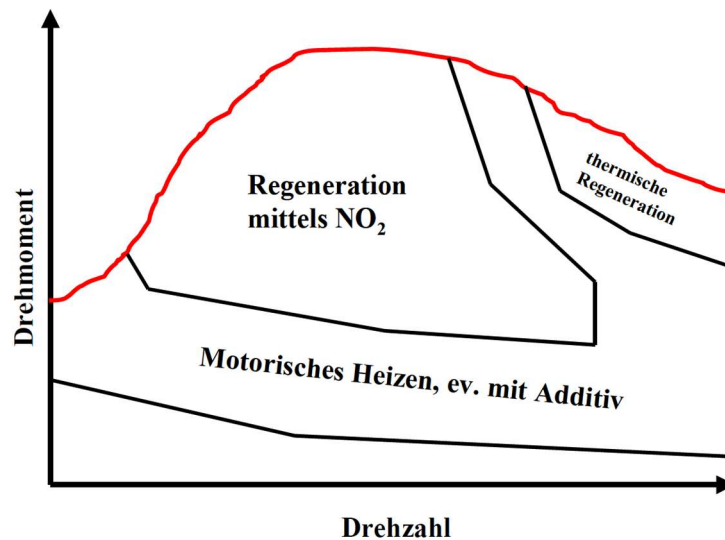


Abbildung 2-10: Regenerationsstrategien [10]

Filterungsmechanismen

Grundsätzlich werden die Filterungsmechanismen in drei große Hauptgruppen unterteilt. Dies sind Impaktion, Interzeption und Diffusion/Thermophorese. [10]

1. Impaktion

Große Partikel können aufgrund ihrer Massenträgheit den Strömungslinien nicht mehr folgen und treffen auf das Hindernis. [10]

2. Interzeption

Mittlere bzw. kleinere Partikel werden durch die Interzeption abgeschieden. Dies geschieht, wenn sich die Teilchen auf oder unterhalb der Grenzpartikelbahn befinden. [10]

3. Diffusion/Thermophorese

Nanopartikel werden mittels Brown'scher Diffusionsbewegung oder Thermophorese am Filter abgeschieden. [10]

Diffusionsabscheidung: Wird durch die Brown'sche Diffusionsbewegung in Kombination mit dem Konzentrationsgradienten des Partikels verursacht. So gelangen Nanopartikel durch die Strömungsgrenzschicht zur Wand (Diffusionsbewegung). Turbulente Strömungen verbessern die Abscheiderate gegenüber laminaren Strömungszuständen. [10]

Thermophoresische Abscheidung: In einem Temperaturgradientenfeld werden Partikel aufgrund von Stößen, welche durch Gasmoleküle mit unterschiedlicher kinetischer Energie geladen sind, zur kälteren Seite bewegt. Der Erfolg ist also abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Filter. [10]

Alle beschriebenen Mechanismen sind in Abbildung 2-11 (Seite 11) dargestellt.

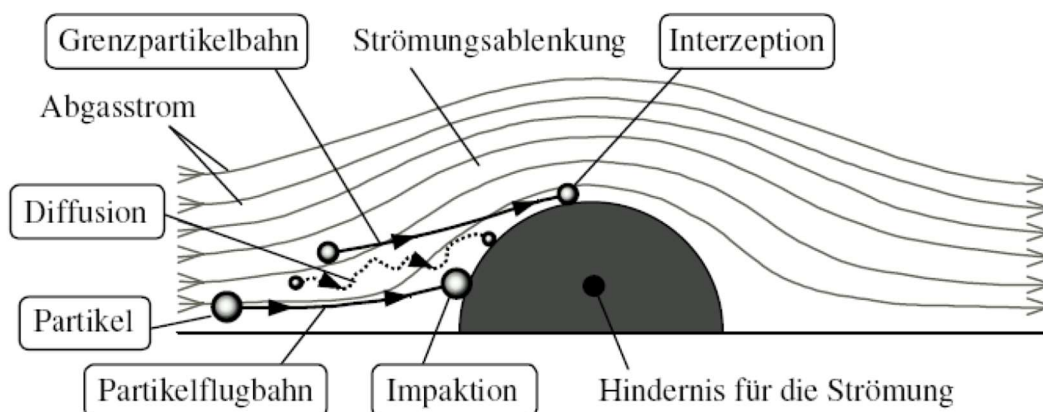


Abbildung 2-11: Filterungsmechanismen [13]

Durch die Filtermechanismen haben sich folgende zwei Filterbauweisen, Oberflächenfilter und Tiefenfilter durchgesetzt (Abbildung 2-12). Oberflächenfilter agieren im unbeladenen Zustand wie ein Tiefenfilter und beladen den Filter in seiner Matrix. Erst ab einer moderaten Beladung bildet sich ein sogenannter Filterkuchen an der Oberfläche. Dieser erhöht die Abscheidung von Partikeln. Tiefenfilter haben den Nachteil, dass der Abgasgedruck stärker ansteigt, wie jener bei Oberflächenfiltern. Dies ist durch die raschere Verengung der Kanalgänge erklärbar. [10]

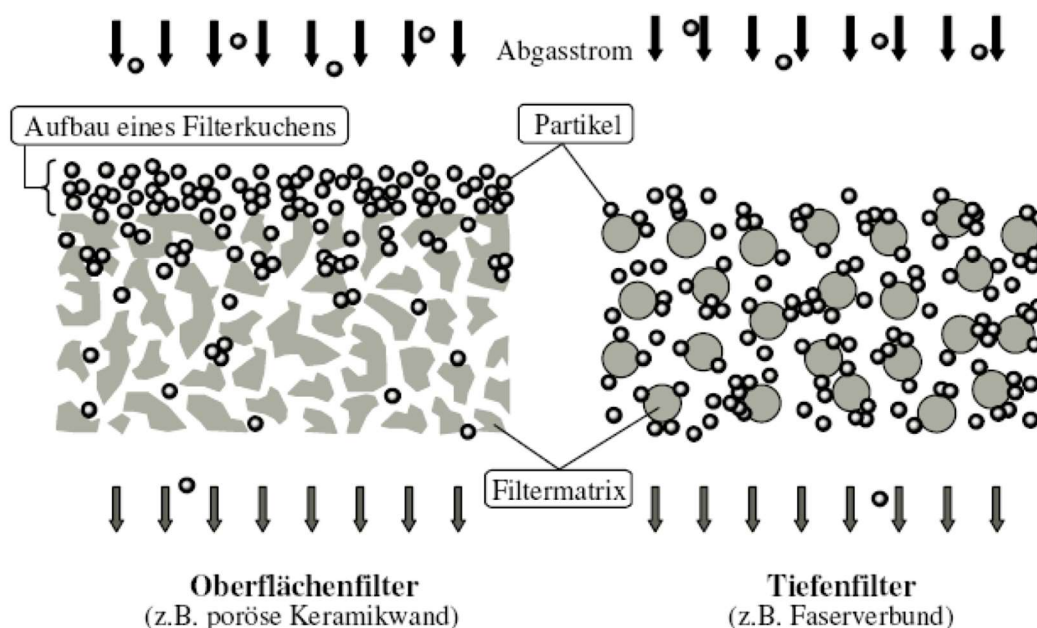


Abbildung 2-12: Oberflächenfilter (links) und Tiefenfilter (rechts) [13]

Offene Systeme

Offene Systeme sind Durchflussfilter, bei denen nicht das gesamte Abgas gezwungen wird durch poröse Wände durchzuströmen. Ein solcher Filter muss so ausgelegt werden, dass er Teilströme des Abgasmassenstroms durch Filtermodule leitet (z.B.: Schaufelartige Vorrichtungen). Durch diese Arbeitsweise entsteht auch ein geringerer Abgasgegendruck, aber auch eine geringere Abscheiderate (20 – 50 %). Die Abbildung 2-13 zeigt den Aufbau eines offenen Filtersystems. [10]

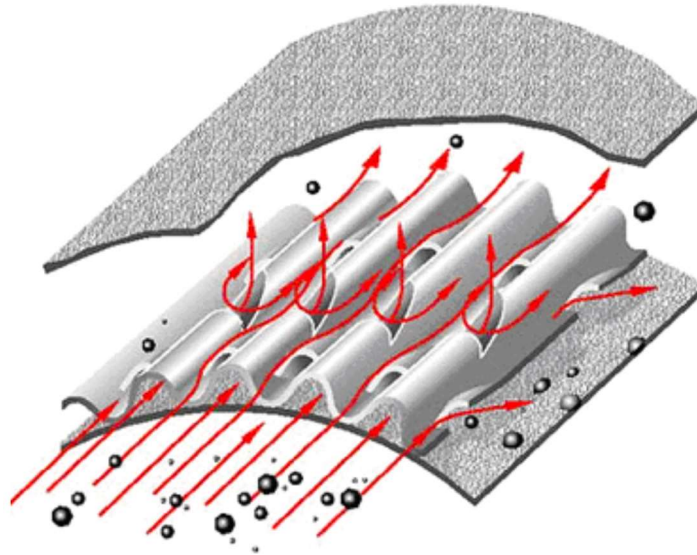


Abbildung 2-13: Schema eines offenen Partikelfilters [2]

2.2 Alterung von Abgasnachbehandlungssystemen

Mit steigender Einsatzdauer sinken, bedingt durch chemische, thermische und mechanische Einflüsse (Tabelle 2-1), die Konvertierungsraten von Katalysatoren. Thermische Desaktivierung verursacht meist das Zusammenwachsen von Edelmetallpartikeln. Chemische Alterungseffekte entstehen aus diversen Bestandteilen, der im Kraftstoff und Motoröl enthaltenen Elementen oder durch Verunreinigungen. Mechanische Mechanismen können zum Beispiel durch Spannungen in Schweiß- und Lötstellen ausgelöst werden. [12]

Eine experimentelle Untersuchung eines Dieseloxydationskatalysators (auf einem Motorprüfstand) hat gezeigt, dass die chemische Desaktivierung der thermischen Desaktivierung überwiegt. [17]

Tabelle 2-1: Desaktivierungsmechanismen von Katalysatoren [4]

Alterungstyp	Desaktivierungsmechanismus
Thermisch	Edelmetallsinterung
	Washcoatsinterung
	Wechselwirkungen zwischen Edelmetallen und Washcoat/Träger
	Bildung von Metalllegierungen
	Metallverflüchtigung (Verdampfung)
	Veränderung der Edelmetalloberfläche (Kristallstruktur)
Chemisch	Edelmetalloxidation
	Vergiftung: Irreversible Adsorption oder Reaktion von Vergiftungskomponenten auf/mit dem Washcoat (selektiv/nicht selektiv)
	Inhibierung: Reversible Adsorptionskonkurrenz von Vergiftungs-Precursors
	Rekonstruktion der katalytischen Oberfläche durch Vergiftungselemente
Mechanisch	Physikalisch/chemische Blockierung der Porenstruktur
	Thermoschock
	Abrieb
Fouling	Unzureichende Festigkeit
	Kohlenstoffablagerungen (Verkokung)

2.2.1 Thermische Alterung

Im gesamten Abgassystem treten thermische Schwankungen von mehreren 100 °C auf. Diese werden verursacht durch Lastwechsel, Regenerationen, Desulfatisierungen oder durch exotherme Oxidationsreaktionen (H_2 , HC, CO). [12]

Sinterung von Edelmetallen

Durch den thermischen Eintrag (bei Temperaturen ab 600 °C) in den Katalysator, werden die hochdispergierten Edelmetallnanopartikel zu großen Edelmetallpartikel gesintert (Abbildung 2-14). Durch dieses Verschmelzen sinkt das Oberflächen-Volums-Verhältnis, welches für eine gute Konvertierung unerlässlich ist. [12]

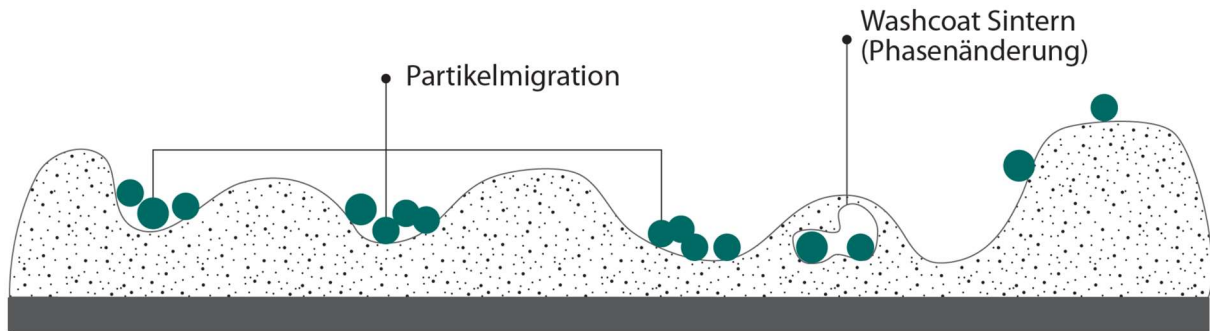


Abbildung 2-14: Thermische Alterung: Edelmetallsinterung [7]

Großen Einfluss auf den Sinterungsprozess haben neben der Temperatur auch die Einwirkzeit, die umliegende Atmosphäre sowie die verwendeten katalytischen Materialien (z.B.: Materialpaarungen). [12]

Bei Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass eine Sinterung von Pt-Partikel auf $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ unter oxidativen Bedingungen schneller vonstattengeht als unter inerten Bedingungen. Liegt jedoch eine Pd-Verbindung vor, liefern inerte Bedingungen aufgrund der höheren thermischen Stabilität und katalytischen Aktivität den schnelleren Sinterungsprozess. Dies ist auch der Grund, warum in den heutigen Katalysatoren meist Verbindungen aus Platin und Palladium verwendet werden. [12]

In Metallträgerkatalysatoren führen Wechselwirkungen zwischen dem Metall und des Trägerwerkstoffes zu Stabilitätsänderungen der katalytisch aktiven Nanopartikel. Um das zu unterbinden werden eine Reihe von Stabilisatoren (z.B.: CeO_2 , La_2O_3 , etc.) eingesetzt. Wird in einem Katalysator also Rhodium in Verbindung mit einem CeZr-Mischoxiden, im Gegensatz zu einem Al_2O_3 -Trägermaterial kombiniert, ist die Sinterungsgefahr weitaus geringer. Zudem wird die Oxidation (bei Temperaturen über 800 °C) von $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ zu $\text{Rh}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ verhindert. [12]

Thermische Alterung des Washcoat – Washcoatsinterung

Die Washcoatsinterung geht immer mit der Edelmetallsinterung einher. Bei der Washcoatsinterung ist das Ergebnis ein Zusammenbruch der Washcoatstruktur. Bei Katalysatoren wird heute meist Aluminiumoxid (hochporöses $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) als Trägermaterial verwendet. Durch die Sinterung durchläuft das Aluminiumoxid eine Phasenumwandlung. Beginnend beim hochporösen $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ über $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ und $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ zur stabilen und nichtporösen $\alpha\text{-Phase}$ ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Durch diesen Prozess bricht die Washcoatstruktur zusammen (Abbildung 2-15) und katalytisch wirksame Oberflächen werden abgekapselt und unwirksam gemacht. Folglich sinkt auch die Gesamtoberfläche, was zu einem weiteren Verlust der Konvertierungsrate führt. [12]

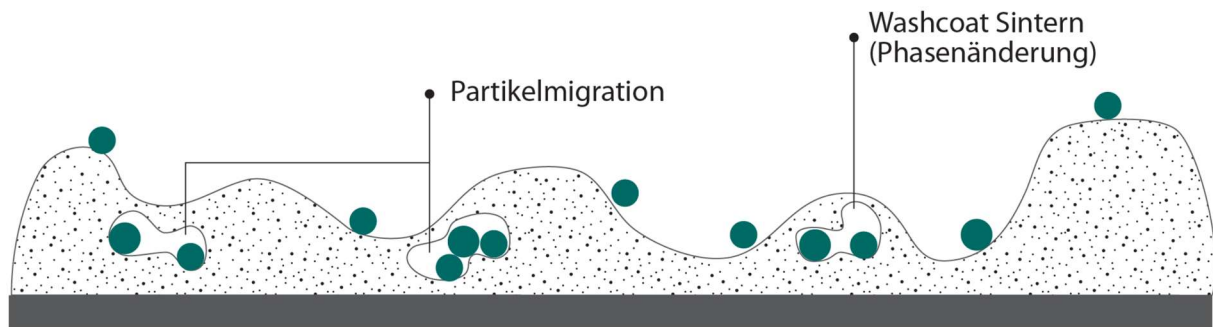


Abbildung 2-15: Thermische Alterung: Alterung des Washcoats [7]

Dieser Phasenumwandlung kann mit geeigneten Additiven im Trägermaterial entgegenwirkt werden. Bekannte Vertreter dafür sind: Bariumoxid (BaO), Cer(IV)-oxid (CeO_2), Lanthanoxid (La_2O_3) oder Zirkonium(IV)-oxid (ZrO_2). [12]

2.2.2 Chemische Alterung

Die chemische Alterung resultiert aus den im Kraftstoff und in den Motorölen enthaltenen Additiven und Verunreinigungen. Zu diesen zählen hauptsächlich Schwefel, Phosphor, Zink, Kalzium und Magnesium. [12]

Unterteilt wird die chemische Desaktivierung in selektive und nicht-selektive Vergiftung. Man spricht von einer selektiven Vergiftung, wenn sich Fremdstoffe mit den katalytisch wirksamen Oberflächen durch Chemisorption verbinden und dort einen Verlust an katalytischer Leistung hervorrufen. Diese Form der Vergiftung ist reversibel und kann durch einen Wärmeeintrag wieder beseitigt werden. Bei einer nicht-selektiven Vergiftung legen sich Fremdkörper an der Oberfläche an und verschmutzen diese, sodass die katalytische Oberfläche vom Abgasstrom getrennt wird. Schwefel und Phosphor zählen zu den Hauptverursachern von nicht-selektiver Vergiftung bei Dieselmotorkatalysatoren. Aus diesem Grund werden die beiden Stoffe im Folgenden noch erläutert. [12]

Schwefelvergiftung

Der im Kraftstoff und Motoröl enthaltene Schwefel ist organisch vorhanden und nimmt an der Verbrennung im Motor teil. Die so entstandenen Schwefeldioxyde (SO_2) und Schwefeltrioxyde (SO_3) legen sich bei geringen Temperaturen (300 °C) an den aktiven katalytischen Oberflächen ab (sie adsorbieren) und reagieren mit dem Washcoatmaterial Aluminiumoxid (Abbildung 2-16, Seite 16). Als Folge wird die reaktive Oberfläche kleiner. Eine Entschwefelung ist mittels Wärmezufuhr oder über eine Reduzierung möglich. Bei der Reduzierung ist zu beachten, dass es zu einer Bildung von Schwefelwasserstoff (H_2S) kommt. [12]

Phosphorverglasung

In Motorölen wird Zink-Dialkyldithiophosphat (ZDDP) als Zusatz für eine bessere Schmiereigenschaft beigelegt. Dieses Molekül ist Ausgangspunkt von Phosphor- und Zinkvergiftung. Die Art und Schwere der Katalysatorverschmutzung ist stark temperaturabhängig. Zudem gibt es auch Unterschiede, ob das ZDDP an der Verbrennung teilnimmt oder unverbrannt in den Abgasstrang gelangt. Wenn das ZDDP unverbrannt in Katalysatoren gelangt, bildet dies eine Schicht aus Phosphor und Zink auf dem Washcoat und es entsteht eine Phosphorverglasung (Abbildung 2-16), die den Washcoat vom Abgasmassenstrom trennt. Diese Art der Vergiftung ist am problematischsten. Die zweite Art wird durch verbranntes ZDDP hervorgerufen. Dabei diffundiert der Phosphor bzw. die Phosphorsäure in den Washcoat. [12]

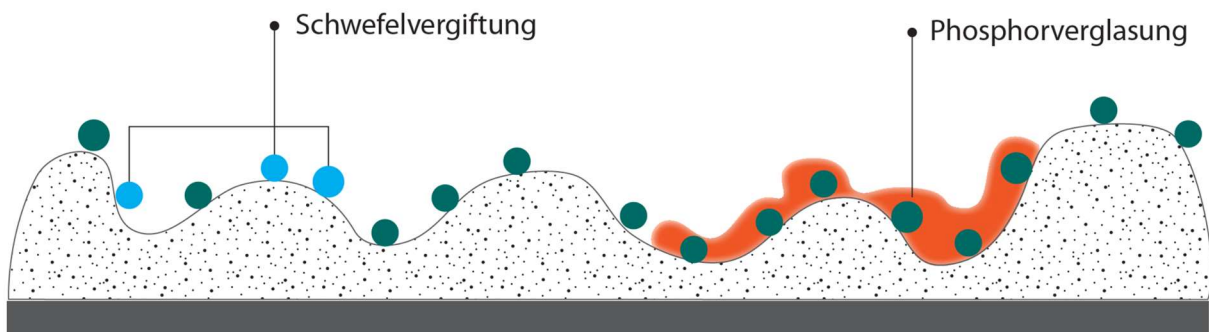


Abbildung 2-16: Chemische Alterung [7]

2.2.3 Mechanische Alterung

Zu den mechanischen Alterungseffekten zählen die Verblockung von Partikelfiltern, der Ausbruch von Katalysatoranteilen, die Ablösung des Washcoats und der katalytischen Materialien. Wird die Aschebelastung im Partikelfilter zu hoch oder schmilzt die Asche, so kommt es zu einer Verklebung der Poren. Werden Filterregenerationen zu spät eingeleitet, verursachen hohe Belastungen ein Ausbrechen von Katalysatoranteilen. Zudem können auch hohe Abrenntemperaturen dazu führen, dass sich Materialien unterschiedlich ausdehnen. Dadurch treten mechanische Spannungen in den Materialien auf und es kann zu einer Ablösung kommen (Abbildung 2-17). [12]

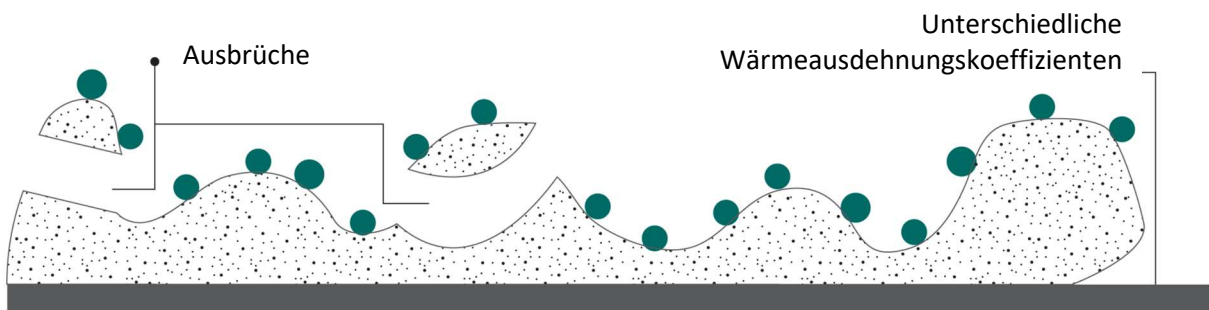


Abbildung 2-17: Mechanische Alterung [7]

2.3 Abgasgesetzgebung

Der steigende menschlich erzeugte Ausstoß von Schadstoffen erfordert auch in der Automobilbranche zunehmend solidere Emissionszyklen (werden in Kapitel 3.3 Testzyklen genauer angesprochen) und striktere Grenzwerte. [8]

In Abbildung 2-18 sind die Grenzwerte für den Rollentestzyklus aufgetragen. Dabei ist zu beachten, dass die Einführung des Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC) als Ablöse des veralteten New European Driving Cycle (NEDC) mit Euro 6d-Temp in Kraft trat.

Auffallend ist, dass sich die Grenzwerte von Euro 5a bis Euro 6d bei fremdgezündeten Personenkraftwagen in den Bereichen gesamt Kohlenwasserstoffe (THC...Total Hydrocarbons), nicht Methan Kohlenwasserstoffe (NMHC...Nonmethane Hydrocarbons), Stickoxide (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO) nicht geändert haben. Jedoch ist mit der Einführung der neuen Abgasgesetzgebung (Euro 6) die Partikelanzahl für fremdgezündeten Personenkraftwagen hinzugekommen. Grund dafür ist die Entwicklung der direkteinspritzenden Ottomotoren. [8]

Bei den kompressionsgezündeten Personenkraftwagen haben sich von Euro 5b/5b+ zu Euro 6b einige Grenzwerte nach unten verschoben. Bei den Stickoxiden (NO_x) wurde der Grenzwert um 55 % nach unten verschoben. [8]

EUROPEAN UNION										
EURO 5-6										
Emissions	Unit	PC M ²⁾ , LCV N1 CL 1			LCV N1 CL 2			LCV N1 CL 3, N2		
		Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d
EURO 5-6 Positive ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)										
THC	mg/km	100	100	100	130	130	130	160	160	160
NMHC		68	68	68	90	90	90	108	108	108
NO _x		60	60	60	75	75	75	82	82	82
CO		1000	1000	1000	1810	1810	1810	2270	2270	2270
PM ²⁾³⁾		5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5
PN ²⁾³⁾	Nb/km	-	-	6x10 ^{11 4)}	-	-	6x10 ^{11 4)}	-	-	6x10 ^{11 4)}
EURO 5-6 Compression ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)										
NO _x	mg/km	180	180	80	235	235	105	280	280	125
HC+NO _x		230	230	170	295	295	195	350	350	215
CO		500	500	500	630	630	630	740	740	740
PM ¹⁾		5.0	4.5	4.5	5.0	5.0	4.5	5.0	5.0	4.5
PN ¹⁾	Nb/km	-	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹	-	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹	-	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹

1) For compression ignition only: exempted M1 vehicles have to comply w/ N1 CL3 test I limits. No more exemption for pass cars for Euro 6.
 2) Test procedure defined in UN Reg 83 Suppl 7.
 3) Applicable to PI DI engines only.
 4) Until 3 years after the dates for TA/FR particle emission limit of 6*E12 may be applied for Euro 6b positive ignition DI vehicles upon request of manufacturer.

Abbildung 2-18: Euro 5-6 Grenzwerttabelle [8]

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsfahrzeuge

In dieser Arbeit wurden drei Fahrzeuge der Emissionsklasse Euro 6d-Temp und einer Laufleistung von mindestens 100 tkm untersucht. Zwei der Fahrzeuge sind baugleich und unterscheiden sich nur in der Laufleistung.

Es wurden zwei BMW GranTourer mit folgenden Spezifikationen untersucht (Tabelle 3-1, Abbildung 3-1).

Tabelle 3-1: Fahrzeugdaten BMW 216d GranTourer

Fahrzeugbezeichnung	BMW 216d GranTourer F46
Motorbezeichnung	B37C15A
Treibstoffart	Diesel
Leistung	85 kW 116 PS
Hubraum	R3 Common Rail 1496 ccm
Abgasnachbehandlungssysteme	EGR DOC/NSC DPF SCR
Laufleistung (Fahrzeug 1)	110 tkm
Laufleistung (Fahrzeug 2)	216 tkm



Abbildung 3-1: BMW 216d GranTourer

Weiters wurde ein Renault Grand Scenic mit nachstehenden technischen Daten analysiert (Tabelle 3-2, Abbildung 3-2).

Tabelle 3-2: Fahrzeugdaten Renault Grand Scenic

Fahrzeugbezeichnung	Renault Grand Scenic
Motorbezeichnung	H5H B4
Treibstoffart	Benzin
Leistung	103 kW 140 PS
Hubraum	R4 Direkteinspritzung 1332 ccm
Abgasnachbehandlungssysteme	EGR TWC GPF SCR
Laufleistung	130 tkm



Abbildung 3-2: Renault Grand Scenic

3.2 Versuchsaufbau

Zur Emissionsmessung aller Fahrzeuge wurden die gleichen Instrumente (PEMS, FTIR, CVS) angewandt.

3.2.1 PEMS

Das PEMS (Portable Emissions Measurement System) der Firma AVL (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List) wurde bei allen Fahrzeugen direkt in den Kofferraum integriert. Versorgt wird das System von zwei Akkumulatoren, damit dem Fahrzeug keine zusätzliche Energie entzogen wird. Vor und nach jeder Fahrt bzw. jedem Rollentest wurde das System kalibriert.

In den nachstehenden Fotos (Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4) ist der Versuchsaufbau vom PEMS, der Massenstrommessung und der Entnahmeleitung dargestellt.



Abbildung 3-3: BMW GranTourer PEMS Einbau



Abbildung 3-4: Massenstrommesser (links) und PEMS-Entnahmestelle (rechts)



Abbildung 3-5: Datenverarbeitungssystem

Im Datenverarbeitungssystem (Abbildung 3-5) laufen alle Schnittstellen zusammen. Die gemessenen Emissionsdaten werden aufbereitet und in einer 1 Hz Frequenz gespeichert. Weiters kommen die On-Board-Diagnose (OBD) Daten von der OBD-Schnittstelle im Fahrzeug. Diese liefern Drehzahl, Fahrzeuggeschwindigkeit und Kühlmitteltemperatur. Auf dem Fahrzeugdach wurde eine Wetter- sowie eine GPS-Station zur Messung der Außentemperatur, der barometrischen Höhe und der GPS-Koordinaten installiert (Abbildung 3-6).



Abbildung 3-6: Wetter- und GPS-Station

3.2.2 Rollenprüfstand

Auf dem Rollenprüfstand wurden die Fahrzeuge inkl. PEMS aufgerüstet. Zusätzlich wurden die Emissionen auf der Rolle noch mittels FTIR (Fourier Transform Infrarot Spektroskopie) und einer CVS-Anlage (CVS...Constant Volume Sampling) gemessen. Eine schematische Darstellung des Rollenprüfstands ist in Abbildung 3-7 illustriert.

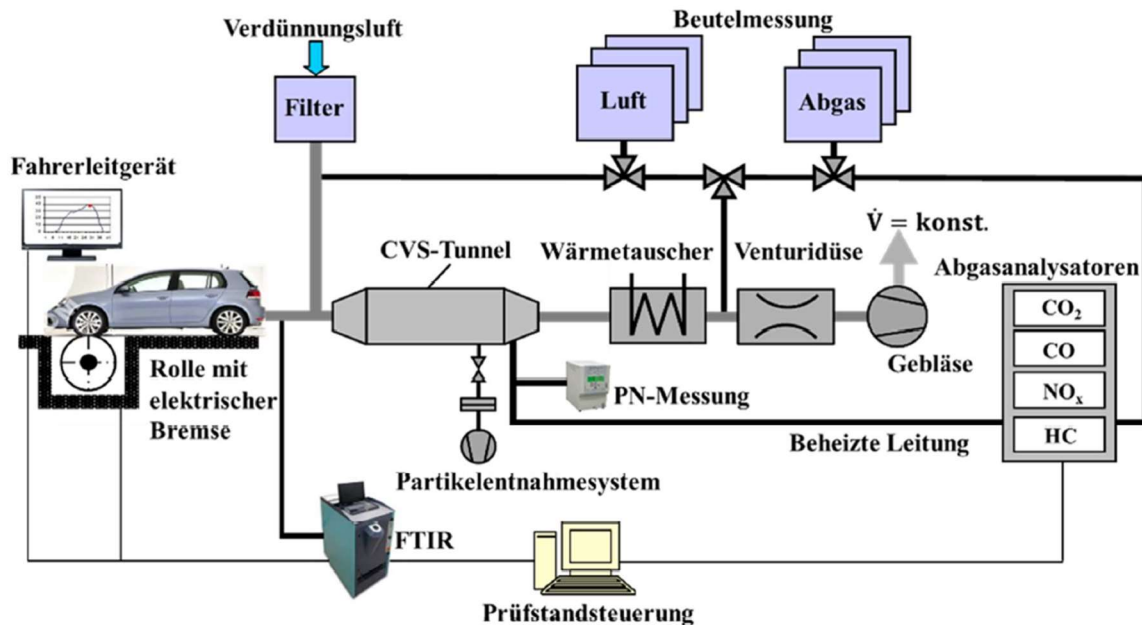


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung eines Rollenprüfstands [16]

Abbildung 3-8 zeigt den Aufbau des FTIR Systems am Rollenprüfstand. Das Abgas passiert die PEMS-Entnahmestelle (nicht sichtbar) und gelangt danach zum FTIR. Von dort strömt das Abgas in die CVS-Anlage.



Abbildung 3-8: FTIR Rollenprüfstand

3.3 Testzyklen

3.3.1 WLTC

Der Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC) ist jener Testzyklus der in der EU (europäischen Union) für die Neuzulassung von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen zu absolvieren ist. Dieser Zyklus gilt seit 1. September 2018 flächendeckend (seit 1. September 2017 für neue Modelle und Motorvarianten) und ist der Nachfolger des New European Driving Cycle (NEDC). [8]

Maßgebliche Veränderungen zum NEDC liegen im Geschwindigkeitsverlauf, welcher dem Fahrzeug mehr Leistung abverlangt und in der Testzeit, die sich auf 1800 s erhöht hat. In Summe stieg auch die Durchschnittsgeschwindigkeit auf 46,5 km/h. Zudem muss die Testfahrt aus einem Kaltstart erfolgen. Nachstehend ist der Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit grafisch dargestellt (Abbildung 3-9). [8]

Der Geschwindigkeitsverlauf wird in vier Phasen unterteilt. [8]

1. Phase (Low): 0 – 589 s
2. Phase (Medium): 589 – 1022 s
3. Phase (High): 1022 – 1477 s
4. Phase (Extra High): 1477 – 1800 s

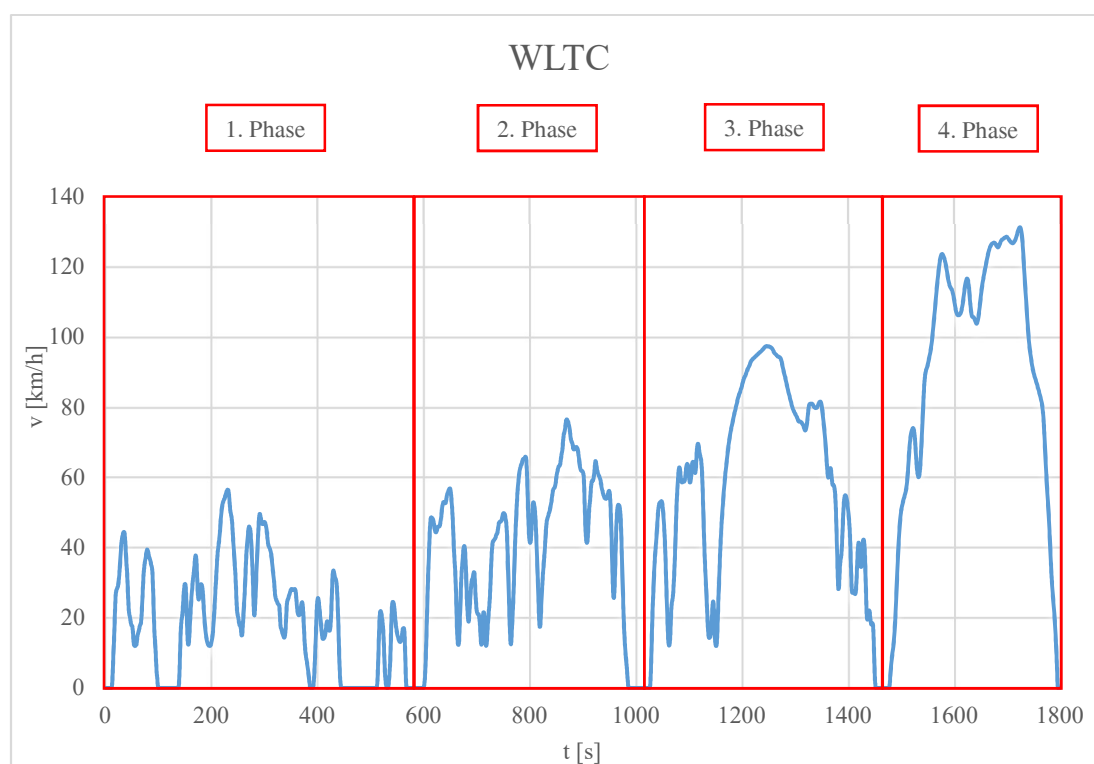


Abbildung 3-9: WLTC

Mit allen Testfahrzeugen wurde jeweils ein gültiger WLTC absolviert. Die Messergebnisse aus diesen WLTCs der Fahrzeuge mit hohen Laufleistungen, können im Folgenden mit den Werten der Typprüfung (Messergebnisse mit sehr geringen Laufleistungen der Fahrzeuge) verglichen werden.

3.3.2 ERMES

ERMES bedeutet European Research On Mobile Emission Sources und ist ein Zusammenschluss aus Industrieverbänden, Forschungseinrichtungen und Behörden. Das Hauptforschungsgebiet von ERMES befasst sich mit der Modellierung von verkehrsbedingten Emissionen. [9]

Der ERMES V9 ist ein Rollenzzyklus, der vom IVT entwickelt worden ist. Er ist um einiges dynamischer als der WLTC. In dem Geschwindigkeitsverlauf des V9 (Abbildung 3-10) sind zudem auch Geschwindigkeitssprünge (z.B.: 723 s) enthalten. Es ist nicht möglich, dass Fahrzeuge solch einem Sprung folgen können, dies ist beabsichtigt. Es geht rein darum, dass an solchen Stellen jedes Fahrzeug eine Beschleunigung an der Vollastlinie betreiben soll. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass Fahrzeuge auch mit ihrer vollen Leistung arbeiten müssen. [9]

Der ERMES V9 ist durch seine hohe Spitzengeschwindigkeit von 166 km/h, seiner dynamischen Beanspruchung und seiner höheren Durchschnittsgeschwindigkeit charakterisiert. Zudem wird dieser Zyklus nicht aus einem Kaltstart gemessen. [9]

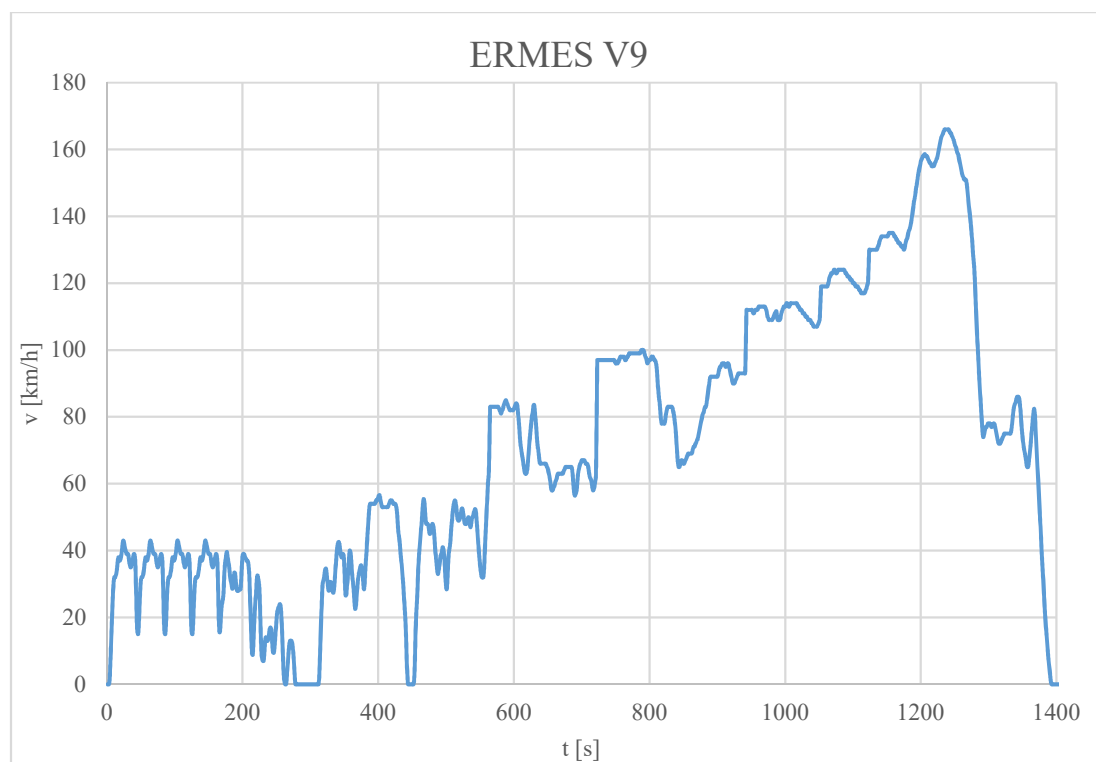


Abbildung 3-10: ERMES V9 Zyklus

3.3.3 RDE

Die RDE Tests (RDE...Real Driving Emissions) wurden im Zuge des WLTC eingeführt und gelten seit 2017 für die Zulassung von neuen Personenkraftwagen. Ziel dieser Testläufe ist es, realitätsgetreue Emissionswerte zu erhalten. Dabei ist ähnlich zum WLTC eine gewisse Distanz im städtischen und überländlichen Verkehr sowie auf der Autobahn zu absolvieren. Die prozentuellen Anteile dieser drei Bereiche sind dabei ebenfalls vorgegeben. Weiters muss auch eine gewisse Anzahl von Beschleunigungspunkten je Phase erreicht werden, damit das Fahrzeug nicht zu ökologisch aber auch nicht zu aggressiv betrieben wird. Der Start eines solchen Prüflaufs erfolgt immer aus einem Kaltstart. Die genauen Anforderungen des RDE-Laufs sind in Abbildung 3-11 aufgelistet. [8]

Trip requirements for a valid RDE test			
Driving portion	Urban	Rural	Motorway
	Speed ≤ 60 km/h	$60 < \text{Speed} \leq 90$ km/h ¹⁾	90 km/h ¹⁾ < Speed
Minimum distance	16 km	16 km	16 km
Distance share	29 - 44%	23 - 43%	23 - 43%
Total trip duration	90 - 120 minutes		
Average speed including stops	$15 < \text{Avg} < 40$ km/h ³⁾	–	–
Total stop time ⁴⁾ (v < 1 km/h)	6 - 30% Urban time	–	–
Individual stop time	≤ 300 sec	–	–
v > 100 km/h ^{1) 2)}	–	–	≥ 5 min
v > 145 km/h	–	–	< 3% Motorway time
Cumulative positive elevation gain	< 1200 m / 100 km		
Start/end test elevation difference	≤ 100 m		

Abbildung 3-11: Anforderungen gültiger RDE-Lauf [8]

RDE Ries-Route

Auf dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik (IVT) hat sich eine RDE-Strecke (Streckename Ries) besonders bewährt.

Ausgehend von der Technischen Universität Graz (Inffeldgasse) in Richtung Norden durch die Stadt Graz, überländlich Richtung Osten bis nach Sinabelkirchen und über die Autobahn nach Graz zurück. Diese Strecke erfüllt alle Anforderungen, die für eine gültige RDE-Fahrt essentiell sind.

RDE Arzberg-Route

Die Arzbergstrecke ist durch große Anstiege und Abfahrten geprägt. Die Route startet auf der Technischen Universität Graz (Inffeldgasse) und verläuft von dort aus Richtung Norden durch die Stadt Graz. Nach der Stadtgrenze führt die Strecke Richtung Nordosten nach Kumberg. Weiter geht es Richtung Norden über den Arzberg und danach Richtung Westen über den Rechberg nach Frohnleiten. Über die Schnellstraße und die Autobahn geht es durch den Plabutschunnel zurück zur Universität.

Diese Fahrten sind nicht RDE konform. Die Hauptursache dafür ist die aggressive Fahrweise. Daraus resultiert ein Überschreiten der dynamischen Parameter.

Test-X

Der Test-X ist ein Testlauf mit dem alle Fahrverhalten in einem Zyklus abgebildet werden. Nachstehend ist in fünf Punkten der Ablauf eines solchen Tests erklärt.

Durchführung:

1. Kaltstart + Fahren außerhalb der dynamischen Randbedingungen:
Nach Kaltstart beschleunigen auf 80 km/h, starke Beschleunigungen und Verzögerungen
2. Stop & Go Fahren mit aktiviertem Start-Stopp und geringer Dynamik für 30 min
10 – 20 % Gaspedalweg nutzen, Durchschnittsgeschwindigkeit bei ca. 10 km/h
Stausimulation (Stop & Go)
3. Mix aus dynamischem Fahren, Maximalgeschwindigkeit und Stop-Start-Situationen mit aktivem Start-Stop für 40 min
Starke Beschleunigungen und Verzögerungen, außerhalb der RDE-Grenzen
4. Leerlauf für 15 min
5. Reguläres Fahren bei 50 km/h

3.4 Versuchsdurchführung

Mit jedem Versuchsfahrzeug (2x BMW 216d GranTourer, 1x Renault Grand Scenic) wurde jeweils ein gültiger WLTC und ein ERMES V9 als Rollenprüfstandtest gefahren. Weiters sind mit allen Fahrzeugen die RDE Routen Ries, Arzberg und Test-X gefahren worden.

Alle Messfahrten bis auf den ERMES-Test wurden aus einem Kaltstart absolviert. Bei den Prüfstandsläufen sind die Geschwindigkeitsverläufe und die Gangwahl vorgegeben. Die RDE-Läufe wurden auf der Riesroute immer ökologisch, jedoch im Rahmen der gültigen RDE-Richtlinien durchgeführt. Bei der Arzbergfahrt wurde ein aggressiver Fahrstil angewandt. Dieser ist durch starke Beschleunigungsmanöver und harte Bremsungen, sowie durch spätes Schalten charakterisiert. Der Test-X wurde nach den oben beschriebenen, vorgegebenen Anweisungen durchgeführt.

3.5 Messergebnisse

Ausgehend von allen Messfahrten wurden die sekundlichen Daten mittels geeigneter Software (ERMES-Tool, TU Graz) ausgewertet und in den nachfolgenden Diagrammen grafisch dargestellt. Weiters wurden die gemessenen Werte den Werksangaben aus den Typprüfungen gegenübergestellt.

Die WLTC und RDE Werte wurden im Folgenden immer normiert dargestellt, was den Vorteil mit sich bringt, dass die Emissionswerte leichter vergleichbar sind.

$$\text{Grenzwert Abgaskomp.}_{\text{NORM}} = \frac{\text{Messwert Abgaskomp.}}{\text{Grenzwert Abgaskomp.}} \quad (3-1)$$

3.5.1 BMW 216d GranTourer

WLTC

Der WLTC ist der erste betrachtete Zyklus. Er bietet wegen seiner Eindeutigkeit gute Vergleichsmöglichkeiten zu den original BMW Werksangaben. Bei den Prüfstandsläufen wurden die originalen Fahrwiderstände von BMW herangezogen.

In Tabelle 3-3 sind die Mittelwerte des gesamten Rollenprüflaufs in Absolutwerten der Schadstoffkomponenten einsehbar.

Tabelle 3-3: BMW 216d GranTourer WLTC-Emissionen

	Werksangaben		WLTC			
	BMW 0 tkm		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm	
	[g/km]	[/#/km]	[g/km]	[/#/km]	[g/km]	[/#/km]
NO_x	0.0284	-	0.0231	-	0.0489	-
HC+NO_x	0.0549	-	0.0505	-	0.0888	-
CO	0.1199	-	0.0858	-	0.1455	-
PM	0.0001	-	0	-	0.0001	-
PN	-	1.03E+09	-	2.16E+08	-	4.48E+09

In der Abbildung 3-12 (Seite 28) sind die normierten Emissionswerte (normiert nach Formel (3-1)) in Orange für das Fahrzeug mit 110 tkm und in Grau für das Fahrzeug mit 216 tkm dargestellt. In Blau sind die gemessenen Werte aus der Typprüfung (bei einer Laufleistung zwischen 3 – 15 tkm [8]) enthalten. Die BMW Werksangaben (Typprüfung) werden im Folgenden immer mit 0 tkm betitelt. Diese Darstellungsweise gilt für alle in dem Kapitel erwähnten BMW Fahrzeugen.

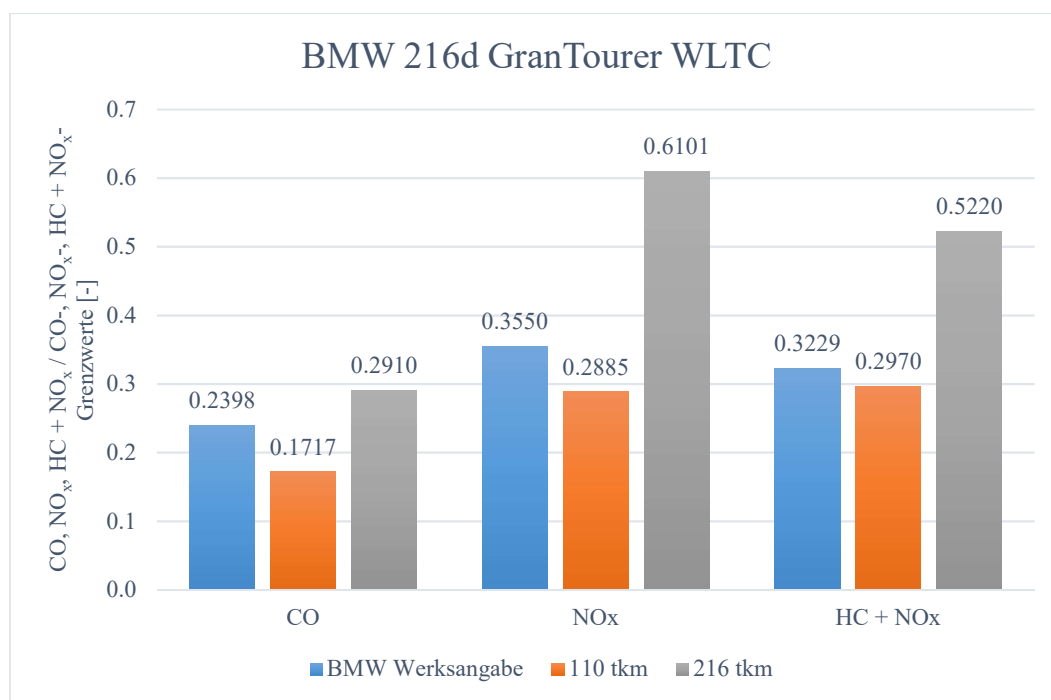


Abbildung 3-12: BMW 216d GranTourer WLTC-Emissionen

Auffallend sind die Werte des 110 tkm BMW, die sich verbessert haben. Ein solches Phänomen könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Typprüfung mit einem neuen Abgasnachbehandlungssystem bewältigt wurde. Abgasnachbehandlungssysteme erreichen erst nach einer gewissen Einlaufzeit ihre volle Wirksamkeit.

Bei den 216 tkm BMW zeigt der Trend wieder in Richtung höherer Emissionswerte, jedoch sind auch hier die Abgaswerte immer noch weit unter dem vorgeschriebenen Euro 6d-Temp Grenzwert.

Die Partikelemissionen wurden wegen der Größenordnung in ein gesondertes Diagramm (Abbildung 3-13) eingetragen. In punkto Partikelmasse PM (Particulate Matter) und Partikelanzahl PN (Particulate Number) fielen die Messergebnisse der Komponenten gering aus. Der Grenzwert wird bei beiden Fahrzeugen um ein Vielfaches unterschritten.

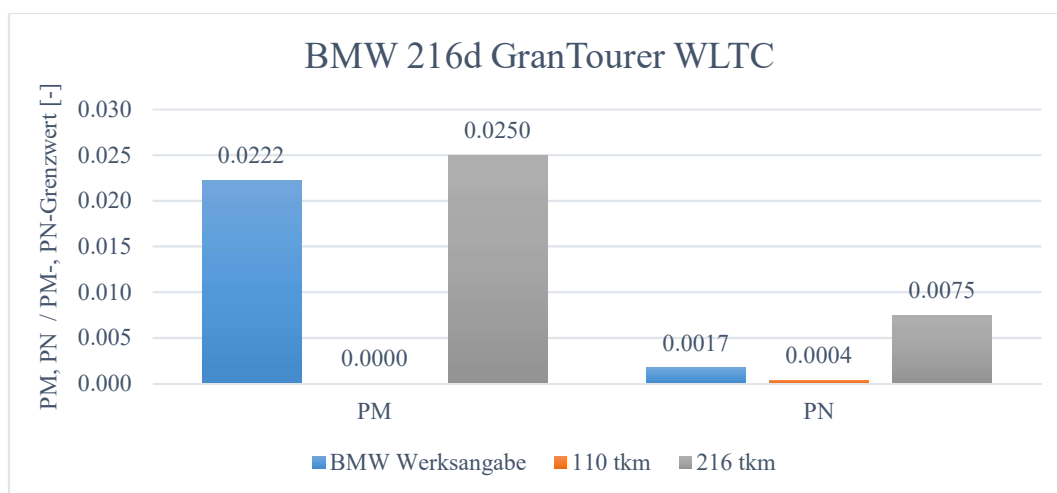


Abbildung 3-13: BMW 216d GranTourer WLTC-Emissionen

In Tabelle 3-4 sind die prozentuellen Änderungen der einzelnen Abgaskomponenten dargestellt. Da die Partikelmasse zu gering für das Messsystem war, konnte für den Bereich 110 – 216 tkm kein prozentueller Wert ausgegeben werden.

Tabelle 3-4: BMW 216d GranTourer Vergleich der WLTC-Emissionen

	0 – 110 tkm [%]	110 – 216 tkm [%]	0 – 216 tkm [%]
NO_x	-18.74	111.48	71.86
HC+NO_x	-8.03	75.76	61.65
CO	-28.42	69.55	21.37
PM	-100.00	-	12.45
PN	-79.02	1970.99	334.53

In Abbildung 3-14 (Seite 30) ist der CO₂-Ausstoß im WLTC und in den jeweiligen vier Phasen (in Kapitel 3.3.1 beschrieben) dargestellt.

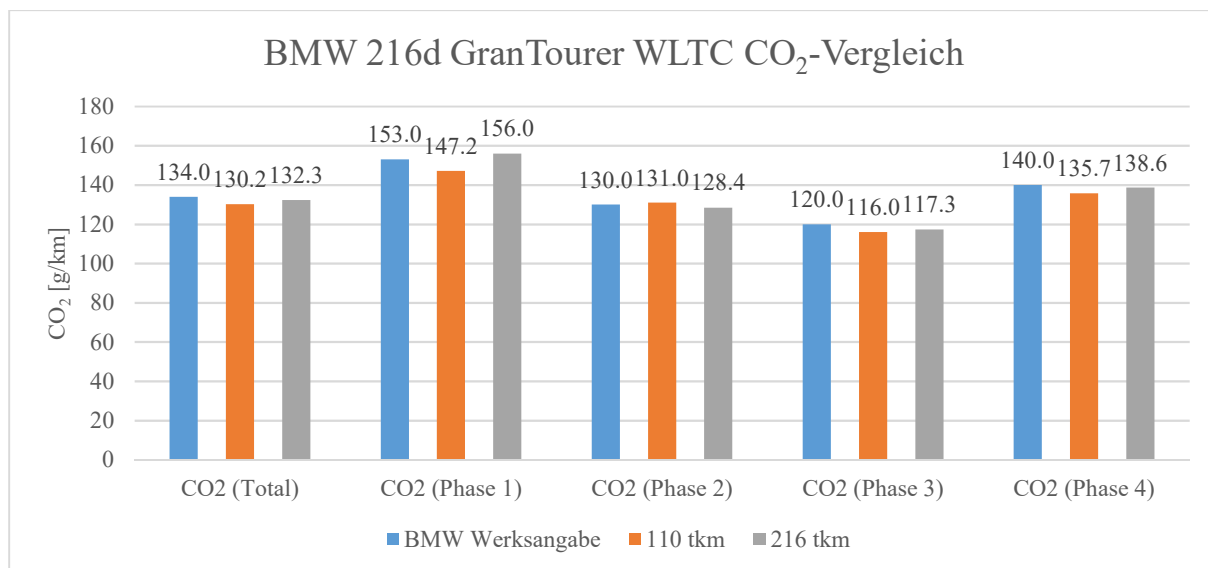


Abbildung 3-14: BMW 216d GranTourer WLTC CO₂-Vergleich

Da die CO₂-Emission im direkten Zusammenhang mit dem Verbrauch steht, wäre es möglich Schlüsse über den Treibstoffverbrauch zu ziehen. Allerdings zeigen die gemessenen Werte wenig Tendenz in eine bestimmte Richtung. In Summe (CO₂ (Total)) ist nahezu keine Veränderung des Verbrauchs erkennbar.

RDE Ries

Die erste betrachtete RDE Strecke ist die Ries Route. Es wurden von beiden Fahrzeugen (110 tkm BMW und 216 tkm BMW) jeweils eine RDE-Konforme Messfahrt absolviert. Aus den gemessenen Emissionswerten wurden die Zyklusmittelwerte berechnet. In Tabelle 3-5 sind zusätzlich die RDE Messwerte von BMW eingetragen.

Tabelle 3-5: Absolutwerte der Riesfahrten BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben

	Werksangaben		Ries			
	BMW 0 tkm		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm	
	[g/km]	[#/km]	[g/km]	[#/km]	[g/km]	[#/km]
NO_x	0.0214	-	0.05347	-	0.05449	-
CO	0.0083	-	0.16434	-	0.14120	-
PN	-	2.34E+09	-	4.62E+09	-	2.42E+09

Die Tabellenwerte wurden normiert (Formel (3-1)) in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 dargestellt.

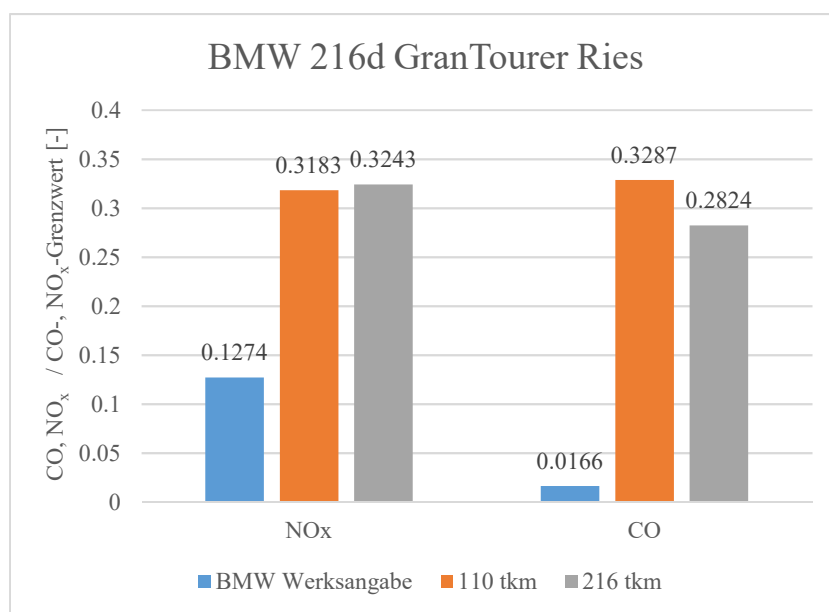


Abbildung 3-15: Messung NO_x, CO RDE Riesstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben

An den normierten NO_x-Werten (Abbildung 3-15) ist ein starker Verschlechterungstrend von einem 0 tkm BMW zum 110 tkm BMW auffallend. Danach ist die Verschlechterung marginal. Die CO-Werte (Abbildung 3-15) zeigen hier einen ähnlichen Trend.

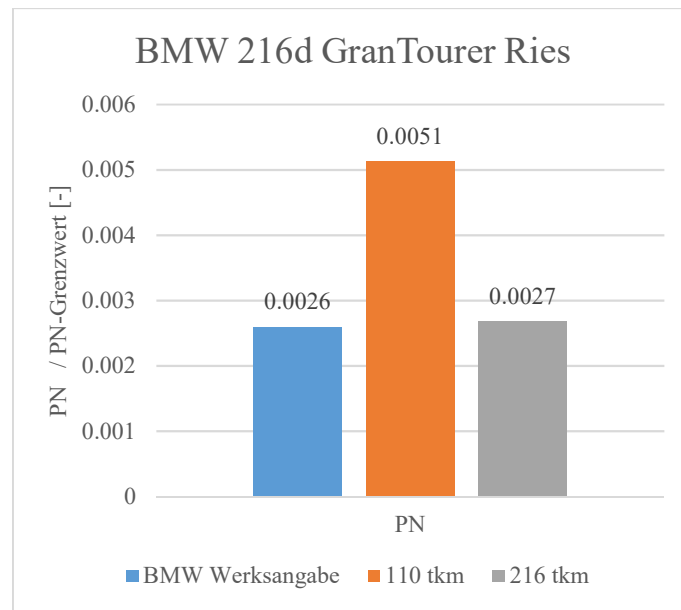


Abbildung 3-16: Messung PN RDE Riesstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben

Abbildung 3-16 stellt die PN-Entwicklung über der Laufleistung dar. Die PN-Emissionen liegen weit unter dem Grenzwert, somit lässt sich aus diesen Messergebnissen keine Aussage über eine Verschlechterung bzw. Verbesserung der PN Emission in Abhängigkeit der Laufleistung treffen

In Tabelle 3-6 sind die relativen Änderungen zu den zuvor gezeigten Diagrammen (Abbildung 3-15, Abbildung 3-16) dargestellt.

Tabelle 3-6: Relative Änderungen der Riesfahrten BMW 216d GranTourer

	0 – 110 tkm [%]	110 – 216 tkm [%]	0 – 216 tkm [%]
NO_x	149.85	1.90	154.61
CO	1879.98	-14.08	1601.19
PN	97.47	-47.70	3.27

RDE Arzberg

Im Folgenden wird auf die Emissionsänderungen der Arzbergroute eingegangen. Der Arzbergzyklus wurde wie im Kapitel 3.4 schon erwähnt aggressiv gefahren. Dies ist bei der Interpretation von Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18 im Gegensatz zu den Werksangaben zu beachten. Die Werksangaben von BMW sollen nur als Bezugsgröße gelten, nicht aber als direkter Vergleich.

In Tabelle 3-7 sind die absoluten Emissionswerte der einzelnen Messfahrten inkl. der BMW Werksangaben für die Emissionskomponenten dargestellt.

Tabelle 3-7: Absolutwerte der Arzbergfahrten BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben

	Werksangaben		Arzberg			
	BMW 0 tkm		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm	
	[g/km]	[/km]	[g/km]	[/km]	[g/km]	[/km]
NO_x	0.0214	-	0.0397	-	0.0910	-
CO	0.0083	-	0.0724	-	0.1194	-
PN	-	2.34E+09	-	3.42E+09	-	2.51E+09

Bei der aggressiven Fahrweise (Arzbergrouen) ist ein deutlicher Anstieg der NO_x-Werte (Abbildung 3-17) zu verzeichnen. Die CO-Werte (Abbildung 3-17) steigen ebenfalls. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Änderungen zwischen dem 110 tkm BMW und dem 216 tkm BMW zu legen.

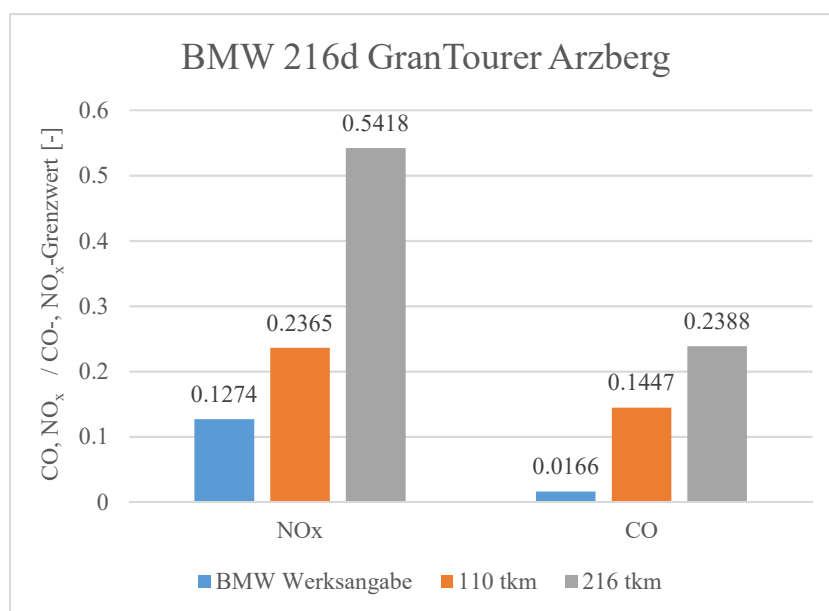


Abbildung 3-17: Messung NO_x, CO RDE Arzbergstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben

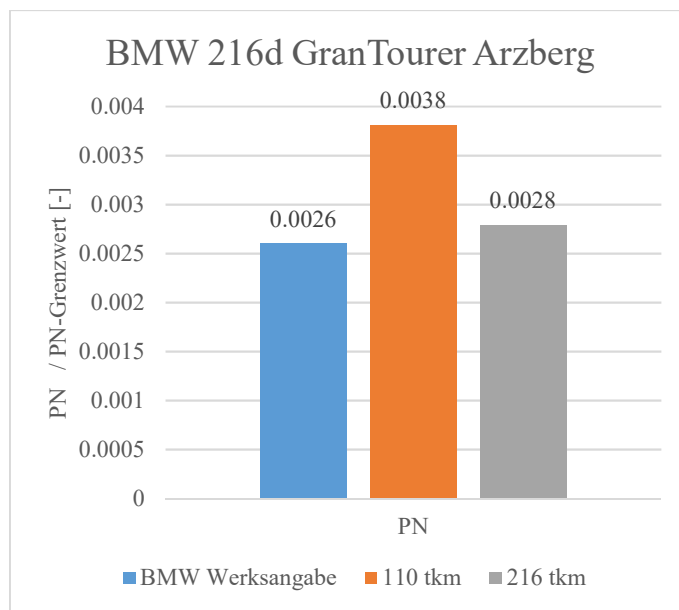


Abbildung 3-18: Messung PN RDE Arzbergstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben

Die PN-Emissionen (Abbildung 3-18) stagnieren zwischen den einzelnen Laufleistungen. Somit ist hier wiederum kein eindeutiger Trend festzustellen. Die Partikelemissionen sind zudem stark vom Aschebeladungszustand und den DPF-Regenerationen abhängig.

In Tabelle 3-8 sind die relativen Änderungen der Laufleistungen einsehbar. Die repräsentativen Werte in dieser Tabelle sind jene zwischen 110 tkm und 216 tkm. Da in diesen Fällen die Fahrstrecke und vor allem die Fahrweise ident waren.

Tabelle 3-8: Relative Änderungen der Arzbergfahrten BMW 216d GranTourer

	0 – 110 tkm [%]	110 – 216 tkm [%]	0 – 216 tkm [%]
NO_x	85.64	129.14	325.37
CO	771.72	65.04	1338.72
PN	46.36	-26.81	7.12

RDE Ries DPF-Regeneration

Bei beiden Fahrzeugen (110 tkm BMW und 216 tkm BMW) wurde jeweils in einer Riesfahrt eine DPF-Regeneration festgestellt. Die absoluten Emissionsmittelwerte der beiden Gesamtfahrten sind in Tabelle 3-9 zusammengestellt.

Tabelle 3-9: Absolutwerte der Ries DPF-Regenerationsfahrten BMW 216d GranTourer

Ries DPF-Regeneration				
BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		
	[g/km]	[/km]	[g/km]	[/km]
NO_x	0.2199	-	0.1447	-
CO	0.1519	-	0.1706	-
PN	-	9.8E+10	-	5.49E+10

In Tabelle 3-9 sind sofort die erhöhten PN-Werte auffallend (Vergleich Tabelle 3-5, Seite 31), welche charakteristisch für eine DPF-Regeneration sind. Die drei Emissionskomponenten wurden normiert in der Abbildung 3-19 und Abbildung 3-22 (Seite 37) graphisch dargestellt.

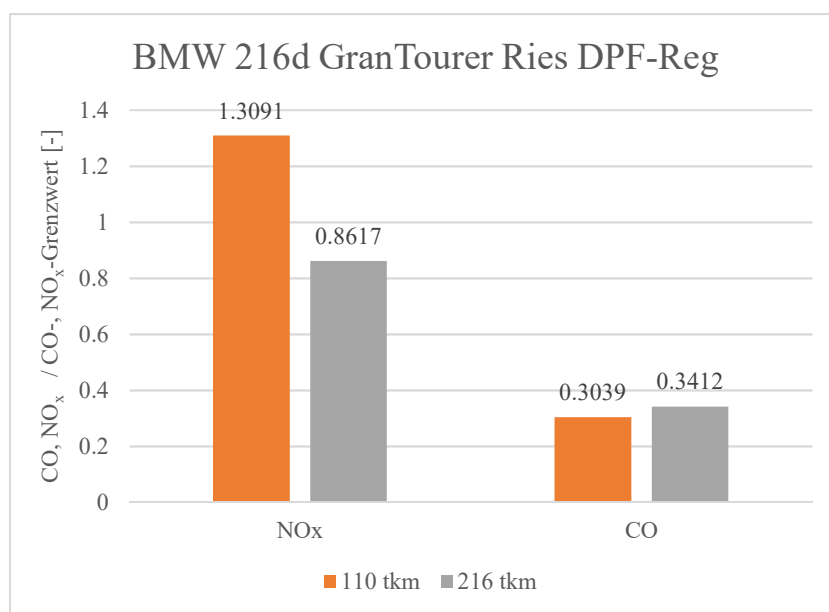


Abbildung 3-19: Messung NO_x, CO RDE Ries DPF-Regenerationen BMW 216d GranTourer

In Abbildung 3-19 sind die NO_x-Werte des 110 tkm BMW deutlich erhöht, sie liegen sogar 31 % über dem gesetzlich vorgeschriebenen NO_x-Grenzwert von 0,168 g/km.

Die CO-Werte sind nur marginal erhöht, da hier der gesamte Emissionsmittelwert veranschaulicht ist (gesamter Fahrzyklus). Die CO-Werte während der DPF-Regeneration waren deutlicher erhöht (Abbildung 3-20, Abbildung 3-21, Seite 36).

Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 stellen jeweils nur den Teil der DPF-Regeneration für die beiden Laufleistungen dar.

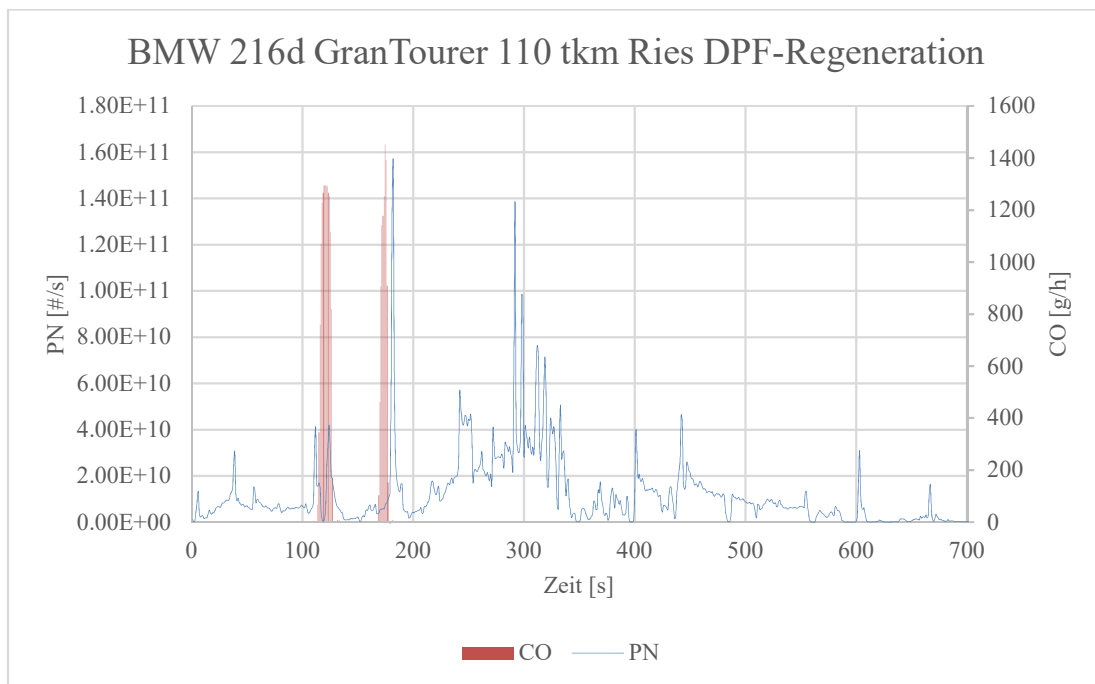


Abbildung 3-20: Ries (DPF-Regenerationsteil) BMW 216d GranTourer 110 tkm

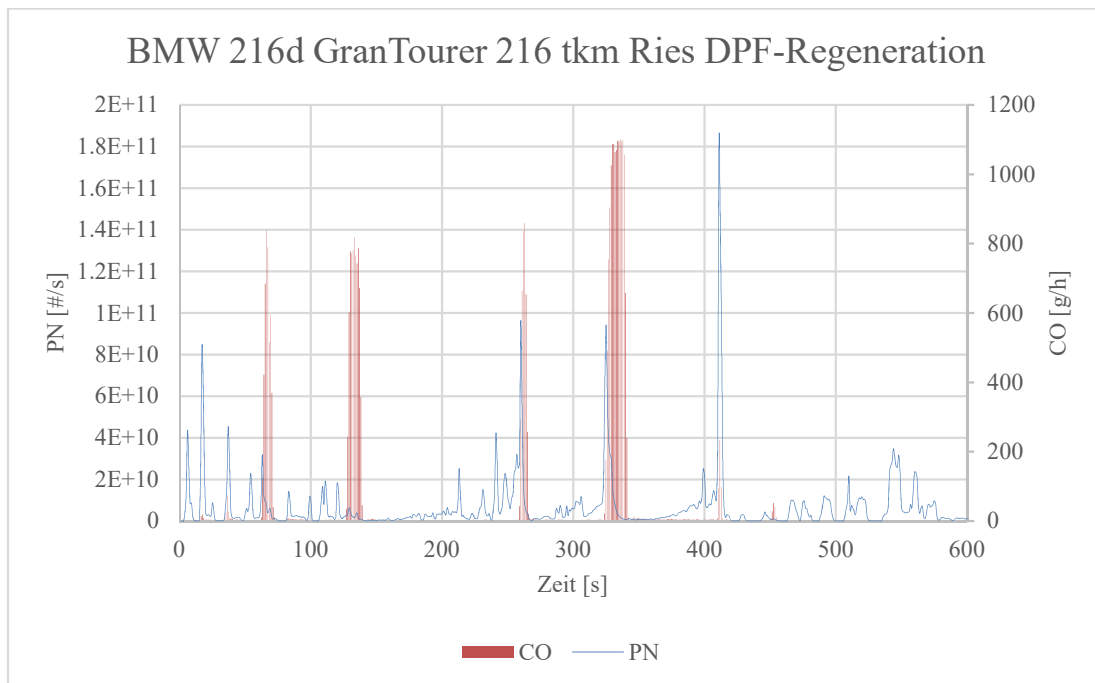


Abbildung 3-21: Ries (DPF-Regenerationsteil) BMW 216d GranTourer 216 tkm

Die gesamten Zyklen der beiden Messfahrten sind im Anhang einsehbar (Abbildung 0-1, Abbildung 0-2, Seite 91).

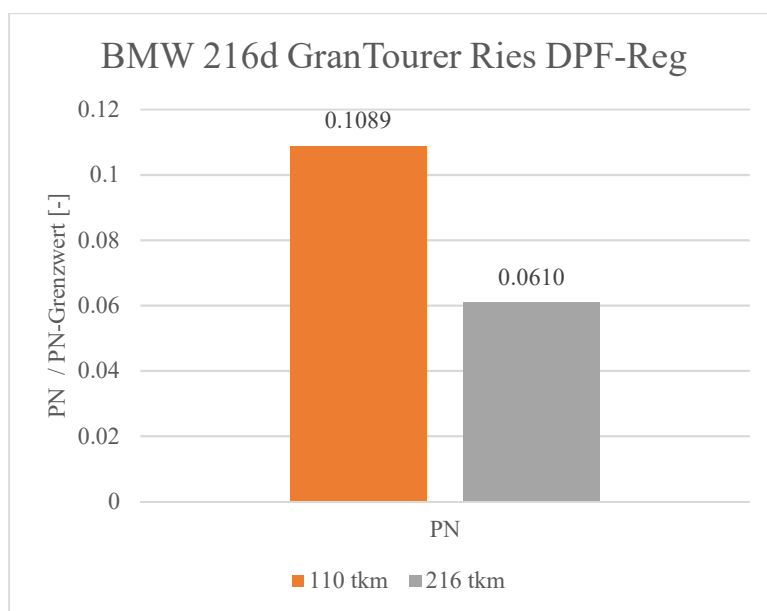


Abbildung 3-22: Messung PN RDE Ries DPF-Regenerationen BMW 216d GranTourer

Der geringere PN-Ausstoß (Abbildung 3-22) bei dem 216 tkm BMW ist darauf zurückzuführen, dass die DPF-Regeneration kürzer andauerte und das Integral der PN-Emissionen im Regenerationsintervall geringer war als das des 110 tkm BMWs.

In Tabelle 3-10 sind die prozentuellen Änderungen dargestellt.

Tabelle 3-10: Relative Änderungen der Ries DPF-Regenerationsfahrten BMW 216d GranTourer

110 – 216 tkm	
[%]	
NO_x	-34.18
CO	12.30
PN	-43.96

Abkühlung Abgasanlage

In einem Streckenabschnitt (Rechberg) der Arzbergfahrt wurde bewusst eine Kühlung der Abgasanlage hervorgerufen. Das Fahrzeug wurde im Schubbetrieb bergab rollend betrieben und der Gang wurde so gering wie möglich gewählt, um den Luftmassenstrom zu erhöhen. Dadurch wurden die gesamten Abgasnachbehandlungssysteme gezielt gekühlt.

Die Auswertungen zu den Abkühlversuchen sind in den beiden Diagrammen (Abbildung 3-23, Abbildung 3-24, Seite 39) ersichtlich. Der blaue Graph stellt die Höhe, der schwarze die Abgastemperatur am Auspuffende dar. Die beiden Balkendiagramme zeigen die CO-Emissionen in Rot und die NO_x-Emissionen in Gelb.

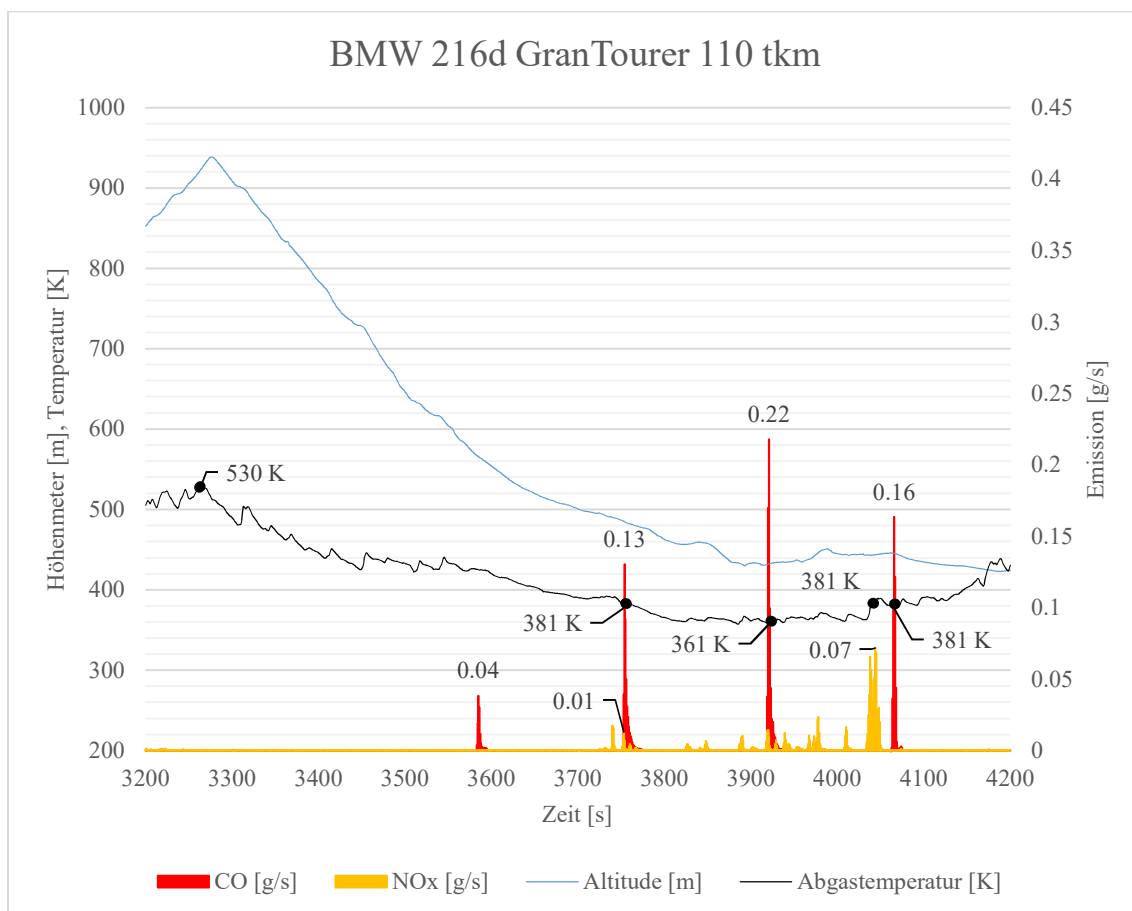


Abbildung 3-23: Arzberg (Teil Rechberg) Auskühlphase BMW 216d GranTourer 110 tkm

Bei dem 110 tkm BMW sinkt die Abgastemperatur von 530 K auf bis zu 361 K (Abbildung 3-23). Dies entspricht einem Delta von 169 K oder einer Abkühlung von 31,9 %. Nach dieser Kühlphase wurde das Fahrzeug stark beschleunigt. Dabei ist zu erkennen, dass die Effizienz der Abgasnachbehandlungssysteme in Bezug auf deren Konvertierungsrate sinkt.

Im Falle der NO_x-Emissionen führt dieses Verhalten zu einer Erhöhung der NO_x-Werte auf bis zu 0,07 g/s. Der Mittelwert der NO_x-Komponente lag im gesamten Arzbergzyklus bei 0,000984 g/s. Was eine Steigerung von 7014 % im gekühlten Zustand ergibt.

Bei den CO-Emissionen wirkt sich der Abkühleffekt deutlich stärker aus. Sie steigen auf bis zu 0,22 g/s. Die CO-Emissionskomponente lag im Mittel bei 0,001329 g/s, was zu einer Erhöhung von 16454 % führt.

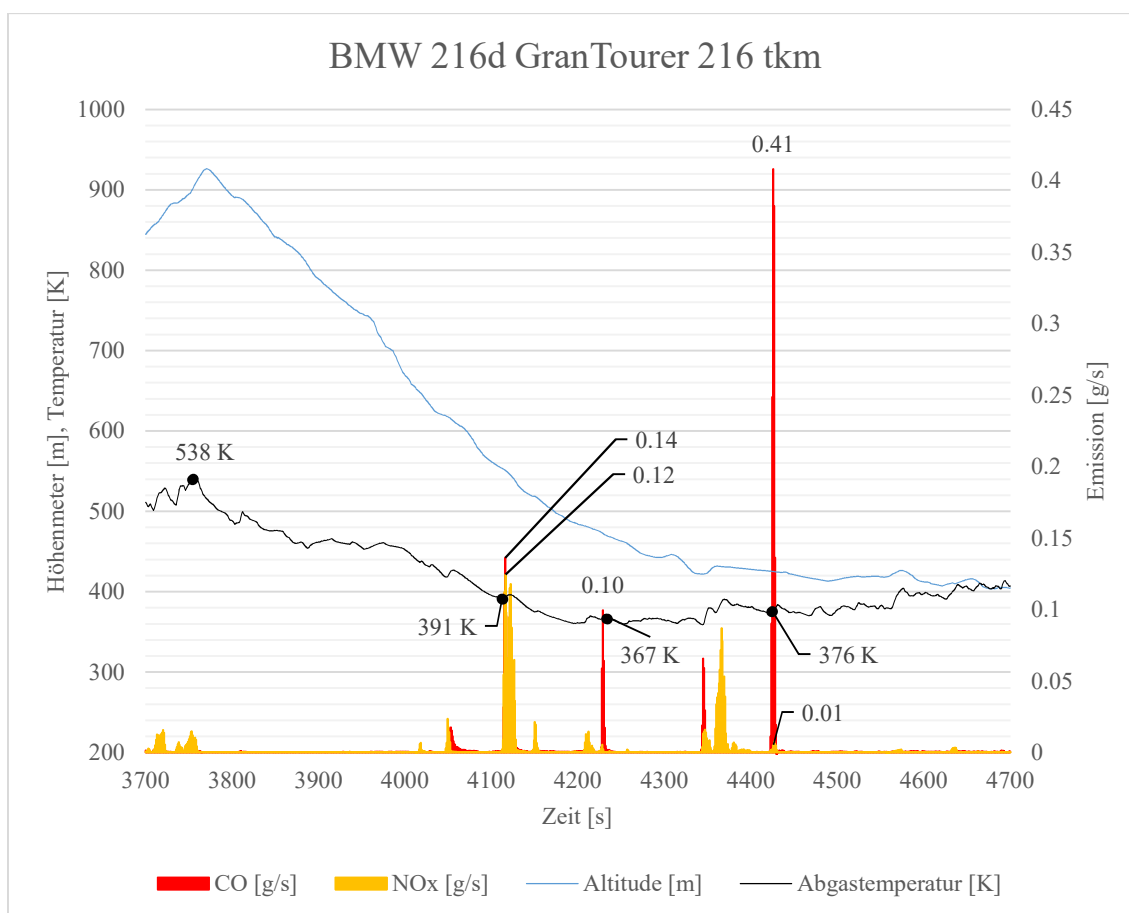


Abbildung 3-24: Arzberg (Teil Rechberg) Auskühlphase BMW 216d GranTourer 216 tkm

Abbildung 3-24 zeigt denselben Streckenabschnitt (Rechberg) wie Abbildung 3-23 (Seite 38). Beide Abschnitte wurden gleich befahren. Im Fokus stand die übermäßige Abkühlung der gesamten Abgasanlage.

Die Abgastemperatur hat sich bei dem 216 tkm BMW von 538 K auf 376 K reduziert. So wurde eine Kühlung von 171 K (31,8 %) erreicht.

Die NO_x-Emissionen stiegen bei dieser Versuchsfahrt auf 0,12 g/s, also auf fast das Doppelte im Gegensatz zu dem 110 tkm BMW. Die durchschnittlichen NO_x-Werte lagen in dieser Messfahrt bei 0,001609 g/s. Somit ergibt sich hier eine Erhöhung der NO_x-Emissionen von 7357 % im gekühlten Zustand.

Die CO-Emissionen erreichten bei einer Abgastemperatur von 376 K einen Wert von 0,41 g/s. Im Vergleich zum Durchschnittswert von 0,002006 g/s während der gesamten Messfahrt folgt eine Steigerung um 20334 %.

Die gesamte Messfahrt der beiden Arzbergrouen ist im Anhang (Abbildung 0-3, Abbildung 0-4, Seite 92) enthalten.

3.5.2 Renault Grand Scenic

WLTC

Bei der Analyse der Messergebnisse des Renault Grand Scenic bildet der WLTC den Anfang. In Tabelle 3-11 sind die Absolutwerte der Typprüfung (Werksangaben) und die gemessenen Emissionswerte des WLTC aufgelistet.

Im Gegensatz zu den Dieselfahrzeugen sind in Ottofahrzeugen andere Abgaskomponenten limitiert (Abbildung 2-18, Seite 17). Diese sind zusätzlich die gesamten Kohlenwasserstoffe (THC...Total Hydrocarbons) und die nicht Methan Kohlenwasserstoffe (NMHC... Nonmethane Hydrocarbons).

Tabelle 3-11: Renault Grand Scenic WLTC-Emissionen

	Werksangaben		WLTC	
	Renault 0 km		Renault 130 tkm	
	[g/km]	[/km]	[g/km]	[/km]
THC	0.0203	-	0.0455	-
NMHC	0.0180	-	0.0407	-
CO	0.3470	-	0.5826	-
NO_x	0.0225	-	0.0392	-
PM	0.0002	-	0.00002	-
PN	-	1.28E+11	-	3.22E+10

In Abbildung 3-25 sind die Emissionswerte aus Tabelle 3-11 wieder normiert zu ihrem Grenzwert dargestellt.

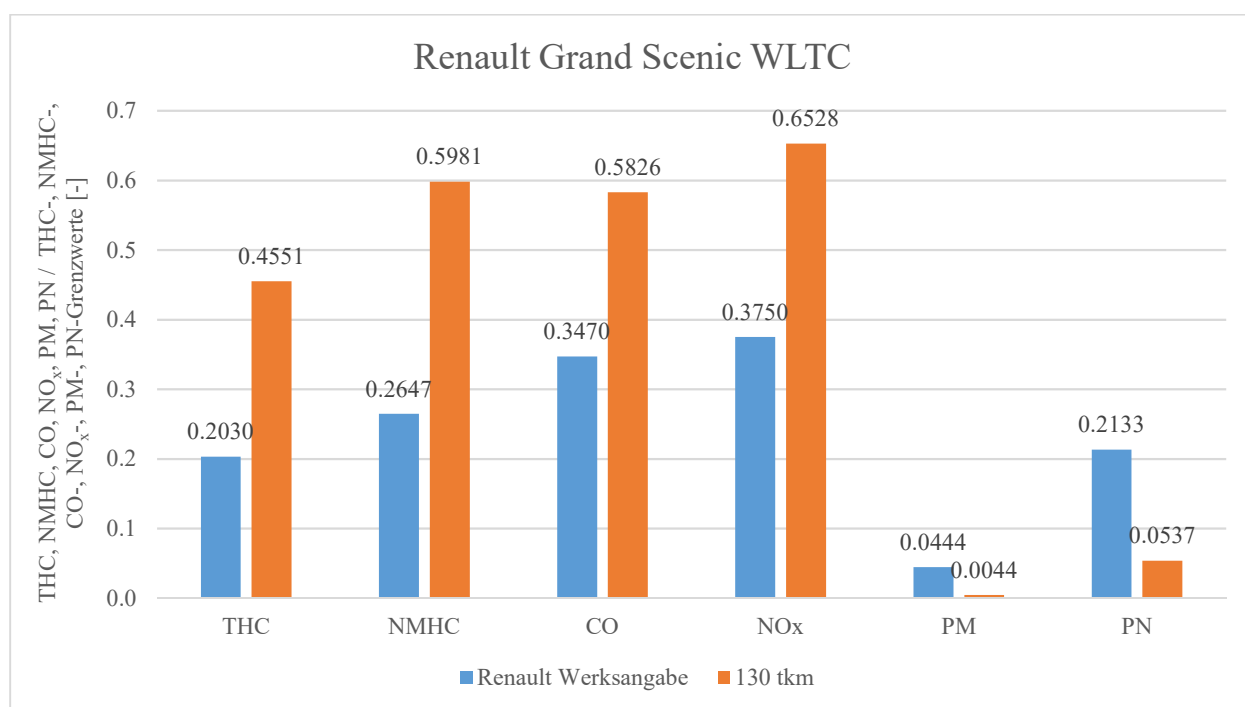


Abbildung 3-25: Renault Grand Scenic WLTC-Emissionen

Es ist auffallend, dass sich die gasförmigen Abgaskomponenten (THC, NMHC, CO, NO_x) über der Laufleistung von 130 tkm verschlechterten. Ein ganz anderes Bild liefern die Partikelemissionswerte (PM, PN), die mit steigender Laufleistung sinken.

Der Benzinpartikelfilter (GPF...Gasoline Particulate Filter) scheidet während der Fahrt die Partikel im Filter ab, regeneriert sich passiv und kontinuierlich. Im Filter bleibt Asche zurück, die die Abscheiderate erhöht. Dies führt auch zu einem Rückgang der Partikelemissionen über der Laufleistung. In Tabelle 3-12 sind die relativen Änderungen von 0 – 130 tkm einsehbar.

Tabelle 3-12: Renault Grand Scenic Vergleich der WLTC-Emissionen

0 – 130 tkm	
[%]	
THC	124.20
NMHC	125.94
CO	67.91
NO_x	71.07
PM	-90.02
PN	-74.81

Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben ist der WLTC in vier Phasen eingeteilt. In der nachstehenden Abbildung 3-26 sind die CO₂-Emissionen in den einzelnen Phasen und über den gesamten Zyklus aufbereitet. Die CO₂-Werte sind immer als Mittelwert der einzelnen Phasen dargestellt. Die CO₂-Emissionen bei dem 130 tkm Renault sanken in allen Phasen. Da die CO₂-Werte direkt proportional zum Verbrauch sind, ist auch dieser gefallen.

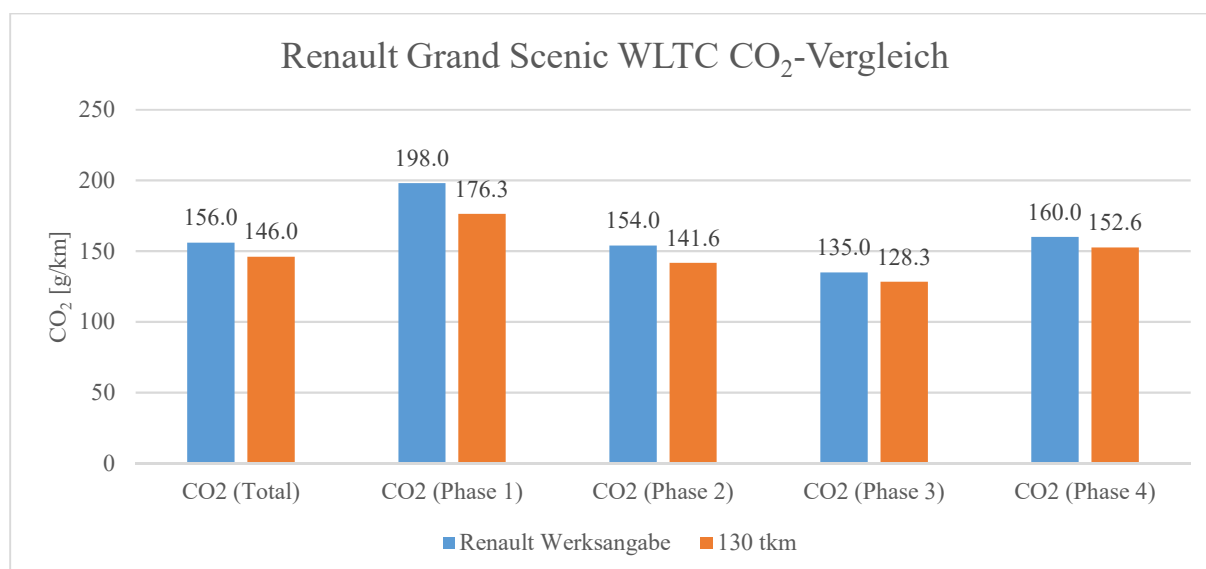


Abbildung 3-26: Renault Grand Scenic WLTC CO₂-Vergleich

Zu den RDE Messfahrten konnten keine Trends erarbeitet werden, da keine Werksangaben von Renault zu RDE Fahrten vorlagen. Im Anhang finden sich die RDE Messwerte (Seite 93).

4 Simulation

4.1 PHEM

PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) ist ein Emissions-Simulationsprogramm, welches im Jahr 1998 von der Technischen Universität Graz entwickelt worden ist und stetig weiterentwickelt wird. In dieser Arbeit wurde PHEM hauptsächlich zur Kennfelderstellung und Längsdynamiksimulation eingesetzt.

4.2 Kennfelderstellung

Die Kennfelderstellung basiert auf den Messwerten, welche bei den Messfahrten (RDE, WLTC, etc.) aufgezeichnet wurden. Da die sekundliche Leistung nicht mitgemessen wurde, wurde ein Verbrauchs-/Leistungszusammenhang benötigt. Dieser wird durch eine CO₂-Map vorgegeben. Eine solche CO₂-Map beinhaltet die normierte Drehzahl, die normierte Leistung und den normierten CO₂-Ausstoß. Der Zusammenhang dieser drei Parameter kommt aus einer Vielzahl von gemessenen Euro 6d-Temp Fahrzeugen und wird somit auch immer normiert dargestellt (siehe Gleichung (4-1) und (4-2)).

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

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

n_{norm}	...normierte Drehzahl [-]	P_{norm}	...normierte Leistung [-]
n	...aktuelle Drehzahl [rpm]	P_e	...effektive Leistung [kW]
n_{idle}	...Leerlaufdrehzahl [rpm]	P_{rated}	...Nennleistung [kW]
n_{rated}	...Nenn Drehzahl [rpm]		

Da die Leistung über der Drehzahl durch die Vollastkurve begrenzt ist, muss diese ebenfalls bei der Kennfelderstellung berücksichtigt werden. (Abbildung 4-1)

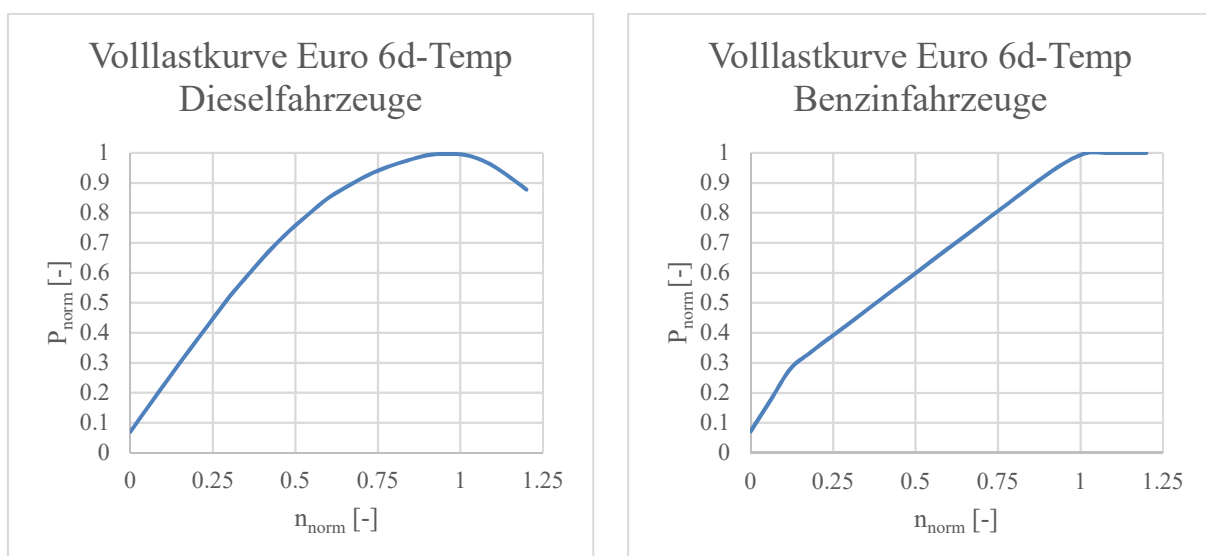


Abbildung 4-1: Vollastkurve Euro 6d-Temp Dieselfahrzeuge (links) und Vollastkurve Euro 6d-Temp Benzinfahrzeuge (rechts)

4.2.1 BMW 216d GranTourer 110 tkm

In die Kennfelder für den BMW 216d GranTourer 110 tkm sind alle Messergebnisse ohne DPF-Regenerationsphasen sowie ohne Kaltstartphasen eingeflossen. Beim 110 tkm BMW ergaben sich somit die folgenden Kennfelder für CO (Abbildung 4-2), PN (Abbildung 4-3) und NO_x (Abbildung 4-4, Seite 44). Da die RDE Fahrten nur mit dem PEMS gemessen werden können, finden sich in den Gesamtkennfeldern keine HC-Emissionen.

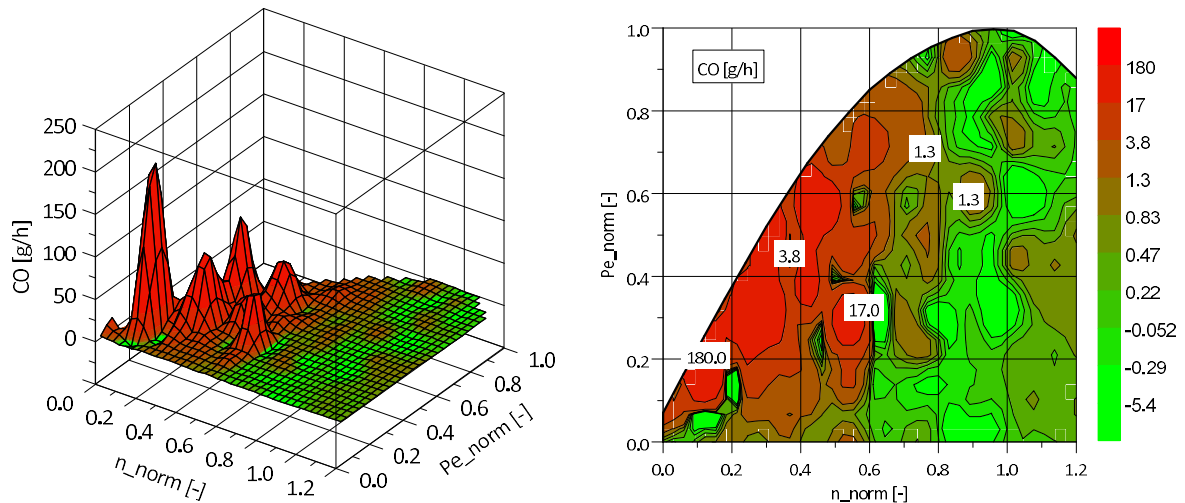


Abbildung 4-2: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (PEMS)

Abbildung 4-2 zeigt die CO-Emissionen, welche ihr Maximum in den unteren Drehzahlbereichen sowie nahe der Volllastkurve erreichen. Mit zunehmender Drehzahl werden die CO-Emissionen nahezu Null.

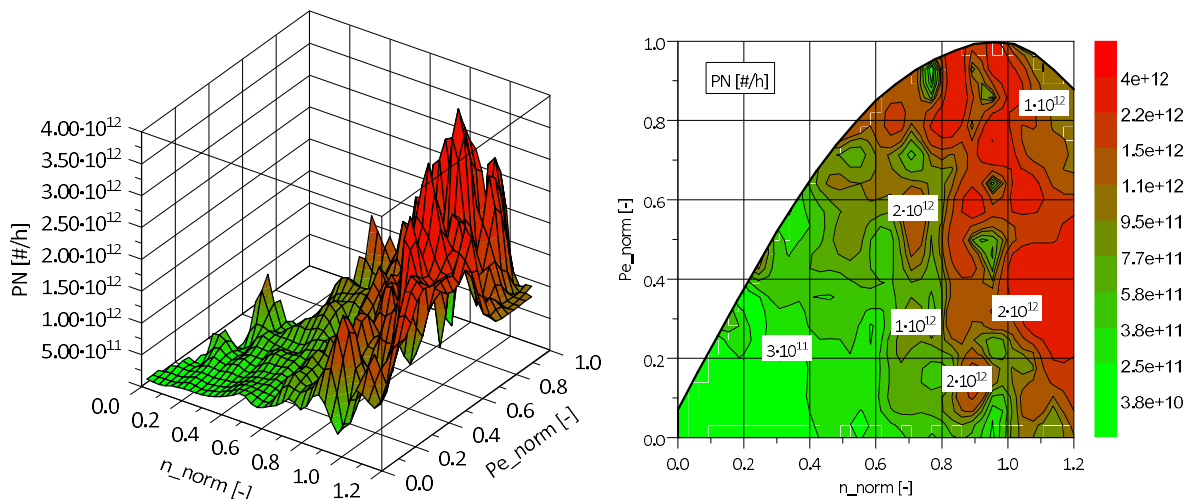


Abbildung 4-3: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (PEMS)

Bei den PN-Emissionen (Abbildung 4-3, Seite 43) und NO_x-Emissionen (Abbildung 4-4) zeigt sich ein anderes Bild. Hier steigen die Emissionswerte mit steigender Drehzahl und Leistung, was zu PN-Spitzenwerten von 4E+12 #/h und NO_x-Spitzenwerten von 250 gNO_x/h führt.

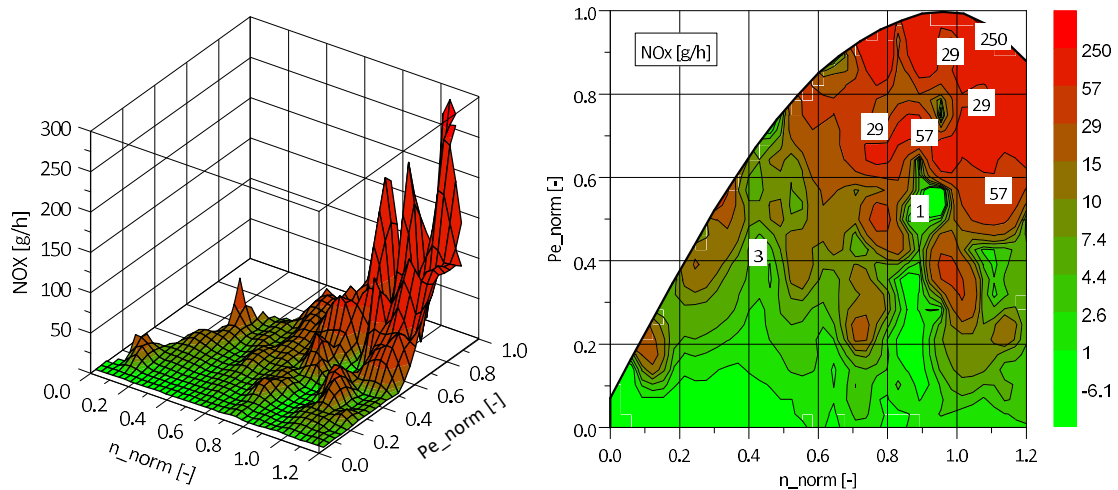


Abbildung 4-4: NO_x-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (PEMS)

Aus den Messdaten der CVS-Anlage wurden für die beiden Prüfstandläufe (WLTC und EMRES V9) jeweils eigene Kennfelder erstellt. Als Beispiel sei hier nur das Kennfeld der Ammoniak-Emission (NH₃) dargestellt (Abbildung 4-5). Ammoniak ist nicht gesetzlich limitiert, liefert aber Erkenntnisse zum Alterungsverhalten des SCR-NH₃-Sperrkatalysators.

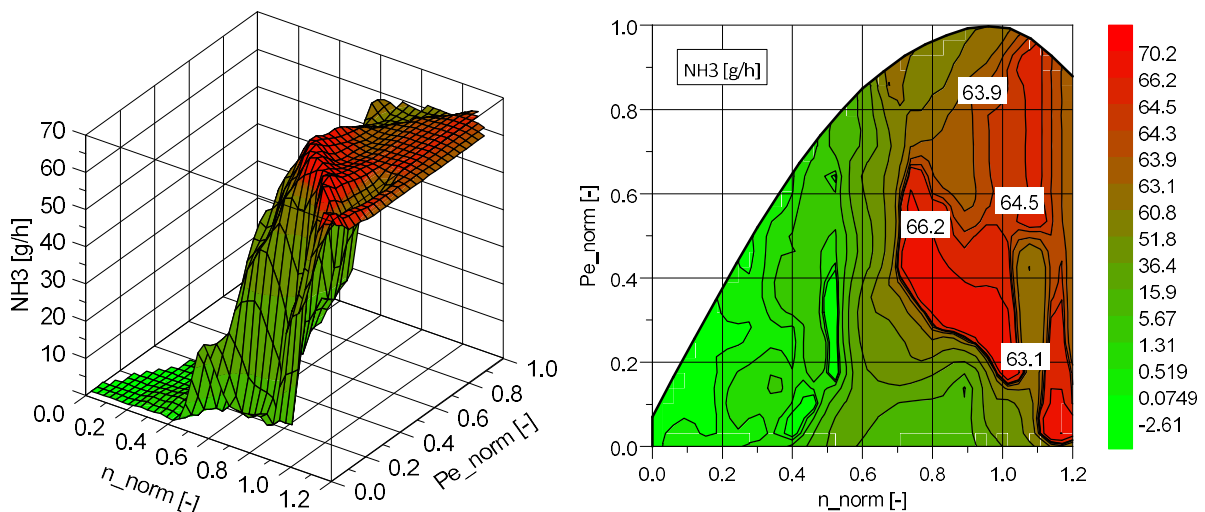


Abbildung 4-5: NH₃-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)

Alle anderen erstellten Kennfelder zum 110 tkm BMW sind zusammengefasst im Anhang enthalten (Abbildung 0-7 bis Abbildung 0-11, Seite 94-95).

4.2.2 BMW 216d GranTourer 216 tkm

Die Kennfelder des 216 tkm BMW wurden analog zum 110 tkm BMW erstellt. Es wurden nur Messfahrten ohne DPF-Regeneration und ohne Kaltstartphasen für die Erstellung benutzt. Die folgenden Abbildungen zeigen die ausgewerteten Kennfelder (Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9, Seite 46).

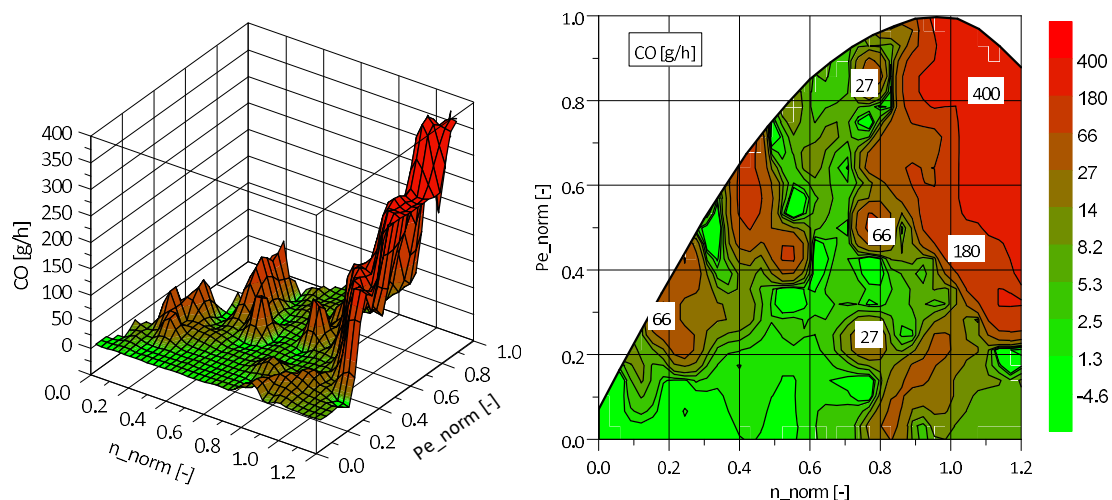


Abbildung 4-6: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (PEMS)

Die CO-Emissionen des 110 tkm BMW (Abbildung 4-6) zeigen einen anderen Trend wie jene des 216 tkm BMW. Hier steigen die CO-Emissionen mit zunehmender Drehzahl und Leistung.

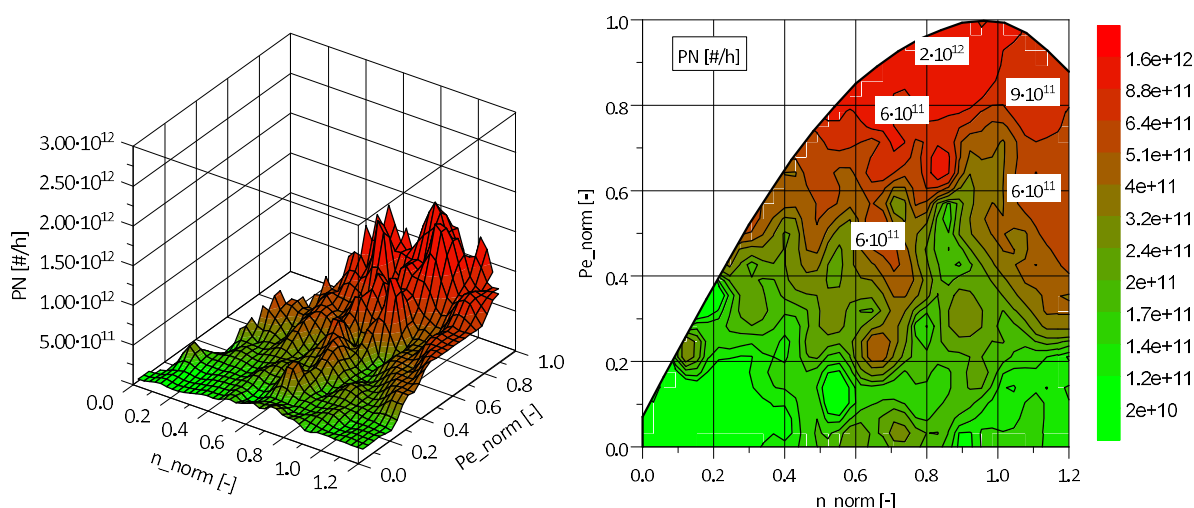


Abbildung 4-7: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (PEMS)

In Abbildung 4-7 sind die PN-Emission aufgetragen. Es ist deutlich erkennbar, dass sich das PN-Emissionsverhalten rein über die Kennfelder vom 110 tkm BMW zum 216 tkm BMW verbessert hat (Vergleich Abbildung 4-3, Seite 43). Dieses Verhalten kann auf eine höhere Aschebelastung im Partikelfilter des 216 tkm BMW zurückgeführt werden. Dadurch steigt der Abscheidegrad des Partikelfilters.

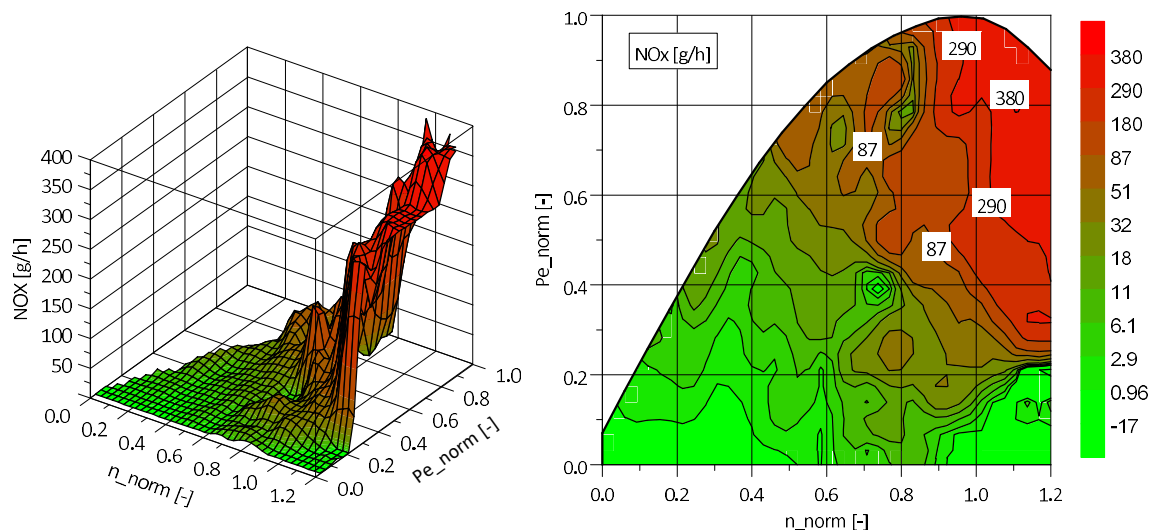


Abbildung 4-8: NO_x-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (PEMS)

Das NO_x-Kennfeld des 216 tkm BMW (Abbildung 4-8) folgt dem gleichen Trend wie jenes des 110 tkm BMW. Es steigt mit hohen Drehzahlen und hohen Leistungen. Lediglich sind hier die absoluten Emissionen höher als jene des 110 tkm BMW. Im Kennfeld erreichen die NO_x-Werte bis zu 380 g/h. Bei dem 110 tkm BMW lagen die Spitzenwerte im NO_x-Kennfeld bei 250 g/h. Dies führt zu einer Steigerung der NO_x-Spitzenwerte von 52 %.

Auch bei dem 216 tkm BMW wurden aus den Rollenprüfstandsmessdaten Kennfelder erstellt. Als Beispiel wurde hier wieder das Ammoniak (NH₃) gewählt. (Abbildung 4-9)

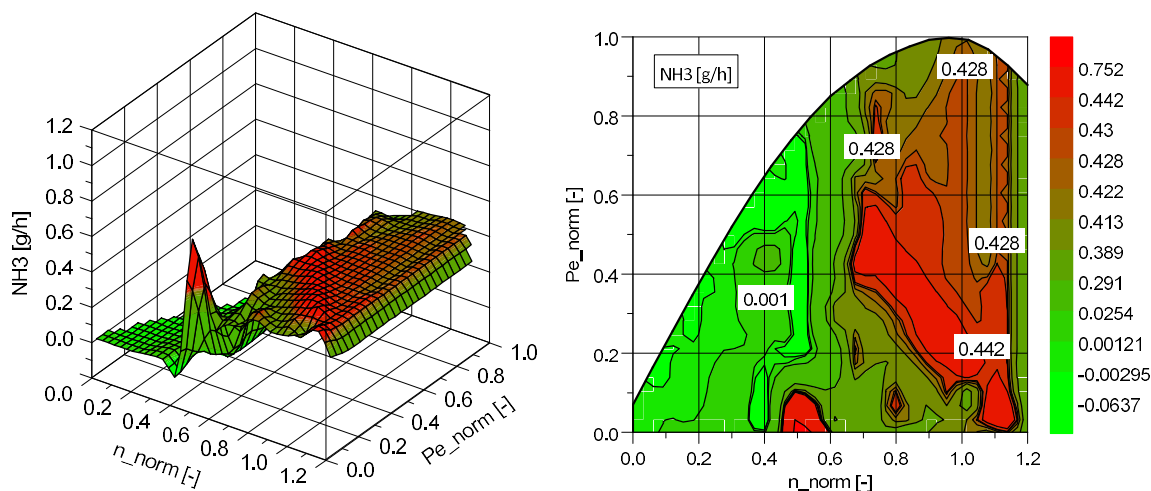


Abbildung 4-9: NH₃-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)

Im Anhang sind noch weitere Kennfelder, die aus den CVS/FTIR-Daten extrahiert wurden. (Abbildung 0-12 bis Abbildung 0-16, Seite 96-97)

4.2.3 BMW 216d GranTourer Differenzkennfelder

Um aus den gewonnenen Kennfeldern der beiden Fahrzeuge Veränderungen im Emissionsverhalten zu erlangen, wurden die Kennfelder des 110 tkm BMW von jenem des 216 tkm BMW subtrahiert (Gleichung (4-3) bis (4-5)).

$$\Delta CO_{i \times j} = CO_{216 \text{ tkm BMW } i \times j} - CO_{110 \text{ tkm BMW } i \times j} \quad (4-3)$$

$$\Delta PN_{i \times j} = PN_{216 \text{ tkm BMW } i \times j} - PN_{110 \text{ tkm BMW } i \times j} \quad (4-4)$$

$$\Delta NO_{x \ i \times j} = NO_{x216 \text{ tkm BMW } i \times j} - NO_{x110 \text{ tkm BMW } i \times j} \quad (4-5)$$

i...Laufvariable für die Drehzahlrasterung (1 ... 20)

j...Laufvariable für die Leistungsrasterung (1 ... 20)

Es wird von jeder Stützstelle die Differenz einzeln berechnet. Auf diesem Weg entstehen Kennfelder, die eine Verschlechterung bzw. eine Verbesserung vom 110 tkm BMW zum 216 tkm BMW zeigen. Die Kennfelder sind in Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-12 (Seite 48) aufgelistet. Differenzkennfelder werden in dieser Arbeit immer mit der in Abbildung 4-10 enthaltenen Farbskala erstellt.

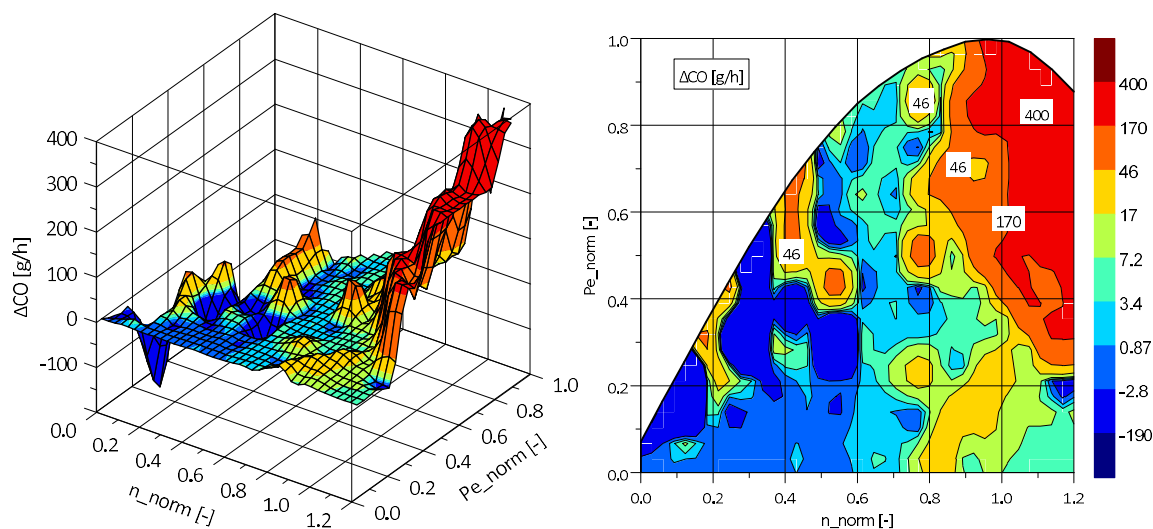


Abbildung 4-10: CO-Differenzkennfeld BMW 216d GranTourer 110 – 216 tkm

Das CO-Differenzkennfeld (Abbildung 4-10) beschreibt die absolute Änderung in jeder Stützstelle. Dies bedeutet, dass positive Werte eine Verschlechterung bzw. eine Erhöhung der Emissionswerte gleichkommen.

Folglich ist zu erkennen, dass die CO-Emissionen im unteren Drehzahlbereich eine leichte Verbesserung erfuhren. Auf der anderen Seite gibt es aber eine erhebliche Verschlechterung im hohen Drehzahl- und Leistungsbereich. Hier treten CO-Spitzen Deltawerte von 400 g/h auf.

Das PN-Differenzkennfeld (Abbildung 4-11) liefert hier Schwankungen von $-3,5E+12$ bis $1,2E+12$ #/h. Das Kennfeld liefert nur einen geringen Trend in Richtung PN-Erhöhung nahe der Vollastlinie. In den hohen Drehzahlen bei niedrigen bis mittleren Leistungen ist eine deutliche Verbesserung vom 216 tkm BMW zum 110 tkm BMW feststellbar.

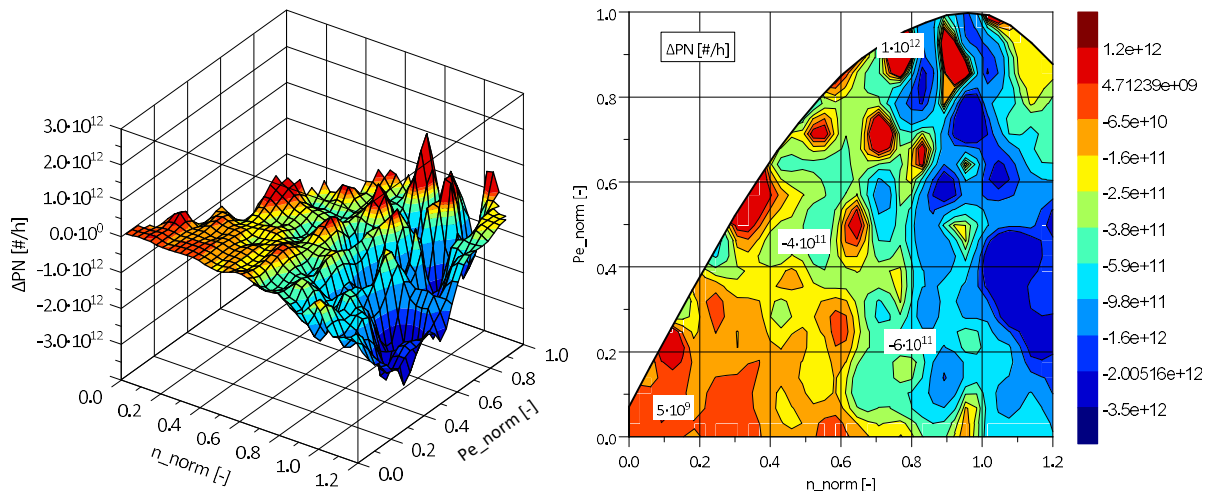


Abbildung 4-11: PN-Differenzkennfeld BMW 216d GranTourer 110 – 216 tkm

Abbildung 4-12 stellt die NO_x -Differenz dar. Die NO_x -Kennfelder der einzelnen Fahrzeuge (110 tkm BMW und 216 tkm BMW) hatten die gleiche Tendenz im NO_x -Verhalten, nur in anderen Größenordnungen. Somit ergibt sich ein NO_x -Differenzkennfeld, das deutlich die Verschlechterung des 216 tkm BMW zum 110 tkm BMW veranschaulicht.

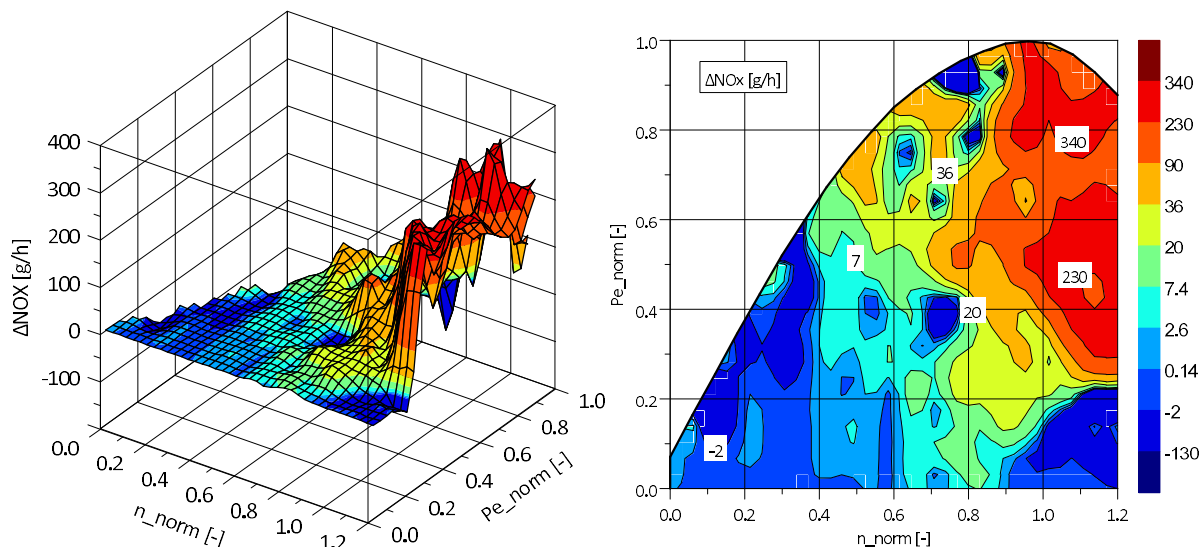


Abbildung 4-12: NO_x -Differenzkennfeld BMW 216d GranTourer 110 – 216 tkm

4.2.4 Renault Grand Scenic

Abbildung 4-13 zeigt das CO-Kennfeld des Renault Grand Scenic. Sieht man sich die Spitzenwerte der CO-Emissionen an, stellt man fest, dass diese um das doppelte höher sind, als der Dieselfahrzeuge.

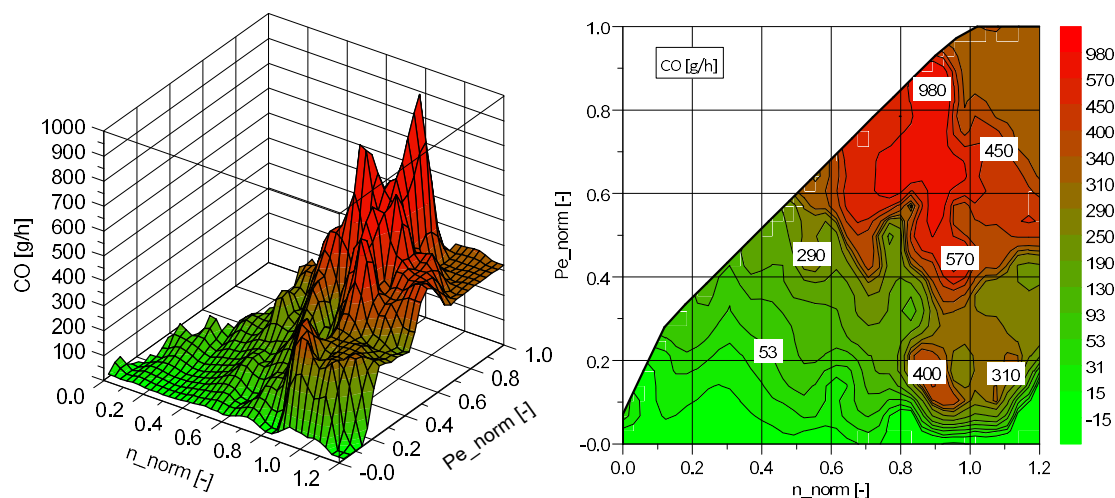


Abbildung 4-13: CO-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (PEMS)

Das PN-Kennfeld (Abbildung 4-14) weist in fast allen Punkten höhere Partikelanzahlwerte auf als jenes der Dieselfahrzeuge. Dies liegt am Regenerationsverhalten des Ottomotors, welcher sich im Grunde während des gesamten Betriebs regeneriert. Dafür wird im Schubbetrieb Sauerstoff durch die Abgasanlage geleitet und der Filter wird passiv regeneriert. Dies ist nur mit einer erhöhten Abgastemperatur möglich, die Ottomotoren aufweisen. Ein passives Regenerieren ist in Dieselfahrzeugen auch möglich, unterliegt in seiner Wirksamkeit aber jenem der aktiven Regeneration.

Somit ergeben sich für die PN-Spitzenwerte von $2,3E+14$ #/h. Auffallend sind die Kennfeldbereiche zwischen einer Normdrehzahl von 0,6 und 0,8 wo die Partikelanzahl enorm steigt. Dieser Betriebsbereich bietet wahrscheinlich die beste Möglichkeit für ein passives Regenerieren. Dieser Bereich wird außerdem im Fahrbetrieb häufig angefahren.

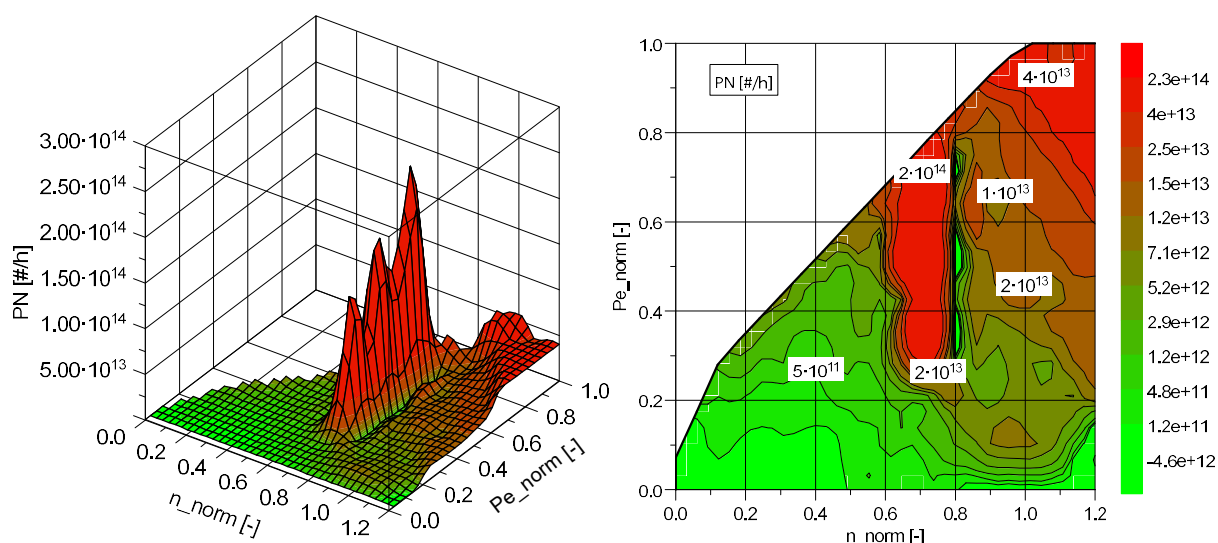


Abbildung 4-14: PN-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (PEMS)

Die NO_x -Emissionen (Abbildung 4-15) sind hingegen um einiges geringer als jene der BMWs. Dies ist auf die Einspritzstrategie der Motoren (Otto/Diesel) erklärbar. Die Werte steigen mit der Drehzahl und der Leistung stark an und erreichen in den Spitzenpunkten Werte von 60 g/h.

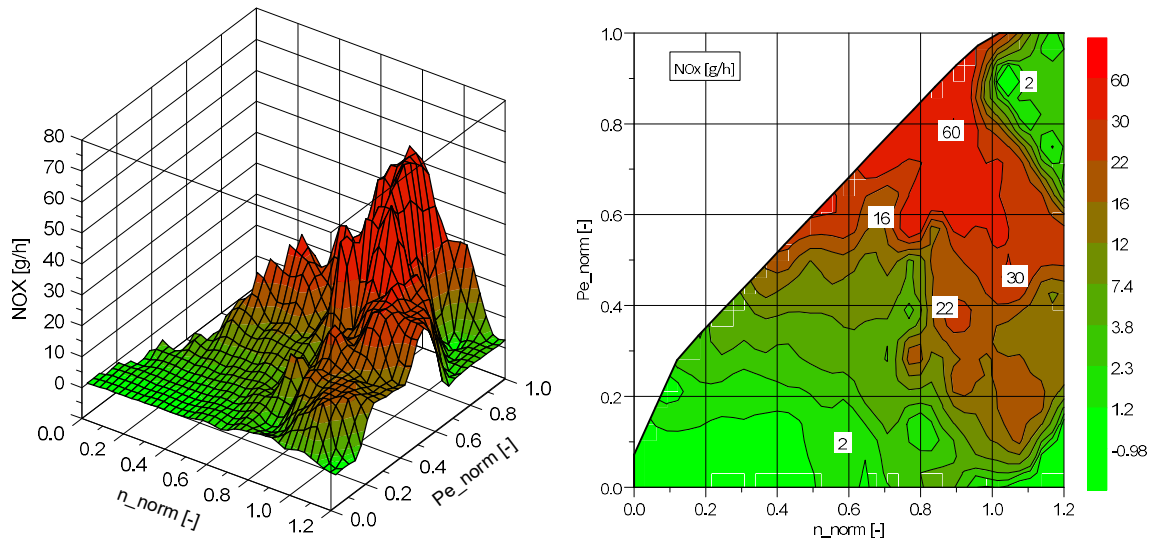


Abbildung 4-15: NO_x -Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (PEMS)

Das Kennfeld der NH_3 -Emissionen (Abbildung 4-16) zeigt eine Steigerung der Emissionen bei hohen Drehzahlen und Leistungen, wie auch an der Vollastlinie.

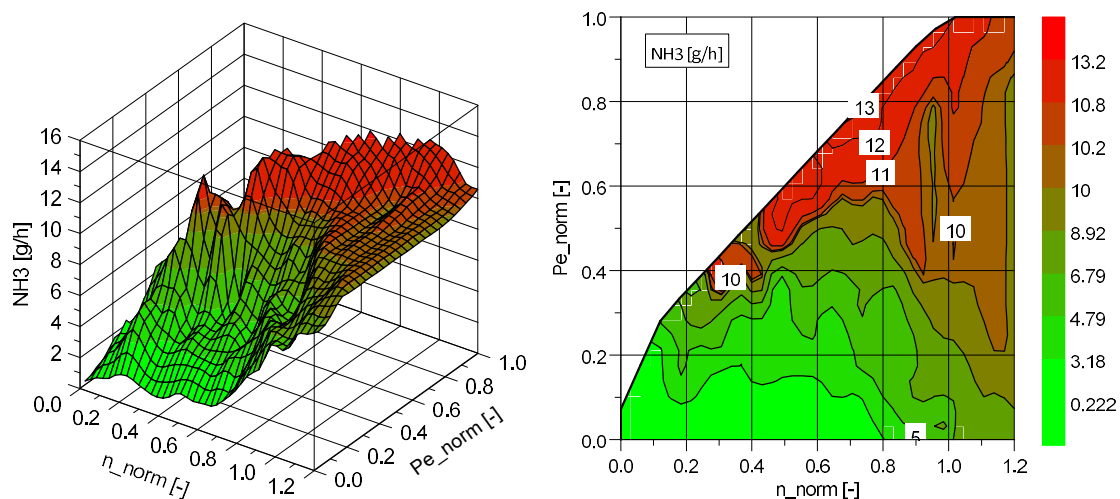


Abbildung 4-16: NH_3 -Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)

Die zusätzlich erstellten Kennfelder (Abbildung 0-17 bis Abbildung 0-21) aus den CVS-/FTIR-Daten sind im Anhang von Seite 98 bis 99 zu finden.

4.3 Längsdynamiksimulation

Mittels einer Simulation werden Strecken, Zyklen oder Teilabschnitte einer Fahrt simuliert, um Fahrzeuge direkt miteinander vergleichen zu können. Dabei werden dem Simulationsprogramm die zuvor erstellten Kennfelder der Abgaskomponenten als Ausgangsparameter geliefert. Als zweites großes Input-File werden die Fahrzeugdaten (Massen, Rollwiderstandsbeiwerte, dynamischer Reifenradius, c_w -Wert und angeströmte Fläche, Nebenverbraucher) zugesteuert. Zu guter Letzt wird der Software noch die zu fahrende Strecke implementiert. In diesem Strecken-File werden dem PHEM-Programm die Zeitschritte, die zu fahrende Geschwindigkeit und Drehzahl wie auch der Steigungsgradient vorgegeben.

Um die erforderliche Leistung, die das Fahrzeug benötigt, um die Strecke zu absolvieren, wird folgende Berechnung zu Grunde gelegt (Gleichung (4-6) bis (4-11)). Die angreifenden Kräfte zu den einzelnen Leistungen sind in Abbildung 4-17 dargestellt.

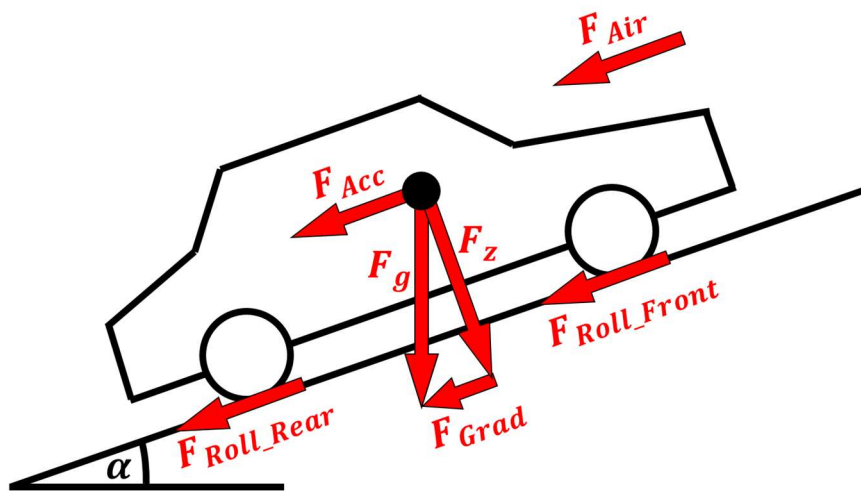


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte am PKW

$$P_e = P_{\text{Roll}} + P_{\text{Air}} + P_{\text{Acc}} + P_{\text{Grad}} + P_{\text{Loss}} + P_{\text{Aux}} \quad (4-6)$$

$$P_{\text{Roll}} = (m_{\text{Veh}} + m_{\text{Load}}) * g * (fr_0 + fr_2 * v + \dots + fr_4 * v^3) * v \quad (4-7)$$

$$P_{\text{Air}} = c_w * A_{\text{front}} * \rho_{\text{Air}} * \frac{v^3}{2} \quad (4-8)$$

$$P_{\text{Acc}} = (m_{\text{Veh}} + m_{\text{Load}} + m_{\text{Rot}}) * a * v \quad (4-9)$$

$$m_{\text{Rot}} = \frac{I_{\text{Wheels}}}{r_{\text{Wheel}}^2} + I_{\text{Eng}} * \left(\frac{i_{\text{Axis}} * i_{\text{Gear}}}{r_{\text{Wheel}}} \right)^2 + I_{\text{Trans}} * \left(\frac{i_{\text{Axis}}}{r_{\text{Wheel}}} \right)^2 \quad (4-10)$$

$$P_{\text{Grad}} = (m_{\text{Veh}} + m_{\text{Load}}) * g * \sin(\alpha) * v \quad (4-11)$$

P_e	...gesamte Motorleistung [kW]
P_{Roll}	...Widerstandsleistung aus dem Rollwiderstand [kW]
P_{Air}	...Widerstandsleistung aus dem Luftwiderstand [kW]
P_{Acc}	...Widerstandsleistung aus der Beschleunigung [kW]
P_{Grad}	...Widerstandsleistung aus der Steigung [kW]
P_{Loss}	...Widerstandsleistung aus Verlusten [kW]
P_{Aux}	...Widerstandsleistung aus Nebenverbrauchern [kW]
m_{Rot}	...Rotierende Massen [kg]
I_i	...Massenträgheitsmomente (Wheels...Räder, Eng...Motor, Trans...Getriebe) [kgm ²]
i_i	...Übersetzungsverhältnisse (Axis...Achübersetzung, Gear...Getriebeübersetzung) [-]
r_{Wheel}	...dynamischer Reifenradius [mm]
α	...Steigungswinkel [°]
c_w	...Luftwiderstandsbeiwert [-]
A_{front}	...angeströmte Fläche [m ²]
fr_i	...Rollwiderstandsbeiwerte (fr_1 [-], fr_2 [s/m], fr_3 [s ² /m ²], fr_4 [s ³ /m ³])
a	...Beschleunigung [m/s ²]
v	...Geschwindigkeit [m/s]

Noch bevor eine Simulation wissenschaftlich durchführbar ist, müssen die gesamten eingeflossenen Parameter auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Dies geschieht in einer Validierung, ohne dieser wäre das weitere Vorgehen bedeutungslos.

Validierung

Bei der Validierung wurde eine Längsdynamiksimulation durchgeführt, welche dem exakten Geschwindigkeits-, Drehzahl- und Steigungsverlauf einer Messfahrt folgt. Anschließend wurde dieser Simulation die Kaltstartphase entfernt. Die so erhaltenen Simulationsergebnisse wurden den Messergebnissen, auch ohne Kaltstartphasen, der gewählten Strecke gegenübergestellt. Die Kaltstartparameter wurden bei RDE Fahrten bis zu einer Kühlmitteltemperatur von 70 °C festgelegt. Bei Prüfstandszyklen wurde als Grenze der Kaltstartphase die ersten 300 s definiert.

Die Validierung in dieser Arbeit hat den Ansatz einer mittleren CO₂-Abweichung von +/- 5 % verfolgt. Um diese engen Grenzen erreichen zu können, bieten die Fahrzeugdaten (Fahrzeug-Input-File) den einzigen Hebel. Diese Parameter dürfen aber nur in gewissen Grenzen variiert werden.

4.3.1 BMW 216d GranTourer 110 tkm

Validierung

Die Validierung des BMW mit 110 tkm wurde anhand von zwei Riesfahrten, einer Arzbergfahrt und eines ERMES Zyklus validiert.

In Tabelle 4-1 ist ersichtlich, dass die CO₂-Abweichung bei der Fahrt Ries-01 bei -3,09 % liegt. Dies bedeutet, dass die Simulation den Treibstoffverbrauch des Realfahrzeuges leicht vermindert abbildet. Die Simulation unterschätzt das gemessene Fahrzeug.

Bei den Werten der anderen angeführten Abgaskomponenten liegt die Abweichung durchaus in einem akzeptablen Rahmen. Anzumerken ist die Abweichung der Partikelanzahl (PN) mit -14,79 %. Dies ist eine geringe Abweichung, da die Simulation von Partikelemissionen sehr komplex ist.

Tabelle 4-1: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries-01

Ries-01					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO ₂	8703.59	-	8434.85	-	-3.09
CO	7.23	-	7.15	-	-1.08
NO _x	2.50	-	2.67	-	6.89
NO	2.09	-	2.42	-	15.72
PN	-	8E+07	-	7E+07	-14.79

In Tabelle 4-2 wurde die Längsdynamiksimulation mit einer Messfahrt (Ries02) verglichen, in der eine DPF-Regeneration stattgefunden hat. Die Abweichungen von CO, NO_x, NO und PN liegen hierbei um einiges höher, obwohl die CO₂-Abweichung gering ist.

Die Partikelanzahl in der Messfahrt ist erwartungsgemäß höher. Auffallend ist die CO-Abweichung, welche bei der Simulation weit höher liegt als bei der Messfahrt. Da die DPF-Regeneration im Vergleich zum Gesamtzyklus gering ausfällt, liegen die Werte in guter Toleranz.

Tabelle 4-2: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries-02

Ries-02					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO ₂	9091.12	-	8979.34	-	-1.23
CO	6.25	-	8.92	-	42.71
NO _x	13.70	-	2.99	-	-78.17
NO	12.42	-	2.73	-	-77.98
PN	-	2E+09	-	7E+07	-96.22

Auf der Arzbergstrecke wurde aggressiv gefahren, sprich starke Beschleunigungen, Bremsmanöver sowie lange Bergabfahrten, die die Abgasmachbehandlungssysteme auskühlen lassen. Wie auch bei den beiden Riesfahrten wurde auch hier, das selbe Fahrzeugdaten-File benutzt.

Bei dieser Gegenüberstellung liegt die CO₂-Abweichung außerhalb der +/- 5 % Grenze, was auf das oben angesprochene Fahrverhalten zurückzuführen ist.

Tabelle 4-3: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm Arzberg

Arzberg					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO ₂	11595.65	-	10840.11	-	-6.52
CO	4.11	-	9.61	-	133.79
NO _x	2.99	-	4.56	-	52.25
NO	2.71	-	4.23	-	56.21
PN	-	1E+08	-	9E+07	-9.65

Als letzte Validierung wurde der ERMES Zyklus durchgerechnet. Da dies ein Prüfstandlauf ist, wurde das Fahrzeugdaten-File hier in punkto Masse und Nebenverbraucherleistung angepasst. Die Nebenverbraucherleistung wurde ausgehend vom RDE Fahrzeugdaten-File von 1,179 kW auf 300 W reduziert und die Masse auf die Prüfstandmasse korrigiert.

Da in der Validierung immer alle Messfahrten (4x RDE Fahrten, 2x Rollenprüfstandläufe) zur Kennfelderstellung eingeflossen sind, liegen die Abgaskomponenten CO, NO_x, NO und PN für den Prüfstandlauf prozentuell weiter weg, als die Abgaskomponenten der Riesfahrt-01.

Tabelle 4-4: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm ERMES

ERMES					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO ₂	12154.41	-	12352.95	-	1.63
CO	4.19	-	8.50	-	102.80
NO _x	2.77	-	4.37	-	57.85
NO	2.69	-	4.03	-	49.93
PN	-	2E+08	-	9E+07	-59.80

4.3.2 BMW 216d GranTourer 216 tkm

Validierung

Die Validierung des zweiten BMW mit 216 tkm wurde an zwei Riesfahrten und einer Arzbergfahrt durchgeführt. Die hier eingegangenen Fahrzeugparameter (Fahrzeugdaten-File) müssen exakt mit jenen des 110 tkm BMW übereinstimmen. Dies ist essentiell, um im nächsten Schritt eine genaue Vergleichbarkeit der beiden Fahrzeuge gewährleisten zu können.

In Tabelle 4-5 kann man die Abweichung der Abgaskomponenten einsehen. Sie liegen in der gleichen Größenordnung, wie jene der Ries-01 Validierung des BMW mit 110 tkm (Tabelle 4-1, Seite 53).

Tabelle 4-5: Validierung BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries-01

Ries-01					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO ₂	7663.80	-	8030.52	-	4.79
CO	5.49	-	5.41	-	-1.59
NO _x	2.53	-	2.76	-	9.10
NO	2.26	-	2.50	-	10.84
PN	-	3E+07	-	4E+07	12.04

Der 216 tkm BMW hatte auch in einer Riesfahrt eine DPF-Regeneration. Dieser Vergleich ist in Tabelle 4-6 veranschaulicht. Gut erkennbar ist hier die „Unterschätzung“ der Simulation in Bezug auf die Realfahrt.

Tabelle 4-6: Validierung BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries-02

Ries-02					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO ₂	8240.48	-	7910.59	-	-4.00
CO	9.24	-	5.13	-	-44.55
NO _x	7.60	-	2.95	-	-61.13
NO	7.18	-	2.69	-	-62.4
PN	-	9E+08	-	4E+07	-95.52

Wie auch schon bei dem 110 tkm BMW angesprochen, liegen die hohen Abweichungen bei der Arzbergfahrt (Tabelle 4-7, Seite 56) des 216 tkm BMW an dem aggressiven Fahrverhalten (spätes Schalten, etc.). Zu sehen ist der Vergleich auf Seite 56 in Tabelle 4-7.

Tabelle 4-7: Validierung BMW 216d GranTourer 216 tkm Arzberg

Arzberg					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung [%]
	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	
CO₂	10753.34	-	11681.91	-	8.64
CO	6.77	-	9.04	-	33.55
NO_x	6.17	-	7.67	-	24.46
NO	5.91	-	7.23	-	22.28
PN	-	6E+07	-	6E+07	6.69

Die Validierungen des 110 tkm und 216 tkm BMW führten schlussendlich auf die realitätsnahen Fahrzeugdaten, die in Abbildung 4-18 ersichtlich sind.

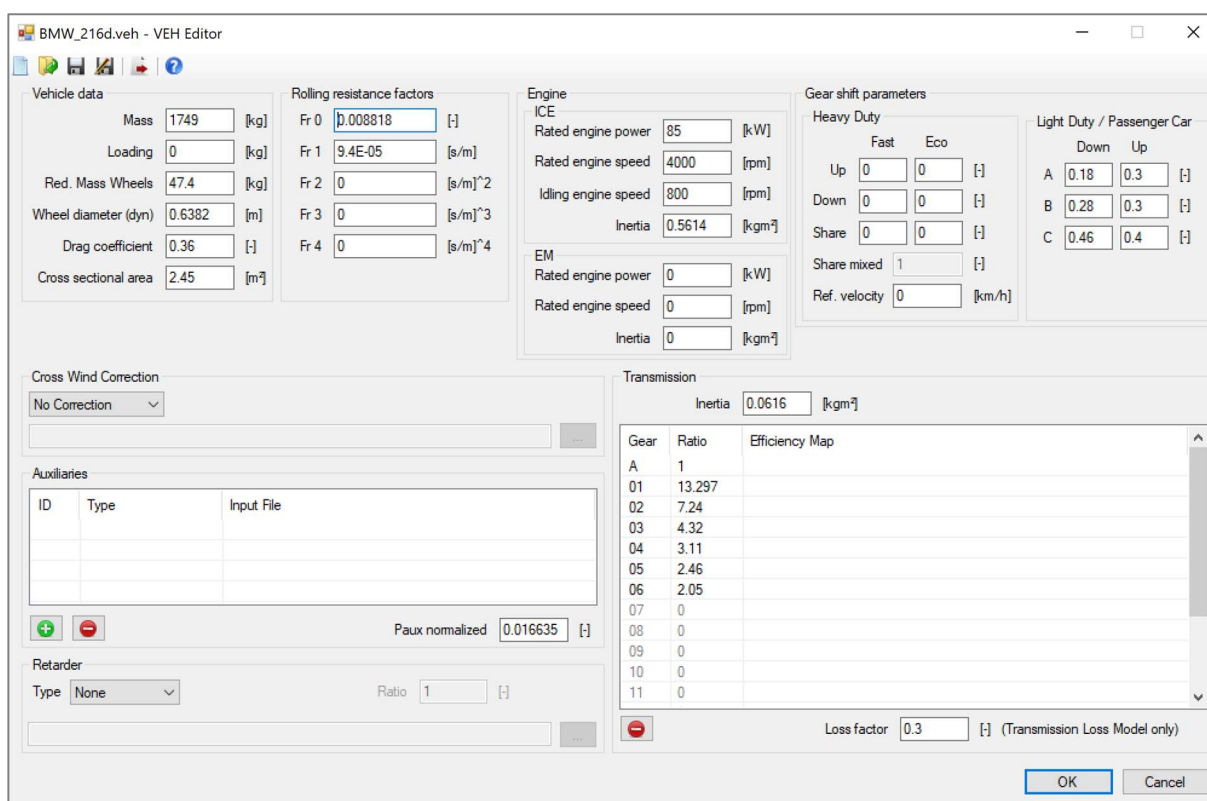


Abbildung 4-18: BMW 216d GranTourer Fahrzeugdaten-File (PHEM)

4.3.3 BMW 216d GranTourer Vergleich der Längsdynamiksimulationen

Die beiden BMW 216d GranTourer wurden in den vorherigen Kapiteln (4.2.1 und 4.2.2) validiert und damit gezeigt, dass die Fahrzeugdaten dem Realfahrzeug gleichen. Mit dieser Erkenntnis ist es möglich weitere Simulationen durchzuführen.

Die erste Längsdynamiksimulation wurde auf einer Riesstrecke durchgeführt. Die Streckendaten für die Riesfahrt stammen aus der Messfahrt Ries-01 vom 216 tkm BMW. Beide Kennfelder (110 tkm BMW und 216 tkm BMW) wurden mit den gleichen Fahrzeugdaten auf derselben Strecke durchgerechnet. Die Resultate der Berechnung sind in Tabelle 4-8 dargestellt. Weiters ist noch die Änderung, sprich die Verschlechterung bzw. Verbesserung, zwischen den Laufleistungen prozentuell dargestellt.

Tabelle 4-8: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer Ries

		Ries				
		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
		[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]
Simulation	CO ₂	7727.12	-	7727.12	-	0.00
	CO	7.59	-	4.95	-	-34.80
	NO _x	2.54	-	2.80	-	10.12
	NO	2.29	-	2.55	-	10.98
	PN	-	6.33E+07	-	3.85E+07	-39.19

Zum besseren Verständnis werden in Tabelle 4-9 die gemessenen Emissionswerte der Abgaskomponenten der Riesfahrt dargestellt.

Tabelle 4-9: Messwerte BMW 216d GranTourer Ries

		Ries				
		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
		[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]
Messung	CO ₂	8703.59	-	7663.80	-	-11.95
	CO	7.23	-	5.50	-	-23.93
	NO _x	2.50	-	2.53	-	1.32
	NO	2.09	-	2.26	-	7.78
	PN	-	7.94E+07	-	3.30E+07	-58.39

Um die simulierten und gemessenen Verschlechterungs- bzw. Verbesserungsfaktoren zu erkennen, wurden diese in Tabelle 4-10 (Seite 58) als Differenz der jeweiligen Laufleistungen angeschrieben. Dies bedeutet, dass sich die NO_x-Werte bei den gemessenen Werten vom 110 tkm auf 216 tkm BMW um den Faktor 1,01 erhöhen. In der Simulation hingegen, ergibt sich ein Verschlechterungsfaktor von 1,1 für die NO_x-Werte.

In der Spalte „Abweichung“ wird die Abweichung zwischen den Änderungsfaktoren von der Messung zum Simulationsergebnis in Prozentpunkten verdeutlicht.

Tabelle 4-10: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung
BMW 216d GranTourer Ries

Ries					
	Messung-Delta		Simulation-Delta		Abweichung
	[%]	[-]	[%]	[-]	
CO ₂	-11.95	0.88	0.00	1.00	11.95
CO	-23.93	0.76	-34.80	0.65	10.88
NO _x	1.32	1.01	10.12	1.10	8.80
NO	7.78	1.08	10.98	1.11	3.20
PN	-58.39	0.42	-39.19	0.61	19.20

Bei der Simulation der Alterungseffekte wurde in allen Abgaskomponenten eine ähnlich geringe Abweichung erzielt. Die CO₂-Änderung in der Simulation ist wegen der gleich hinterlegten CO₂-Map 0 %.

Die berechneten Verschlechterungs- bzw. Verbesserungsfaktoren sind in der nachstehenden Abbildung 4-19 dargestellt. Zudem sind in dem Diagramm die HBEFA-Werte eingetragen.

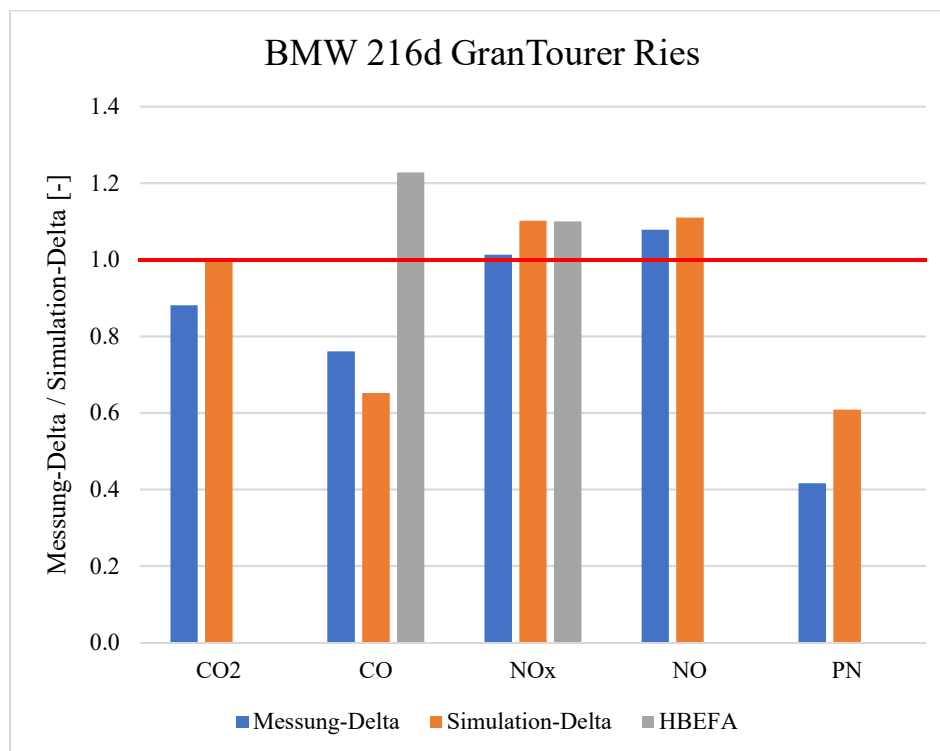


Abbildung 4-19: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung
BMW 216d GranTourer Ries

Für die so erhaltenen Faktoren ergeben sich für die NO_x-Werte gute Näherungen zu dem HBEFA-Wert in der Simulation sowie in der Messung. Die CO-Werte liegen weiter von dem HBEFA-Wert weg. Es sei erwähnt, dass in die HBEFA-Werte eine große Menge an Fahrzeugmessdaten einfließen, um so eine repräsentative Durchschnittsalterung für die einzelnen Abgaskomponenten zu erhalten.

Eine weitere Längsdynamiksimulation wurde für die Strecke des Test-X berechnet. In Tabelle 4-11 sind die simulierten Werte und in Tabelle 4-12 die gemessenen Werte gegenübergestellt.

Tabelle 4-11: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer Test-X

		RDE Test-X				
		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
		[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]
Simulation	CO ₂	5377.75	-	5377.75	-	0.00
	CO	2.68	-	4.04	-	50.8
	NO _x	2.56	-	5.34	-	108.71
	NO	2.37	-	5.14	-	116.56
	PN	-	6.20E+07	-	3.40E+07	-45.17

In Tabelle 4-12 sind die Änderungen vom 110 tkm BMW zum 216 tkm BMW stark erhöht. Dies schuldet dem, dass es bei dem 216 tkm BMW zu einer DPF-Regeneration kam.

Tabelle 4-12: Messwerte BMW 216d GranTourer Test-X

		RDE Test-X				
		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
		[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]
Messung	CO ₂	5948.81	-	7602.30	-	27.80
	CO	5.83	-	14.96	-	156.5
	NO _x	3.69	-	8.04	-	117.64
	NO	3.58	-	7.60	-	112.08
	PN	-	5.06E+07	-	5.46E+08	978.81

Trotz der DPF-Regeneration in einer Fahrt, wurden für die NO_x- und NO-Werte nur geringe Abweichungen von unter 10 %-Punkten realisiert (Tabelle 4-13). Die CO- und PN-Abweichungen sind erwartungsgemäß hoch.

Tabelle 4-13: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Test-X

		Test-X				
		Messung-Delta		Simulation-Delta		Abweichung
		[%]	[-]	[%]	[-]	[%-Punkte]
CO ₂	27.80	1.28	0.00	1.00	27.80	
CO	156.50	2.56	50.83	1.51	105.67	
NO _x	117.64	2.18	108.71	2.09	8.93	
NO	112.08	2.12	116.56	2.17	4.49	
PN	978.81	10.79	-45.17	0.55	1023.99	

Die in Tabelle 4-13 berechneten Alterungsfaktoren sind in Abbildung 4-20 nochmals grafisch dargestellt.

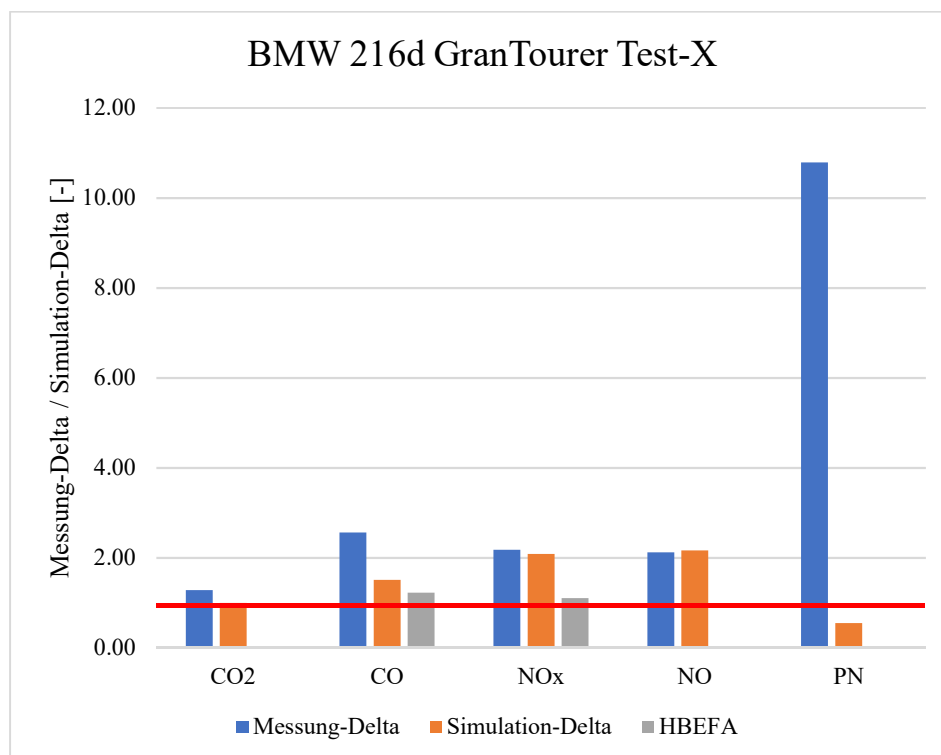


Abbildung 4-20: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Test-X

Im Anhang finden sich noch weitere Längsdynamiksimulationen.

Für die Arzbergroute in Tabelle 0-1 (Seite 100) bis Tabelle 0-3 (Seite 100) sind die berechneten Werte ersichtlich und in Abbildung 0-22 (Seite 101) die grafische Darstellung der Werte.

Für den WLTC sind die Simulations- und Messergebnisse in Tabelle 0-4 (Seite 101) bis Tabelle 0-6 (Seite 102) enthalten. Die grafische Darstellung findet sich in Abbildung 0-23 (Seite 102).

4.3.4 Renault Grand Scenic

Validierung

Die Validierung des Renault Grand Scenic wurde analog zu den BMW Fahrzeugen durchgeführt. Das Fahrzeugdaten-File wurde an zwei Strecken (Ries, Arzberg) überprüft. Die Ergebnisse inkl. Abweichungen aus der Riesroute sind in Tabelle 4-14 aufgelistet.

Tabelle 4-14: Validierung Renault Grand Scenic 130 tkm Ries-01

Ries-01					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung [%]
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO₂	6996.62	-	7032.88	-	0.52
CO	16.77	-	17.86	-	6.48
NO_x	1.18	-	1.23	-	5.02
NO	1.18	-	1.19	-	0.55
PN	-	7E+07	-	1E+08	42.07

Da bei dem Renault nur Messergebnisse einer Laufleistung (130 tkm) vorhanden sind, war es nicht nötig einen Kompromiss in der Fahrzeugbedatung zwischen zwei Laufleistungen einzugehen, wie es bei den BMW Fahrzeugen geschehen musste. Dies führt bei der Validierung natürlich auf exaktere Ergebnisse. Wie zu sehen ist, wurde die CO₂-Abweichung vom Messergebnis zur Simulation auf der Riesstrecke auf unter ein Prozent gebracht.

Tabelle 4-15: Validierung Renault Grand Scenic 130 tkm Arzberg

Arzberg					
	Messfahrt		Simulation		Abweichung [%]
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	
CO₂	11807.25	-	11266.16	-	-4.58
CO	48.87	-	51.82	-	6.02
NO_x	3.19	-	3.83	-	19.56
NO	3.18	-	3.74	-	17.64
PN	-	4E+08	-	1E+09	133.98

Tabelle 4-15 zeigt die Validierungsergebnisse der Arzbergstrecke. Die CO₂-Abweichung lag hier sogar in der 5 % Toleranz. Klar zu sehen ist auch, dass die Simulation die Messung in punkto CO₂ unterschätzt. Dies kann wieder auf die aggressiv-dynamische Fahrweise der Arzbergfahrt zurückgeführt werden.

Aus den beiden Ergebnissen (Ries, Arzberg) kann das folgende Fahrzeugdaten-File (Abbildung 4-21) abgeleitet werden.

The screenshot shows the 'Renault_Grand_Scenic.veh - VEH Editor' window. The interface is divided into several sections for configuring vehicle data:

- Vehicle data:** Mass (1812 [kg]), Loading (0 [kg]), Red. Mass Wheels (48.54 [kg]), Wheel diameter (dyn) (701.5499 [m]), Drag coefficient (0.3 [-]), Cross sectional area (2.56 [m²]).
- Rolling resistance factors:** Fr 0 (0.005258 [-]), Fr 1 (3.2E-05 [s/m]), Fr 2 (0 [s/m]²), Fr 3 (0 [s/m]³), Fr 4 (0 [s/m]⁴).
- Engine (ICE):** Rated engine power (103 [kW]), Rated engine speed (5000 [rpm]), Idling engine speed (800 [rpm]), Inertia (0.6803 [kgm²]).
- Engine (EM):** Rated engine power (0 [kW]), Rated engine speed (0 [rpm]), Inertia (0 [kgm²]).
- Gear shift parameters:** Heavy Duty (Fast/Eco) and Light Duty / Passenger Car (Down/Up) settings for Up, Down, Share, and Ref. velocity.
- Transmission:** Inertia (0.0747 [kgm²]) and a table for Gear, Ratio, and Efficiency Map.
- Table:**

Gear	Ratio	Efficiency Map
A	1	
01	17.64	
02	9.22	
03	6.24	
04	4.64	
05	3.59	
06	3.03	
07	0	
08	0	
09	0	
10	0	
11	0	
- Other sections:** Cross Wind Correction (No Correction), Auxiliaries (table with ID, Type, Input File), Retarder (Type: None, Ratio: 1), Loss factor (0.3 [-]).

Abbildung 4-21: Renault Grand Scenic Fahrzeugdaten-File (PHEM)

Da es keine vergleichbaren Fahrzeuge für eine Längsdynamiksimulation gegeben hat, wurden keine weiteren Simulationsrechnungen für den Renault Grand Scenic durchgeführt.

4.4 Simulation der Dieselpartikelfilter Regeneration

Die Vergleichbarkeit von einem Fahrzeug im Normalbetrieb zu jenem im DPF-Regenerationsbetrieb wurde einerseits anhand von Emissionskennfeldern durchgeführt. Andererseits mit einer Vergleichsmethode von der Simulation zu der DPF-Regenerationsmessung.

Kennfeldmethode

Dazu wurden für den ersten Ansatz die in Kapitel 4.2 (Kennfelderstellung) erstellten Kennfelder der beiden BMW Fahrzeuge als Normalbetriebskennfelder definiert. Zudem wurden für die beiden Laufleistungen (110 tkm und 216 tkm) jeweils eigene DPF-Kennfelder erstellt. Die Erstellung derer wurde nach den gleichen Kriterien durchgeführt, wie die des Normalbetriebs.

Da eine Regeneration im Gegensatz zum Normalbetrieb seltener auftritt, mussten die Emissionskennfelder in einigen Punkten extrapoliert werden. Dies bedeutet, dass es nur in einem kleineren Kennfeldbereich möglich war, Werte zwischen gemessenen Emissionskomponenten zu interpolieren. Um dennoch vollständige Kennfelder zu erhalten, wurden die fehlenden Werte ausgehend von den gemessenen Werten extrapoliert. Dies führt zu gewissen Unsicherheiten.

Methode DPF-Regenerationsmessung zu Simulation

Die zweite Methode stellt eine DPF-Regenerationsmessung mit einer Simulation des Normalbetriebs gegenüber. Exakt bedeutet das, dass der Streckenabschnitt einer DPF-Regenerationsmessung mit einer Längsdynamiksimulation nachgerechnet wurde. Dabei wurden aber jene Kennfelder zu Grunde gelegt, welche das Normalemissionsverhalten des Fahrzeuges widerspiegeln. Aus den Abweichungen von DPF-Regenerationsmessung zu Simulation wurden dann Resultate abgeleitet. Diese Methode ist in Kapitel 4.4.3 und Kapitel 4.4.4 ersichtlich (ab Seite 73).

4.4.1 Kennfeldmethode BMW 216d GranTourer 110 tkm

In Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-24 (Seite 64) sind die Emissionskennfelder inklusive extrapolierte Werte des 110 tkm BMW dargestellt. Zusätzlich ist auch der Bereich der interpolierten Werte ersichtlich (Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-24 jeweils rechts).

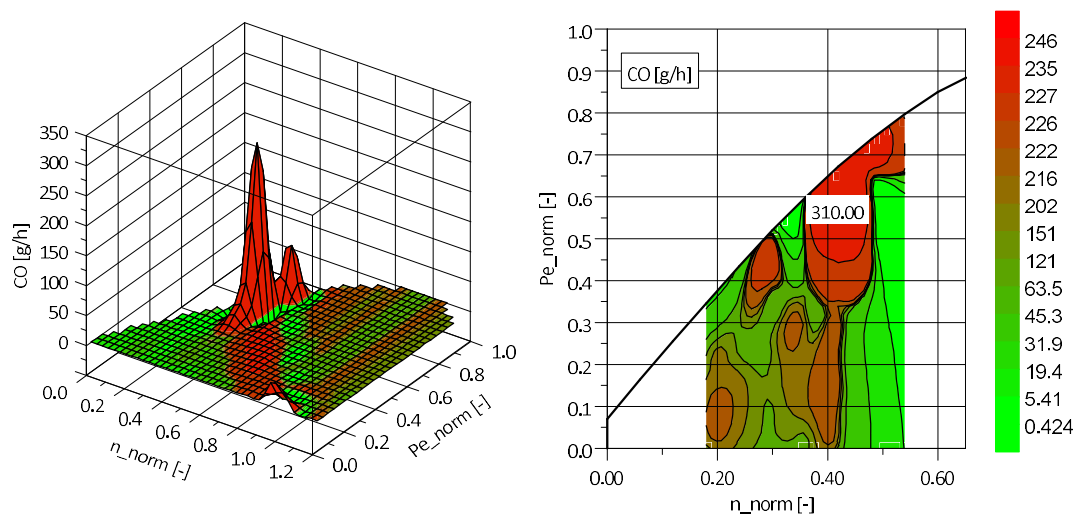


Abbildung 4-22: CO-Kennfeld im DPF-Reg.-Betrieb BMW 216d GranTourer 110 tkm

In Abbildung 4-22 (Seite 63) ist deutlich zu erkennen, dass die CO-Emissionen bei einer Partikelfilterregeneration stark ansteigen (Vergleich Abbildung 4-2, Seite 43). Dies ist auf die Motorbetriebsart zurückzuführen, welche benötigt wird, um den DPF zu reinigen. Der CO-Anstieg ist nur im interpolierten Teil (zwischen 0,18 und 0,54 Normdrehzahl) stark ausgeprägt. In den extrapolierten Zonen wurde mit Null gerechnet.

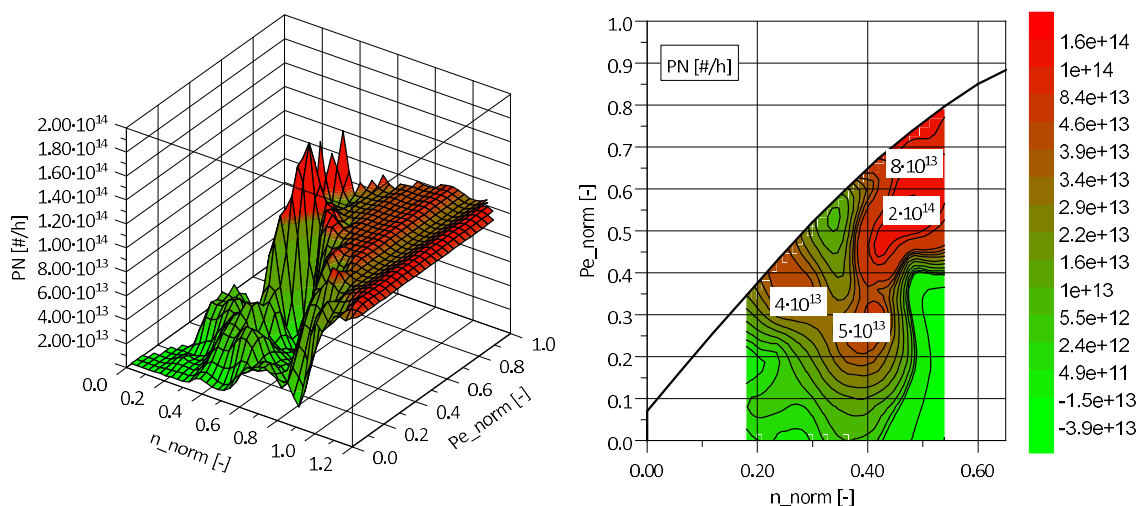


Abbildung 4-23: PN-Kennfeld im DPF-Reg.-Betrieb BMW 216d GranTourer 110 tkm

Die Partikelanzahl (PN) ist ebenfalls stark erhöht (Abbildung 4-23). Die Partikelwerte gehen auf bis zu $1,9 \cdot 10^{14}$ #/h. Im Kennfeld des Standardverhaltens erreichten die Partikelanzahlwerte nur $3,9 \cdot 10^{12}$ #/h. Extrapoliert wurde an beiden Seiten mittels konstanten Werten.

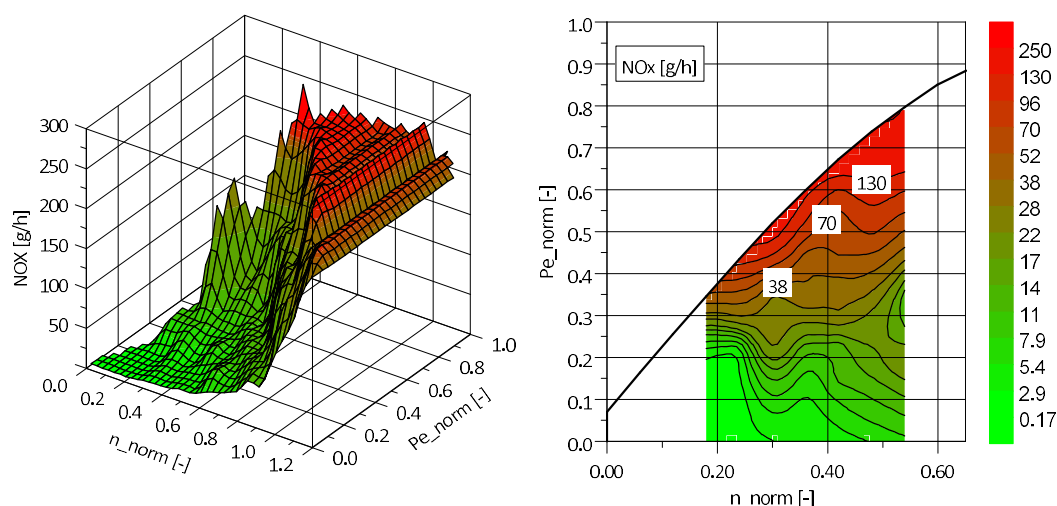


Abbildung 4-24: NO_x-Kennfeld im DPF-Reg.-Betrieb BMW 216d GranTourer 110 tkm

In Abbildung 4-24 ist zu erkennen, dass die NO_x-Werte erst bei einer höheren Drehzahl zu steigen beginnen. Im interpolierten Teil befinden sich nur wenige Spitzenwerte an der Vollastkurve. Der extrapolierte Teil im Bereich der hohen Drehzahlen und Leistungen wurde wieder als Konstante weitergeführt. Diese Extrapolation ist durch den vorher liegenden starken Anstieg der NO_x-Emissionen mit Vorsicht zu genießen.

Um aus den Regenerationskennfeldern repräsentative Aussagen generieren zu können, wurde die Differenz aus den DPF-Kennfeldern und den Standardemissionskennfeldern herangezogen.

$$\Delta CO_{i \times j} = CO_{DPF \text{ Reg } i \times j} - CO_{\text{Normalbetrieb } i \times j} \quad (4-12)$$

$$\Delta PN_{i \times j} = PN_{DPF \text{ Reg } i \times j} - PN_{\text{Normalbetrieb } i \times j} \quad (4-13)$$

$$\Delta NO_x_{i \times j} = NO_{xDPF \text{ Reg } i \times j} - NO_{x\text{Normalbetrieb } i \times j} \quad (4-14)$$

i...Laufvariable für die Drehzahlrasterung (1 ... 20)

j...Laufvariable für die Leistungsrasterung (1 ... 20)

Da die Kennfeldgenerierung über ein 20x20 Raster verläuft, wurde bei den Differenzkennfeldern jedes Quadrat einzeln voneinander subtrahiert und wieder zu einem Kennfeld zusammengeführt (Gleichungen (4-12) bis (4-14)).

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 4-25 bis Abbildung 4-27 (Seite 66)) sind die berechneten Differenzkennfelder der Abgaskomponenten CO, PN und NO_x dargestellt. Ein positiver Wert bedeutet, dass sich diese Abgaskomponente um den Wert im DPF-Regenerationsbetrieb im Vergleich zum Normalbetrieb erhöht.

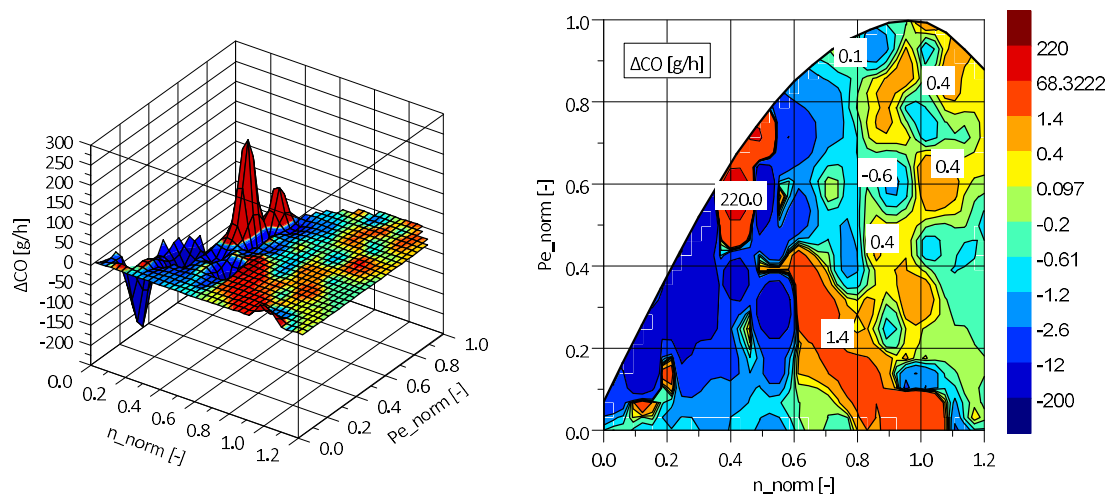


Abbildung 4-25: CO-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 110 tkm

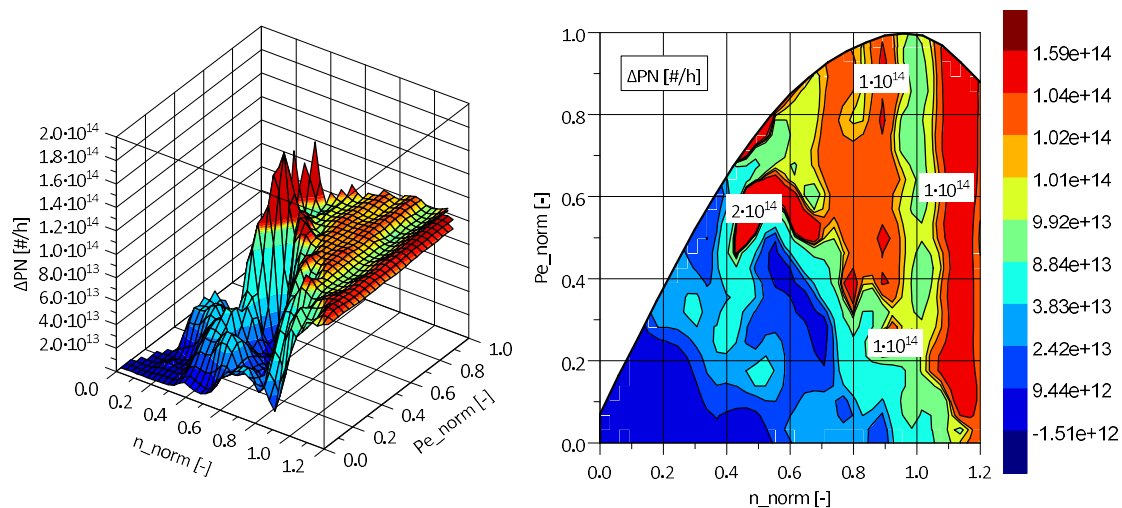
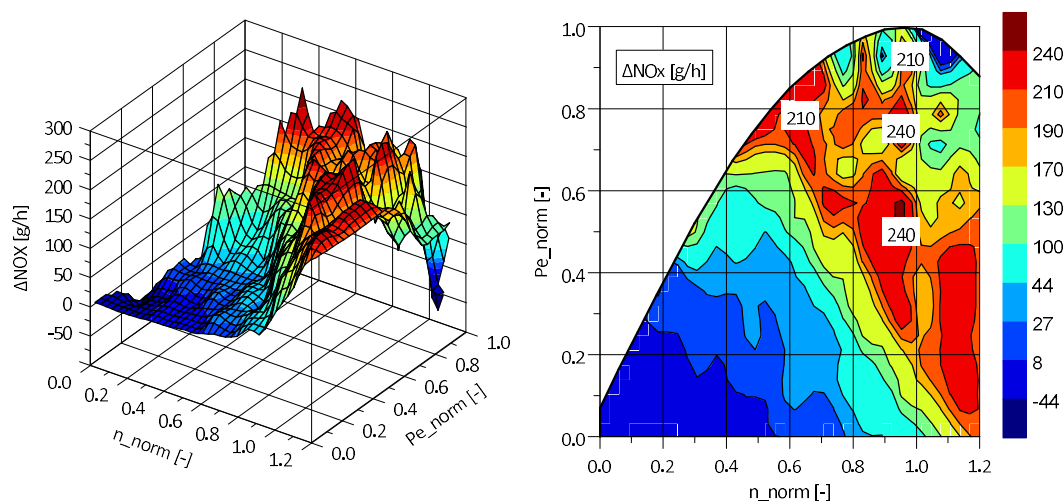


Abbildung 4-26: PN-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 110 tkm

Abbildung 4-27: NO_x-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 110 tkm

Die Mittelwerte der Differenzkennfelder wurden in Relation zu den Mittelwerten im Normalbetrieb gestellt, um einen Faktor für die Emissionserhöhung im DPF-Regenerationsbetrieb zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-16 und Tabelle 4-17 (Seite 67) einsehbar.

Tabelle 4-16: Emissionsabweichungen Gesamt BMW 216d GranTourer 110 tkm

BMW 216d GranTourer 110 tkm - Gesamt								
	Normalbetrieb		DPF-Reg		Delta		Abweichung / Faktor	
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]	[-]
CO₂	285.89	-	285.89	-	0.00	-	0.00	1.00
CO	6.83	-	3.52	-	-3.31	-	-48.51	0.51
NO_x	20.60	-	129.52	-	108.91	-	528.60	6.29
NO	19.94	-	120.18	-	100.24	-	502.78	6.03
PN	-	2.78E+08	-	1.89E+10	-	1.86E+10	6702.20	68.02

Tabelle 4-17: Emissionsabweichungen Interpoliert BMW 216d GranTourer 110 tkm

BMW 216d GranTourer 110 tkm - Interpoliert								
	Normalbetrieb		DPF-Reg		Delta		Abweichung / Faktor	
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]	[-]
CO₂	225.20	-	225.20	-	0.00	-	0.00	1.00
CO	15.33	-	14.80	-	-0.53	-	-3.44	0.97
NO_x	6.21	-	56.71	-	50.49	-	812.68	9.13
NO	5.73	-	51.40	-	45.67	-	797.00	8.97
PN	-	1.18E+08	-	1.13E+10	-	1.12E+10	9506.38	96.06

Um die Auswirkung der DPF-Regeneration in Bezug auf einen realgetreuen Fahrzyklus erkennen zu können, wurde ein sogenannter Ki-Faktor berechnet. Dieser ist definiert als das Verhältnis aus Durchschnittsemissionswerten der gemittelten Emissionen durch die Mittelwerte der Emissionswerte im Normalbetrieb (Gleichung (4-15)). Die gemittelten Emissionswerte ergeben sich aus der Gleichung (4-16).

$$Ki\ Faktor_j = \frac{AZ_j}{A_{Normalbetrieb\ j}} \quad (4-15)$$

$$AZ_j = \frac{A_{Normalbetrieb\ j} * t_{Normalbetrieb} + A_{DPF-Reg\ j} * t_{DPF-Reg}}{t_{Normalbetrieb} + t_{DPF-Reg}} \quad (4-16)$$

Ki-Faktor _j	...Emissionserhöhung (Abgaskomponente j) in Bezug auf einen Fahrzyklus [-]
AZ _j	...gemittelte Emission (Abgaskomponente j) über Fahrzyklus ([g/h], [#h])
A _{Normalbetrieb j}	...mittlere Emission (Abgaskomponente j) im Normalbetrieb ([g/h], [#h])
A _{DPF-Reg j}	...mittlere Emission (Abgaskomponente j) im DPF-Regenerationsbetrieb ([g/h], [#h])
t _{Normalbetrieb}	...Zeit zwischen zwei DPF-Regenerationszyklen [s]
t _{DPF-Reg j}	...Zeit einer DPF-Regeneration [s]

Die berechneten gemittelten Emissionen und Ki-Faktoren für jede Abgaskomponente sind in Tabelle 4-18 (Seite 68) für das gesamte und interpolierte Kennfeld aufgelistet. Dabei wurde für t_{Normalbetrieb 110 tkm BMW} = 12000 s und t_{DPF-Reg 110 tkm BMW} = 750 s gewählt. Der Wert für die DPF-Regenerationszeit wurde aus den Messdaten genommen und die Zeit zwischen den Regenerationen wurde mit 12000 s angenommen (da es bei dem 110 tkm BMW nur eine DPF-Regeneration gab).

Zusätzlich sind auch die HBEFA-Daten für Vergleichszwecke angegeben. Die berechneten Ki-Faktoren aus CO₂ sind jeweils eins, dies ist nicht realistisch. Der Wert kommt dadurch zu Stande, da in der Kennfelderstellung immer die gleiche CO₂-Map eingeflossen ist.

Tabelle 4-18: Ki-Faktoren gesamtes/interpoliertes Kennfeld (110 tkm) inkl. HBEFA-Daten

	Gesamt		Interpoliert		HBEFA
	Gemittelt [g/h] / [#s]	Ki-Faktor [-]	Gemittelt [g/h] / [#s]	Ki-Faktor [-]	
CO ₂	285.89	1.00	225.20	1.00	-
CO	6.70	0.98	15.31	0.99	1.005
NO _x	24.96	1.21	8.23	1.33	1.047
NO	23.95	1.20	7.56	1.32	-
PN	1.02E+09	3.68	5.67E+08	4.80	1.9

Abbildung 4-28 zeigt die in Tabelle 4-18 angeführten Ki-Faktoren für die gesamte bzw. interpolierte Kennfelddarstellung und die HBEFA-Werte. Die Ki-Faktoren passen für die Abgaskomponenten CO und NO_x gut mit den Daten der HBEFA-Werte zusammen.

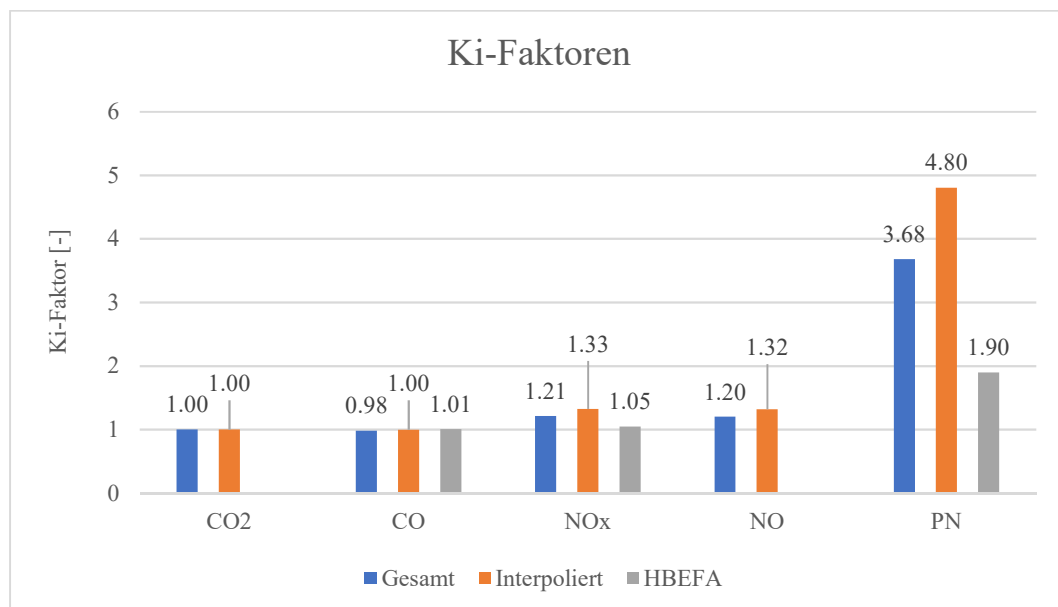


Abbildung 4-28: Ki-Faktoren Gesamt/Interpoliert BMW 216d GranTourer 110 tkm

Bei den PN-Werten sind größere Abweichungen zu erkennen, die durch die angewandte Methodik erklärbar sind. Da in diesem Vorgehen nur die Mittelwerte der Kennfelder in Relation gesetzt werden, setzt man auch voraus, dass jeder Kennfeldpunkt gleich oft angefahren wird. Somit gewichtet diese Methode jeden Kennfeldpunkt gleich, was nicht der Realität entspricht.

4.4.2 Kennfeldmethode BMW 216d GranTourer 216 tkm

Bei dem BMW mit 216 tkm wurden während den gesamten Messungen zwei DPF-Regenerationen festgestellt. Somit sind auch mehr Rohdaten in die Erstellung eines DPF-Regenerationskennfeldes eingeflossen. Dies hat auch den interpolierten Bereich des Kennfeldes etwas erweitert (siehe Abbildung 4-29 bis Abbildung 4-31 (Seite 70)).

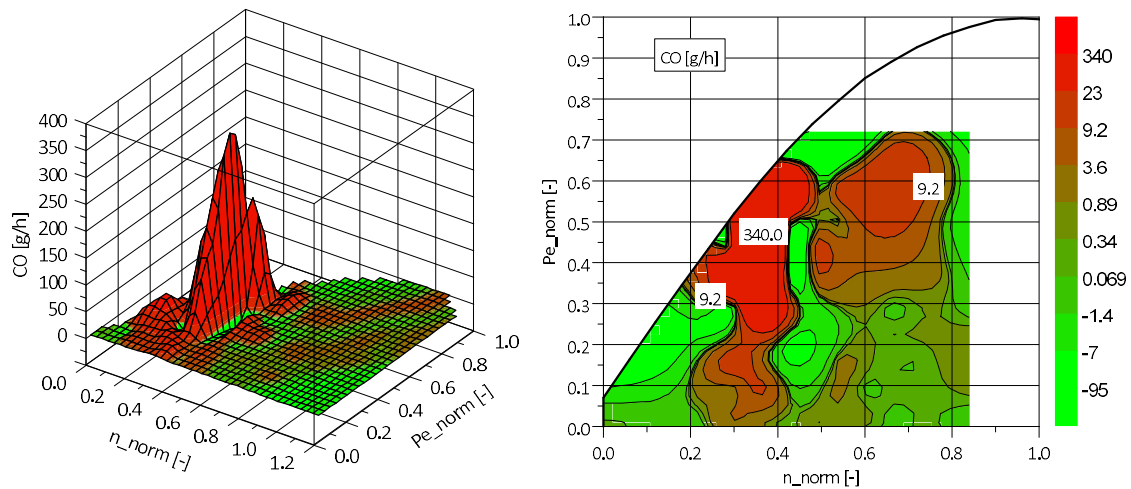


Abbildung 4-29: CO-Kennfeld im DPF-Betrieb BMW 216d GranTourer 216 tkm

In Abbildung 4-29 ist wieder ein hoher CO-Anstieg ersichtlich. Dieser liegt im interpolierten Teil des Kennfeldes und kann auch als realitätsgetreu angesehen werden. Im rechten CO-Kennfeld (Abbildung 4-29) ist der interpolierte Bereich dargestellt. Er liegt zwischen einer Normdrehzahl von 0 bis 0,84 und einer Normleistung von 0 bis 0,72.

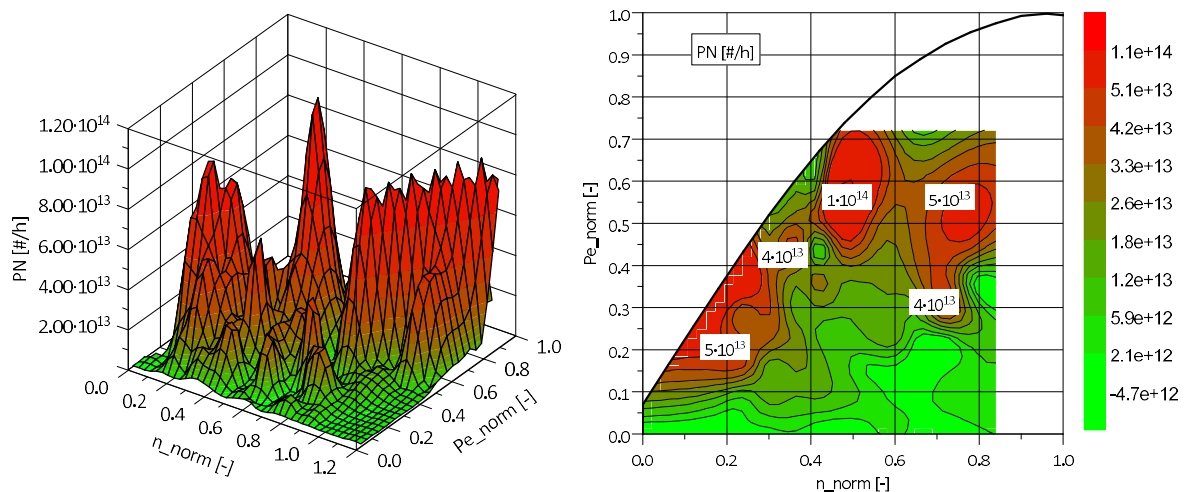


Abbildung 4-30: PN-Kennfeld im DPF-Betrieb BMW 216d GranTourer 216 tkm

Am PN-Kennfeld (Abbildung 4-30) ist in den unteren Drehzahlbereichen eine starke PN-Emission zu verzeichnen. Diese ist bei dem 110 tkm BMW nicht ersichtlich gewesen, da dort schon der extrapolierte Bereich begann (Vergleich Abbildung 4-23, Seite 64).

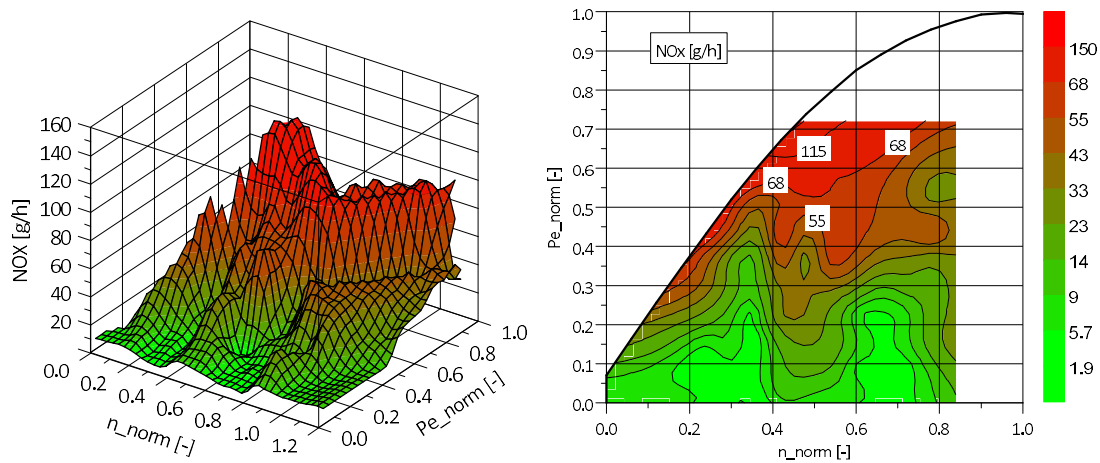


Abbildung 4-31: NO_x-Kennfeld im DPF-Betrieb BMW 216d GranTourer 216 tkm

Die NO_x-Werte des BMW mit 216 tkm (Abbildung 4-31) nehmen mit steigender Leistung zu. Nahe der Volllastkurve werden sie am höchsten. Ein ähnliches Bild ergab auch das DPF-Regenerationskennfeld des 110 tkm BMW (Abbildung 4-24, Seite 64). Unterschiedlich ist jedoch der Kennfeldverlauf in den hohen Drehzahlen und Leistungen.

Die Differenzkennfelder wurden nach der gleichen Methode wie beim 110 tkm BMW berechnet (Gleichung (4-12) bis (4-14), Seite 65). Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 4-32 bis Abbildung 4-34, Seite 71).

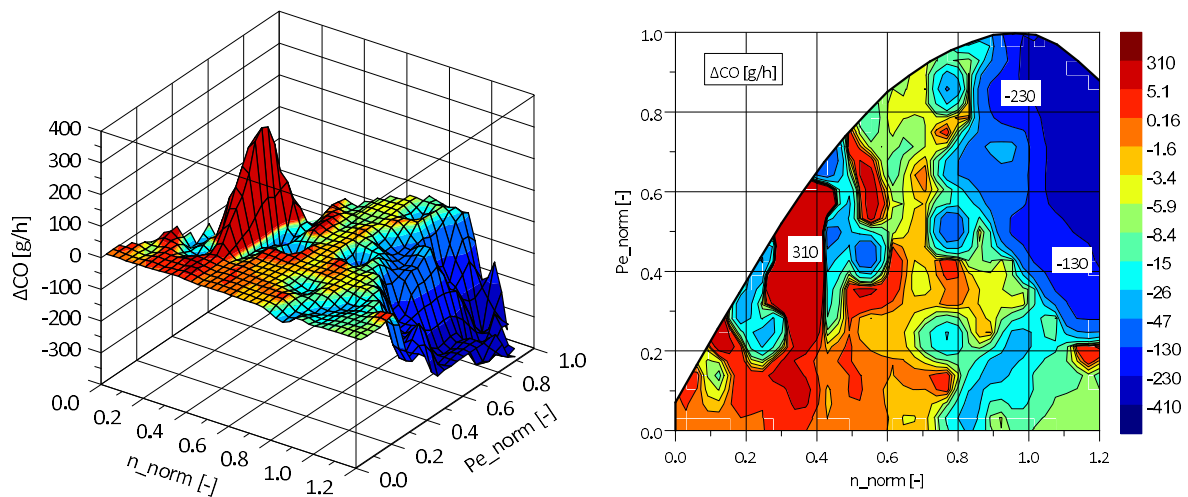


Abbildung 4-32: CO-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 216 tkm

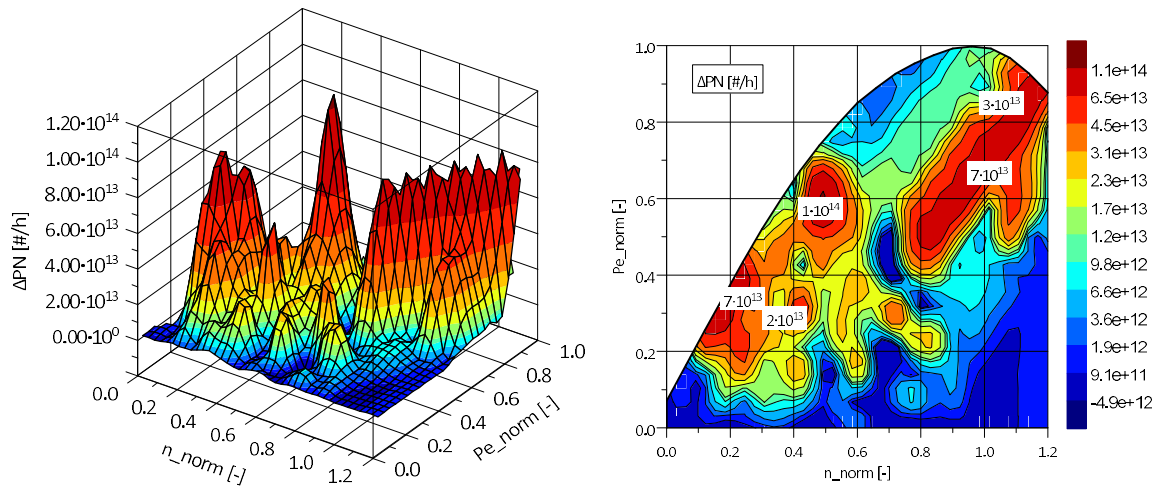
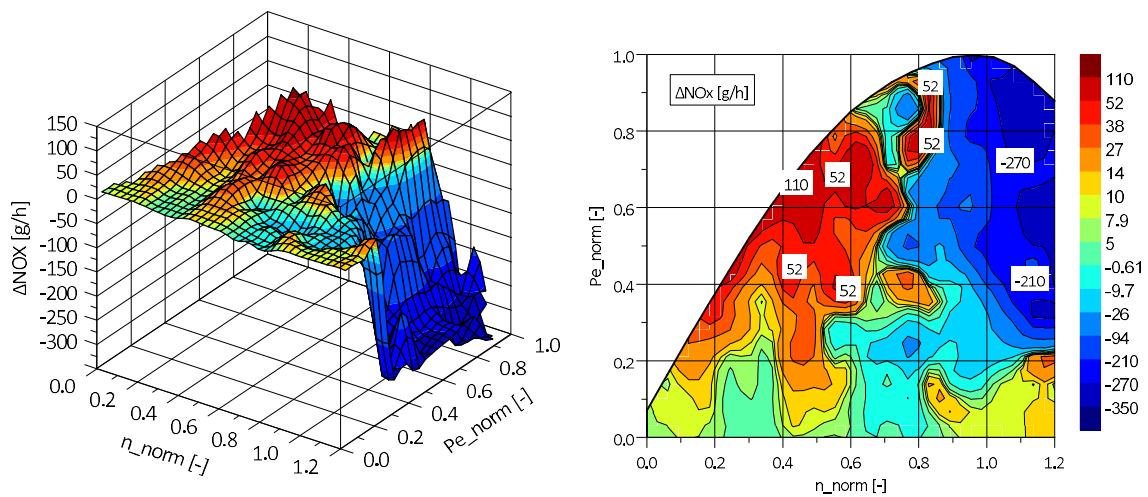


Abbildung 4-33: PN-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 216 tkm

Abbildung 4-34: NO_x-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 216 tkm

Die Vorgehensweise, um auf die Ki-Faktoren zu kommen, wurde wieder analog zum 110 tkm BMW durchgeführt. Die Absolutwerte und ihre Differenzen zueinander sind im Anhang (Tabelle 0-7 und Tabelle 0-8, Seite 103) einsehbar.

Die berechneten Emissionen und Ki-Faktoren sind in Tabelle 4-19 (Seite 72) ersichtlich. Bei dem 216 tkm BMW wurde für $t_{\text{Normalbetrieb 216 tkm BMW}} = 11400$ s und $t_{\text{DPF-Reg 216 tkm BMW}} = 500$ s gewählt. Die Werte wurden aus den Messdaten erhoben.

Tabelle 4-19: Ki-Faktoren gesamtes/interpoliertes Kennfeld (216 tkm) inkl. HBEFA-Daten

	Gesamt		Interpoliert		HBEFA
	Gemittelt [g/h] / [#s]	Ki-Faktor [-]	Gemittelt [g/h] / [#s]	Ki-Faktor [-]	
CO ₂	285.89	1.00	183.29	1.00	-
CO	47.55	0.97	15.32	1.04	1.005
NO _x	71.59	0.98	7.09	1.16	1.047
NO	70.64	0.98	6.47	1.16	-
PN	3.55E+08	3.32	2.99E+08	5.37	1.9

Wie auch beim 110 tkm BMW sind die Ki-Faktoren der CO- bzw. NO_x-Emissionen im Bezug zu den HBEFA-Werten ähnlich (Abbildung 4-35). Die Abweichung der Ki-Faktoren der PN-Werte drifft auch beim 216 tkm BMW deutlich von den HBEFA-Werten ab.

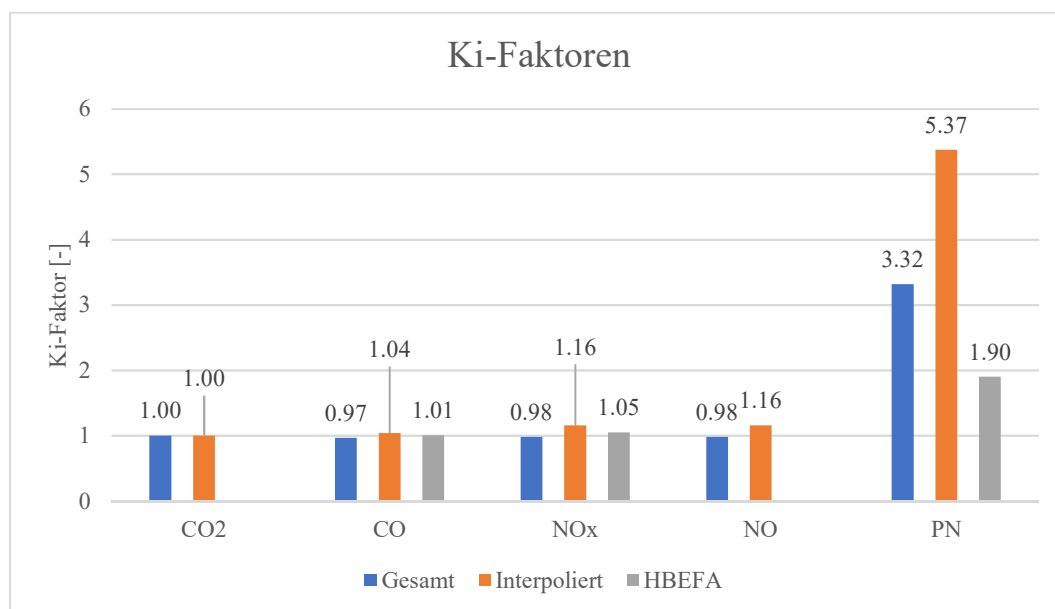


Abbildung 4-35: Ki-Faktoren Gesamt/Interpoliert BMW 216d GranTourer 216 tkm

4.4.3 Methode DPF-Reg.-Messung zu Simulation BMW 216d GranTourer 110 tkm

Bei dem 110 tkm BMW wurde die DPF-Regenerationsphase der Ries Messfahrt als Grundlage genommen (Abbildung 4-36). Aus diesem Streckenabschnitt wurden die Streckendaten extrahiert und diese mit den Emissionskennfeldern (Normalbetrieb) aus Kapitel 4.2 (Kennfelderstellung) nachsimuliert. Der PN-Verlauf über der Zeit ist in Abbildung 4-37 dargestellt.

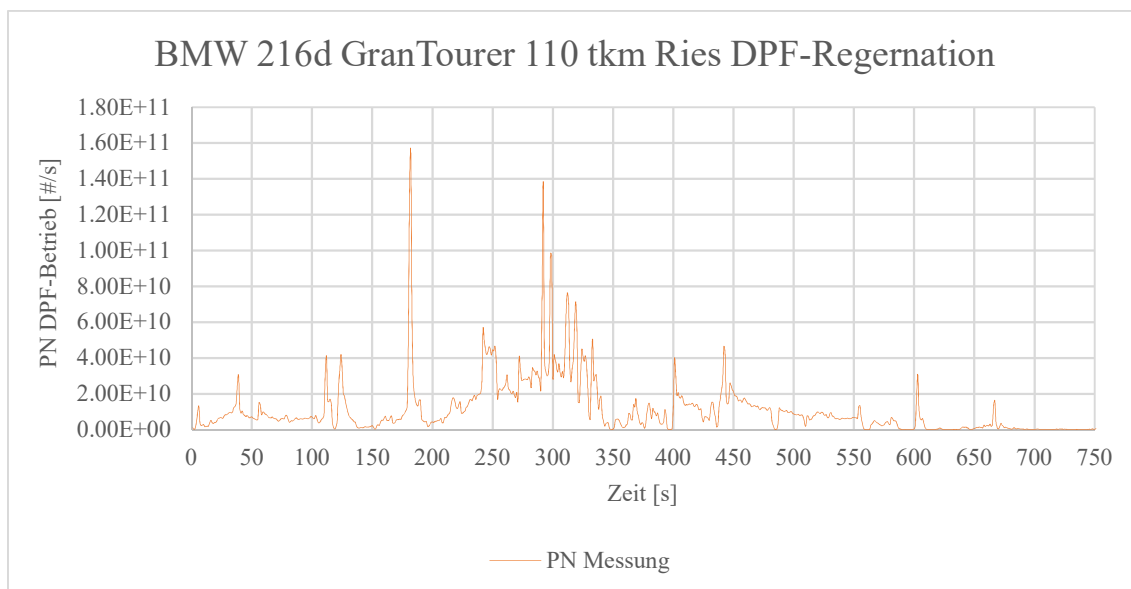


Abbildung 4-36: BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries DPF-Regeneration

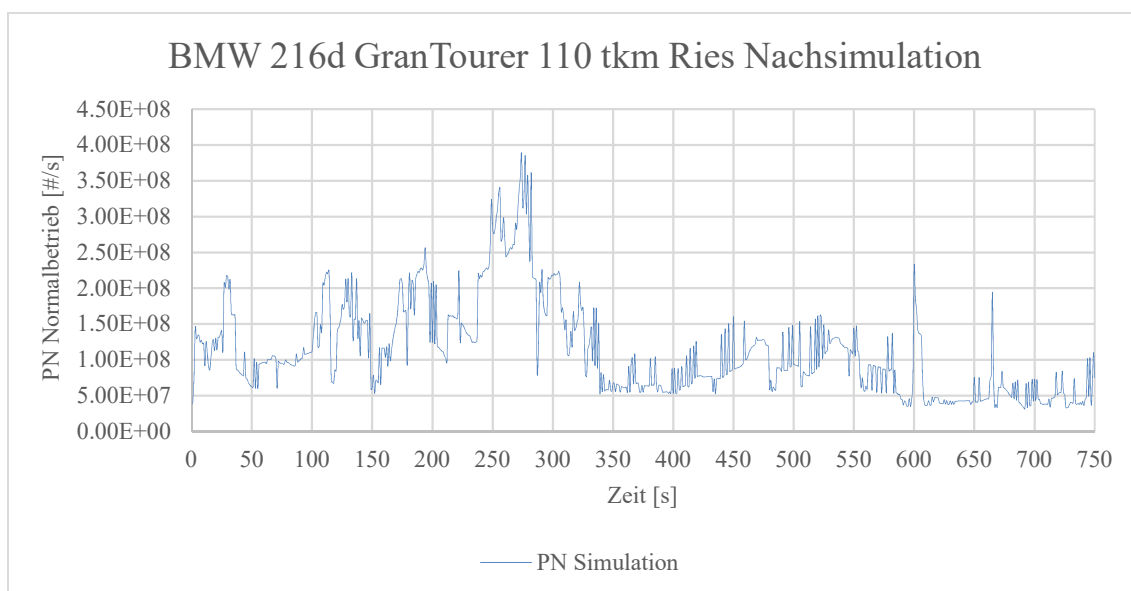


Abbildung 4-37: BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries Nachsimulation

Während die PN-Spitzenwerte der DPF-Regenerationsmessung auf $1,6E+11$ #/s anstiegen, lagen die PN-Werte im Normalbetrieb (nachsimuliert) nur in der Größenordnung von $5,0E+07$ bis $4,0E+08$ #/s.

Die Mittelwerte der einzelnen Abgaskomponenten der Messung und der Simulation sind in Tabelle 4-20 aufgelistet. Zudem sind noch die Differenzen (Spalte „Delta“) und die Abweichungen berechnet.

Tabelle 4-20: Mittelwerte Normalbetrieb/DPF-Reg.-Betrieb inkl. Abweichung
BMW 216d GranTourer 110 tkm

BMW 216d GranTourer 110 tkm								
	Normalbetrieb		DPF-Reg		Delta		Abweichung / Faktor	
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]	[-]
CO₂	18066	-	18961	-	894	-	4.95	1.05
CO	13.92	-	31.10	-	17.18	-	123.42	2.23
NO_x	5.32	-	47.94	-	42.62	-	801.93	9.02
NO	4.89	-	43.53	-	38.65	-	790.59	8.91
PN	-	1.1E+08	-	1.1E+10	-	1.1E+10	9777.97	98.78

Aus den obigen Werten wurden wieder die Ki-Faktoren berechnet. Als Parameter kamen die gleichen Zeitwerte ($t_{\text{Normalbetrieb 110 tkm BMW}} = 12000 \text{ s}$ und $t_{\text{DPF-Reg 110 tkm BMW}} = 750 \text{ s}$), die in der kennfeldbasierten Methode des 110 tkm BMW angewandt wurden, zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-21 einsehbar. Zum besseren Vergleich wurden die HBEFA-Werte ebenfalls angegeben.

Tabelle 4-21: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 110 tkm inkl. HBEFA-Daten

	Gemittelt	Ki-Faktor	HBEFA
	[g/h] / [/s]	[-]	[-]
CO₂	18119	1.00	-
CO	14.93	1.07	1.005
NO_x	7.82	1.47	1.047
NO	7.16	1.47	-
PN	7.58E+08	6.75	1.9

Die berechneten Werte aus Tabelle 4-21 sind in Abbildung 4-38 (Seite 75) nochmals grafisch dargestellt.

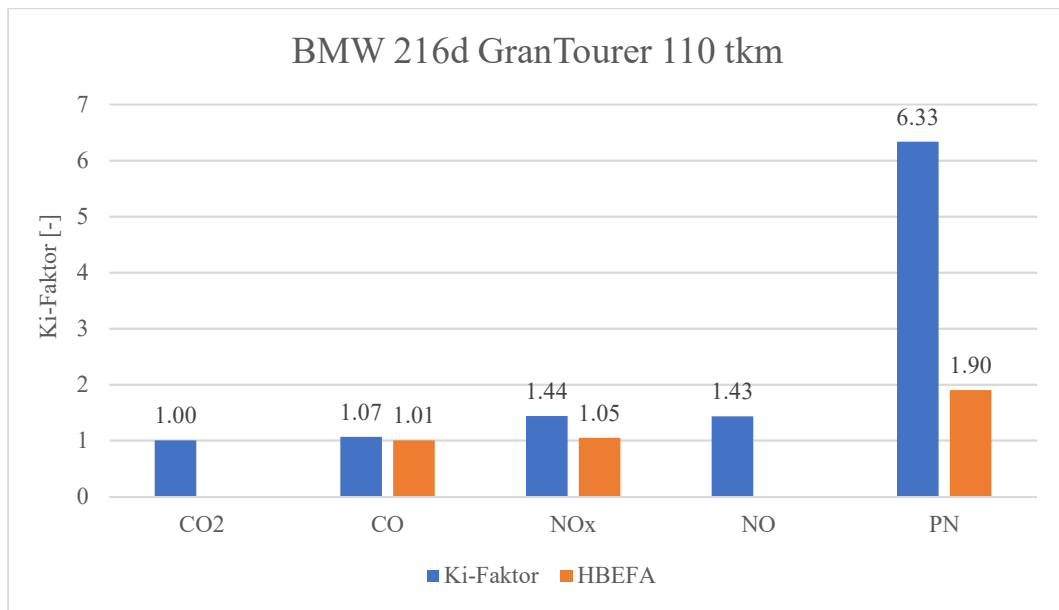


Abbildung 4-38: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 110 tkm

An den erhaltenen Ki-Faktoren ist eine gute Übereinstimmung mit den HBEFA-Werten in Bezug auf die CO- und NO_x-Emissionen feststellbar. In punkto Partikelanzahl ist der Ki-Faktor deutlich über jenem des HBEFA-Werts.

4.4.4 Methode DPF-Reg.-Messung zu Simulation BMW 216d GranTourer 216 tkm

Die Vorgehensweise beim 216 tkm BMW erfolgte analog zu dem in Kapitel 4.4.3 (Seite 73) beschriebenen Ablauf. Der 216 tkm BMW hatte auch in der Ries Messfahrt eine DPF-Regeneration. Hier fiel die DPF-Regenerationszeit mit 500 s kürzer aus (Abbildung 4-39).

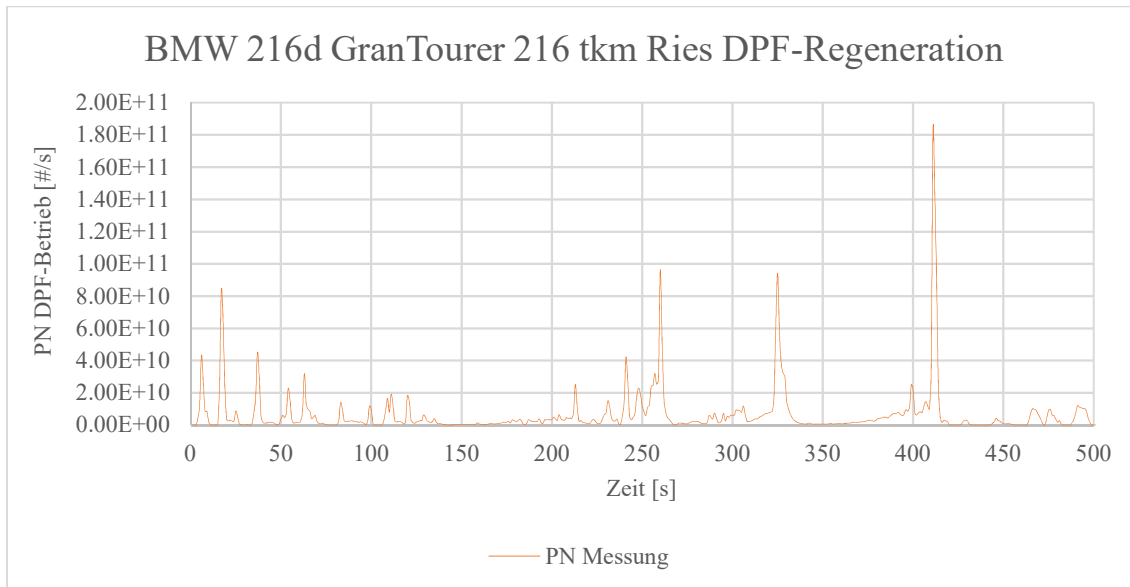


Abbildung 4-39: BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries DPF-Regeneration

Abbildung 4-40 zeigt den nachsimulierten Streckenabschnitt mit den Normalemissionskennfeldern.

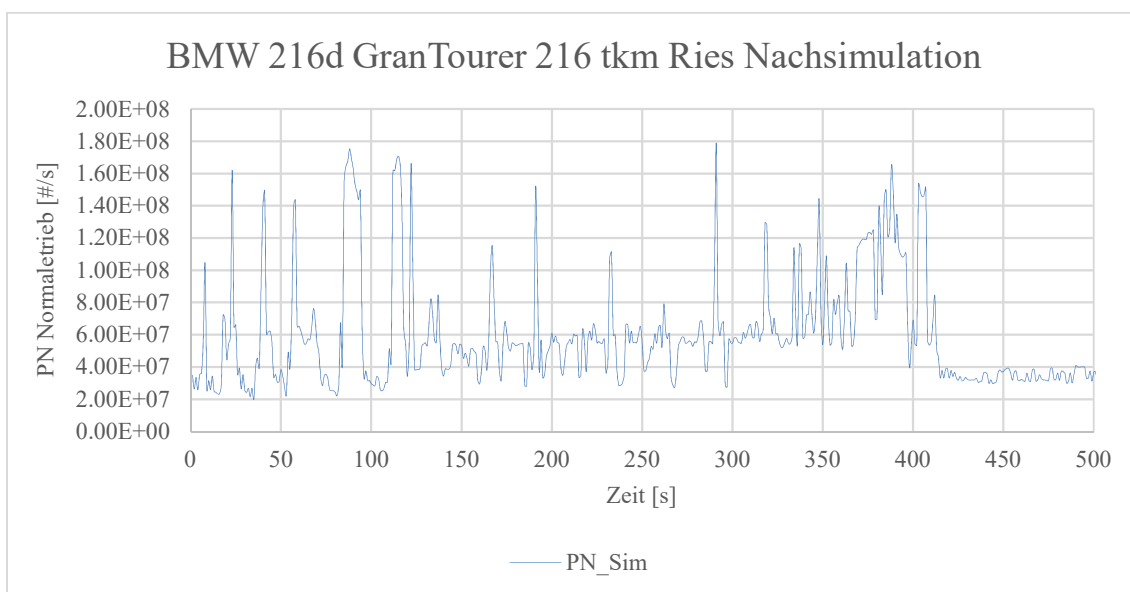


Abbildung 4-40: BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries Nachsimulation

Die PN-Spitzenwerte lagen in der Regeneration bei $1,90E+11$ #/s und im Normalbetrieb (nachsimuliert) bei $1,80E+08$ #/s.

Analog zum BMW mit 110 tkm sind in Tabelle 4-22 die Mittelwerte der einzelnen Phasen einsehbar. Zusätzlich sind noch die Differenzen (Spalte „Delta“) und die Abweichung (Spalte „Abweichung“) ausgewiesen.

Tabelle 4-22: Mittelwerte Normalbetrieb/DPF-Reg.-Betrieb inkl. Abweichung
BMW 216d GranTourer 216 tkm

BMW 216d GranTourer 216 tkm								
	Normalbetrieb		DPF-Reg		Delta		Abweichung / Faktor	
	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]	[-]
CO₂	15188	-	16488	-	1300	-	8.56	1.09
CO	10.34	-	54.20	-	43.86	-	424.28	5.24
NO_x	4.79	-	24.43	-	19.65	-	410.26	5.10
NO	4.27	-	22.87	-	18.60	-	435.89	5.36
PN	-	5.7E+07	-	6.5E+09	-	6.5E+09	11405.09	115.05

Tabelle 4-23 zeigt die gemittelten Werte mit den dazugehörigen Ki-Faktoren je Abgaskomponente. Zum Vergleich sind die HBEFA-Werte rechts angegeben.

Tabelle 4-23: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 216 tkm inkl. HBEFA-Daten

	Gemittelt	Ki-Faktor	HBEFA
	[g/h] / [/s]	[-]	[-]
CO₂	15242	1.00	-
CO	12.18	1.18	1.005
NO_x	5.61	1.17	1.047
NO	5.05	1.18	-
PN	3.29E+08	5.79	1.900

Die Ki-Faktoren des BMW mit 216 tkm sind in allen Abgaskomponenten niedriger als jene des 110 tkm BMW. Dies bedeutet, dass der 216 tkm BMW eine geringere Erhöhung der Emissionen vom Normalverhalten zum Gesamtzyklusbetrieb aufweist.

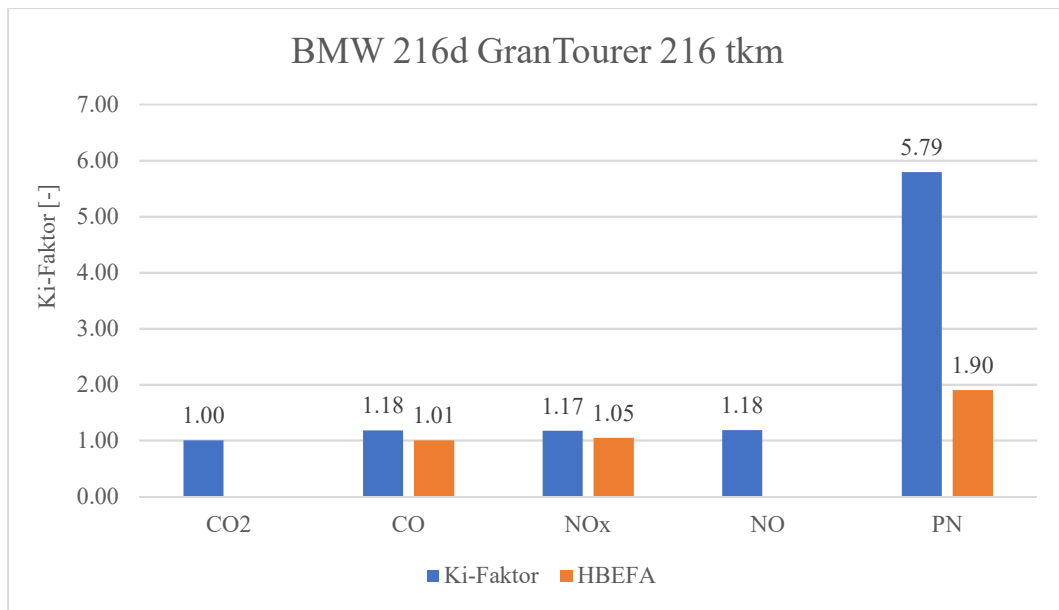


Abbildung 4-41: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 216 tkm

In Abbildung 4-41 sind die berechneten Ki-Faktoren grafisch aufbereitet. Deutlich zu erkennen ist die geringe Abweichung der Abgaskomponenten CO und NO_x. Der Ki-Faktor für die Partikelanzahl (PN) liegt mit 5,79 um einiges höher als der HBEFA-Wert.

4.4.5 Vergleich der Methoden

Für die bessere Vergleichbarkeit der beiden Methoden wurden jeweils die Ki-Faktoren von NO_x, CO und PN des BMW mit 216 tkm in Abbildung 4-42 grafisch dargestellt.

In diesem Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass die Ki-Faktoren von NO_x und CO sehr gut die HBEFA-Werte widerspiegeln.

Bei den Ki-Faktoren für die Partikelanzahl (PN) driften die berechneten Werte stark voneinander ab. Die kennfeldbasierte Methode weist nur eine geringe Erhöhung der Emissionswerte vom Normalbetrieb zum Gesamtzyklusbetrieb auf. Bei der zweiten Methode liegt der Ki-Faktor für die Partikelanzahl mit 5,792 weit über jenem des HBEFA-Wertes.

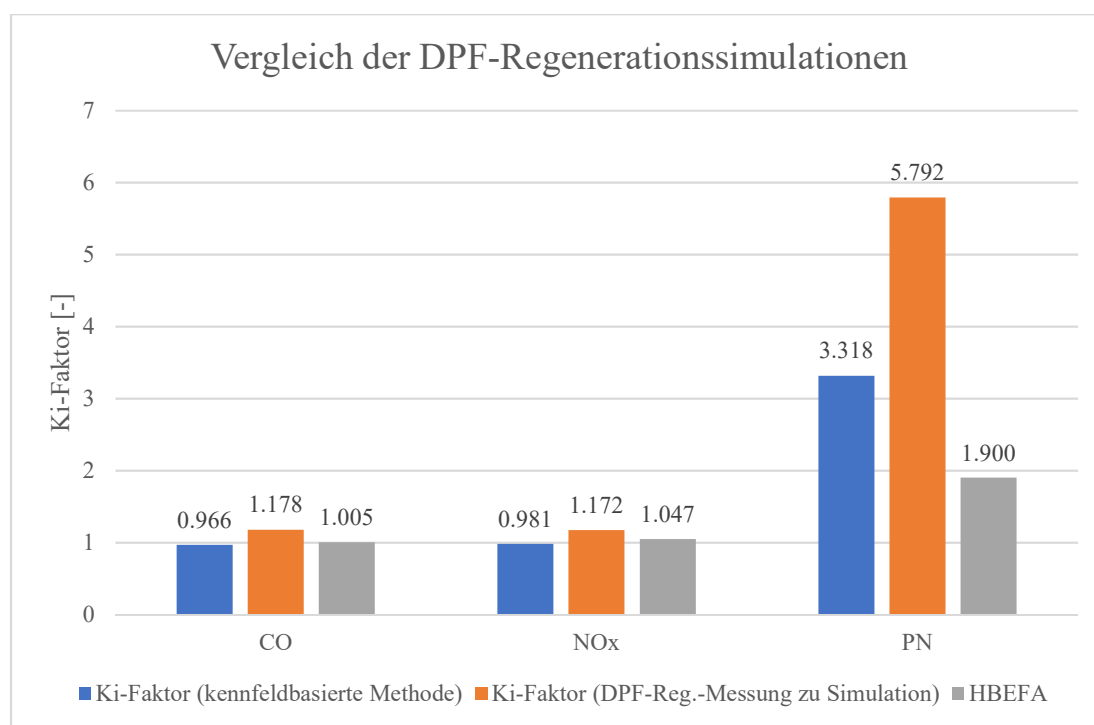


Abbildung 4-42: Vergleich der DPF-Regenerationssimulationen
BMW 216d GranTourer 216 tkm

Die kennfeldbasierte Methode hat den Nachteil, dass jeder Kennfeldpunkt gleich gewichtet wird. Dies bildet das Realverhalten nicht realistisch ab. Durch den Vergleich zweier Kennfelder (DPF-Regenerationskennfeld und Normalkennfeld) können rasch Trends bzw. Änderungen festgestellt werden. Weiters können Kennfeldbereiche von Emissionserhöhungen bzw. -verminderungen quantifiziert werden.

Die zweite Methode (DPF-Reg.-Messung zu Simulation) ist stark von dem Streckenteil der DPF-Regeneration abhängig. Durch die unterschiedlichen Größenordnungen während einer DPF-Regeneration in Bezug auf das Normalverhalten, spielt die Simulationsungenauigkeit keine Rolle. Eine Schwäche ist die Vergleichbarkeit zu anderen Fahrzeugen, da die DPF-Regenerationszeiten wie auch die Zeiten zwischen diesen stark variieren. Somit müsste hier die absolute Erhöhung der Abgaskomponenten immer auf die DPF-Regeneration (#/DPF-Reg, g/DPF-Reg) bezogen werden.

In Summe zeigen beide Methoden einen Trend in Richtung höherer PN-Emissionen vom Normalbetrieb zu einem Gesamtzyklusbetrieb.

5 Ergebnisse

Messergebnisse

Die WLTC-Emissionsmessergebnisse der BMW Fahrzeuge ergaben mit zunehmender Laufleistung einen Anstieg der gasförmigen Schadstoffe. In punkto Partikelanzahl und -masse konnte keine Veränderung im Abgasverhalten der Fahrzeuge erkannt werden.

Die RDE Messungen der BMWs führten zu einer Erhöhung des Emissionsausstoßes in alle gasförmigen Schadstoffkomponenten. Bei den Partikelwerten konnte nur ein stagnierendes Verhalten festgestellt werden. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass die RDE Messergebnisse enorm vom Fahrstil (ökologisch, aggressiv, etc.) und der Streckenwahl abhängen.

Werden Abgasnachbehandlungssysteme gezielt gekühlt, verursacht dies einen starken Anstieg der CO- und NO_x-Emissionen. Diese hohen Emissionen sind nur von kurzer Dauer und legen sich nach kurzer Zeit wieder.

Bei dem Renault konnten nur Emissionsänderungen in dem WLTC erarbeitet werden. Diese lieferten, wie auch schon bei den BMW Modellen, Verschlechterungen in allen gasförmigen Schadstoffen. Die Partikelemissionen sanken mit steigender Laufleistung, was auf die Aschebelastung im Partikelfilter zurückzuführen ist.

Eine Verschlechterung der Emissionswerte konnte bei allen Fahrzeugen festgestellt werden, jedoch wurden die Grenzwerte in den gültigen Zyklen immer eingehalten.

Längsdynamiksimulation

In den Längsdynamiksimulationen wird die Riesroute am besten reproduziert. Die Ursache liegt darin, dass immer eine größere Menge an Messdaten der Riesstrecken in die Kennfelderstellung einfließen.

Die Alterungsfaktoren, die aus den RDE Messfahrten hervorgingen, konnten durch die Simulation ebenfalls sehr gut dargestellt werden.

DPF-Regenerationssimulation

Die beiden eingesetzten Methoden für die DPF-Regenerationssimulation lieferten plausible und realistische Aussagen. Die Ki-Faktoren aus der kennfeldbasierten Methode lieferten in Bezug auf die CO- und NO_x-Werte gute Näherungen zu den HBEFA-Werten. Bei der Partikelanzahl wurde der HBEFA-Wert um das Doppelte übertroffen.

Die Methode mit dem Vergleichssatz von einer DPF-Regenerationsmessung zu einer Nachsimulation ergab ähnliche Ergebnisse wie die kennfeldbasierte Methode. Die Ki-Faktoren waren in allen Schadstoffkomponenten höher als jene der ersten Variante. Der Ki-Faktor aus der Partikelanzahl lag nochmals höher, wie jener des vorherigen Ansatzes.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ausgehend von den gemessenen Werten hat sich bei allen Fahrzeugen eine Emissionserhöhung bei allen gasförmigen Abgaskomponenten herauskristallisiert. Dabei waren die WLTC-Daten durch die gute Reproduzierbarkeit am aussagekräftigsten. Um für die Emissionsklasse Euro 6d-Temp jedoch allgemeinere Änderungsfaktoren zu erarbeiten, bedarf es weiterer Untersuchungen.

Rollenprüfstandsläufe sind am besten dazu geeignet, um realistische Alterungsfaktoren aus der Messung zu erhalten, da sowohl der Fahrereinfluss wie auch der Streckeneinfluss wegfallen. In punkto Simulation können die Messergebnisse aller Fahrten einfließen. Hier wird durch die Vorgabe des Anwenders jeglicher Einfluss durch Fahrer oder Strecke eliminiert.

Alle untersuchten Fahrzeuge wiesen trotz Ihrer hohen Laufleistung ein erstaunlich gutes Emissionsverhalten auf. Die Fahrzeuge hielten in Bezug auf Schadstoffausstoß die Euro 6d-Temp Grenzwerte bei allen gültigen Läufen ein.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schadstoffkonzentrationen über dem Luftverhältnis vor/nach Katalysator [3]	2
Abbildung 2-2: Konvertierungsrate über dem Luftverhältnis [10]	2
Abbildung 2-3: Wabenstruktur (links), Washcoat (mitte), Katalysatorpartikel (rechts) [6]	3
Abbildung 2-4: Aufbau einer Abgasanlage mit NO _x -Speicher-katalysator [14]	5
Abbildung 2-5: Aufbau eines SCR-Systems [14]	7
Abbildung 2-6: Abgasanlage zur katalytischen Reduktion [14]	7
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung eines Partikelfilters [15]	8
Abbildung 2-8: Ablagerung von Partikeln und Asche [1]	8
Abbildung 2-9: Abgasgegendruck, Beladungszustand und Abgasvolumenstrom [10]	9
Abbildung 2-10: Regenerationsstrategien [10]	10
Abbildung 2-11: Filterungsmechanismen [13]	11
Abbildung 2-12: Oberflächenfilter (links) und Tiefenfilter (rechts) [13]	11
Abbildung 2-13: Schema eines offenen Partikelfilters [2]	12
Abbildung 2-14: Thermische Alterung: Edelmetallsinterung [7]	14
Abbildung 2-15: Thermische Alterung: Alterung des Washcoats [7]	15
Abbildung 2-16: Chemische Alterung [7]	16
Abbildung 2-17: Mechanische Alterung [7]	16
Abbildung 2-18: Euro 5-6 Grenzwerttabelle [8]	17
Abbildung 3-1: BMW 216d GranTourer	18
Abbildung 3-2: Renault Grand Scenic	19
Abbildung 3-3: BMW GranTourer PEMS Einbau	20
Abbildung 3-4: Massenstrommesser (links) und PEMS-Entnahmestelle (rechts)	20
Abbildung 3-5: Datenverarbeitungssystem	21
Abbildung 3-6: Wetter- und GPS-Station	21
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung eines Rollenprüfstands [16]	22
Abbildung 3-8: FTIR Rollenprüfstand	22
Abbildung 3-9: WLTC	23
Abbildung 3-10: ERMES V9 Zyklus	24
Abbildung 3-11: Anforderungen gültiger RDE-Lauf [8]	25
Abbildung 3-12: BMW 216d GranTourer WLTC-Emissionen	28
Abbildung 3-13: BMW 216d GranTourer WLTC-Emissionen	29
Abbildung 3-14: BMW 216d GranTourer WLTC CO ₂ -Vergleich	30
Abbildung 3-15: Messung NO _x , CO RDE Riesstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben	31

Abbildung 3-16: Messung PN RDE Riesstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben	32
Abbildung 3-17: Messung NO _x , CO RDE Arzbergstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben	33
Abbildung 3-18: Messung PN RDE Arzbergstrecke BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben	34
Abbildung 3-19: Messung NO _x , CO RDE Ries DPF-Regenerationen BMW 216d GranTourer	35
Abbildung 3-20: Ries (DPF-Regenerationsteil) BMW 216d GranTourer 110 tkm.....	36
Abbildung 3-21: Ries (DPF-Regenerationsteil) BMW 216d GranTourer 216 tkm.....	36
Abbildung 3-22: Messung PN RDE Ries DPF-Regenerationen BMW 216d GranTourer	37
Abbildung 3-23: Arzberg (Teil Rechberg) Auskühlphase BMW 216d GranTourer 110 tkm.	38
Abbildung 3-24: Arzberg (Teil Rechberg) Auskühlphase BMW 216d GranTourer 216 tkm.	39
Abbildung 3-25: Renault Grand Scenic WLTC-Emissionen.....	40
Abbildung 3-26: Renault Grand Scenic WLTC CO ₂ -Vergleich.....	41
Abbildung 4-1: Volllastkurve Euro 6d-Temp Dieselfahrzeuge (links) und Volllastkurve Euro 6d-Temp Benzinfahrzeuge (rechts).....	42
Abbildung 4-2: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (PEMS)	43
Abbildung 4-3: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (PEMS).....	43
Abbildung 4-4: NO _x -Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (PEMS).....	44
Abbildung 4-5: NH ₃ -Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR).....	44
Abbildung 4-6: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (PEMS)	45
Abbildung 4-7: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (PEMS).....	45
Abbildung 4-8: NO _x -Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (PEMS).....	46
Abbildung 4-9: NH ₃ -Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR).....	46
Abbildung 4-10: CO-Differenzkennfeld BMW 216d GranTourer 110 – 216 tkm	47
Abbildung 4-11: PN-Differenzkennfeld BMW 216d GranTourer 110 – 216 tkm	48
Abbildung 4-12: NO _x -Differenzkennfeld BMW 216d GranTourer 110 – 216 tkm	48
Abbildung 4-13: CO-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (PEMS)	49
Abbildung 4-14: PN-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (PEMS).....	49
Abbildung 4-15: NO _x -Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (PEMS).....	50
Abbildung 4-16: NH ₃ -Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)	50
Abbildung 4-17: Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte am PKW.....	51
Abbildung 4-18: BMW 216d GranTourer Fahrzeugdaten-File (PHEM).....	56
Abbildung 4-19: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Ries.....	58
Abbildung 4-20: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Test-X.....	60

Abbildung 4-21: Renault Grand Scenic Fahrzeugdaten-File (PHEM)	62
Abbildung 4-22: CO-Kennfeld im DPF-Reg.-Betrieb BMW 216d GranTourer 110 tkm	63
Abbildung 4-23: PN-Kennfeld im DPF-Reg.-Betrieb BMW 216d GranTourer 110 tkm	64
Abbildung 4-24: NO _x -Kennfeld im DPF-Reg.-Betrieb BMW 216d GranTourer 110 tkm	64
Abbildung 4-25: CO-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 110 tkm	65
Abbildung 4-26: PN-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 110 tkm	66
Abbildung 4-27: NO _x -Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 110 tkm	66
Abbildung 4-28: Ki-Faktoren Gesamt/Interpoliert BMW 216d GranTourer 110 tkm	68
Abbildung 4-29: CO-Kennfeld im DPF-Betrieb BMW 216d GranTourer 216 tkm	69
Abbildung 4-30: PN-Kennfeld im DPF-Betrieb BMW 216d GranTourer 216 tkm	69
Abbildung 4-31: NO _x -Kennfeld im DPF-Betrieb BMW 216d GranTourer 216 tkm	70
Abbildung 4-32: CO-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 216 tkm	70
Abbildung 4-33: PN-Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 216 tkm	71
Abbildung 4-34: NO _x -Differenzkennfeld DPF-Regeneration BMW 216d GranTourer 216 tkm	71
Abbildung 4-35: Ki-Faktoren Gesamt/Interpoliert BMW 216d GranTourer 216 tkm	72
Abbildung 4-36: BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries DPF-Regeneration	73
Abbildung 4-37: BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries Nachsimulation	73
Abbildung 4-38: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 110 tkm	75
Abbildung 4-39: BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries DPF-Regeneration	76
Abbildung 4-40: BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries Nachsimulation	76
Abbildung 4-41: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 216 tkm	78
Abbildung 4-42: Vergleich der DPF-Regenerationssimulationen BMW 216d GranTourer 216 tkm	79
Abbildung 0-1: Ries DPF-Fahrt Gesamt BMW 216d GranTourer 110 tkm	91
Abbildung 0-2: Ries DPF-Fahrt Gesamt BMW 216d GranTourer 216 tkm	91
Abbildung 0-3: Arzberg Auskühlphase BMW 216d GranTourer 110 tkm	92
Abbildung 0-4: Arzberg Auskühlphase BMW 216d GranTourer 216 tkm	92
Abbildung 0-5: Renault Grand Scenic RDE Riesstrecke Emissionen	93
Abbildung 0-6: Renault Grand Scenic RDE Arzbergstrecke Emissionen	93
Abbildung 0-7: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)	94
Abbildung 0-8: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)	94
Abbildung 0-9: NO _x -Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)	94

Abbildung 0-10: N ₂ O-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR).....	95
Abbildung 0-11: Formaldehyd-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)	95
Abbildung 0-12: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)	96
Abbildung 0-13: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR).....	96
Abbildung 0-14: NO _x -Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR).....	96
Abbildung 0-15: N ₂ O-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR).....	97
Abbildung 0-16: Formaldehyd-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)	97
Abbildung 0-17: CO-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR).....	98
Abbildung 0-18: PN-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)	98
Abbildung 0-19: NO _x -Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)	98
Abbildung 0-20: N ₂ O-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)	99
Abbildung 0-21: Formaldehyd-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)	99
Abbildung 0-22: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Arzberg	101
Abbildung 0-23: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer WLTC	102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Desaktivierungsmechanismen von Katalysatoren [4].....	13
Tabelle 3-1: Fahrzeugdaten BMW 216d GranTourer	18
Tabelle 3-2: Fahrzeugdaten Renault Grand Scenic.....	19
Tabelle 3-3: BMW 216d GranTourer WLTC-Emissionen	27
Tabelle 3-4: BMW 216d GranTourer Vergleich der WLTC-Emissionen	29
Tabelle 3-5: Absolutwerte der Riesfahrten BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben	31
Tabelle 3-6: Relative Änderungen der Riesfahrten BMW 216d GranTourer	32
Tabelle 3-7: Absolutwerte der Arzbergfahrten BMW 216d GranTourer inkl. Werksangaben	33
Tabelle 3-8: Relative Änderungen der Arzbergfahrten BMW 216d GranTourer	34
Tabelle 3-9: Absolutwerte der Ries DPF-Regenerationsfahrten BMW 216d GranTourer	35
Tabelle 3-10: Relative Änderungen der Ries DPF-Regenerationsfahrten BMW 216d GranTourer	37
Tabelle 3-11: Renault Grand Scenic WLTC-Emissionen.....	40
Tabelle 3-12: Renault Grand Scenic Vergleich der WLTC-Emissionen	41
Tabelle 4-1: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries-01	53
Tabelle 4-2: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm Ries-02.....	53
Tabelle 4-3: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm Arzberg	54
Tabelle 4-4: Validierung BMW 216d GranTourer 110 tkm ERMES.....	54
Tabelle 4-5: Validierung BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries-01	55
Tabelle 4-6: Validierung BMW 216d GranTourer 216 tkm Ries-02.....	55
Tabelle 4-7: Validierung BMW 216d GranTourer 216 tkm Arzberg	56
Tabelle 4-8: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer Ries.....	57
Tabelle 4-9: Messwerte BMW 216d GranTourer Ries	57
Tabelle 4-10: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Ries.....	58
Tabelle 4-11: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer Test-X.....	59
Tabelle 4-12: Messwerte BMW 216d GranTourer Test-X	59
Tabelle 4-13: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Test-X.....	59
Tabelle 4-14: Validierung Renault Grand Scenic 130 tkm Ries-01.....	61
Tabelle 4-15: Validierung Renault Grand Scenic 130 tkm Arzberg.....	61
Tabelle 4-16: Emissionsabweichungen Gesamt BMW 216d GranTourer 110 tkm.....	66
Tabelle 4-17: Emissionsabweichungen Interpoliert BMW 216d GranTourer 110 tkm.....	67
Tabelle 4-18: Ki-Faktoren gesamtes/interpoliertes Kennfeld (110 tkm) inkl. HBEFA-Daten	68
Tabelle 4-19: Ki-Faktoren gesamtes/interpoliertes Kennfeld (216 tkm) inkl. HBEFA-Daten	72

Tabelle 4-20: Mittelwerte Normalbetrieb/DPF-Reg.-Betrieb inkl. Abweichung BMW 216d GranTourer 110 tkm.....	74
Tabelle 4-21: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 110 tkm inkl. HBEFA-Daten.....	74
Tabelle 4-22: Mittelwerte Normalbetrieb/DPF-Reg.-Betrieb inkl. Abweichung BMW 216d GranTourer 216 tkm.....	77
Tabelle 4-23: Ki-Faktoren BMW 216d GranTourer 216 tkm inkl. HBEFA-Daten.....	77
Tabelle 0-1: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer Arzberg.....	100
Tabelle 0-2: Messwerte BMW 216d GranTourer Arzberg.....	100
Tabelle 0-3: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Arzberg.....	100
Tabelle 0-4: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer WLTC.....	101
Tabelle 0-5: Messwerte BMW 216d GranTourer WLTC.....	101
Tabelle 0-6: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer WLTC.....	102
Tabelle 0-7: Emissionsabweichungen Gesamt BMW 216d GranTourer 216 tkm.....	103
Tabelle 0-8: Emissionsabweichungen Interpoliert BMW 216d GranTourer 216 tkm.....	103

Formelverzeichnis

(2-1).....	2
(2-2).....	2
(2-3).....	2
(2-4).....	3
(2-5).....	4
(2-6).....	4
(2-7).....	4
(2-8).....	5
(2-9).....	5
(2-10).....	6
(2-11).....	6
(2-12).....	6
(2-13).....	6
(2-14).....	6
(2-15).....	9
(2-16).....	9
(2-17).....	9
(3-1).....	27
(4-1).....	42
(4-2).....	42
(4-3).....	47
(4-4).....	47
(4-5).....	47
(4-6).....	51
(4-7).....	51
(4-8).....	51
(4-9).....	51
(4-10).....	51
(4-11).....	51
(4-12).....	65
(4-13).....	65
(4-14).....	65
(4-15).....	67
(4-16).....	67

Literatur

- [1] AECC (Association for Emission Control by Catalysts): From DPF to GPF: The Success Story of Particulate Filters; AECC, Brüssel, 2016
- [2] Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [Online]: <https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/massnahmen/partikelfilter/filtersysteme.htm> [Zitat vom 2.6.2021]
- [3] BBW (Berufsbildungsschule Winterthur): Schadstoffminderung, Abgasanlage, BBW, 2021
- [4] Carol L. A.; Newman, N. E.; Mann, G. S.: High Temperature Deactivation of Threeway Catalyst, SAE Technical Paper Series, 892040, 1989
- [5] Chan, D.: Thermische Alterung von Dieseloxydationskatalysatoren und NO_x-Speicherkatalysatoren: Korrelierung von Aktivität und Speicherfähigkeit mit physikalischen und chemischen Katalysatoreigenschaften, Karlsruher Institut für Technologie, ISBN 978-3-7315-0162-6, 2014
- [6] Chatterjee D.: Detaillierte Modellierung von Abgaskatalysatoren, Dissertation, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg, 2001
- [7] DCL International Inc. [Online]: <http://www.dcl-inc.de/catalyst-assessment/> [Zitat vom 1.6.2021]
- [8] Delphi Automotive PLC, Worldwide Emissions Standards Passenger Cars and Light Duty, 2020/21
- [9] ERMES (European Research for Mobile Emission Sources) [Online]: https://ermes-group.eu/web/about_ermes [Zitat vom 23.5.2021]
- [10] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs, Teil II Abgasnachbehandlung, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [11] Hausberger, S.; Schüssler Martin.: Umweltauswirkungen des Verkehrs, Teil III SCR, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2012
- [12] Lanzerath, P.: Alterungsmechanismen von Abgaskatalysatoren für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012
- [13] Peck S.: Experimentelle Untersuchung und dynamische Simulation von Oxidationskatalysatoren und Diesel-Partikelfiltern, Dissertation, Universität Stuttgart, 2007
- [14] Reif, K.: Abgastechnik für Verbrennungsmotoren, Duale Hochschule Baden-Württemberg, ISBN 978-3-658-09522-2 (eBook), 2015
- [15] Senfineco Germany [Online]: https://www.senfineco.de/en/?action=news_preview&id=42 [Zitat vom 27.5.2021]
- [16] Wimmer A.; Blassnegger, J.: Laborübungen Motor und Umwelt, Pkw Rollenprüfstand, Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2013

- [17] Winkler, A.; Ferri, D.; Aguirre, M.: The influence of chemical and thermal aging on the catalytic activity of a monolithic diesel oxidation catalyst, *Applied Catalysis*, 2009

Anhang

BMW 216d GranTourer Ries DPF-Regenerationsfahrten

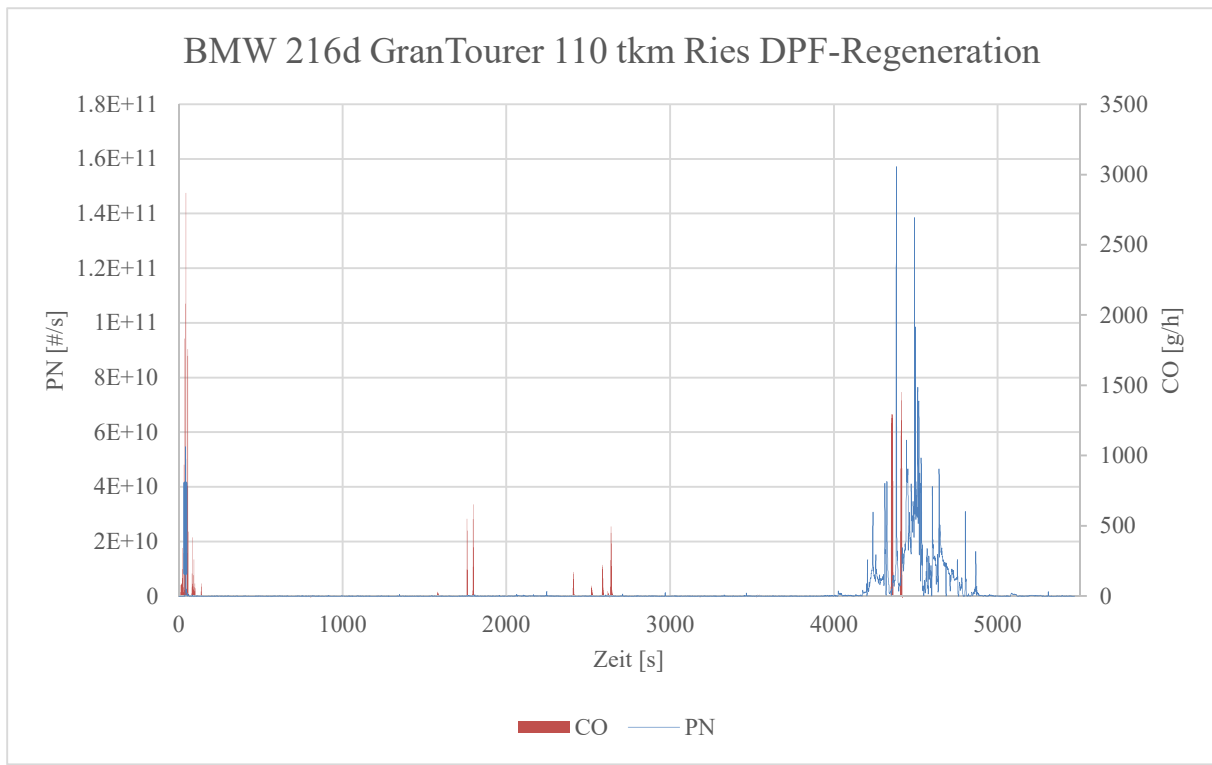


Abbildung 0-1: Ries DPF-Fahrt Gesamt BMW 216d GranTourer 110 tkm

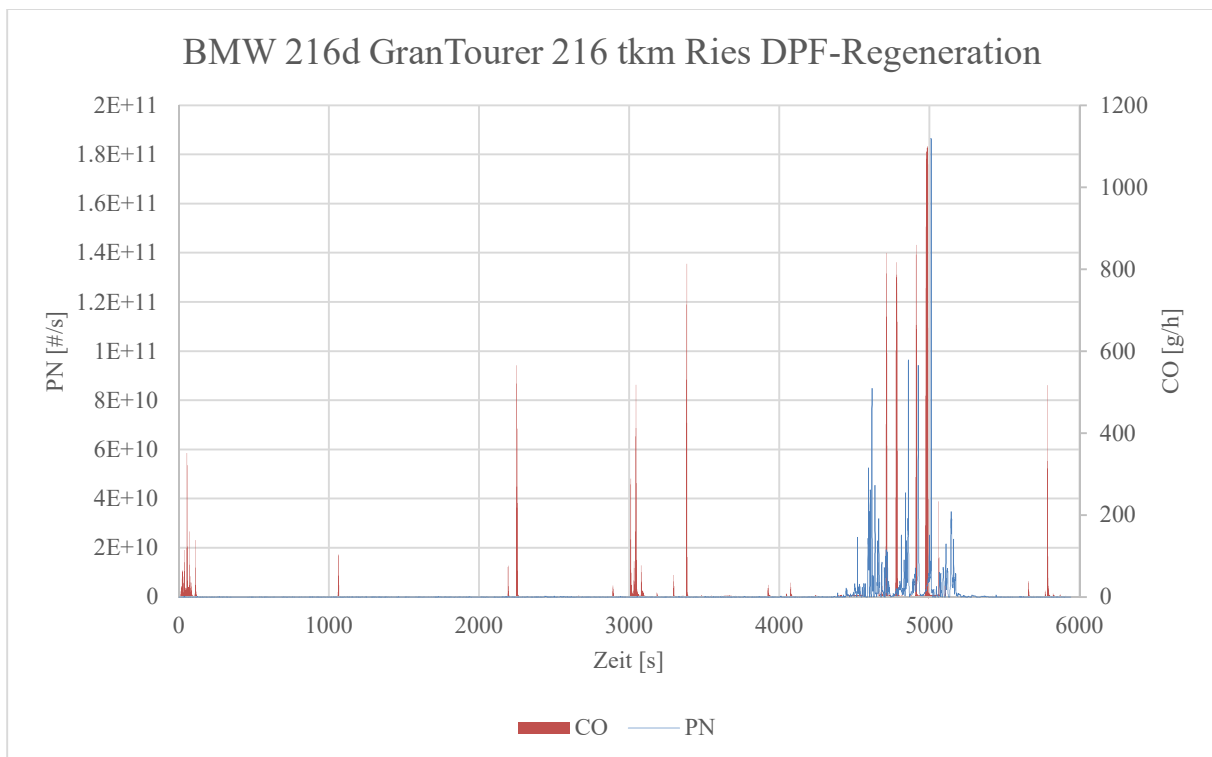


Abbildung 0-2: Ries DPF-Fahrt Gesamt BMW 216d GranTourer 216 tkm

BMW 216d GranTourer gesamte Arzbergroute

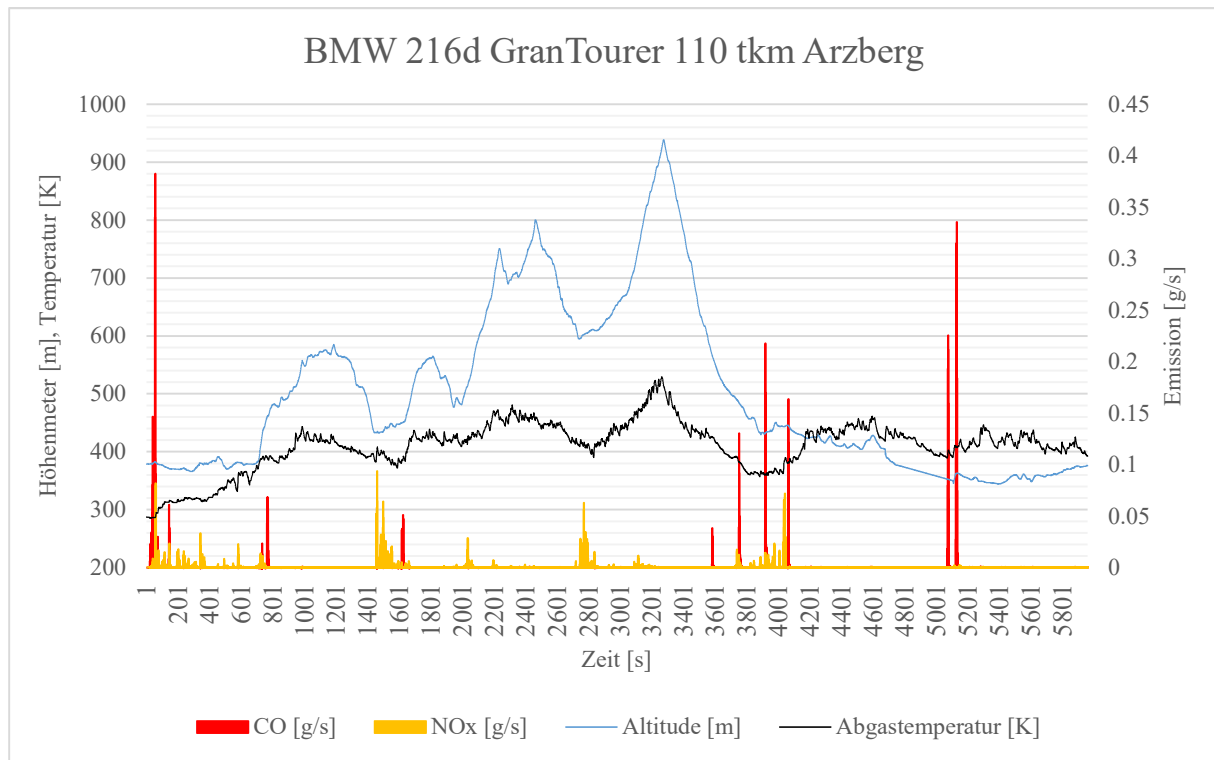


Abbildung 0-3: Arzberg Auskühlphase BMW 216d GranTourer 110 tkm

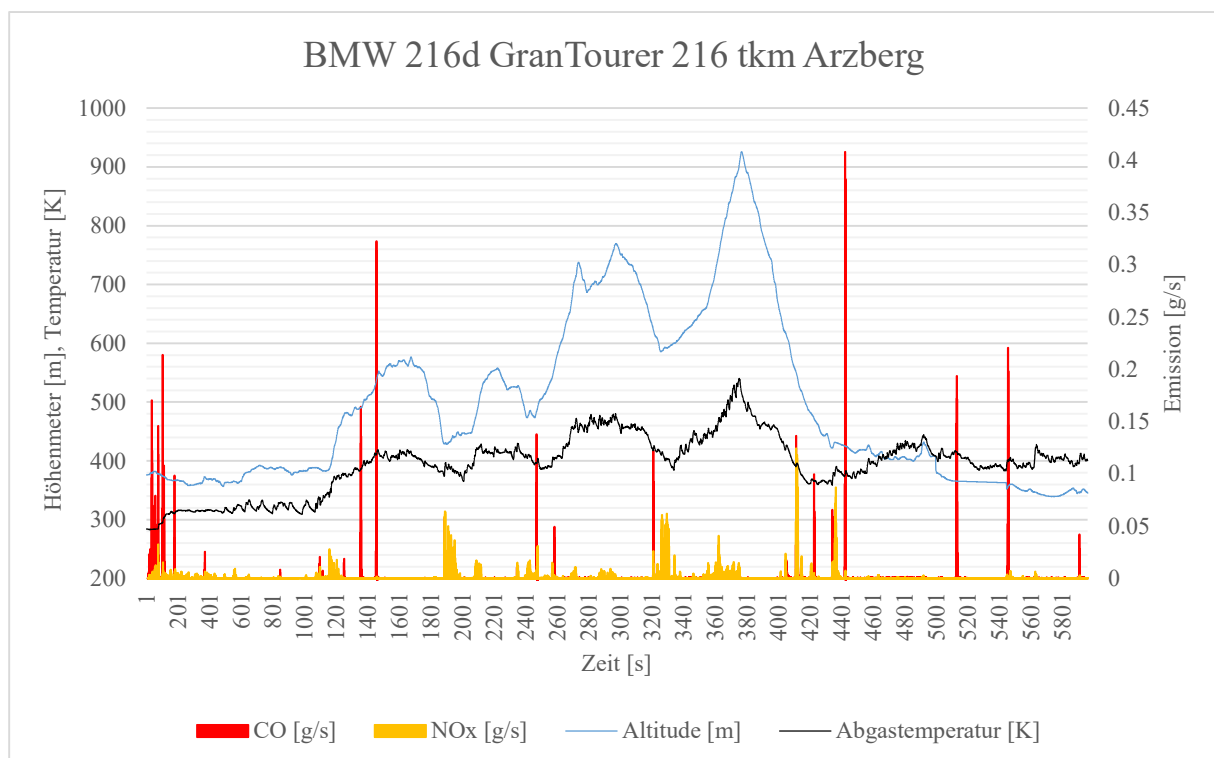


Abbildung 0-4: Arzberg Auskühlphase BMW 216d GranTourer 216 tkm

Renault Grand Scenic 130 tkm RDE Fahrten

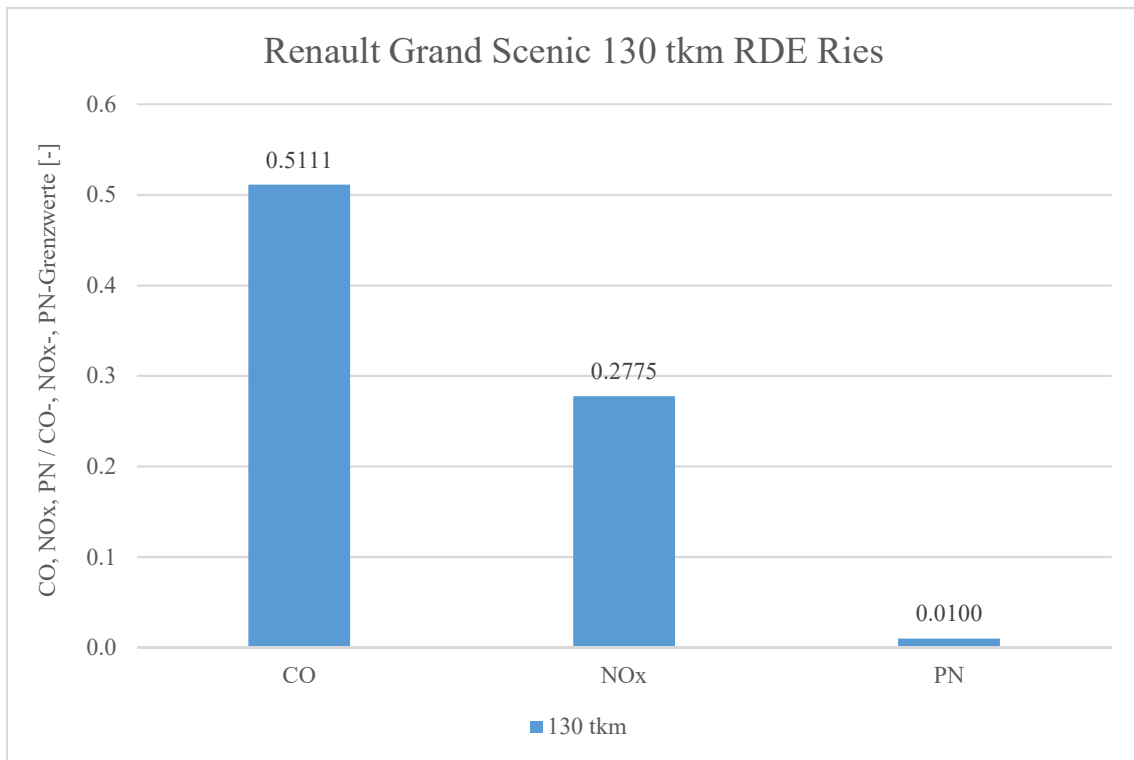


Abbildung 0-5: Renault Grand Scenic RDE Riesstrecke Emissionen

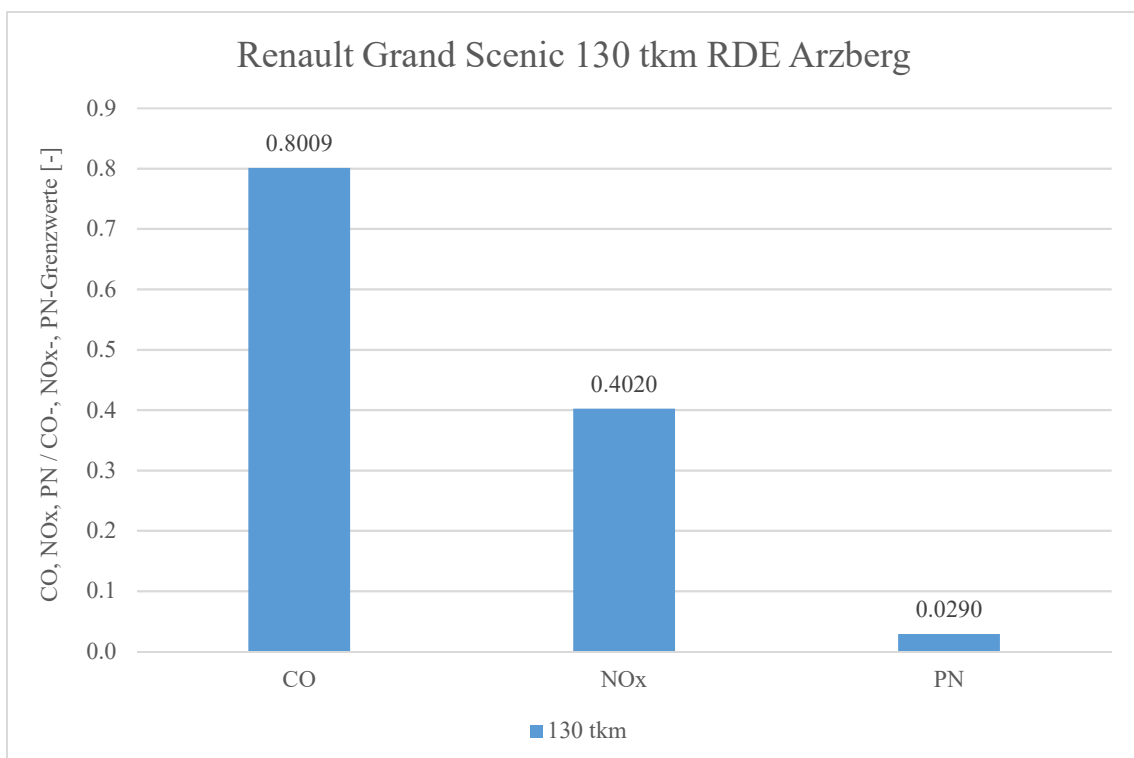


Abbildung 0-6: Renault Grand Scenic RDE Arzbergstrecke Emissionen

BMW 216d GranTourer 110 tkm Emissionskennfelder

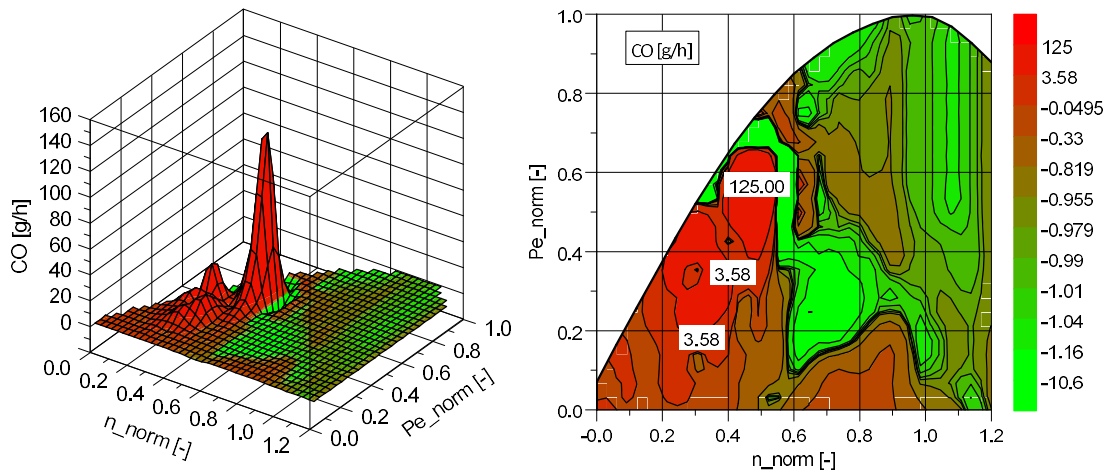


Abbildung 0-7: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)

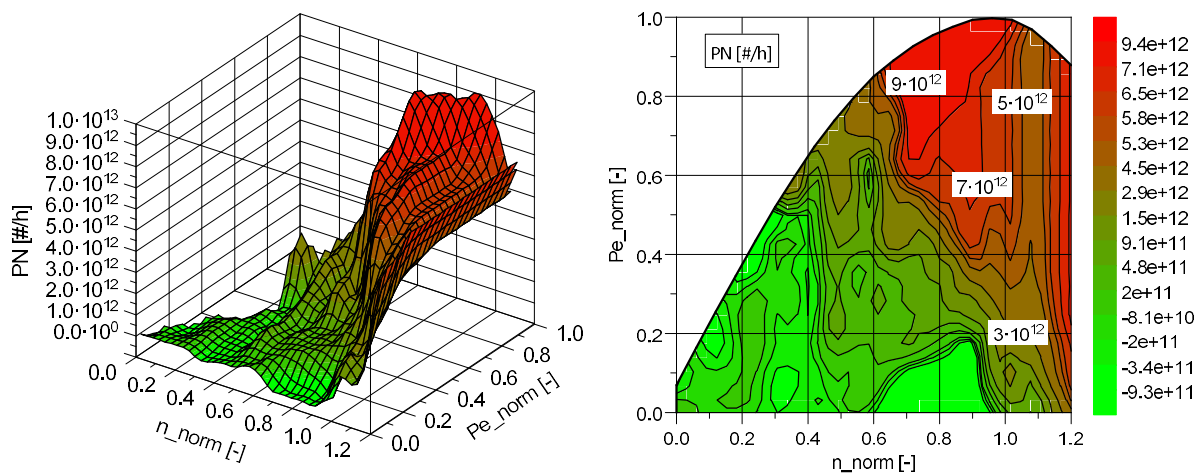


Abbildung 0-8: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)

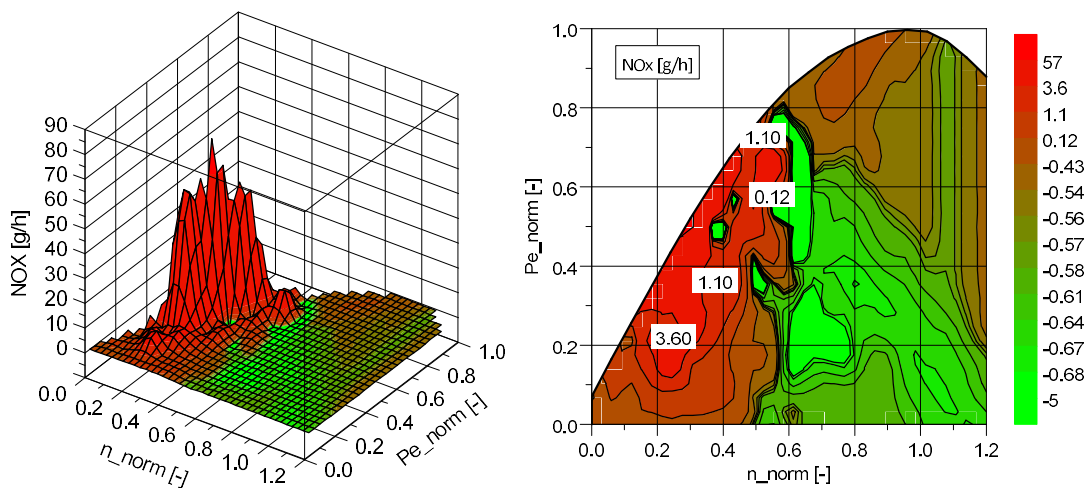


Abbildung 0-9: NO_x-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)

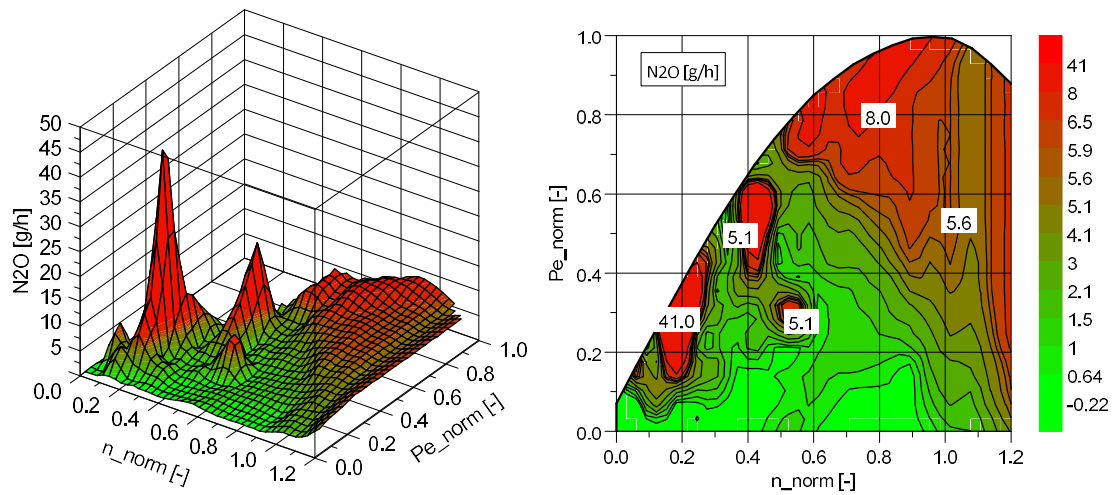


Abbildung 0-10: N₂O-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)

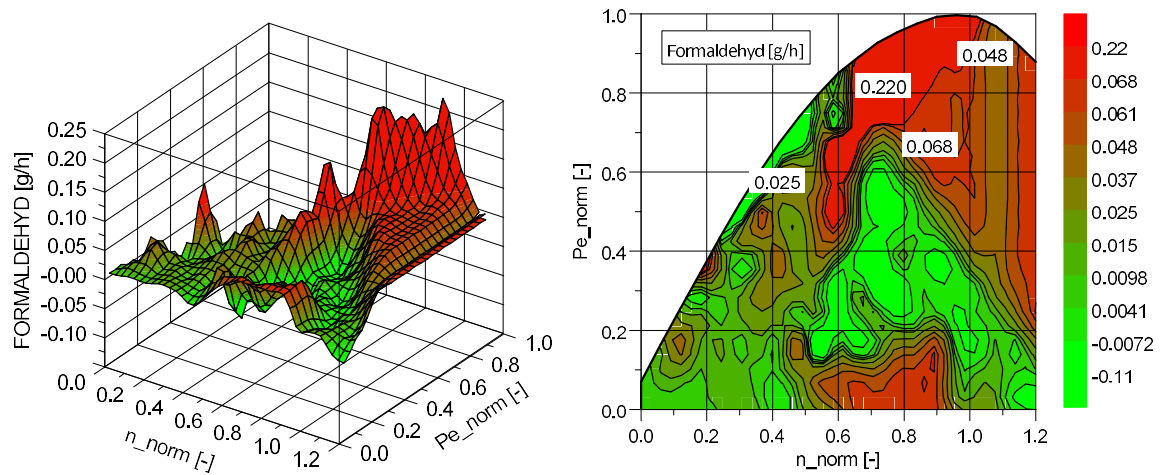


Abbildung 0-11: Formaldehyd-Kennfeld BMW 216d GranTourer 110 tkm (CVS/FTIR)

BMW 216d GranTourer 216 tkm Emissionskennfelder

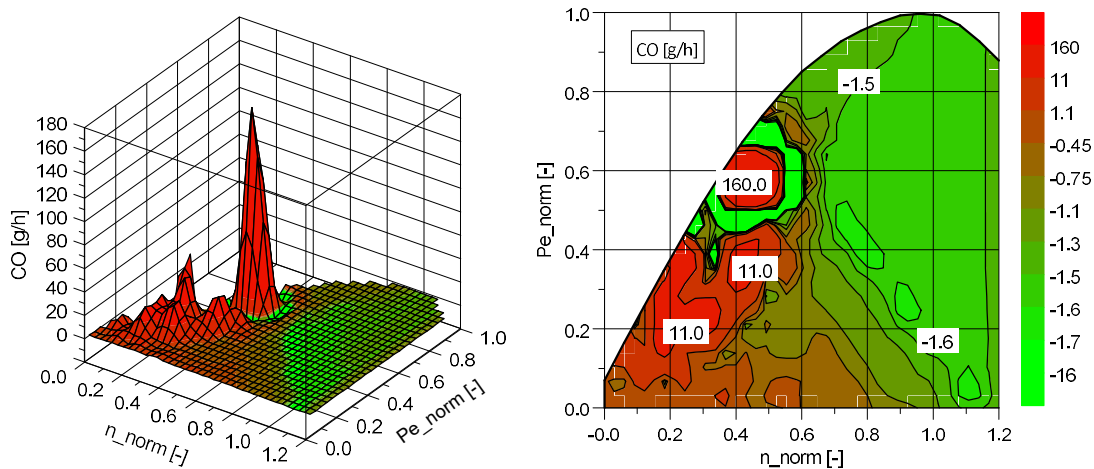


Abbildung 0-12: CO-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)

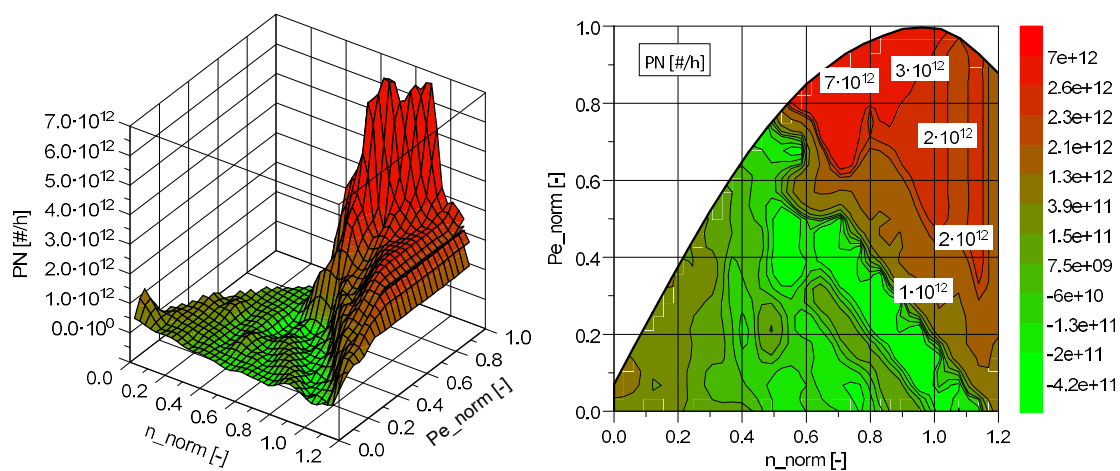


Abbildung 0-13: PN-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)

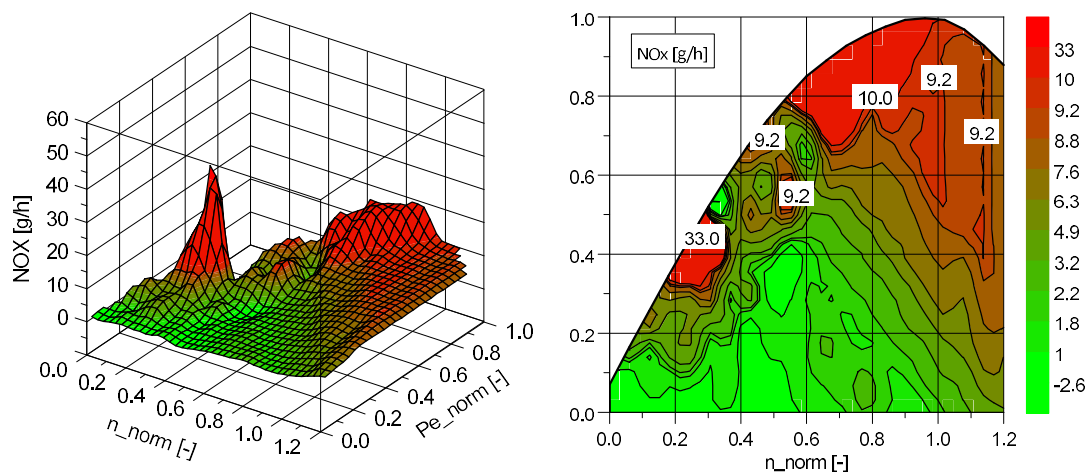


Abbildung 0-14: NO_x-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)

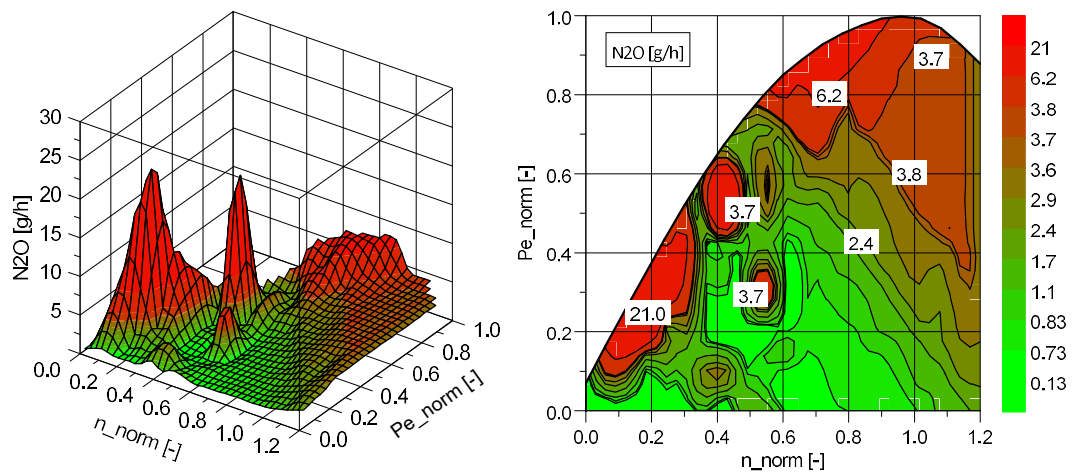


Abbildung 0-15: N₂O-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)

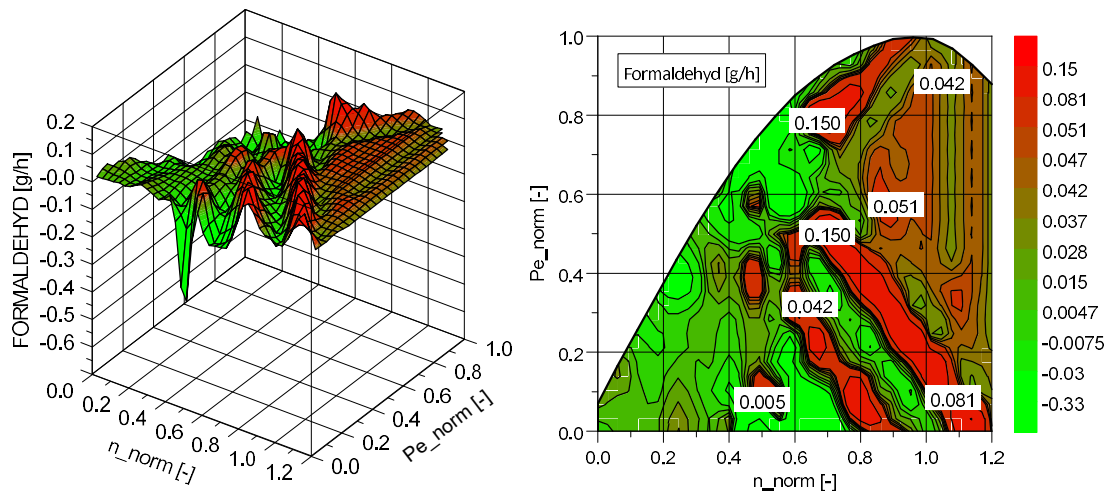


Abbildung 0-16: Formaldehyd-Kennfeld BMW 216d GranTourer 216 tkm (CVS/FTIR)

Renault Grand Scenic 130 tkm Emissionskennfelder

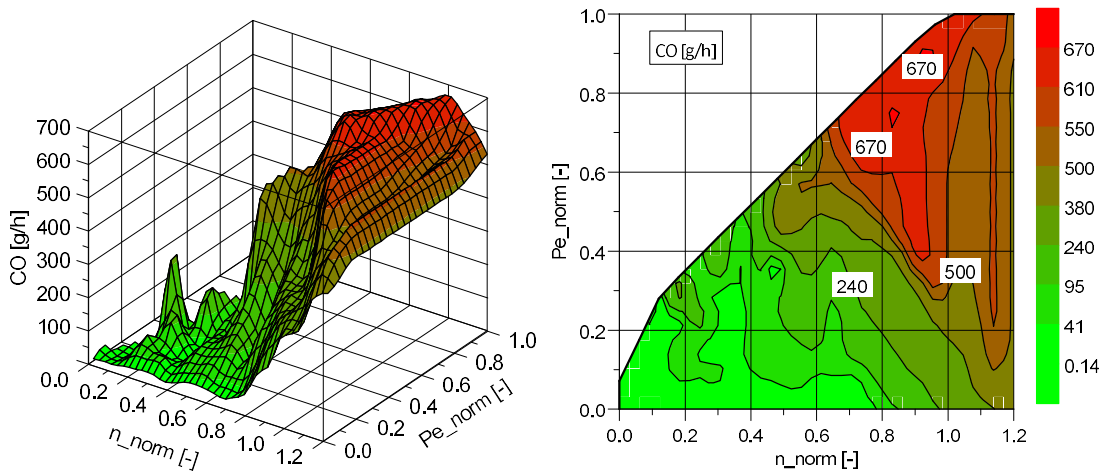


Abbildung 0-17: CO-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)

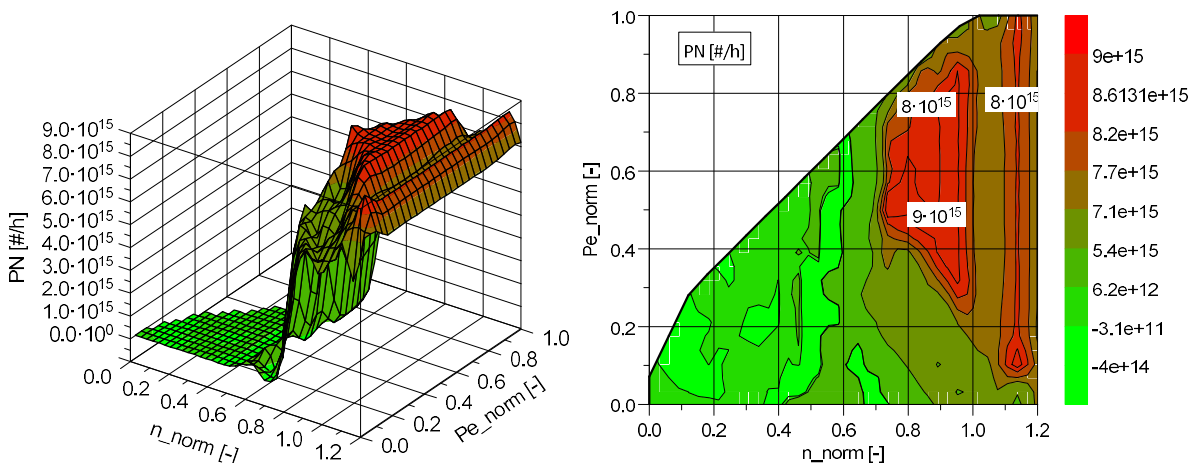


Abbildung 0-18: PN-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)

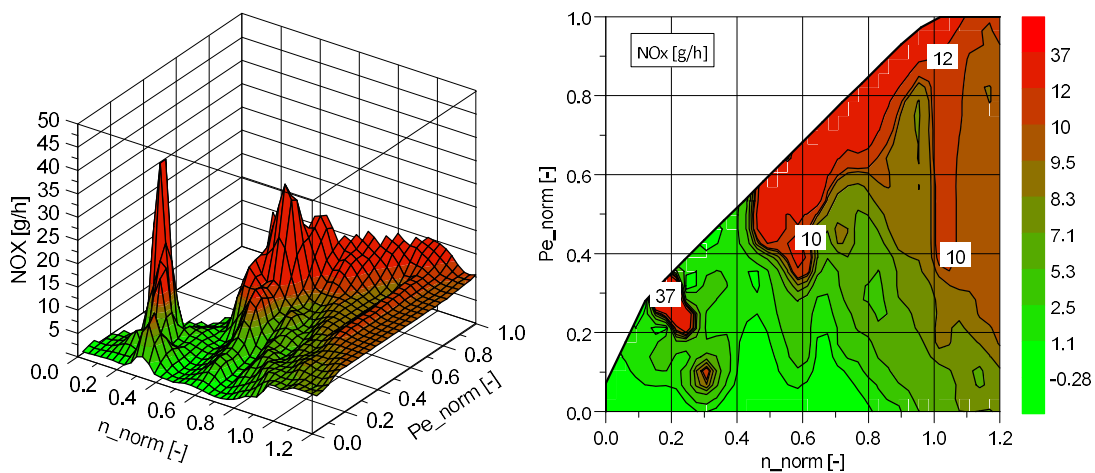


Abbildung 0-19: NO_x-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)

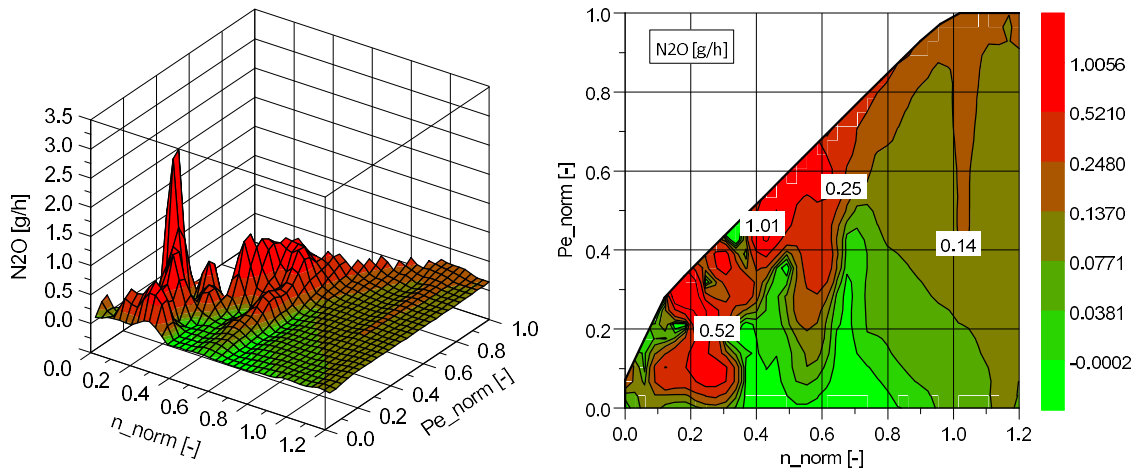


Abbildung 0-20: N₂O-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)

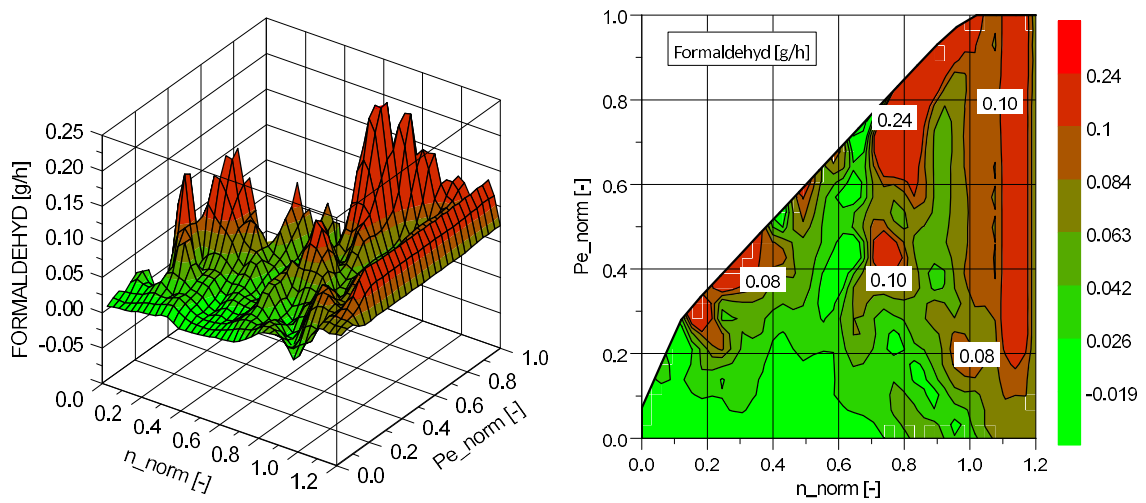


Abbildung 0-21: Formaldehyd-Kennfeld Renault Grand Scenic 130 tkm (CVS/FTIR)

Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer

Tabelle 0-1: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer Arzberg

		Arzberg				
		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
		[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]
Simulation	CO ₂	11681.91	-	11681.91	-	0.00
	CO	10.35	-	9.04	-	-12.66
	NO _x	4.95	-	7.67	-	55.00
	NO	4.59	-	7.23	-	57.54
	PN	-	9.48E+07	-	5.95E+07	-37.20

Tabelle 0-2: Messwerte BMW 216d GranTourer Arzberg

		Arzberg				
		BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
		[g/h]	[/s]	[g/h]	[/s]	[%]
Messung	CO ₂	11595.65	-	10753.34	-	-7.26
	CO	4.11	-	6.77	-	64.68
	NO _x	3.00	-	6.17	-	105.68
	NO	2.71	-	5.91	-	118.42
	PN	-	9.79E+07	-	5.58E+07	-43.01

Tabelle 0-3: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Arzberg

		Arzberg				
		Messung-Delta		Simulation-Delta		Abweichung
		[%]	[-]	[%]	[-]	[%-Punkte]
CO ₂	-7.26	0.93	0.00	1.00	7.26	
CO	64.68	1.65	-12.66	0.87	77.33	
NO _x	105.68	2.06	55.00	1.55	50.68	
NO	118.42	2.18	57.54	1.58	60.88	
PN	-43.01	0.57	-37.20	0.63	5.81	

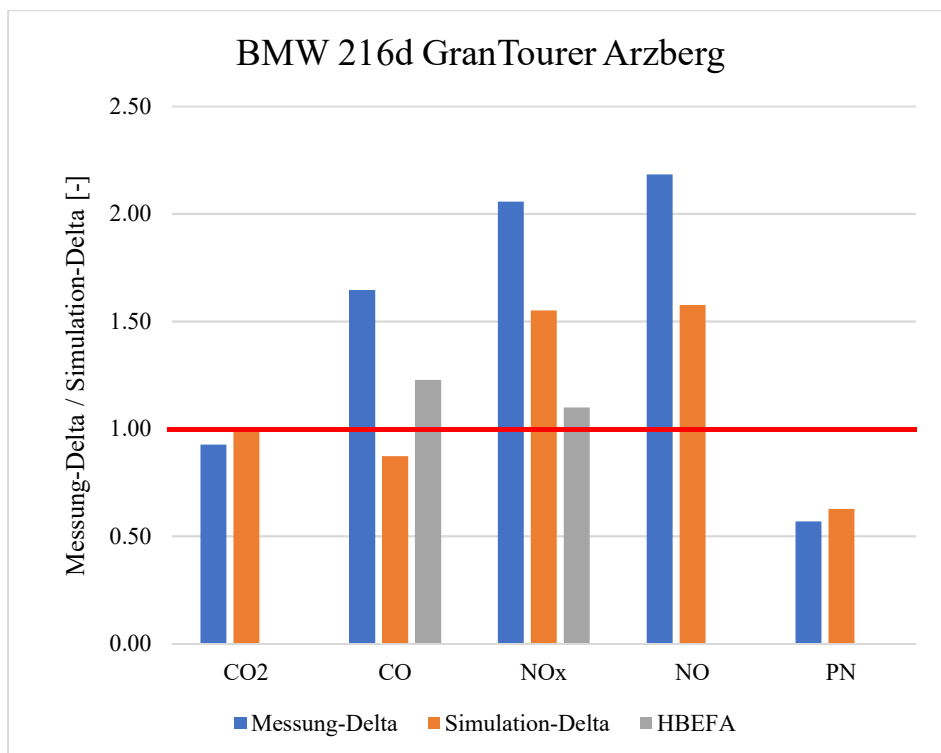


Abbildung 0-22: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung BMW 216d GranTourer Arzberg

Tabelle 0-4: Längsdynamiksimulation BMW 216d GranTourer WLTC

	WLTC				
	BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	[%]
CO₂	6416.68	-	6416.68	-	0.00
CO	3.92	-	2.60	-	-33.81
NO_x	1.61	-	2.44	-	51.79
NO	1.58	-	1.98	-	25.25
PN	-	3.60E+07	-	2.08E+07	-42.08

Tabelle 0-5: Messwerte BMW 216d GranTourer WLTC

	WLTC				
	BMW 110 tkm		BMW 216 tkm		Änderung
	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	[%]
CO₂	6756.47	-	6746.32	-	-0.15
CO	3.99	-	4.08	-	2.09
NO_x	1.48	-	2.28	-	54.25
NO	1.46	-	1.84	-	26.02
PN	-	4.17E+07	-	2.15E+07	-48.45

Tabelle 0-6: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung
BMW 216d GranTourer WLTC

	WLTC				
	Messung-Delta		Simulation-Delta		Abweichung
	[%]	[-]	[%]	[-]	
CO₂	-0.15	1.00	0.00	1.00	0.15
CO	2.09	1.02	-33.81	0.66	35.90
NO_x	54.25	1.54	51.79	1.52	2.45
NO	26.02	1.26	25.25	1.25	0.77
PN	-48.45	0.52	-42.08	0.58	6.37

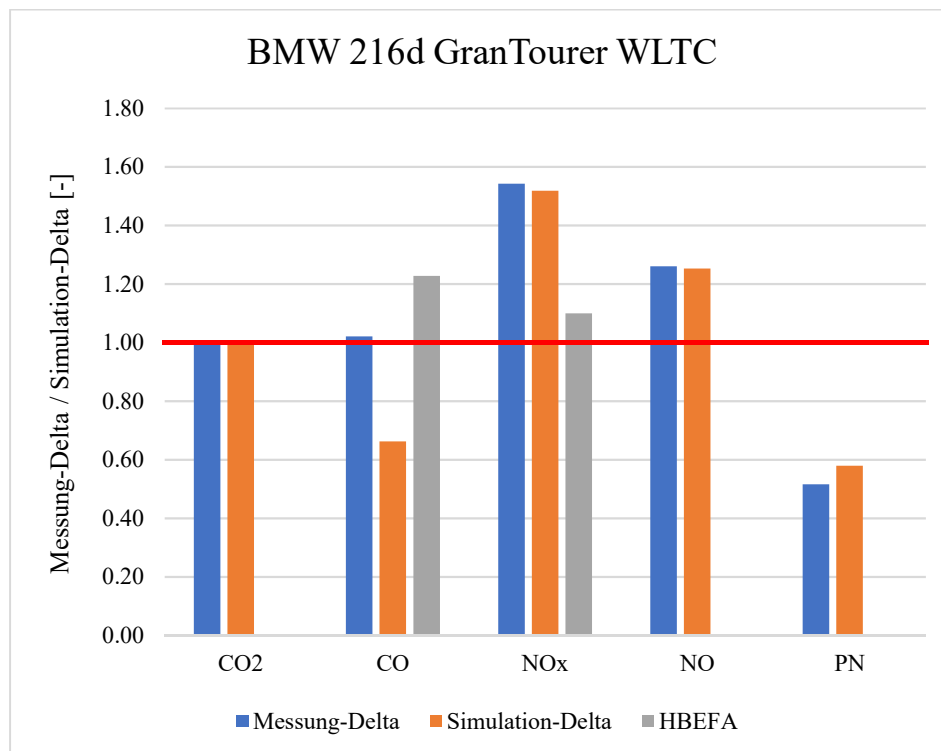


Abbildung 0-23: Änderungen und Alterungsfaktoren von Simulation und Messung
BMW 216d GranTourer WLTC

DPF-Regenerationssimulation BMW 216d GranTourer

Tabelle 0-7: Emissionsabweichungen Gesamt BMW 216d GranTourer 216 tkm

BMW 216d GranTourer 216 tkm - Gesamt									
	Normalbetrieb		DPF-Reg		Delta		Abweichung / Faktor		
	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	[%]	[-]	
CO₂	285.89	-	285.89	-	0	-	0.00	1.00	
CO	49.24	-	9.12	-	-40.11	-	-81.47	0.19	
NO_x	73.01	-	39.49	-	-33.51	-	-45.90	0.54	
NO	72.15	-	36.18	-	-35.97	-	-49.85	0.50	
PN	-	1.07E+08	-	6.01E+09	-	5.91E+09	5516.34	56.16	

Tabelle 0-8: Emissionsabweichungen Interpoliert BMW 216d GranTourer 216 tkm

BMW 216d GranTourer 216 tkm - Interpoliert									
	Normalbetrieb		DPF-Reg		Delta		Abweichung / Faktor		
	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	[g/h]	[#/s]	[%]	[-]	
CO₂	183.27	-	183.90	-	0.63	-	0.35	1.00	
CO	14.71	-	29.07	-	14.36	-	97.58	1.98	
NO_x	6.13	-	28.76	-	22.63	-	368.91	4.69	
NO	5.58	-	26.63	-	21.05	-	376.98	4.77	
PN	-	5.57E+07	-	5.85E+09	-	5.79E+09	10407.43	105.07	