

Masterarbeit

**EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VERSCHIEDENER DIESEL-
ABGASNACHBEHANDLUNGSKONZEPTE
FÜR DIE RICHTLINIE LEV3 SULEV**

Verfasser

Thomas Mayr, BSc

**Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz**

Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder

Betreuer:

Dipl.-Ing. Klaus Hadl

Dipl.-Ing. Dr.techn. Eberhard Schutting

Graz, 03.02.2014



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.

Thomas Mayr

Graz am 03.02.2014

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Zuge des Comet K2 Mobility Forschungsprogramm in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz und der AVL List GmbH. Die Untersuchungen wurden unter der Mitwirkung einer Vielzahl an Mitarbeitern an einem Prüfstand der Technischen Universität Graz durchgeführt. Für die tatkräftige Unterstützung möchte ich allen einen großen Dank aussprechen. Besonders hervorheben möchte ich dabei mehrere Personen:

An erster Stelle möchte ich mich bei dem Leiter des IVT und Begutachters dieser Arbeit, Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichlseder, für die Möglichkeit bedanken, dass ich die Arbeit am Institut absolvieren durfte.

Einen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer Dipl.-Ing. Klaus Hadl aussprechen, der mich während meiner gesamten Arbeit tatkräftig und unermüdlich unterstützte.

Bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Eberhard Schutting möchte ich mich für die fachliche Hilfe herzlich bedanken.

Weiterer Dank gebührt dem Herrn Kurt Leopold für die sehr gute Zusammenarbeit am Motorenprüfstand und die Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Seitens der AVL möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Albert Beichtbuchner und bei Dipl.-Ing. Ludwig Bürgler für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, meiner Partnerin und meinen Freunden für ihren tatkräftigen Beistand während des Studiums.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit widmet sich der experimentellen Untersuchung verschiedener Abgasnachbehandlungskonzepte für Dieselmotoren. Die unterschiedlichen Konzepte wurden dabei auf ihre Eignung für die US-Amerikanische LEV3 SULEV30 Gesetzgebung bewertet.

Im ersten Teil der Arbeit wird eine Kombination aus DOC, cDPF und Unterboden SCR beschrieben. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass mit diesem Konzept eine wirkungsvolle Schadstoffreduktion möglich ist. Dabei konnte der hohe Stellenwert der Heizmaßnahmen im Warmlauf ermittelt werden. Die Kombination aus E-Heater und innermotorischen Heizmaßnahmen (Rapid Heat Up - RHU) erlaubt ein wirkungsvolles Thermomanagement, welches einen raschen Temperaturanstieg in den Katalysatoren ermöglicht. Im Warmlauf können Schadstoffe somit effektiv vermindert werden. Um den durch die Heizmaßnahmen verursachten Mehrverbrauch einzuschränken, wurden in Kalibrierarbeiten die Parameter der RHU und der AGR angepasst. In den Untersuchungen konnte zudem gezeigt werden, dass die Alterung der Katalysatoren eine große Herausforderung darstellt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die Kombination aus DOC, sDPF und Unterboden SCR beschrieben. Durch die motornahe Anbringung der reduzierenden Komponente kann ein frühes Erreichen der Betriebstemperatur gewährleistet werden. Somit kann auf den Rapid Heat Up verzichtet werden. Mit einem E-Heater als Heizmaßnahme kann das Konzept die Schadstoffe sehr wirkungsvoll reduzieren. Dabei erzielt es ein besseres Emissionsergebnis als das System aus Teil 1. In den Untersuchungen konnte zudem gezeigt werden, dass eine effektive Schadstoffminimierung nur möglich ist, wenn das System individuell an das jeweilige Fahrzeug angepasst ist.

Im 3. Teil wird die Kombination aus LNT (Lean NO_x Trap), cDPF und Unterboden SCR System beschrieben. Das Konzept erzielte das beste Emissionsergebnis bei gleichzeitig niedrigstem Verbrauch. Dabei stellte die Regeneration des Speicherkatalysators eine sehr große Herausforderung dar. Zudem konnte durch den stark gealterten SCR ein verringertes Reduktionsvermögen beobachtet werden. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis kann für das Konzept eine zusätzliche Reduzierung der Schadstoffe angenommen werden.

Im letzten Teil der Arbeit werden die einzelnen Konzepte verglichen. Berücksichtigt werden dabei das Emissionsverhalten und der Kraftstoffverbrauch.

Abstract

This master thesis describes the experimental study of various exhaust aftertreatment concepts for diesel engines. The different concepts have been evaluated according to their suitability for the U.S. American LEV3 SULEV30 legislation.

In the first part of this work, a combination of DOC, cDPF and underfloor SCR is described. The investigations have shown, that an effective emission reduction is possible with this concept. In the course of this, the significance of heating measures during warm-up could be determined. The combination of E-Heater and heating measures within the engine (Rapid Heat Up – RHU) allows an effective thermal management with a rapid temperature rise in the catalysts. Therefore, emissions during warm-up can be effectively reduced. To minimize the higher fuel consumption from the heating measures, the parameters of the RHU and the EGR have been adjusted during calibration. In addition, the studies could show that the aging of the catalysts is a major challenge.

In the second part of the work, the combination of DOC, sDPF and underfloor SCR is discussed. Because of the close mounting of the sDPF towards the engine, the operating temperature in the catalyst can be achieved more rapidly. As a result of that, the RHU can be deactivated. With an E- Heater as heating measure the concept can reduce the emissions effectively. The concept achieves a better emission result than system 1. The studies show, that for an effective minimization of emissions, the system has to be individually adapted to the respective vehicle.

In the third part, the combination of LNT (Lean NO_x Trap), cDPF and underfloor SCR is described. The concept achieved the best emission results while maintaining the lowest fuel consumption. The regeneration of the storage-catalyst is one of the greatest challenges. The heavily aged SCR–catalyst showed a low conversion ratio. A system with a new SCR catalyst would reduce the emissions even more.

In the last part of the work the individual concepts are compared, considering the emission results and the fuel consumption.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	3
VORWORT	5
KURZFASSUNG	7
ABSTRACT	8
FORMELZEICHEN	12
1 EINLEITUNG	14
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	15
2.1 SCHADSTOFFBILDUNG IM VERBRENNUNGSMOTOR.....	15
2.1.1 Kohlenstoffmonoxid (CO)	16
2.1.2 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC).....	17
2.1.3 Partikel- und Rußemissionen.....	17
2.1.4 Stickoxide (NO _x).....	18
2.2 ABGASRÜCKFÜHRUNG.....	21
2.3 GESETZLICHE LIMITIERUNG DER SCHADSTOFFEMISSIONEN	22
2.3.1 Europäische Gesetzgebung	22
2.3.2 Amerikanische Gesetzgebung.....	23
2.3.3 Prüfzyklus FTP75.....	25
2.3.4 Anforderungen SULEV.....	26
2.4 ABGASNACHBEHANDLUNG.....	27
2.4.1 Katalytische Reaktion.....	27
2.4.2 Diesel Oxidation Catalyst (DOC)	31
2.4.3 Dieselpartikelfilter (DPF).....	33
2.4.4 Selective Catalytic Reaction (SCR)	35
2.4.5 NO _x -Speicherkatalysator.....	39
2.4.6 Elektrisch beheizter Katalysator	43
2.4.7 Wechselwirkung der Abgasnachbehandlungssysteme	44
3 ALLGEMEINES	46
3.1 PRÜFSTANDSAUFBAU	46
3.2 MOTOR	46
3.3 MESSTECHNIK	48
3.3.1 FTIR	48
3.3.2 CEB	48
3.4 VERSUCHSAUFBAU	49
3.5 AM PRÜFSTAND ABGEBILDETE FAHRZEUGE	50
3.6 BERECHNUNGEN VERSCHIEDENER GRÖßEN.....	51
3.6.1 Ermittlung der Massenemissionen	51
3.6.2 Bestimmung des AdBlue- und NH ₃ -Verbrauchs.....	51
3.6.3 Errechnung der gespeicherten NH ₃ -Menge im SCR	52
3.6.4 Berechnung des Uniformity-Index.....	52
3.7 VORKONDITIONIERUNG	52
3.8 RAPIDE COOL DOWN	53
3.9 UNIFORMITY INDEX.....	54
4 SULEV SYSTEM 1	55
4.1 VERSUCHSANORDNUNG	55
4.2 ABSCHÄTZUNG DER FTP75 ERGEBNISSE.....	56
4.3 AUSGANGSPUNKT.....	57
4.4 BASISKALIBRIERUNG.....	58
4.4.1 Abgasrückführung (AGR).....	59
4.4.2 Abgasstauklappe	59
4.4.3 Betriebsstrategie	59
4.4.4 Ergebnisse.....	59
4.5 HEIZMAßNAHMEN.....	62
4.5.1 E-Heater.....	62

4.5.2	<i>Rapid Heat Up</i>	63
4.5.3	<i>Ergebnisse</i>	63
4.5.4	<i>Emissionsstand mit Heizmaßnahmen</i>	64
4.6	KALIBRIERARBEITEN.....	65
4.6.1	<i>Durchgeführte Kalibriermaßnahmen</i>	65
4.6.2	<i>Ergebnisse</i>	66
4.7	ANALYSE DER SCHADSTOFFREDUZIERUNG AN VERSCHIEDENEN MESSPOSITIONEN.....	68
4.7.1	<i>Emissionsverläufe</i>	68
4.7.2	<i>Ergebnisse</i>	69
4.8	SCR ALTERUNG.....	71
4.8.1	<i>Ergebnisse</i>	71
4.9	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	73
4.10	GEGENÜBERSTELLUNG MIT SIMULATIONSERGEBNISSEN.....	74
5	SULEV SYSTEM 2	76
5.1	VERSUCHSANORDNUNG SYSTEM 2.....	76
5.2	NH ₃ GLEICHVERTEILUNG.....	77
5.2.1	<i>Eindüsungsvariationen</i>	77
5.2.2	<i>Ergebnisse</i>	77
5.3	AUSGANGSPUNKT SYSTEM 2.....	78
5.4	ANALYSE DER SCHADSTOFFREDUZIERUNG AN VERSCHIEDENEN MESSPOSITIONEN.....	80
5.4.1	<i>Emissionsverläufe</i>	80
5.4.2	<i>Ergebnisse</i>	81
5.5	RELEVANZ DES E-HEATER.....	83
5.5.1	<i>Energiebereitstellung</i>	83
5.5.2	<i>Ergebnisse</i>	84
5.6	FAHRZEUGVERGLEICH.....	85
5.6.1	<i>Vergleich der Lastpunkte und der aufzuwendenden Arbeit</i>	85
5.6.2	<i>Ergebnisse</i>	86
5.7	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	88
5.8	GEGENÜBERSTELLUNG MIT SIMULATIONSERGEBNISSEN.....	89
6	SULEV SYSTEM 3	91
6.1	VERSUCHSANORDNUNG.....	91
6.2	AUSGANGSPUNKT.....	92
6.3	KALIBRIERUNG.....	94
6.4	ANPASSUNG DER LNT REGENERATION.....	96
6.4.1	<i>Betriebspunkte</i>	96
6.4.2	<i>Grundlegende Anpassungen der LNT Regeneration</i>	97
6.4.3	<i>Regenerationszeitpunkt</i>	97
6.5	BETRIEBSSTRATEGIE IM WARMLAUF.....	98
6.5.1	<i>HD-AGR</i>	98
6.5.2	<i>Rapid Heat Up</i>	99
6.6	LNT TECHNOLOGIEFORTSCHRITT.....	100
6.6.1	<i>Untersuchte Speicherkatalysatoren</i>	100
6.6.2	<i>Ergebnisse</i>	101
6.7	ANALYSE DER SCHADSTOFFREDUZIERUNG AN DEN EINZELNEN MESSPOSITIONEN.....	102
6.7.1	<i>Emissionsverläufe</i>	103
6.7.2	<i>Ergebnisse</i>	104
6.8	BETRIEBSSTRATEGIE E-HEATER.....	105
6.8.1	<i>Energiebereitstellung</i>	105
6.8.2	<i>Ergebnisse</i>	106
6.9	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	109
6.10	GEGENÜBERSTELLUNG MIT SIMULATIONSERGEBNISSEN.....	110
7	VERGLEICH DER SYSTEME	112
7.1	HEIZSTRATEGIE.....	112
7.2	EMISSIONSERGEBNIS DES FTP75 ZYKLUS.....	112
7.3	EMISSIONSERGEBNIS DES US 06 ZYKLUS.....	115
8	ZUSAMMENFASSUNG	118

8.1	AUSBLICK.....	119
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		120
TABELLENVERZEICHNIS		123
ANHANG.....		126
A.	TESTZYKLEN	126
B.	TEMPERATURMESSSTELLEN	127
C.	AUFLISTUNG DER IN SYSTEM 1 EINGESETZTE NACHBEHANDLUNGSKOMPONENTEN.....	128
D.	SYSTEM 1	129
E.	AUFLISTUNG DER IM SYSTEM 2 EINGESETZTEN NACHBEHANDLUNGSKOMPONENTEN.....	130
F.	NH3 MISCHER.....	131
G.	VERSUCHSAUFBAU UND ERGEBNISSE DER NH3 GLEICHVERTEILUNGSMESSUNGEN.....	132
H.	SYSTEM 2	133
I.	AUFLISTUNG DER IM SYSTEM 3 EINGESETZTEN NACHBEHANDLUNGSKOMPONENTEN.....	136
J.	SYSTEM 3	137

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

D	m	Durchmesser
E_a	kJ/kmol	Aktivierungsenergie
K	$(\text{mol}\cdot\text{s})^{-1}$	Geschwindigkeitskonstante
l	m	Länge
m	kg oder mol	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	molare Masse
M_d	Nm	Drehmoment
n	mol	Stoffmenge, Molzahl
N	min^{-1}	Drehzahl
p	bar, Pa	Druck
P	W	Leistung
Q	J	Wärme
R	J/(kgK)	spezifische Gaskonstante
T	K oder °C	Temperatur
V	m^3	Volumen
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

Griechische Formelzeichen

α	–	Dosierverhältnis
λ	–	Luftverhältnis, Luftzahl

Operatoren und Bezeichnungen

d	vollständiges Differential
“	Zoll
ppm	Parts per million

Abkürzungen

BMEP:	Brake Mean Effective Pressure (Effektiver Mitteldruck)
CEB:	Combustion Emission Bench
cDPF:	katalytisch beschichteter Dieselpartikelfilter
CH ₄ :	Methan
CO:	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂ :	Kohlenstoffdioxid
CRT:	Continuos Regenerating Trap
DOC:	Diesel Oxidationskatalysator
DPF:	Dieselpartikelfilter
EO:	Engine Out
FTIR:	Fourier Transform Infrared Spectrometer
FTP:	Federal Test Procedure
HD-AGR:	Hochdruck Abgasrückführung
HSDI:	High Speed Direct Injection
kum.:	kumuliert
LNT:	Lean NO _x Trap
ND-AGR:	Niederdruck Abgasrückführung
NMHC:	Non Methane Hydro Carbons
NO:	Stickstoffmonoxid
N ₂ O:	Lachgas
NO ₂ :	Stickstoffdioxid
NO _x :	Stickoxid
NSC:	NO _x Storage Catalyst
O ₂ :	Sauerstoff
RCD:	Rapid Cool Down
SCR:	Selective Catalytic Reduction
sDPF:	Selektiv beschichteter Dieselpartikelfilter
THC:	Total Hydro Carbons
TP:	Tail Pipe
VKM:	Verbrennungskraftmaschine
VTG:	Variable Turbinengeometrie

1 Einleitung

Der Einfluss des Verkehrs auf die Luftgüte sowie das gesteigerte Umweltbewusstsein der Bevölkerung veranlasst die Gesetzgeber zur Einführung immer restriktiver Schadstoffgrenzwerte. Die Einführung der LEV3 Gesetzgebung in Amerika durch die CARB¹ stellt dabei eine große Herausforderung an die Reduzierung der Schadstoffe dar. Bis 2025 soll der Flottengrenzwert für Kraftfahrzeuge auf den SULEV30 Grenzwert abgesenkt werden, wobei die Menge der Stickoxide und Kohlenwasserstoffe (ohne Methan) auf insgesamt 30mg pro Meile limitiert wird. Die Schadstoffgrenzen müssen dabei für eine Strecke von 150.000 Meilen eingehalten werden. Zudem wird durch die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) mit der Corporate Average Fuel Efficiency (CAFE) Gesetzgebung eine steigende Flotteneffizienz vorgeschrieben. Der Verbrauch spielt somit für zukünftige Fahrzeugkonzepte eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang rücken Dieselfahrzeuge immer weiter in das Interesse der Bevölkerung und der Fahrzeughersteller. Sie zeichnen sich durch eine hohe Reichweite, einen geringen Verbrauch und geringe Rohemissionen aus. Die Einhaltung zukünftiger Gesetzgebungen und insbesondere der SULEV Grenzwerte ist ohne eine aktive Abgasnachbehandlung aber nicht möglich. Der überstöchiometrische Betrieb des Dieselmotors schließt die Verwendung eines Dreiwegekatalysators aus. Dieser Umstand macht den Einsatz verschiedener komplexer Nachbehandlungsstrategien und Betriebsarten notwendig.

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Laufe des Comet K2 Mobility Forschungsprogramms und stellt einen Auszug dessen dar. In Zusammenarbeit u.a. der AVL List GmbH wurden am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz verschiedene Konzepte zur Abgasnachbehandlung bewertet. Insgesamt sind folgend drei verschiedene hocheffektive Konzepte zu Schadstoffminderung beschrieben. Die Nachbehandlungssysteme wurden jeweils an einem Motorprüfstand aufgebaut und emissionstechnisch vermessen. Spezifische Anpassungen an den einzelnen Systemen führten zu wichtigen Erkenntnissen und ermöglichten des Weiteren eine zusätzliche Reduzierung an Schadstoffen. Im Unterschied zum System 3, waren die experimentellen Untersuchungen zu den Systemen 1 und 2 bereits vor Beginn der Arbeit abgeschlossen. Im Zuge der Diplomarbeit wurden somit die Daten der Systeme 1,2 und 3 ausgewertet und verglichen. Zusätzlich würde das System 3 aufgebaut, optimiert und experimentell vermessen. Die Ergebnisse der Untersuchungen und der Vergleich der Systeme sind in den folgenden Kapiteln dargelegt.

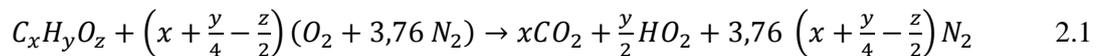
¹ Californian Air Resources Board

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die weiteren Ausführungen beschrieben. Beginnend von der Entstehung der Schadstoffe im Motor, über die Abgasnachbehandlung bis zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen soll somit ein übersichtliches Gesamtbild vermittelt werden. Im Sinne der durchgeführten Versuche beziehen sich die Beschreibungen auf Diesel PKW Anwendungen.

2.1 Schadstoffbildung im Verbrennungsmotor

In Verbrennungskraftmaschinen eingesetzte Diesel- und Ottokraftstoffe setzen sich aus Kohlenwasserstoffverbindungen zusammen und können durch die Summenformel $C_xH_yO_z$ beschrieben werden. Wie Formel 2.1 zeigt, entstehen bei einer idealen stöchiometrischen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen nur Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid CO_2 [1]. Stickstoff, welcher einen Großteil der Luft ausmacht, wird durch die Reaktion nicht verändert.



Im Gegensatz zu diesem idealen Zustand bilden sich bei der realen Verbrennung unerwünschte Nebenprodukte. Dazu gehören sowohl die Produkte der unvollständigen Verbrennung wie Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) als auch Stickoxide (NO_x) und Partikel. Das globale Luftverhältnis λ hat einen entscheidenden Einfluss auf die Konzentration der Schadstoffe. Der Zusammenhang ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

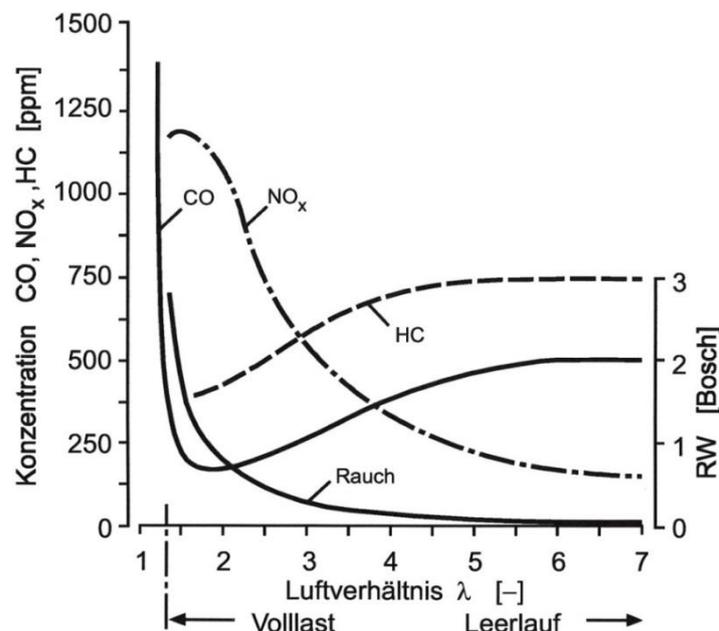


Abbildung 2.1: Konzentration der Schadstoffe im Dieselmotor über dem Luftverhältnis λ [2]

HC und CO steigen bei fettem Gemisch ($\lambda < 1$) stark an. Hohe Temperaturen und ein ausreichendes Sauerstoffverhältnis ($\lambda \approx 1,1$) begünstigen die NO_x Bildung. Magere Gemische

($\lambda > 1,2$) senken die Verbrennungstemperatur und somit die NO_x - Konzentration. Demgegenüber steigt die HC-Konzentration [3].

Die Zusammensetzung des Abgases ist stark vom verwendeten Motor und dem Betriebspunkt abhängig. Für einen Dieselmotor stellt Abbildung 2.2 exemplarisch die Gewichtsanteile der Rohemissionen dar. Trotz des geringen Anteils der Schadstoffe, verpflichtet das hohe gesundheitliche Gefahrenpotential zu einer genauen Betrachtung der Schadstoffe.

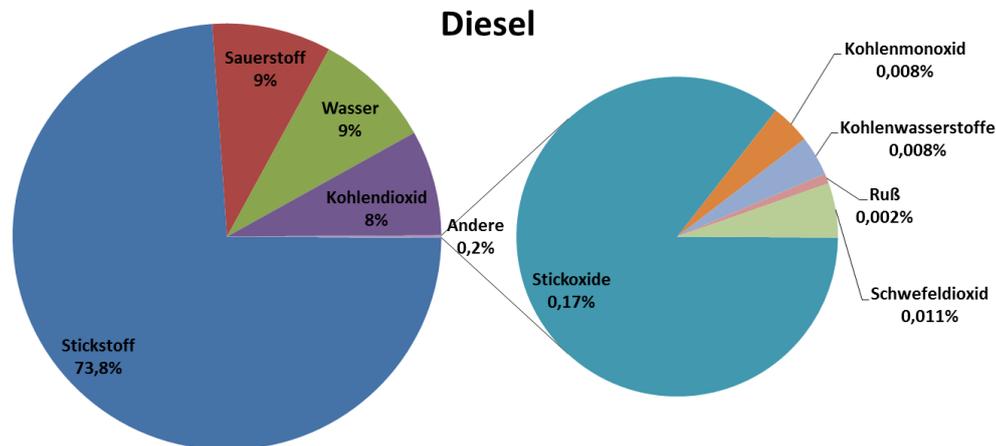


Abbildung 2.2: Zusammensetzung der Rohemissionen bei Dieselmotoren [3]

Ohne eine Abgasnachbehandlung können die niedrigen gesetzlichen Schadstoffgrenzwerte nicht eingehalten werden. Folgend wird auf die einzelnen Schadstoffe vertieft eingegangen.

2.1.1 Kohlenstoffmonoxid (CO)

Kohlenstoffmonoxid CO entsteht als Produkt der unvollständigen Verbrennung bei Luftmangel ($\lambda < 1$). Das farb- und geruchlose Gas gilt als sehr giftig. Markant ist die extrem hohe Affinität zum Hämoglobin des Blutes unter Bildung von Carboxyhämoglobin COHb, wodurch die Sauerstoffsättigung im Blut sinkt [4]. Die Klimarelevanz des Gases ist hingegen sehr gering.

CO wird bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen als Zwischenprodukt der Oxidation gebildet. Unter stöchiometrischen bzw. bei überstöchiometrischen Bedingungen kann CO theoretisch vollständig zu CO_2 oxidieren. Bei lokalem Luftmangel verbleibt der Schadstoff aber als Produkt der Zwischenreaktion. [3] Obwohl im Dieselmotor global ein mageres Gemisch vorherrscht, führt der Diesel-Einspritzstrahl zu lokalen Zonen mit Luftmangel. In diesen Zonen bleibt CO erhalten. In wandnahen Zonen ist auch eine Zunahme des Schadstoffes festzustellen. Ein extrem mageres Gemisch und niedrige Temperaturen führen in diesen Gebieten zu einer unvollständigen Verbrennung [3].

Um CO Emissionen zu vermeiden, sollen Zonen mit Luftmangel verhindert werden. Die langsame CO Oxidation setzt zudem eine möglichst vollständige Verbrennung oder eine katalytische Nachreaktion voraus [4].

2.1.2 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)

Der Sammelbegriff HC (Hydro Carbons) bezeichnet in der organischen Chemie eine Vielzahl von flüchtigen organischen Substanzen, welche auch in Naturprodukten und Kunststoffen durch deren Verarbeitung entstehen können. Diesel- und Ottokraftstoffe sind ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen. Bedingt durch die unvollständige reale Verbrennung im Motor gelangt ein kleiner Teil dieser Kohlenwasserstoffe ins Abgas. Unterschieden werden diese wie folgt: [4]

- HC Emissionen aus dem Kraftstoff bzw. aus der Kraftstoffanlage (fuel emissions)
- HC Emissionen welche nicht dem Kraftstoff entstammen wie z.B. Schmierstoffe (non fuel emissions)

HC Emissionen gehen bei der Verbrennung von C_xH_y -Brennstoffen aus Zonen hervor, welche nur teilweise oder nicht von der Verbrennung erfasst werden. Die Schadstoffe setzen sich dabei aus einer Vielzahl an Komponenten zusammen, welche entweder vollständig unverbrannt oder teiloxydiert sein können. In Europa ist die Zusammensetzung der HC derzeit noch nicht relevant, da von der Gesetzgebung die Summe aller HC Emissionen limitiert ist. In den USA ist aber auch die Zusammensetzung des Abgases von Bedeutung, da NMHC² und HCHO³ gesetzlich limitiert sind. Die bedeutendsten Quellen für HC-Emissionen in Diesel- und Ottomotoren mit Direkteinspritzung sind folgend aufgelistet [3]:

- am äußeren Rand des Einspritzstrahls liegt die Gemischzusammensetzung außerhalb des Zündbereichs. Es ist mager
- innerhalb des Einspritzstrahls ist die Zusammensetzung des Gemisches zu fett
- ein rascher Temperatur- und Druckabfall während der Expansion löscht die Flamme
- Brennstoff welcher an der Wand angelagert ist verdunstet aufgrund niedriger Temperatur zu langsam und oxidiert nicht vollständig
- erneutes Öffnen der Düsenadel nach Einspritzende erzeugt sehr große Brennstofftropfen welche nur langsam verdunsten und verbrennen
- Unverbrannter Brennstoff aus dem Sacklochvolumen der Einspritzdüse dampft aus
- Injektorleckage führt nach Abstellen des Motors und anschließenden Kaltstart zu einem Ausgasen von Brennstoff

Die gesundheitliche Auswirkung der Kohlenwasserstoffe ist sehr unterschiedlich. Während z.B. bei Alkanen keine Effekte auf den Menschen bekannt sind, wirken andere Verbindungen wie aromatische Kohlenwasserstoffe krebserregend.

2.1.3 Partikel- und Rußemissionen

In den industrialisierten Ländern Mitteleuropas beträgt der Anteil des Straßenverkehrs an den anthropogenen Partikelemissionen 20% [4]. Trotz dieses überschaubaren Anteils spielt das Motorabgas, begründet durch die Kanzerogenität der Partikel, eine besondere Rolle.

Die Rußbildung gilt als sehr komplexer Prozess, welcher durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt ist. Um die Vorgänge besser zu verstehen, kann ein vereinfachter Ablauf beschrieben werden. Durch die thermische Belastung des Kraftstoffes im Brennraum werden C-H und C-C Bindungen aufgebrochen. Dabei entstehen große Mengen an Ethin C_2H_2 , welches als Ausgangsprodukt der Rußbildung gilt. Additionsreaktionen mit Radikalen und

² NMHC – Non Methane Hydrocarbons

³ HCHO - Formaldehyd

der Zusammenstoß bzw. die Verbindung mit anderen Rußpartikeln (Koagulation) bilden Rußkeime in der Größenordnung von 2nm. Ein ausgeprägtes Oberflächenwachstum in Verbindung mit weiterer Koagulation bildet Rußpartikel mit typischen äquivalenten Durchmessern von 50nm bis 100nm [4].

Die Partikelzusammensetzung im Abgas zeigt Abbildung 2.3. Neben Ruß können zudem noch Reste des Schmieröls und des Kraftstoffes gemessen werden. Dies verschafft einen Einblick über die Herkunft der Partikel im Abgas.

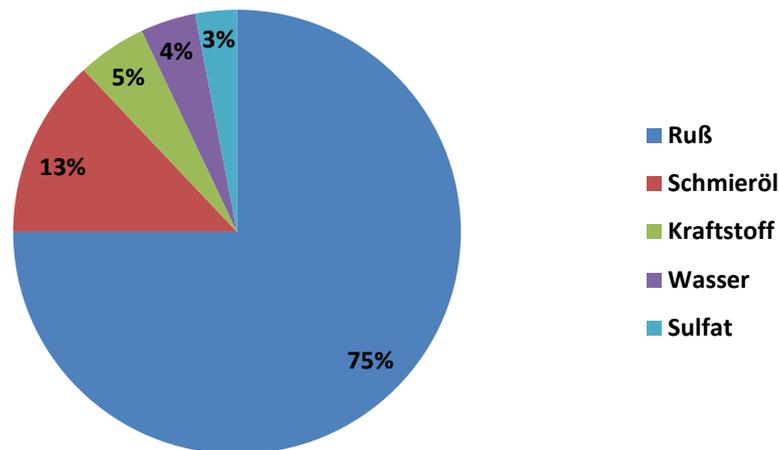


Abbildung 2.3: Typische Partikelzusammensetzung im Dieselmotor [5]

Die Bedeutung der Rußpartikel im Abgas lässt sich durch deren Funktion als lungengängige Träger krebserregender Stoffe erklären. Zu diesen gehören besonders polyzyklische Aromaten (PAH) und im Kraftstoff enthaltene Spurenstoffe, welche hauptsächlich den organisch löslichen Teil der Rußpartikel bilden. Die schädliche Wirkung auf den menschlichen Körper gilt als bestätigt, dennoch sind die genauen Mechanismen noch weitgehend unerforscht [4]. Eine primäre Maßnahme zur Reduktion der Rußpartikel liegt in deren Vermeidung. Ausreichende Verweilzeiten bei hohen Temperaturen führen zu einer Oxidation der Partikel. Weitere effektive Möglichkeiten bietet die Abgasnachbehandlung.

2.1.4 Stickoxide (NO_x)

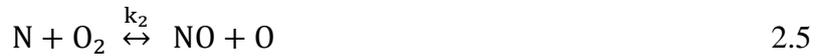
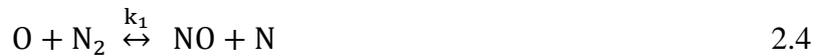
Der Sammelbegriff Stickoxide beinhaltet die Mengen der Schadstoffe NO und NO₂. Bei der realen Verbrennung nimmt im Gegensatz zur idealen Verbrennung der Stickstoff aus der Luft an der Reaktion teil. Neben einem Sauerstoffüberschuss ist zur Bildung von Stickoxiden eine hohe Temperatur notwendig. In Verbrennungsmotoren entstehen hauptsächlich Stickstoffmonoxid NO und nur geringe Mengen an Stickstoffdioxid NO₂ [5]. Unter der Einwirkung von UV-Strahlung reagiert in der Atmosphäre ein Großteil des emittierten NO zu NO₂. Dieses hochgiftige Reizgas besitzt eine geringe Wasserlöslichkeit und kann dadurch tief in die Lunge eindringen. Dort kann es die Lungenfunktion beeinträchtigen oder bei genügender Konzentration sogar zu lebensbedrohlichen Lungenödemen führen. Neben den toxischen Eigenschaften beeinflusst NO₂ auch die Ozonbildung in der Atmosphäre. Dies ist in Formel 2.2 und 2.3 dargestellt. In der Fotolyse bezeichnet $h\nu$ die Energie durch das UV-Licht und M den für die Reaktion notwendigen Stoßpartner [4].



NO kann durch 4 verschiedene Mechanismen gebildet werden. Unterschieden werden thermisches NO, Promptes NO, über N₂O gebildetes NO und Brennstoff NO.

2.1.4.1 Thermisches NO

Thermisches NO, auch bekannt als Zeldovich-NO, wird in der verbrannten Zone gebildet. Die Reaktionsmechanismen sind in den Gleichungen 2.4, 2.5 und 2.6 aufgelistet [3].



Die Geschwindigkeitskonstanten k werden dabei experimentell ermittelt. Der Zeldovich-Mechanismus gilt als einer der am besten untersuchten Reaktionsmechanismen. Dennoch besteht immer noch eine große Unsicherheit in der Wahl der Geschwindigkeitskonstanten. Tabelle 2.1 zeigt einige in der einschlägigen Literatur verwendete Werte.

Tabelle 2.1: Geschwindigkeitskoeffizienten für die Zeldovich Reaktion [3]

Reaktion i	$k_{i,r}$ [cm ³ /mol s]	Autor
k1	$1,8 \cdot 10^{14} \exp\left[-\frac{38.400}{T}\right]$	Baulch et al. (1991)
	$0,544 \cdot 10^{14} T^{0,1} \exp\left[-\frac{38.020}{T}\right]$	GRI-MECH 3.0 (2000)
	$0,76 \cdot 10^{14} \exp\left[-\frac{38.000}{T}\right]$	Heywood (1988)
	$4,93 \cdot 10^{13} T^{0,0472} \exp\left[-\frac{38.061}{T}\right]$	Pattas (1973)
k2	$6,4 \cdot 10^9 T \exp\left[-\frac{3.150}{T}\right]$	Baulch et al. (1969)
	$9,0 \cdot 10^9 T \exp\left[-\frac{3.280}{T}\right]$	GRI-MECH 3.0 (2000)
	$1,48 \cdot 10^8 T^{1,5} \exp\left[-\frac{2.860}{T}\right]$	Pattas (1973)
k3	$3,0 \cdot 10^{13}$	Baulch et al. (1991)
	$3,36 \cdot 10^{13} \exp\left[-\frac{195}{T}\right]$	GRI-MECH 3.0 (2000)
	$4,1 \cdot 10^{13}$	Heywood (1988)
	$4,22 \cdot 10^{13}$	Pattas (1973)

Die Betrachtung der Geschwindigkeitskomponenten zeigt, dass die erste Reaktion, dargestellt durch Gleichung 2.4, am langsamsten abläuft. Sie ist somit geschwindigkeitsbestimmend. Zudem weist diese Reaktion die höchste Aktivierungsenergie auf. Erst bei sehr hohen Temperaturen läuft die Reaktion schnell genug ab. Dieser Umstand verleiht der Reaktion die Bezeichnung „thermisch“. Abbildung 2.4 zeigt den Geschwindigkeitskoeffizienten $k_{1,r}$ in Abhängigkeit der Temperatur T .

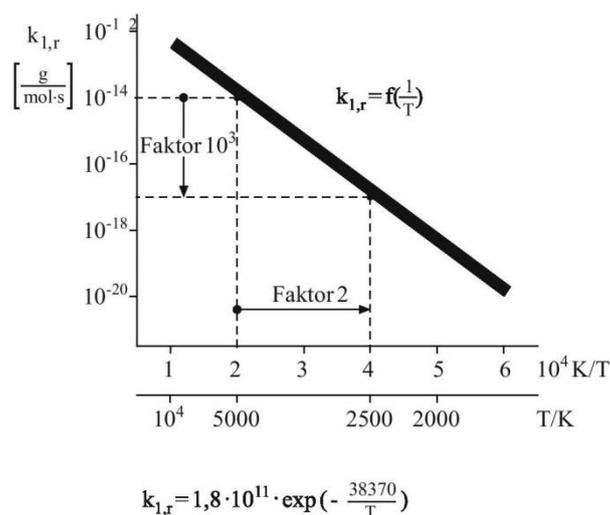


Abbildung 2.4: Temperaturabhängiger Geschwindigkeitskoeffizient der thermischen NO Bildung [3]

Eine Verdoppelung der Temperatur führt somit zu einem Anstieg der NO Bildung um den Faktor 10^3 .

2.1.4.2 Promptes NO

Die Bildung des prompten NO, erstmals beschrieben von Fenimore (1979), ist bei weitem komplexer als beim thermischen NO. Der Prozess ist sehr eng mit der Bildung des CH-Radikals verbunden, welches auf verschiedenste Weisen reagieren kann. Die Geschwindigkeitskomponenten des bestimmenden Reaktionspfades, dargestellt in Gleichung 2.10, sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet [4].



Als Vorläufer des CH-Radikals gilt das Molekül Ethin C_2H_2 . Dieses wird unter brennstoffreichen Bedingungen in der Flammenfront gebildet und ist verantwortlich für die Namensgebung „prompt“. Die geringe Aktivierungsenergie von 57 kJ/mol ermöglicht die NO Bildung bei bereits geringen Temperaturen von 1000 K. Im Vergleich dazu ist beim thermischen NO eine Aktivierungsenergie von 319 kJ/mol erforderlich [4].

2.1.4.3 Über N₂O-Mechanismus erzeugtes NO:

Magere Brennstoffgemische drängen die CH Bildung zurück und sorgen für eine geringe Menge an promptem NO. Sind zudem noch zu geringe Temperaturen für thermische NO Reaktionen vorhanden, gewinnt der N₂O Mechanismus an Bedeutung. Lachgas (N₂O) entspringt der ersten geschwindigkeitsbestimmenden Reaktion des Zeldovich-Mechanismus (siehe Kapitel 2.1.4.1): [3]



Der Stoßpartner M geht dabei aus der Reaktion unverändert hervor und senkt die Aktivierungsenergie drastisch. Durch Oxidation des N₂O entsteht NO:



Der Reaktionsmechanismus läuft bevorzugt bei hohen Drücken ab und wird durch geringe Temperaturen nur geringfügig abgebremst. Von Bedeutung ist die Reaktion bei Ottomotoren mit Magerkonzept und dieselmotorischen Verfahren mit hohen Spitzendrücken [3].

2.1.4.4 Umwandlung von Brennstoff-Stickstoff in NO:

Die Bildung von NO aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff spielt für Verbrennungskraftmaschinen so gut wie keine Rolle. Brennstoffe für den Straßenverkehr sind praktisch frei von Stickstoff [4].

2.2 Abgasrückführung

Die Abgasrückführung (AGR) stellt eine wichtige Maßnahme zur innermotorischen Reduktion der Stickoxide dar. Durch die Zufuhr von Abgas zum Frischgas wird die Sauerstoffkonzentration der Zylinderladung gesenkt. Die Flamme muss eine größere Ladungsmasse erfassen, um den Sauerstoffbedarf zu decken. Dadurch sinken die Gastemperatur und die Flammengeschwindigkeit ab [2]. Da die Bildung der Stickoxide exponentiell mit der Temperatur zusammenhängt, hat die Abgasrückführung eine Reduktion der NO_x Emissionen zur Folge. Die Absenkung der Temperatur und des Sauerstoffgehaltes erhöht allerdings den Ausstoß von Ruß.

Das Schema einer externen Abgasrückführung stellt Abbildung 2.5 dar. Bei der Hochdruck-AGR wird das Abgas vor der Turbine des Abgasturboladers entnommen und im Luftsammler der Frischluft beigemischt. Ein wichtiges Kriterium für die korrekte Funktion der HD-AGR ist ein ausreichendes Druckgefälle zwischen der Entnahmestelle vor der Turbine und der Zuführung im Saugrohr.

Beim Niederdruck AGR erfolgt die Entnahme nach dem Partikelfilter und wird der Frischluft saugrohrseitig vor dem Verdichter beigemischt. Dadurch wird eine Verschmutzung des Ansaugtraktes und des Kühlers verhindert. Da bei der ND-AGR ein höheres Frischluftvolumen durch das Abgas kontaminiert wird, verschlechtert sich das dynamische Verhalten des Motors. Eine möglichst kurze Niederdruckstrecke ist dem zufolge anzustreben [6]. Um ein erforderliches Druckgefälle in der ND-AGR aufrechtzuerhalten, kann der Druck im Ansaugkanal durch eine Drosselklappe gesenkt werden.

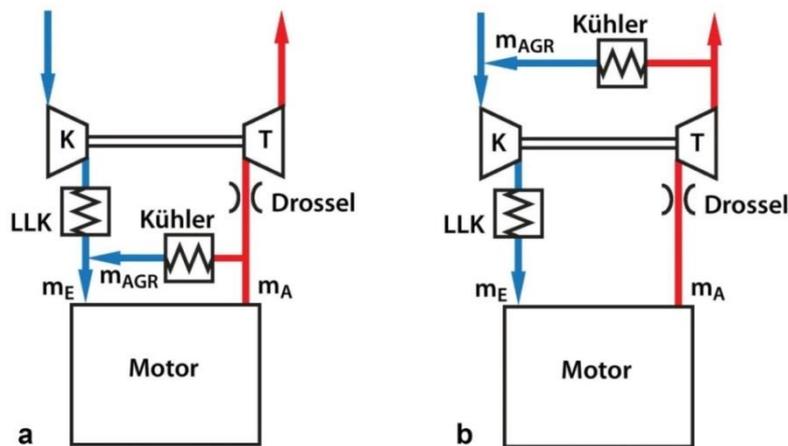


Abbildung 2.5: Abgasrückführung a Hochdruck AGR b Niederdruck AGR [2]

Die temperatursenkende Wirkung des Abgases kann durch eine Kühlung weiter verstärkt werden. Dies bewirkt eine bessere Zylinderfüllung, erfordert aber auch eine höhere Kühlleistung [2]. Ob das rückgeführte Abgas gekühlt wird oder nicht, hängt von den Anforderungen an das System ab. Eine gekühlte ND-AGR kann zum Beispiel mit einer ungekühlten HD-AGR kombiniert werden. Letzteres sorgt in niedrigen Lastpunkten und im Warmlauf für eine schnelle Aufwärmung des Ansaugsystems.

2.3 Gesetzliche Limitierung der Schadstoffemissionen

Das wachsende Verkehrsaufkommen und die dem zufolge steigenden Schadstoffmengen veranlassten die kalifornische Regierung in den 70er Jahren zu den ersten gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzen. Bald darauf folgten der Rest der USA, Europa und Japan mit ähnlichen Gesetzgebungen. Grundlage der Legislative ist ein Abgastest, welcher eine quantitative Aussage über die Emissionsmengen des Fahrzeugs liefern soll. Durchgeführt wird dieser auf einem Rollenprüfstand mit standardisierten Fahrzyklen. Infolge unterschiedlicher Fahrweisen auf den jeweiligen Kontinenten entwickelten sich im Laufe der Zeit parallel mehrere Emissionierungszyklen [5]. In den einzelnen Ländern finden zurzeit folgende Testläufe ihren Einsatz: [7]

- New European Driving Cycle (NEDC) in Europa
- Federal Test Procedure (FTP) in den USA
- Chassis dynamometer Test Cycle (JC08den) in Japan

Im Anhang A sind die wichtigsten Testzyklen detailliert dargestellt.

2.3.1 Europäische Gesetzgebung

Tabelle 2.2 zeigt die Entwicklung der Grenzwerte für die limitierten Schadstoffe in Europa.

Tabelle 2.2: PKW Abgasgrenzwerte in Europa. Euro2² gilt für direkteinspritzende Dieselmotoren. Euro 5a wird ohne Partikelanzahl PN, Euro 5b mit Partikelanzahl gemessen. [7]

Abgasnorm	Typprüfung, gültig ab	Diesel PKW						Otto PKW					
		CO	HC	NOx	HC+NOx	PM	PN	CO	HC	NOx	HC+NOx	PM	PN
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[-]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[-]
Euro 1	01.07.1992	3,16	-	-	1,13	0,18	-	3,16	-	-	1,13	-	-
Euro 2	01.01.1996	1	-	-	0,7	0,08	-	2,2	-	-	0,5	-	-
Euro 2 ²	01.01.1996	1	-	-	0,9	0,1	-						
Euro 3	01.01.2000	0,64	-	0,5	0,56	0,05	-	2,3	0,2	0,15	-	-	-
Euro 4	01.01.2005	0,5	-	0,25	0,3	0,025	-	1	0,1	0,08	-	-	-
Euro 5a	01.09.2009	0,5	-	0,18	0,23	0,005	-	1	0,1	0,06	-	0,005	-
Euro 5b	01.09.2011	0,5	-	0,18	0,23	0,005	6x10 ¹¹						
Euro 6	01.09.2014	0,5	-	0,08	0,17	0,005	6x10 ¹¹	1	0,1	0,06	-	0,005	6x10 ¹¹

2.3.2 Amerikanische Gesetzgebung

In den USA gibt es derzeit zwei Emission Standards mit entsprechend zwei unabhängigen Behörden. Einerseits die CARB (California Air Resources Board), die Behörde in Kalifornien, und zum anderen die für die restlichen Staaten zuständige EPA (Environmental Protection Agency). Den einzelnen Bundesstaaten ist es gestattet, sich der deutlich strengeren kalifornischen Gesetzgebung anzuschließen. Bis 2012 haben 15 Staaten von diesem Recht Gebrauch gemacht, sie unterliegen damit der CARB und nicht mehr der Behörde der restlichen Staaten. Beide Gesetzgebungen gelten gleichermaßen für Diesel- und Ottomotoren.

Die aktuell gültige Emissionsstufe Tier2 der EPA ist unterteilt in verschiedene Bins, ersichtlich in Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Tier2 Abgasgrenzwerte für PKW in den USA

Abgasnorm	Emissionslimits bei 50.000 Meilen / 5 Jahre						Emissionslimits bei 120.000 Meilen (Lebensdauer)					
	CO	NMOG	NOx	NMOG+NOx	PM	HCHO	CO	NMOG	NOx	NMOG+NOx	PM	HCHO
	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]
Bin 11	5	0,19	0,6	0,79	-	0,022	7,3	0,28	0,9	1,18	0,12	0,032
Bin 10	3,4	0,125	0,4	0,525	-	0,015	4,2	0,56	0,6	1,16	0,08	0,018
Bin 9	3,4	0,075	0,2	0,275	-	0,015	4,2	0,09	0,3	0,39	0,06	0,018
Bin 8	3,4	0,1	0,14	0,24	-	0,015	4,2	0,125	0,2	0,325	0,02	0,018
Bin 7	3,4	0,075	0,11	0,185	-	0,015	4,2	0,09	0,15	0,24	0,02	0,018
Bin 6	3,4	0,075	0,08	0,155	-	0,015	4,2	0,09	0,1	0,19	0,01	0,018
Bin 5	3,4	0,075	0,05	0,125	-	0,015	4,2	0,09	0,07	0,16	0,01	0,018
Bin 4		-	-	-	-	-	2,1	0,07	0,04	0,11	0,01	0,011
Bin 3	-	-	-	-	-	-	2,1	0,055	0,03	0,085	0,01	0,011
Bin 2	-	-	-	-	-	-	2,1	0,01	0,02	0,03	0,01	0,004
Bin 1	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0

Mit der Einführung der LEVIII Gesetzgebung in den Jahren 2015-2025 verschärft die CARB, die ohnehin schon sehr strengen gesetzlichen Anforderungen. Auch die Anforderungen an die

Langzeitstabilität der Abgassysteme folgen anspruchsvolleren Regeln. Die in Tabelle 2.4 angegebenen Grenzwerte gelten für PKW und Fahrzeuge mit einem Fahrzeuggewicht <8500 Pfund (3855kg) und sollen bis 150.000 Meilen bestehen bleiben.

Tabelle 2.4: LEV VIII Abgasgrenzwerte für PKW [7]

Abgasnorm	NMOG + NO _x	CO	HCHO	PM
	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]	[g/mi]
LEV160	0,160	4,2	4	0,01
ULEV125	0,125	2,1	4	0,01
ULEV70	0,070	1,7	4	0,01
ULEV50	0,050	1,7	4	0,01
SULEV30	0,030	1,0	4	0,01
SULEV20	0,020	1,0	4	0,01

Zudem ist in den CARB-Staaten ein Flottengrenzwert für den Summenwert aus NO_x+NMOG definiert (siehe Abbildung 2.6). Letzterer wird bis zum Jahr 2025 sukzessive verringert. Die Summe aus NO_x+NMOG darf für jedes einzelne Fahrzeug jedoch nicht höher als 180mg/mi sein. Um Fahrzeuge, welche höhere Emissionen als den Flottengrenzwert aufweisen zu kompensieren, ist es bereits heute nötig Niedrigstmissionsfahrzeuge zu entwickeln [7].

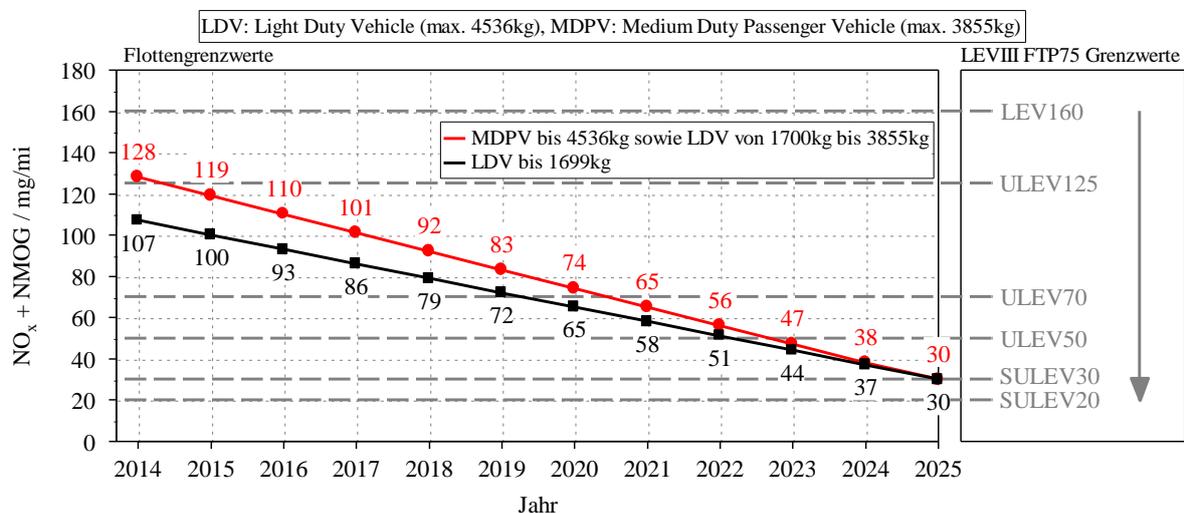


Abbildung 2.6: Flottenmittelwerte und LEV VIII Emissionskategorien [8]

Die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte wird bei beiden Gesetzgebungen durch die sogenannte Supplemental Federal Test Procedure (SFTP) ermittelt. Der SFTP setzt sich aus folgenden Einzeltests zusammen: [7]

- FTP75: Der Zyklus stellt die Fahrt innerhalb einer Stadt dar. Weitere Details sind in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

- US06: Mit diesem Zyklus wird der FTP Zyklus um Bereiche mit hoher Beschleunigung, aggressiver Fahrweise und Hochgeschwindigkeitsphasen erweitert.
- SC03: Beim SC03 wird der Gebrauch der Klimaanlage berücksichtigt. Die Umgebungstemperatur am Rollenprüfstand beträgt dabei 35°C.

Die von der EPA beauftragte National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) legt überdies Grenzwerte für den CO₂-Flottenverbrauch fest, was durch den sogenannten CAFE-Index (Corporate Average Fuel Efficiency) beschrieben wird. Der Flottendurchschnittsverbrauch von PKW und LDT (Light Duty Trucks) soll ab MY2016 bei 35,5mpg liegen, was ungefähr 6,6 L/100km entspricht. Jedem Fahrzeug wird dabei entsprechend seiner Größe ein sogenannter „Fußabdruck“ zugewiesen, mit welchem sein Grenzwert berechnet wird. Der CO₂ - Ausstoß wird dabei im FTP75 ermittelt. Zusätzlich zum CO₂-Flottengrenzwert sind aufgrund ihres hohen CO₂-Äquivalents die Lachgasemissionen auf 10mg/mile und die Methanemissionen auf 30mg/mile im genannten Testzyklus limitiert [7] [8].

2.3.3 Prüfzyklus FTP75

Der Zyklus stellt die Fahrt innerhalb einer Stadt dar und besteht aus 3 Teilen. Zur Konditionierung wird das Fahrzeug für 12 Stunden bei einer Raumtemperatur von 20-30°C abgestellt. Der Motor wird folglich kalt gestartet. Die erste Phase des Zyklus wird als Kaltstartphase bezeichnet und dauert von 0-505s. Dieser folgt eine sogenannte Stabilisierungsphase im Zeitfenster von 506-1372s. Anschließend erfolgt eine Pause für die Dauer von 540-660s, in der eine Auskühlung des Aggregats simuliert wird. In der sogenannten Warmstartphase wird der erste Teil des Zyklus bei warmem Motor wiederholt. Abbildung 2.7 zeigt ein Schema des Zyklus. Die Emissionen der 3 einzelnen Phasen werden gesammelt, analysiert und mit einem Faktor aufsummiert. Die Gewichtungsfaktoren betragen dabei 0,43 für die Kaltstartphase, 1,0 für die Stabilisierungsphase und 0,57 für die Warmstartphase. Die Berechnung der Emissionen erfolgt nach einem standardisierten Verfahren, das hier nicht weiter erörtert werden soll.

Der FTP72 beinhaltet die ersten beiden Teile des beschriebenen Zyklus und berücksichtigt nicht die Warmstartphase. Für diesen Zyklus betragen die Gewichtungsfaktoren 0,43 für den ersten Teil und 0,57 für den zweiten Teil [7].

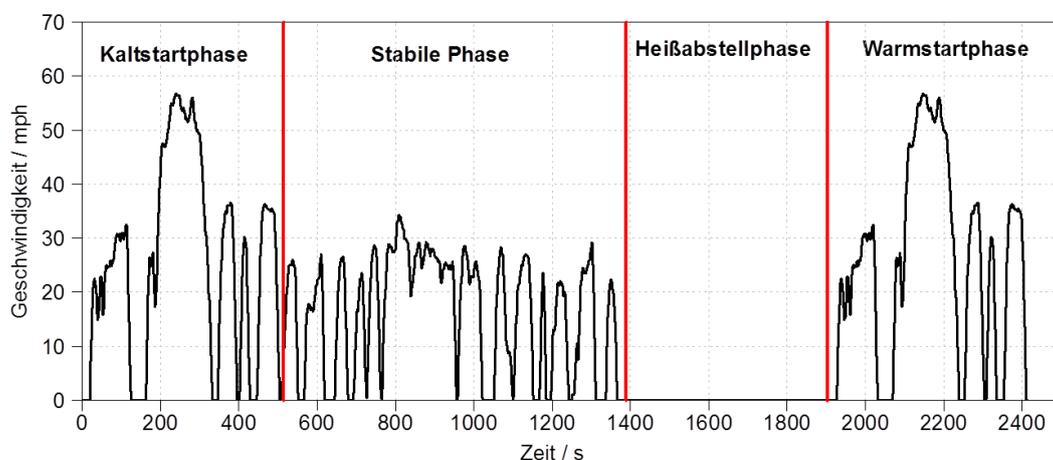


Abbildung 2.7: Geschwindigkeitsprofil FTP75 [7]

2.3.4 Anforderungen SULEV

Für die Abgasnorm Sulev30 gelten zusammengefasst folgende Grenzwerte, dargestellt in Tabelle 2.5:

Tabelle 2.5: Sulev-Grenzwerte

Abgasnorm	NMHC + NO _x	CO	HCHO	PM	N ₂ O	CH ₄
	[mg/mi]	[mg/mi]	[mg/mi]	[mg/mi]	[mg/mi]	[mg/mi]
Sulev30	30	1000	4000	10	10	30

Um die Schärfe dieser Gesetzgebung zu verdeutlichen, sind in Abbildung 2.8 verschiedene Abgasnormen dargestellt. Die Grenzwerte aus Europa sind dabei auf mg/mi skaliert. Es zeigt sich, dass insbesondere der Summengrenzwert aus NMHC+NO_x bei der Sulev-Gesetzgebung als enorme Herausforderung anzusehen ist. Bedenkt man, dass für viele Fahrzeuge mit Euro6 (ab September 2014) bereits eine aktive NO_x-Abgasnachbehandlung nötig wird, so wird klar, dass die Sulev-Gesetzgebung höchste Anforderungen an Motor und Abgasnachbehandlung stellt. Im Speziellen wären dies:

- schnelles Anspringen aller Abgasnachbehandlungskomponenten nach Kaltstart
- niedriger Kraftstoffverbrauch
- Alterungsbeständigkeit bis 150.000 Meilen

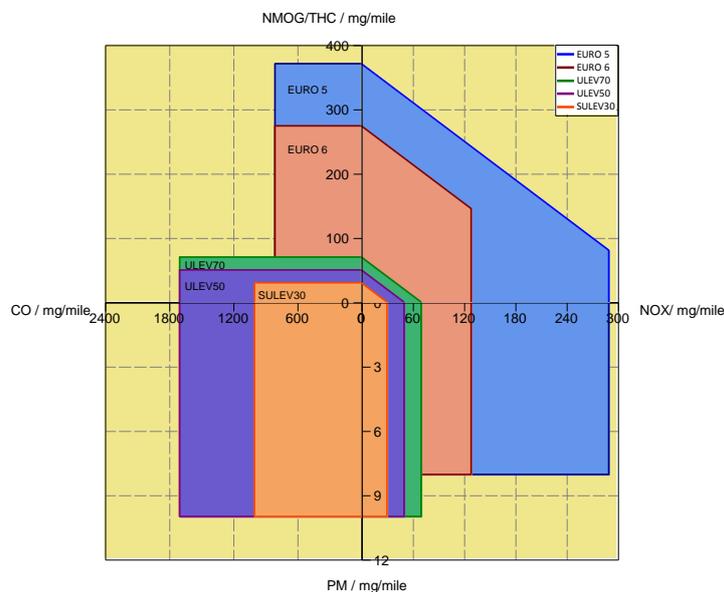


Abbildung 2.8: Vergleich unterschiedlicher Abgasnormen in USA und Europa

2.4 Abgasnachbehandlung

Durch die stetige Absenkung der Abgasgrenzwerte seitens des Gesetzgebers steigen auch die Anforderungen an eine effektive Reduktion der Schadstoffe. Um dies umzusetzen, gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten:

- innermotorische Maßnahmen
- Externe Maßnahmen bzw. Abgasnachbehandlung

Bei den innermotorischen Maßnahmen liegt das Augenmerk in der Vermeidung der Schadstoffe. Erreicht wird dieses Ziel durch eine Optimierung des Verbrennungsverlaufs. Eine weitere Möglichkeit bietet die Rückführung von Abgas (AGR) in den Brennraum.

Eine weitere und in vielen Fällen einfachere Methode zur Schadstoffreduktion bieten die externen Maßnahmen. Die Möglichkeit bereits vorhandene Motoren mit einer effektiven Abgasnachbehandlung auszustatten, reduziert den Aufwand und schafft somit einen großen Kostenvorteil. Während die Abgasnachbehandlung beim Ottomotor mit stöchiometrischer Verbrennung und einem Dreiwegekatalysator bereits seit geraumer Zeit Serientechnologie ist, rückten bei Dieselmotoren externe Maßnahmen zu Schadstoffreduktion erst später in den Fokus der Entwicklung. Die korrekte Funktion einer modernen Abgasnachbehandlung ist an eine Vielzahl von Parametern gebunden. Neben der Temperatur, dem Massenstrom und der Zusammensetzung des Rohabgases ist auch die Beschaffenheit der Katalysatoren, deren Zusammensetzung und die Betriebsstrategie ausschlaggebend. In den folgenden Kapiteln wird auf die Abgasnachbehandlung näher eingegangen.

2.4.1 Katalytische Reaktion

In einer Abgasnachbehandlung erfolgt die Reduzierung der Schadstoffe durch chemische Reaktionen. Um die Reaktionsgeschwindigkeiten zu erhöhen, werden Katalysatoren verwendet. Diese verringern die Aktivierungsenergie einer Reaktion und gehen aus dieser unverändert hervor. Zu den katalytischen Materialien gehören unter anderem Platin Pt, Rhodium Rh, Palladium Pd, Cer Ce aber auch Eisen Fe, Kupfer Cu und Kobalt Co [9]. Die Reaktion gasförmiger Edukte mit einem Feststoff als Katalysator wird als heterogen katalytisch bezeichnet. Diese findet an einem sogenannten aktiven Zentrum, dem katalytischen Partikel, statt. Wird eine Vielzahl dieser Zentren auf einer möglichst großen reaktiven Fläche verteilt, nimmt auch die Anzahl der Reaktionen zu. Aus diesem Grund wird das katalytische Material sehr dünn auf einem feinporigen Träger verteilt. In Abbildung 2.9 ist der Reaktionsmechanismus in einem Katalysator dargestellt.

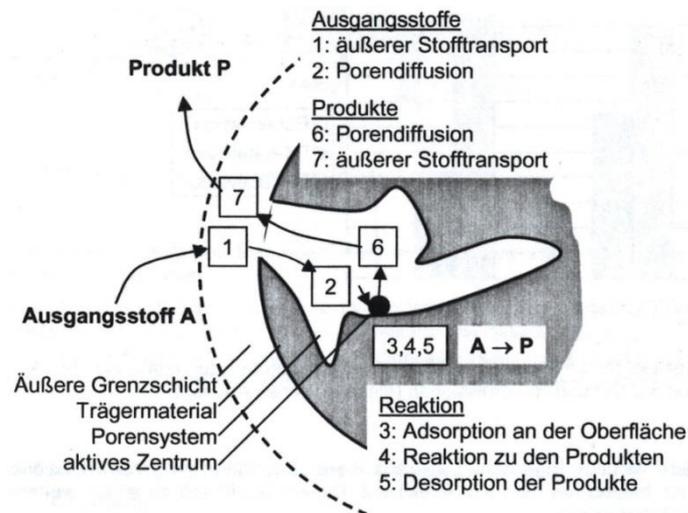


Abbildung 2.9: Reaktionsschritte einer heterogenen katalytischen Reaktion [10]

Gelangen die Reaktionspartner zum Katalysator, findet die Wechselwirkung zwischen den Teilnehmern statt. Je nach Stärke der Wechselwirkung wird zwischen physikalischer Adsorption (Physisorption) und Chemisorption unterschieden. Relativ große Abstände zwischen den Reaktionspartnern und dem Katalysator kennzeichnen die Physisorption. Es werden schwache van-der-Waals Kräfte wirksam, wobei geringe Energiemengen freigesetzt werden (ca. 50 kJ/mol). Als Beispiel kann die Speicherung von Kohlenwasserstoffen in Dieseloxydationskatalysatoren genannt werden. Bei der für die heterogene Katalyse ausschlaggebenden Chemisorption muss das Gasmolekül eine bestimmte Aktivierungsenergie überwinden, um mit dem Oberflächenmolekül in Wechselwirkung zu geraten. Ist dies der Fall werden größere Energiemengen frei (ca. 100 kJ/mol) [10]. Die Anwesenheit eines Katalysators in einer Reaktion ist verantwortlich für die Bildung einer chemisorbierten Zwischenspezies, wodurch ein alternativer Reaktionsmechanismus ermöglicht wird. Dieser Mechanismus ist durch eine reduzierte Aktivierungsenergie E_a charakterisiert. Abbildung 2.10 vergleicht die Energieverläufe einer katalytischen Reaktion mit einer nicht katalytischen Reaktion. Der dargestellte Verlauf ist prinzipiell für alle Reaktionen gültig [10].

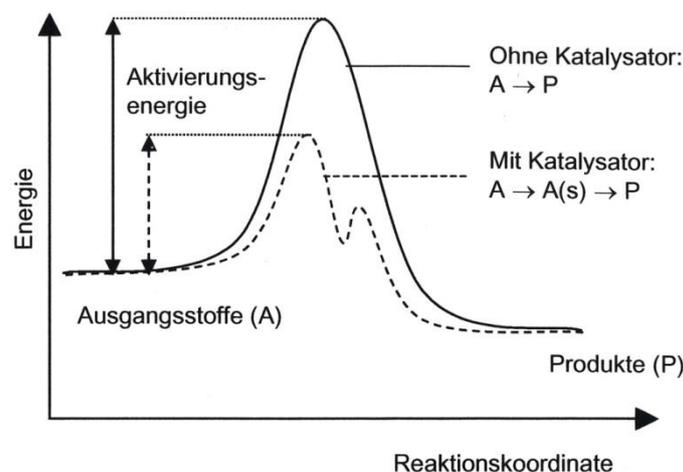


Abbildung 2.10: Energieschwelle bei katalytisch und nicht-katalytisch geführter Reaktion

Die Auswirkung der Aktivierungsenergie auf die Geschwindigkeitskonstante k zeigt die Arrhenius-Gleichung in Formel 2.10 [10]. Dabei beschreibt k_0 den Frequenzfaktor [1/s], E_a die Aktivierungsenergie [kJ/kmol], R die Gaskonstante [kJ/(kmol*K)] und T die Temperatur [K].

$$k = k_0 * \exp\left(-\frac{E_a}{R*T}\right) \quad 2.10$$

Die Gleichung zeigt, wie groß der Einfluss der Aktivierungsenergie und auch der Temperatur auf die Geschwindigkeitskonstante k ist. Bereits ein Unterschied von wenigen Grad Celsius kann für das Anspringen der Reaktion im Katalysator bestimmend sein. Der Frequenzfaktor gibt an, wie viele Reaktionen pro Zeiteinheit am Katalysator stattfinden können. Eine Erhöhung der aktiven Zentren sorgt somit auch für eine gesteigerte Anzahl an Reaktionen. Zusammenfassend wird die Reaktionsrate an den katalytischen Partikeln durch eine Absenkung der Aktivierungsenergie, eine Erhöhung der Temperatur und durch eine steigende Anzahl an reaktiven Zentren verbessert.

Die Temperatur hat auch einen starken Einfluss auf den Stofftransport vom Abgas zu den aktiven Zentren. Wie Abbildung 2.11 zeigt, wird bei tiefen Temperaturen der Umsatz von der Reaktionskinetik bestimmt. In einem mittleren Temperaturbereich geben Diffusionsvorgänge im Porengefüge die Geschwindigkeit an. Steigt die Temperatur weiter, wird die Reaktionsgeschwindigkeit vom äußeren Stofftransport dominiert [10].

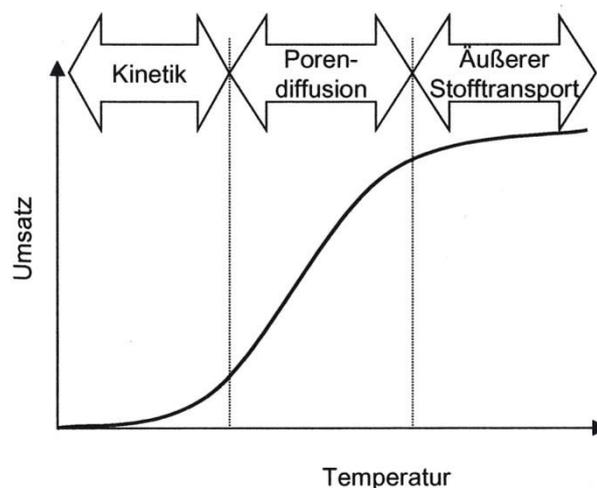
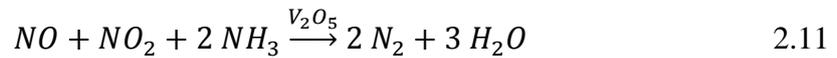


Abbildung 2.11: Abhängigkeit des Stoffumsatzes von der Temperatur [10]

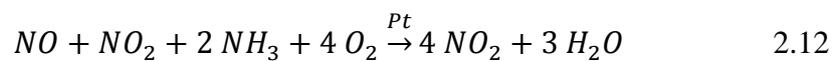
Bei Betrachtung dieser Erkenntnisse lässt sich feststellen, dass steigende Temperaturen einen positiven Einfluss auf die heterogene katalytische Reaktion haben. Dabei ist aber zu beachten, dass mit steigender Temperatur auch die Gefahr der thermischen Deaktivierung im Katalysator anwächst. Bei hohen Temperaturen werden die fein verteilten katalytischen Partikel mobil und können durch Diffusionsprozesse zusammenwachsen. Durch die sich dabei verringernde Oberfläche sinkt auch die Anzahl der aktiven Zentren. Der Katalysator verliert an Effektivität. Neben der Beschichtung greifen hohe Temperaturen auch das Trägermaterial an. Die Einhaltung der zulässigen Maximaltemperatur ist somit für die Langzeitstabilität des Katalysators sehr wichtig.

Ein weiterer ausschlaggebender Faktor eines Katalysators ist dessen Selektivität. Darunter wird eine bevorzugte Produktbildung verstanden und bezeichnet das Verhältnis zwischen der bevorzugten Reaktion und den parallel möglich ablaufenden. Beispielhaft wird ein Gasgemisch aus NO, NO₂ und NH₃ in Luft bei einer Gastemperatur von 250 Grad verschiedenen Katalysatoren ausgesetzt [10].

Bei Vanadiumpentoxid als Katalysator entstehen die Produkte N₂ und H₂O



Unter analogen Reaktionsbedingungen in Anwesenheit eines Platinkatalysators werden hingegen NO₂ und H₂O gebildet.



Diese Eigenschaft kann bei gezieltem Einsatz im Katalysator die Reduzierung eines speziellen Schadstoffes ermöglichen.

Ausschlaggebend für eine korrekte Funktion des Katalysators ist die Auswahl des Trägermaterials. Bei kleinen Einbaumaßen soll eine möglichst hohe Oberfläche erreicht werden. Ein geringer Abgasgedruck ist genauso gefordert wie ein schnelles thermisches Ansprungsverhalten und eine ausreichende mechanische Festigkeit bei geringem Preis. Optimal können diese Anforderungen von einem keramischen, stranggepressten Wabenkörper aus Corderit (2 MgO•2Al₂O₃•5 SiO₂) erfüllt werden [10]. In vereinzelt Fällen kann der Katalysatorträger auch aus einer dünnen, gewellten und gewickelten Metallfolie (FeCrAl-Legierung) hergestellt werden. Im Laufe des Herstellungsprozesses entsteht im Trägermaterial eine Wabenstruktur mit einer Vielzahl an parallelen, meist quadratischen Kanälen. Die Dichte der Zellen wird meist in der Einheit „Anzahl der Zellen pro Quadratzoll“, also cells per square inch (cps) angegeben. Übliche Werte liegen zwischen 200 und 1200 cps [10]. Um die Oberfläche in den Zellen weiter zu erhöhen, wird auf den monolithischen Grundkörper ein Trägeroxid (engl. Washcoat) aufgebracht. Diese anorganischen Substanzen besitzen eine extrem hohe spezifische Oberfläche deren Werte von 50 bis 200 m²/g reichen. Am häufigsten findet Aluminiumoxid (Al₂O₃) Verwendung [10]. Ceroxid (CeO₂) als Zuschlagstoff ermöglicht die Einspeicherung von Sauerstoff. In den vielen kleinen Poren der Trägermatrix sitzt das katalytisch aktive Substrat. Der beschichtete Monolith wird in einem metallischen Gehäuse, dem sogenannten Canning, untergebracht. Ein elastisches Zwischengeflecht aus Draht oder einer Metallmatte gleicht temperaturbedingte Ausdehnungen zwischen dem Grundkörper und dem Canning aus. Eine prinzipielle Darstellung des Aufbaus zeigt Abbildung 2.12.

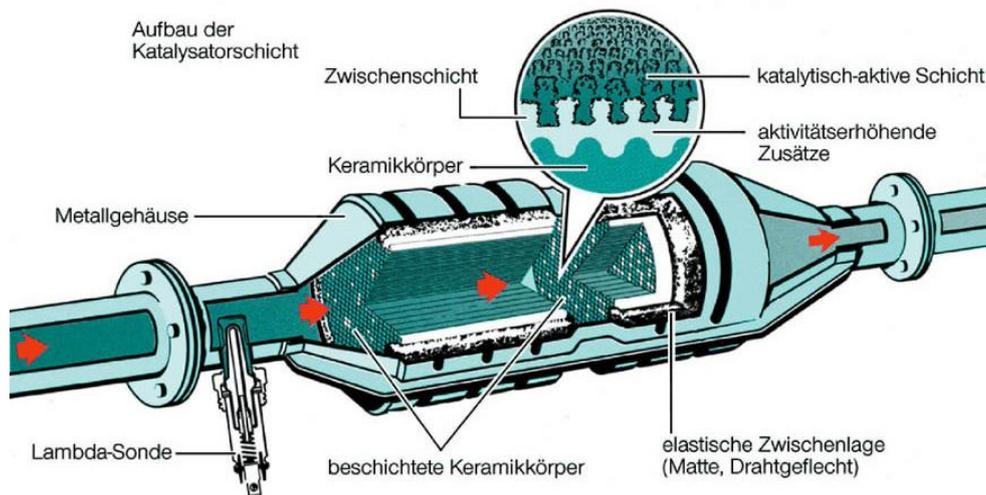


Abbildung 2.12: Prinzipieller Aufbau eines Abgaskatalysators [11]

Der Konvertierungsgrad beschreibt die Effektivität eines Katalysators. Diese Kennzahl gibt den prozentualen Umsatz der Schadstoffe wieder und ist in Formel 2.13 dargestellt [2].

$$k = \frac{\text{Eingangskonzentration} - \text{Ausgangskonzentration}}{\text{Eingangskonzentration}} \quad 2.13$$

In den meisten Fällen wird jene Temperatur, bei der eine Schadstoffkonvertierung von 50% erreicht wird, als Anspringtemperatur bzw. Light Off Temperatur bezeichnet [12]. Diese hängt vom Zustand des Katalysators (Vergiftung, Alterung), den Abgastemperaturen und der Raumgeschwindigkeit ab. Letztere ist in Formel 2.14 beschrieben und gibt den Kehrwert der Verweilzeit wieder [2].

$$RG = \frac{\text{Volumenstrom/Stunde}}{\text{Katalysatorvolumen}} [h^{-1}] \quad 2.14$$

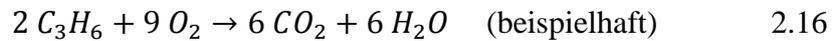
In den folgenden Kapiteln werden Nachbehandlungssysteme beschrieben, welche für den dieseltypischen $\lambda > 1$ Betrieb ausgelegt sind. Dazu gehören:

- Diesel Oxidation Catalyst (DOC)
- Dieselpartikelfilter (DPF)
- Selective Catalytic Reduction (SCR)
- Lean NOx Trap – NOx Speicherkatalysator (LNT)

2.4.2 Diesel Oxidation Catalyst (DOC)

In Dieselfahrzeugen konnte sich der Diesel-Oxidations-Katalysator (DOC) als erste serienweit eingesetzte Katalysator-Technologie durchsetzen. Die Hauptfunktion dieser Technologie

besteht in der Oxidation von Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen. Wie in den Formeln 2.15 und 2.16 ersichtlich, bilden sich dabei die ungiftigen Produkte Kohlenstoffdioxid und Wasser [10].



Die Light-Off-Temperatur des DOC liegt zwischen 170°C und 200°C und ist abhängig von der Zusammensetzung des Abgases, der Zusammensetzung des Katalysators und der Raumgeschwindigkeit in der Komponente [6]. In Abbildung 2.13 ist die Konvertierungsrate in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Es zeigt sich, dass der Umsatz an CO und HC nach Light Off rapide ansteigt. Bei höheren Temperaturen werden CO Konvertierungsraten von über 90% erreicht. Auch wenn die Kohlenwasserstoffe prinzipiell einen ähnlichen Verlauf zeigen, ist das Konvertierungsverhalten abhängig von deren Zusammensetzung. So reagieren kurzkettige Alkene bereits bei niederen Temperaturen, wohingegen für die Oxidation des Treibhausgases Methan 600°C notwendig sind [6].

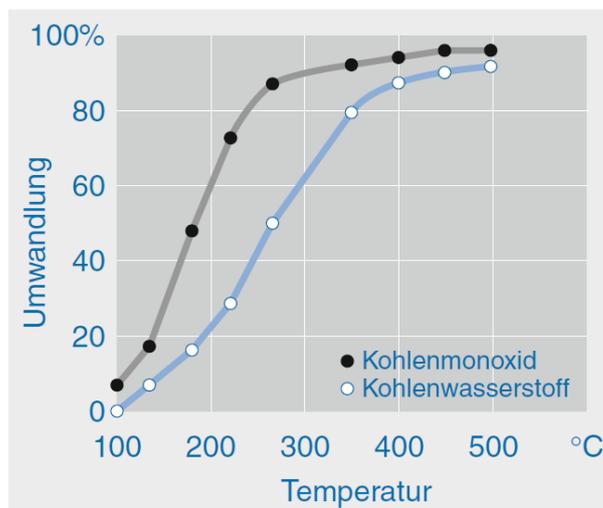


Abbildung 2.13: Abhängigkeit der CO- und HC Konvertierung von der Temperatur [6]

Auf dem meist keramischen Trägermaterial des DOC befindet sich ein Washcoat aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Ceroxid (CeO_2) und Zirkonoxid (ZrO_2). Als katalytisch aktives Material wirken die Edelmetalle Platin (Pt), Rhodium (Rh) und Palladium (Pd) [6]. Dieser komplexe Aufbau ermöglicht dem Katalysator neben der Senkung der CO- und HC-Emissionen noch weitere Funktionen: [5]

- Flüchtige Anteile der Partikel können oxidiert werden. Die Partikelmasse nimmt um bis zu 30% ab
- Die Oxidation von gezielt zugeführten HC und CO setzt exotherme Wärme frei. Dadurch kann ein früherer Light Off von SCR Systemen erreicht werden. Auch die Regeneration des Partikelfilters wird dadurch unterstützt.
- Die Oxidation von NO zu NO_2 wirkt sich vorteilhaft auf die selektiv katalytische Reduktion aus. Nähere Details sind in Kapitel 2.4.4 beschrieben

Neben den SCR-Systemen profitieren auch Speicherkatalysatoren und beschichtete Partikelfilter von einem gleichmäßigen NO zu NO₂ Verhältnis. Auch wenn die Oxidation von NO zu NO₂ für eine effektive Reduktion der Stickoxide als wünschenswert gilt, ist sie dennoch an Einschränkungen gebunden. Niedrige Temperaturen begünstigen thermodynamisch zwar die NO₂ Bildung, doch wird diese durch kinetische Vorgänge eingeschränkt. Bei hohen Temperaturen limitiert das thermodynamische Gleichgewicht den NO₂ Anteil. Ein weiterer Effekt kann im Zusammenhang mit dem CO- bzw. dem HC Umsatz beobachtet werden. Die Oxidation zu NO₂ beginnt erst bei einer vollständigen CO-Konvertierung und bei einem HC-Umsatz von 80%. Da NO₂ reaktiver als Sauerstoff ist, dient die Stickstoffverbindung vor dem Erreichen dieses Punktes als Oxidationsmittel für die CO- und HC Emissionen. Der beschriebene Zusammenhang ist in Abbildung 2.14 dargestellt [13].

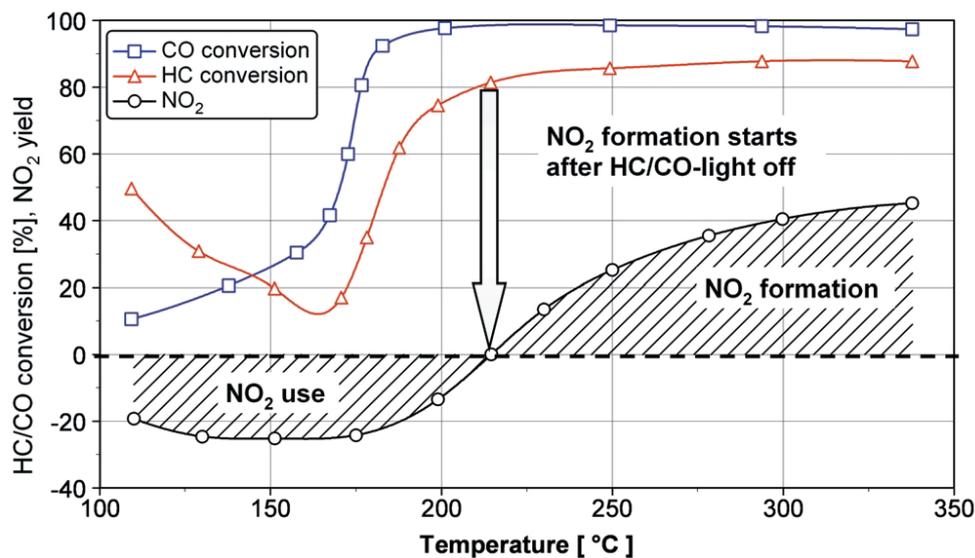


Abbildung 2.14: NO₂ Rate in Abhängigkeit der Temperatur im DOC [13]

2.4.3 Dieselpartikelfilter (DPF)

Die Bildung und der Ausstoß von feinen, für den menschlichen Organismus schädlichen Partikeln, sorgten bei Dieselmotoren für den Einbau des Partikelfilters. In einer ersten groben Unterscheidung kann der geschlossene vom offenen Partikelfilter abgegrenzt werden. Bei dem in den meisten Fällen verwendeten geschlossenen Partikelfilter besteht der Wabenkörper aus einer porösen Keramik. Siliziumkarbid bzw. Corderit bilden ein Gefüge aus meist quadratischen parallelen Kanälen. Bei einer Wanddicke von 0,3 bis 0,4 mm befinden sich 100 bis 300 Zellen auf einem Quadratzoll (100 bis 300 cpsi⁴) [6]. Damit das Abgas durch die porösen Wände geführt wird, sind die jeweils benachbarten Kanäle mit einem Keramikstopfen verschlossen. Diese Technik wird als Wandstromfilterprinzip bezeichnet und ist charakteristisch für geschlossenen Partikelfilter. Eine Prinzipskizze zeigt Abbildung 2.15. Da das gesamte Abgas filtriert wird, werden relevante Partikel in der Größenordnung von 10nm bis 1µm zu 95% zurückgehalten [5]. In einem unbeladenen Filter diffundieren die Rußpartikel beim durchströmen der Wände an die poröse Keramik und bleiben dort haften. Dieser Prozess wird als Tiefenfiltration bezeichnet. Mit zunehmender Rußbelastung setzen sich die Partikel auch an der Oberfläche der Kanalwände an. Es bildet sich eine Rußschicht,

⁴ Cells per square inch

welche für eine zusätzliche, sehr effektive Filterung sorgt. Bei offenen Partikelfiltern wird nicht der gesamte Abgasstrom durch die Wände geführt. Indem ein Teil des Abgases vorbeigeführt wird, wird die Problematik eines zu hohen Abgasgedrucks vermieden. Diesem Vorteil steht ein niedriger Abscheidegrad von 20% bis 70 % entgegen [5].

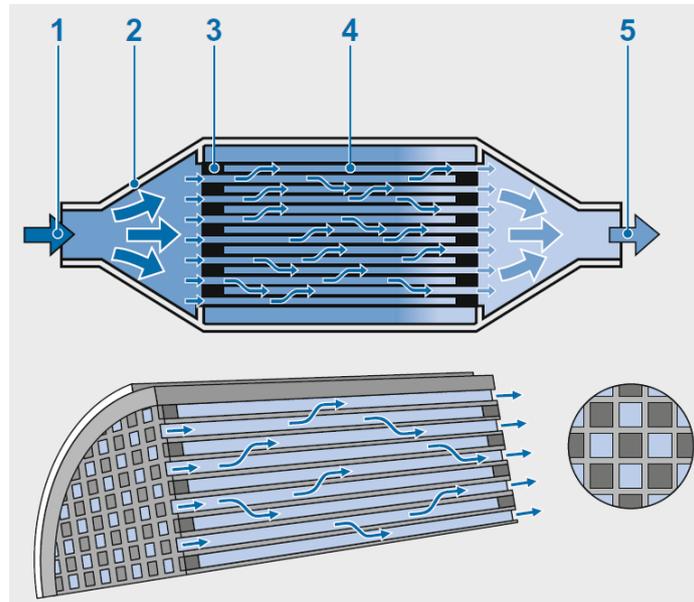


Abbildung 2.15: Funktionsweise eines keramischen Dieselpartikelfilters. 1 Abgasstrom 2 Gehäuse 3 Keramikpropfen 4 Keramikgerüst 5 gereinigtes Abgas [6]

Die stetige Rußbelastung sorgt für eine Verstopfung der Kanäle und steigert den Abgasgedruck im System. Erreicht dieser Druck einen kritischen Wert, kann ein problemloser Motorlauf nicht mehr sichergestellt werden und der Filter muss regeneriert werden. Die eingelagerten Rußpartikel werden dabei unter kontrollierten Bedingungen abgebrannt. Das Dieselabgas enthält durch den Betrieb bei Luftüberschuss so viel Restsauerstoff, dass der Ruß bereits bei Temperaturen oberhalb von 550°C abbrennt. Der Filter wird dadurch passiv gereinigt [2]. Die langen Reaktionszeiten und die hohen Temperaturen dieser Nachoxidation lassen sich durch die Zugabe von Kraftstoffadditiven absenken. Cer- und Eisenverbindungen ermöglichen eine Zündtemperatur von 450°C bis 500°C, bleiben aber als Aschen in Form von Metalloxid im Filter zurück [5]. Durch eine aktive Zwangsregeneration in Form eines Kraftstoffbrenners oder einer elektrischen Heizung kann zusätzlich extern Wärme zugeführt werden.

Mit einer platinhaltigen katalytischen Beschichtung des Partikelfilters kann auf die Beimischung der Kraftstoffadditive verzichtet werden. In diesem als cDPF (catalyzed Diesel Particulate Filter) bezeichneten Filter wird ein Teil der anfallenden Partikel permanent an der aktiven Schicht umgesetzt. Das Intervall für die gezielte Regeneration kann dadurch deutlich verlängert werden. Zusätzlich sinkt durch den Wegfall des Kraftstoffadditivs die Menge der Asche im Filter, was eine längere Nutzungsdauer ermöglicht [2]. Die Regeneration wird durch eine geänderte Motorapplikation erreicht, welche die Temperatur des Abgases erhöht. Neben der Drosselung der Ansaugluft erfolgen eine Veränderung der Einspritzparameter und eine zusätzliche Nacheinspritzung. Die Temperaturerhöhung wird dabei zum Großteil innermotorisch erzeugt und nur ein Teil wird über die Exotherme im Katalysator gebildet [2]. In der Praxis führen innermotorische Maßnahmen bei der Regeneration von Partikelfiltern zu ungewünschten Nebeneffekten wie unruhigem Motorlauf und einem Anstieg der CO, HC und Partikelemissionen. Als Alternative zu den zyklischen Regenerationen besteht die

Möglichkeit des kontinuierlichen Rußabbrandes. Beim sogenannten CRT⁵ Filter System bildet ein Platinkatalysator vor dem Partikelfilter NO₂. Das Nebenprodukt der katalytischen Reaktion verringert wie in Abbildung 2.16 dargestellt die Konzentration der Ruß-, Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemissionen.

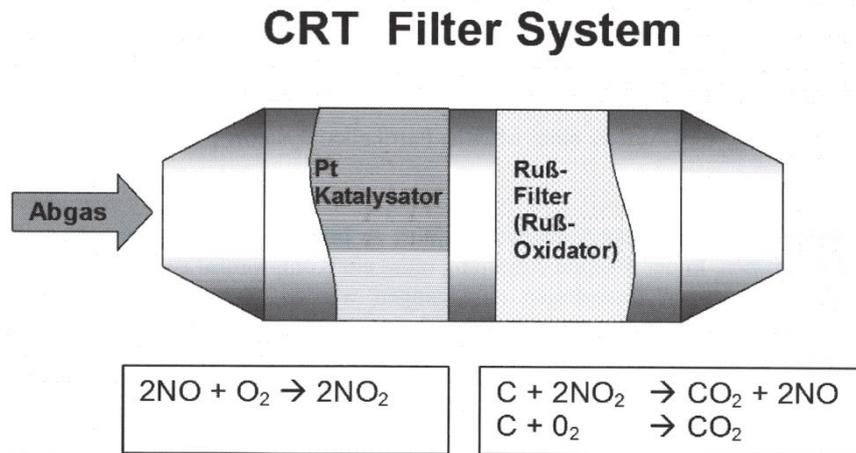


Abbildung 2.16: CRT System [2]

Für eine optimale Funktion des Systems muss zwischen emittierten Ruß und emittierten NO_x ein bestimmtes Verhältnis eingehalten werden.

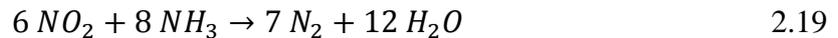
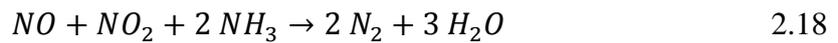
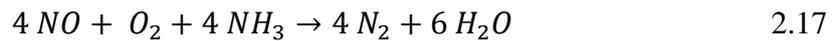
Eine selektiv katalytische Beschichtung des Partikelfilters ermöglicht zusammen mit einem geeigneten Reaktionsmittel die selektive Reduktion der Stickoxide. Eine solche Komponente wird als sDPF⁶ bezeichnet. Die genauen Mechanismen zur Reduktion der Stickoxide sind im Kapitel 2.4.4 dargestellt.

2.4.4 Selective Catalytic Reaction (SCR)

Als wirkungsvolle Maßnahme zur Reduktion der Stickoxide hat sich die selektive Katalytische Reduktion (SCR) erwiesen. Die Nachbehandlung hat dabei keinen Einfluss auf den Motorbetrieb und sorgt bei gleichbleibendem Kraftstoffverbrauch für Konvertierungsraten von bis zu 90% [5]. Als grundlegendes Prinzip bei einem SCR System gilt die selektive Reduktion der Stickoxide unter Zuhilfenahme eines geeigneten Reduktionsmittels. Dieser Vorgang geschieht an einem Katalysator in Gegenwart von Sauerstoff. Ausschlaggebend ist hierbei der Begriff „selektiv“: die Oxidation des Reduktionsmittels bevorzugt den gebundenen Sauerstoff der Stickoxide und nicht den reichlich im Abgas vorhandenen Luftsauerstoff [6]. Angesichts seiner hohen Selektivität hat sich das Gas Ammoniak NH₃ bei SCR Systemen durchgesetzt. In Kombination mit diesem Reduktionsmittel ergeben sich die Reaktionsgleichungen 2.17 bis 2.19:

⁵ Continuous Regenerating Trap

⁶ Selektiver beschichteter Dieselpartikelfilter



Da NH_3 mit dem Luftsauerstoff erst bei Temperaturen ab 550°C reagiert, liegt die Selektivität des Reduktionsmittels bei fast 100%. Da in den meisten Fällen die Reaktionen 2.17 und 2.18 dominieren, lässt sich ein NH_3 Bedarf von 0,3% bis 1% in Bezug auf die Kraftstoffmenge errechnen [5]. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist es sehr problematisch das toxische Reizgas Ammoniak im PKW zu speichern. Vorläufersubstanzen, aus denen das Reaktionsmittel in einfacher Weise gebildet werden kann, bieten die Möglichkeit einer sicheren und unbedenklichen Speicherung. Durchsetzen konnte sich in diesem Zusammenhang die Substanz AdBlue®, eine wässrige Lösung mit einem Harnstoffanteil von 32,5 %. Harnstoff (NH_2)₂CO findet hauptsächlich Einsatz als Düngemittel und ist bei guter Wasserlöslichkeit chemisch stabil.

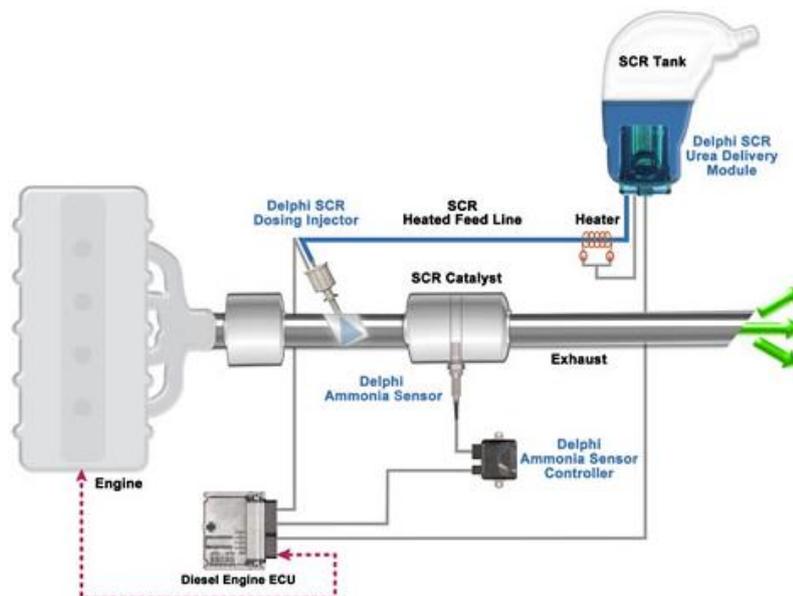


Abbildung 2.17: Schema eines SCR Systems [14]

Die NH_3 Bildung findet wie in Abbildung 2.17 dargestellt vor dem SCR-Katalysator statt. Dabei wird die wässrige Lösung in den Abgasstrang eindosiert und kann dort vollständig verdampfen. Anschließend erfolgt bei Temperaturen über 250°C die zweistufige Bildung von Ammoniak durch eine Thermolyse und eine Hydrolyse: [4]



Isocyansäure HNCO wird bei der Reaktion als Zwischenprodukt gebildet. Sinken die Temperaturen nach der Thermolyse unter 250°C , können durch Nebenreaktionen unerwünschte feste Ablagerungen gebildet werden. Unverbrauchtes NH_3 kann im SCR-Katalysator begrenzt eingespeichert werden, wobei die Speicherfähigkeit mit steigender Temperatur abnimmt. Je nach katalytischem Substrat erfolgt die Reduktion in verschiedenen

Temperaturfenstern. Neben verschiedenen Zeolithen findet hauptsächlich Vanadiumpentoxid als aktive Substanz Einsatz im SCR [4]. Wie Abbildung 2.18 zeigt, sind im Temperaturbereich zwischen 250°C und 450°C Reduktionsraten von über 90% erreichbar.

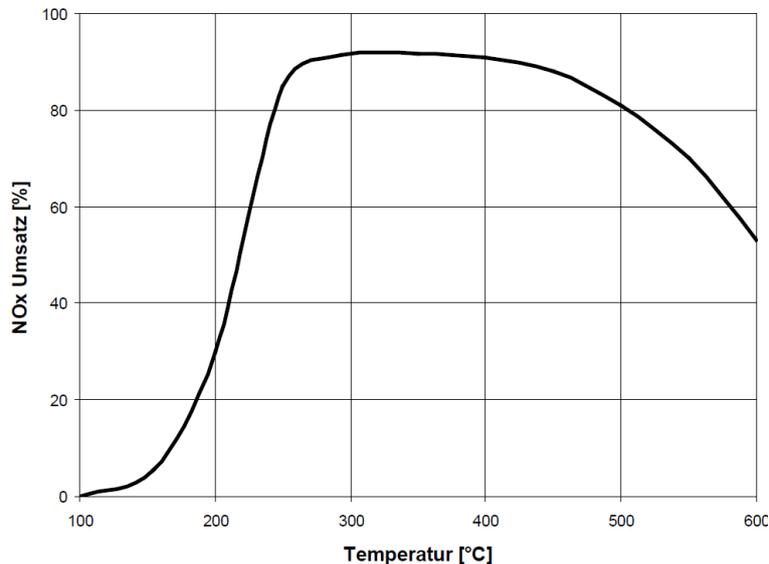


Abbildung 2.18: NO_x Umsatz eines SCR Systems in Abhängigkeit der Temperatur [4]

Neben der Temperatur und der Raumgeschwindigkeit spielen für die Reduktionsraten im SCR Katalysator noch weitere Parameter eine wichtige Rolle:

- Gespeicherte NH₃ Menge
- Konzentration der Stickoxide im Abgas C_{NO_x}
- Molares Verhältnis zwischen NO₂ und NO

Ausschlaggebend ist hierbei besonders das Verhältnis zwischen NO₂ und NO. Bei Temperaturen unter 300°C überwiegt die Reaktionsgleichung 2.18. Wie in Abbildung 2.19 dargestellt, ermöglicht ein NO₂/NO Verhältnis von 1 bereits bei 180°C Umsatzraten von 90%. Ein sinkender NO₂ Anteil hat eine Verschlechterung des NO_x Umsatzes zur Folge. Um zufriedenstellende Reduktionsraten zu erreichen, muss die Katalysatortemperatur weiter gesteigert werden, womit ein zusätzlicher Mehraufwand verbunden ist. Steigt hingegen der NO₂ Anteil über 50%, wird die Bildung des klimarelevanten Lachgases N₂O begünstigt. Auch dieser Trend ist nicht erwünscht [4].

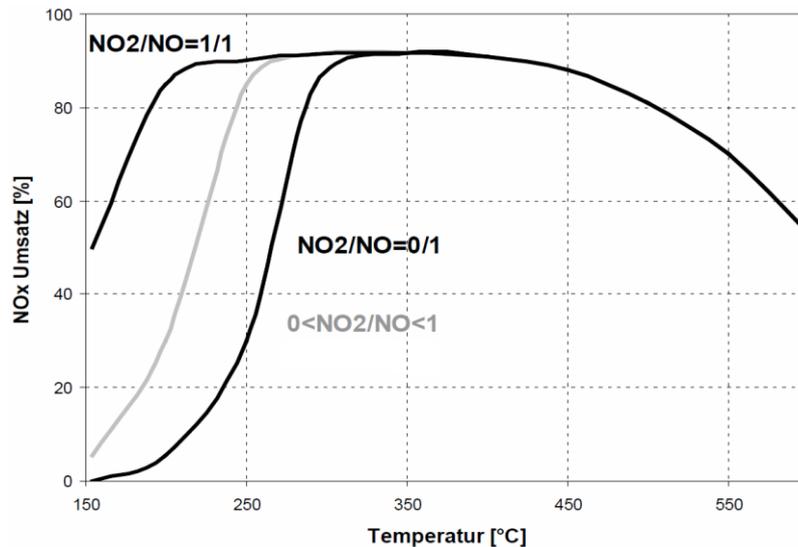


Abbildung 2.19: Auswirkung des NO₂/NO Verhältnisses auf die Umsatzrate im SCR Katalysator [4]

Eine optimale SCR Funktion kann bei einem NO₂/NO Verhältnis von 1 erreicht werden. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Konvertierung der Stickoxide stellt die Menge des eidosierten AdBlue dar. Wie in der Reaktionsgleichung 2.22 abgebildet, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen den reduzierten Stickoxiden und der eingebrachten NH₃ Menge. Dieser Zusammenhang wird als Dosierverhältnis α bzw. als Feed-Verhältnis bezeichnet. Der molare NH₃-Äquivalent wird mit dem molaren Anteil der Stickoxide im Abgas im Verhältnis gesetzt: [5]

$$\alpha = \frac{\dot{n}_{NH_3}}{\dot{n}_{NO_x}} = \frac{2 \dot{n}_{Harnstoff}}{\dot{n}_{NO_x}} \quad 2.22$$

Ein Dosierverhältnis von $\alpha = 1$ würde somit theoretisch eine vollständige NO_x Reduktion bedeuten. Praktisch wird dies aber aus mehreren Gründen nicht erreicht: [5]

- Eine unzureichende Homogenisierung der Vorläufersubstanz führt zu einem ungleich Verteilten NH₃ im SCR System
- Bei einer unvollständigen Hydrolyse kann es zur Bildung von Abscheidungen kommen
- Zu hohe Temperaturen im Abgas führen zur Oxidation des NH₃ mit Luftsauerstoff
- Bei zu großem NO₂/NO_x Verhältnis reagiert das NO₂ gemäß der Reaktionsgleichung 2.19

Ein Dosierverhältnis von $\alpha > 1$ führt zur NH₃ Einspeicherung im Substrat des SCR. Ist die Speicherfähigkeit erschöpft, verlässt nicht umgesetztes NH₃ den Katalysator. Dieser Umstand wird als NH₃ Schlupf bezeichnet und ist aufgrund der geringen Geruchsschwelle des Reizgases von 15 ppm nicht erwünscht.

Trotz der Effektivität des Systems kann die hohe Komplexität und der teure Aufbau als Nachteil bewertet werden. Im Fahrzeug muss zusätzlich die Dosiereinheit und ein zusätzlicher Tank für das Reduktionsmittel untergebracht werden. Dieser muss so groß sein, dass die Befüllung für ein ganzes Serviceintervall reicht. Zusätzlich ist ein Heizsystem notwendig, da

die Harnstofflösung bereits bei -11°C gefriert [6]. Bei der Auslegung der Einspritzung ist darauf zu achten, dass der Harnstoff über den gesamten Querschnitt des Katalysators gleichmäßig verteilt ist. Ist dieser nicht gut mit dem Abgas vermischt, sinken die NO_x Umsatzraten und es steigt der NH_3 Schlupf.

2.4.5 NO_x -Speicher-katalysator

Bei Luftüberschuss können Stickoxide am Katalysator nicht ohne ein weiteres Reduktionsmittel reduziert werden. Ist der zusätzliche Aufwand des SCR Systems nicht erwünscht, bietet sich die temporäre Einspeicherung der Stickoxide im Katalysator an. Solche Speicherkonzepte werden als NSC (NO_x Storage Catalyst), LNT (Lean NO_x Trap) oder allgemein als NO_x -Speicher-katalysatoren bezeichnet

2.4.5.1 Grundlagen

Im Gegensatz zum SCR Katalysator, welcher die Schadstoffe kontinuierlich reduziert, erfolgt die Schadstoffminderung im Speicher-katalysator in zwei sich abwechselnden Phasen:

- Beladungsphase: In Betriebsbereichen mit magerer Abgaszusammensetzung erfolgt die Einspeicherung der Stickoxide
- Regenerationsphase: Eingespeicherte Stickoxide werden im fetten Abgas zu H_2O , N_2 und CO_2 reduziert

Die Einspeicherung wird durch eine spezielle Beschichtung ermöglicht. Die dort eingesetzten Materialien haben die Neigung mit Stickoxiden feste, aber dennoch reversible Bindungen einzugehen. Dazu zählen Oxide und Karbonate der Alkali- und Erdalkalimetalle. Innerhalb dieser Gruppen weisen Bariumverbindungen ein erwünschtes Temperaturverhalten auf. Die im Einspeichervorgang gebildeten Nitrate sind bis 600°C weitgehend stabil [15]. Abhängig von den Reaktionsbedingungen kann Barium in Form von BaO , BaOH_2 und BaCO_3 vorliegen. Die Anwesenheit von CO_2 und H_2O führt jedoch bereits bei geringen Temperaturen zur Bildung von BaCO_3 weshalb weiterhin von dieser Speicherkomponente ausgegangen werden kann [16]. Neben der Speicherkomponente kann die katalytische Beschichtung noch aus weiteren aktiven Elementen zusammengesetzt werden: [15]

- Platin Pt begünstigt die Oxidation von NO zu NO_2 . Zudem wird auch die katalytische Zersetzung von gespeicherten Nitraten ermöglicht
- Rhodium Rh spielt eine wichtige Rolle bei der Reduktion der Stickoxide
- Ceroxid CeO_2 ermöglicht eine Sauerstoffeinspeicherung bei magerer Abgaszusammensetzung. Während der Regenerationsphasen ($\lambda < 1$) kann der eingespeicherte Sauerstoff den Reaktionen zur Verfügung gestellt werden.

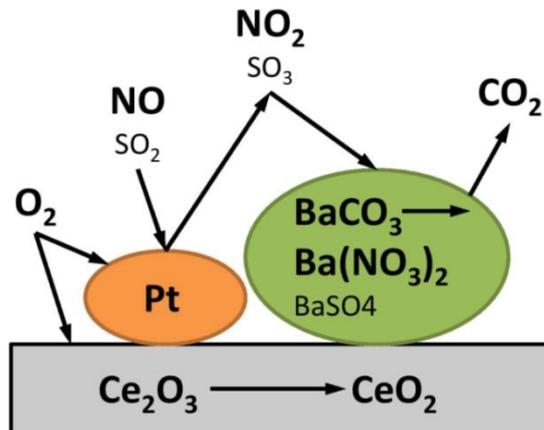
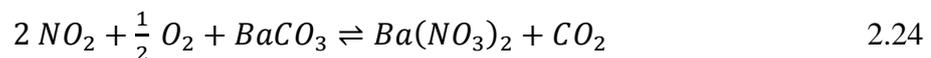


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung des NO_x Einspeichervorgangs im LNT

In Abbildung 2.20 ist die Einspeicherung der Stickoxide stark vereinfacht dargestellt. Der Mechanismus erfolgt bei der im Dieselmotor typischen mageren Verbrennung ($\lambda > 1$). Da NO nicht direkt eingespeichert werden kann, erfolgt an der katalytischen Platinbeschichtung die Oxidation von NO nach NO_2 :



In der Ceroxidbeschichtung wird zeitgleich Sauerstoff eingespeichert. Vorhandenes und oxidiertes NO_2 bilden zusammen mit O_2 und der aktiven Bariumcarbonatbeschichtung die stabile Nitratverbindung: [15]



Eine optimale Einspeicherung kann im Temperaturfenster zwischen 250°C und 450°C erreicht werden. Bei Unterschreitung des Intervalls behindert eine sehr langsame Oxidation von NO zu NO_2 die Funktion des LNT. Oberhalb von 450°C ist die Stabilität der Nitrats nicht mehr gewährleistet [5]. Neben der Einspeicherung im genannten Temperaturfenster besitzt die Beschichtung im LNT auch die Möglichkeit Stickoxide bei niedrigen Temperaturen bis 100°C zu binden. Diese als Oberflächenspeicherung bekannte Eigenschaft ist zwar begrenzt, reicht in den meisten Fällen aber aus, um im Warmlauf den Durchbruch der Stickoxide zu verhindern. Mit zunehmender Nitratbildung nimmt die Fähigkeit Stickoxide im Bariumcarbonat zu binden ab. Dieses Phänomen kann durch das Shrinking Core Modell beschrieben werden. Mit $81,6 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ist das spezifische Volumen von Bariumnitrat weitaus höher als beim Bariumcarbonat mit $45,9 \text{ cm}^3/\text{mol}$ [15]. Die Nitrats liegen deshalb in einer dichteren Form vor als die Carbonate. Abbildung 2.21 stellt diese Situation schematisch dar.

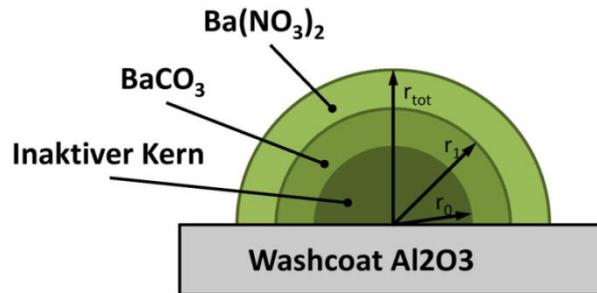


Abbildung 2.21: Shrinking Core Modells [17]

Mit zunehmender NO_x Einspeicherung bildet sich um den Bariumcarbonatkern eine sehr dichte Nitratschale, welche zunehmend die Diffusion der Reaktionsteilnehmer hemmt. Der Kern der Speicherkomponente wird somit inaktiv und Stickoxide können nur noch schwer eingespeichert werden.

Um den Grad der Beladung festzustellen, bieten sich einerseits modellgestützte Verfahren oder NO_x Sensoren hinter dem Katalysator an. Anhand der NO_x Menge im Abgas lässt sich der aktuelle Füllstand des LNT ermitteln und die Regeneration einleiten. Bei diesem Vorgang werden unter Sauerstoffmangel die in den Nitraten gespeicherten Stickoxide ausgelagert und in einem zweiten Schritt an geeigneten Katalysatoren zu unschädlichen Abgasen konvertiert. Als Reduktionsmittel dienen die durch motorische Verbrennung bereitgestellten Komponenten CO , HC und H_2 .

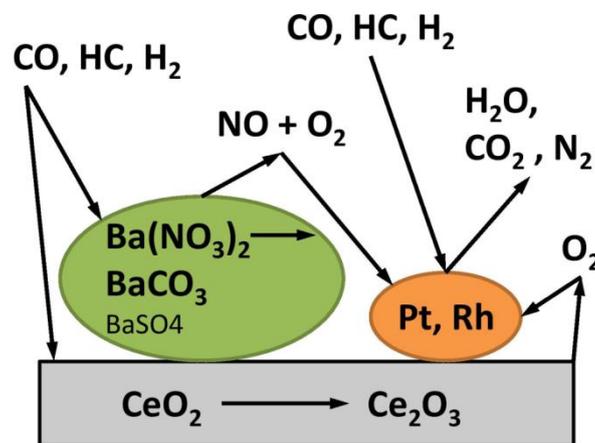
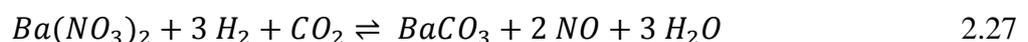
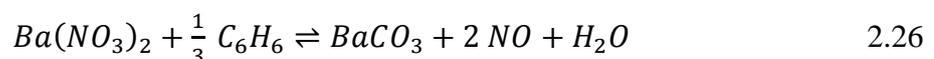
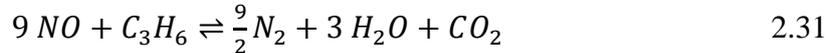


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der Regeneration im LNT

Abbildung 2.22 zeigt schematisch den Regenerationsprozess. Die chemischen Reaktionen, welche für die Auslagerung der Stickoxide sorgen, sind sehr komplex. Beispielfhaft können die Reaktionsgleichungen 2.25, 2.26 und 2.27 betrachtet werden: [15]



Anschließend werden die freigesetzten Stickoxide an der Edelmetallbeschichtung reduziert:

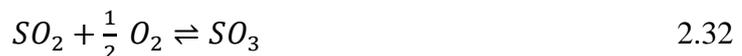


Der reichlich vorhandene Sauerstoff im Magerbetrieb ermöglicht nicht nur die Einspeicherung der NO_x , sondern schafft auch die Voraussetzung für die Oxidation von HC und CO. Die Sauerstoffeinspeicherung am Cer stellt auch während der Fettphase genügend O_2 bereit, um überschüssige Reduktionsmittel (HC, CO und H_2) zu oxidieren. Während der Regenerationsphase können somit beinahe alle Schadstoffe eliminiert werden.

Der Konvertierungsgrad eines Speicherkatalysators liegt zwischen 50% bis 80% und ist hauptsächlich abhängig von der Edelmetallbeladung, Zusammensetzung und Temperatur des Abgases und der Raumgeschwindigkeit [5].

2.4.5.2 Katalysatorvergiftung

Eine zentrale Problematik bei Speicherkatalysatoren ist deren Schwefelempfindlichkeit. In Kraft- und Schmierstoffen gebundener Schwefel oxidiert während der Verbrennung zu SO_2 . Die hohe Affinität zu den Bariumverbindungen sorgt für die Bildung von Sulfaten, welche eine höhere Bindungsstärke als Nitrate besitzen: [4]



Potentielle Speicherplätze werden wie in Abbildung 2.23 dargestellt besetzt, womit die Leistungsfähigkeit des LNT mit der Zeit abnimmt [5].

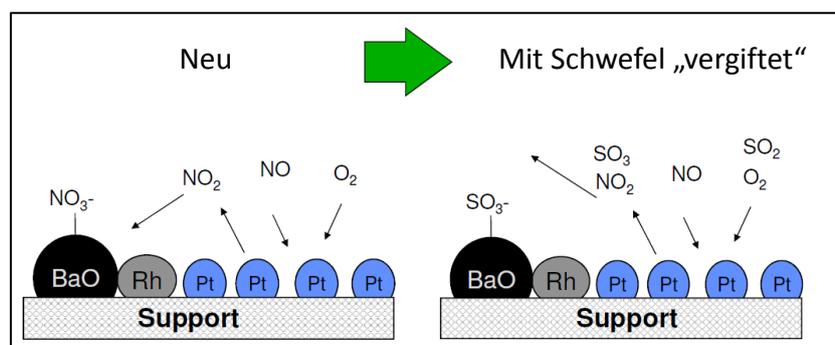


Abbildung 2.23: Auswirkung von Schwefel auf die aktiven Komponenten im LNT [18]

Da bei einer üblichen Regeneration die Sulfate nicht ausgelagert werden, ist auch bei der Verwendung eines schwefelfreien Kraftstoffes (10ppm) in definierten Abständen (500-2500km) eine Desulfatisierung (Schwefelregeneration) vorzusehen. Der Katalysator wird dabei in einem Zeitraum von mehreren Minuten Temperaturen von über 650°C ausgesetzt. Wiederkehrende Pulse mit fettem Abgas lagern den eingespeicherten Schwefel aus [5].

2.4.5.3 Alterung

Bei der Regeneration des Partikelfilters und der Entschwefelung des Speicherkatalysators wird dieser sehr hohen Abgastemperaturen ausgesetzt. Um eine starke Alterung der Komponente zu verhindern, ist darauf zu achten, dass die Temperaturen in der Nachbehandlungskomponente 650°C nicht überschreiten [4]. Ist dies der Fall, gehen die aktiven Zentren des Katalysators Bindungen untereinander oder mit dem Washcoat ein. Dadurch kann weniger NO zu NO₂ oxidieren worauf die Menge des eingespeicherten Stickoxides abnimmt. Abbildung 2.24 stellt den Alterungsprozess schematisch dar.

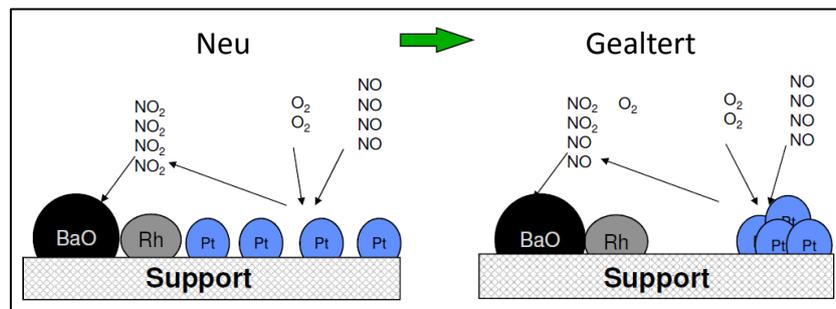


Abbildung 2.24: Alterung der Speicherkatalysators [18]

2.4.6 Elektrisch beheizter Katalysator

Der Kaltstart eines Motors führt im Gegensatz zu einem Heißstart zu einem verstärkten Ausstoß von Schadstoffen. Die zu geringe Temperatur der Abgasnachbehandlung führt zu einer stark reduzierten Konvertierungsrate. Um den Katalysatoren nach dem Kaltstart zusätzliche Wärme zuzuführen, stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung. Eine Möglichkeit bietet der elektrisch beheizte Katalysator (EHC) welcher auch als E-Katalysator (E-Kat) bezeichnet werden kann. Das System besteht wie in Abbildung 2.25 dargestellt aus einem Heizelement, gefolgt von einem Vorkatalysator und einem Hauptkatalysator.

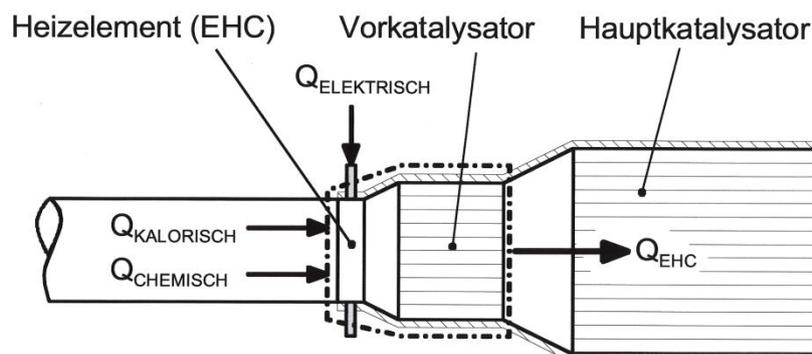


Abbildung 2.25: Aufbau und Energiebilanz einer EHC-Kaskade [2]

Das Heizelement dient als „Zünder“ um die Oxidation von CO und HC im Vorkatalysator möglichst schnell zu starten. Die von der Heizung und dem Katalysator freigesetzte Wärmemenge bringt den nachgeschalteten Hauptkatalysator innerhalb kürzester Zeit auf Betriebstemperatur. Die vom elektrisch beheizten Katalysator abgegebene Energiemenge Q_{EHC} setzt sich aus folgenden Wärmemengen zusammen: [2]

- $Q_{\text{Elektrisch}}$: vom Heizer an das Abgas abgegebene Wärmemenge abzüglich der im Heizelement gespeicherten Wärme
- $Q_{\text{Kalorisch}}$: Verbrennungswärme aus dem Motor abzüglich Wärmeverluste
- Q_{Chemisch} : Reaktionswärme aus der CO- und HC-Oxidation

Ein System, welches auf den Vorkatalysator verzichtet und nur aus einem Heizelement aufgebaut ist, wird als E-Heater bezeichnet. Die von diesem Bauteil abgegebene Energiemenge entspricht jener des elektrisch beheizten Katalysators vermindert um die chemische Wärmemenge.

2.4.7 Wechselwirkung der Abgasnachbehandlungssysteme

In einem Abgassystem sind die einzelnen Komponenten hintereinander angeordnet. Jede Komponente hat thermische und physikalisch-chemische Auswirkungen auf die darauf folgende. Um eine hohe Effektivität der Abgasanlage zu erreichen, stellt die Strategie der Anordnung und der Betriebsart des Gesamtsystems Motor-Abgasnachbehandlung eine große Herausforderung dar.

Änderungen der Abgastemperatur führen zu einer verzögerten Temperaturänderung in den Katalysatoren. Jede Komponente wirkt wie ein thermischer Tiefpass mit einer Zeitkonstante von ca. 10-100s [5]. Zur gleichen Zeit wird auch Wärme über die Außenwände des Systems abgegeben, so dass mit steigender Entfernung vom Motor die Temperaturen der Komponenten abnehmen. Als kritisch erweist sich dieser Punkt bei der Betrachtung der Light-Off Temperatur (siehe dazu Kapitel 2.4.1). Um einen hohen Umsatz der Abgasnachbehandlung zu erreichen, muss jede Komponente diese so schnell als möglich erreichen. Eine motornahe Anbringung und Isolierung hält Wärmeverluste gering. Durch zusätzliche Heizmaßnahmen kann die Temperatur im Warmlauf zudem rapide gesteigert werden. Neben der thermischen Betrachtung sind Abgasnachbehandlungskomponenten auch über die Schadstoffe aneinander gekoppelt. Mindestens ein Schadstoff wird vom jeweiligen Katalysator oder Filter reduziert, wohingegen andere Komponenten den Prozess unterstützen oder behindern können. Auch die Bildung oder teilweise Umsetzung eines Stoffes ist möglich.

Tabelle 2.6: Wechselwirkung der Schadstoffe auf die Abgasnachbehandlungskomponenten [5]

		Komponente				
		DOC	CDPF	SCR	Einspeicherung NSC	Regeneration NSC
Schadstoff	HC	X	---	---	↘	- ↘
	CO	X	---	---	↘	- ↘
	Partikel	-	X	-	0	-
	NO	-	- ↗	X	X	X
	NO ₂	+	+ ↑	X	X	X

X: Hauptzweck der Komponente; ---: Schadstoff wird stark reduziert; -: Schadstoff wird reduziert; 0: Keine Änderung; +: Schadstoff wird vermehrt;
 ↑: Schadstoff fördert Prozess stark; ↗: Schadstoff fördert Prozess; ↘: Schadstoff behindert Prozess.

Bei genauerer Betrachtung lassen sich bei der Anordnung der Nachbehandlungskomponenten einige Richtlinien erkennen. Um bei SCR-Systemen einen möglichst hohen Konvertierungsgrad zu erreichen, muss vor dem Katalysator eine oxidative Komponente (z.B. DOC) angebracht werden. Diese gewährleisten ein hohes NO_2/NO Verhältnis und sorgen in der Funktion als katalytischer Brenner für einen frühen Light Off. Zusätzlich wird durch diese Anordnung eine HC Vergiftung des SCR Systems verhindert. Partikelfilter sollten hingegen nicht am Ende des Abgasstrangs verbaut werden. Die für den Rußabbrand notwendigen Temperaturen bewirken eine vorzeitige Alterung der vorgeschalteten Katalysatoren. Zudem werden diese durch die späte Rußabscheidung zusätzlich in ihrer Funktion eingeschränkt. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang der Wechselwirkungen sehr komplex ist. Auch bei der Berücksichtigung der Richtlinien ist eine allgemeingültige Aussage zur Anordnung der Nachbehandlungskomponenten nicht möglich.

3 Allgemeines

Dieses Kapitel widmet sich der Versuchsdurchführung. Dabei werden der Prüfstands Aufbau, der eingesetzte Versuchsträger und die Messtechnik beschrieben. Neben dem grundlegenden Versuchsaufbau erfolgen die Berechnung der notwendigen Größen und die Beschreibung der Vorkonditionierung.

3.1 Prüfstands Aufbau

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem Versuchsaufbau, welcher für die durchgeführten Untersuchungen benützt wurde.

Alle Versuche der vorliegenden Arbeit wurden an einem Motorprüfstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz durchgeführt. Angesichts früherer Untersuchungen war der Versuchsträger bereits aufgebaut und musste somit nur noch an die aktuelle Aufgabenstellung angepasst werden.

Abbildung 3.1 zeigt das Innere der Prüfstandszelle. In dieser befinden sich der Motor und die damit verbundene volldynamische Belastungseinheit. Das System ist mit der Messtechnik und den Konditioniereinheiten verbunden.

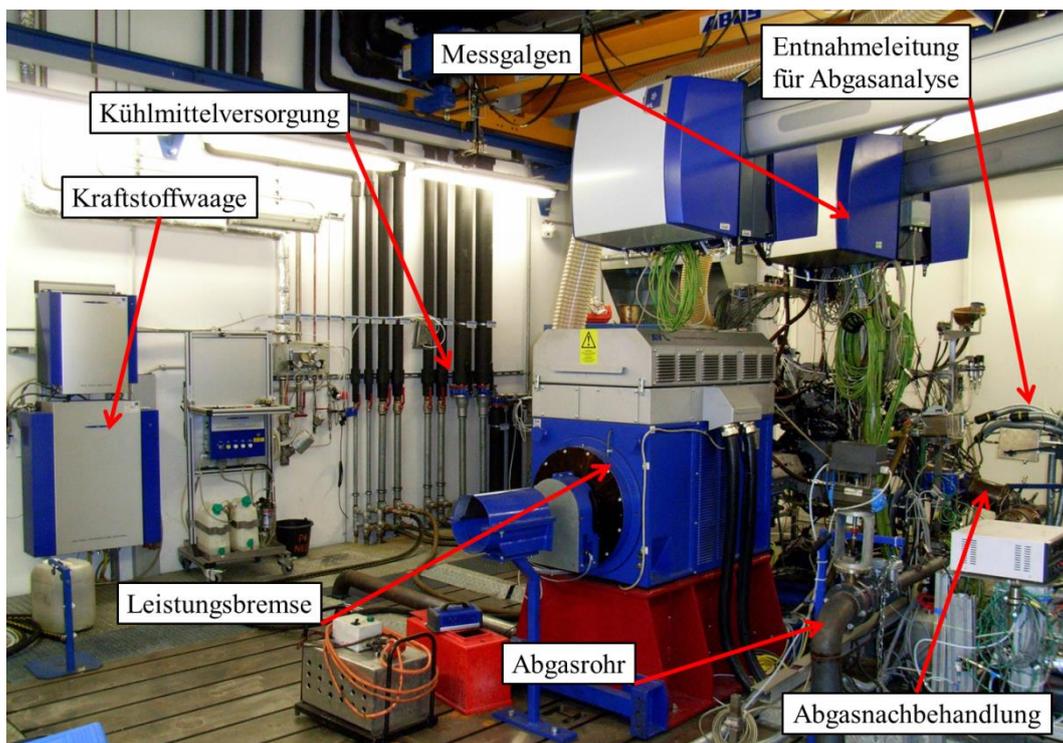


Abbildung 3.1: Ansicht des Prüfstands aufbaus

3.2 Motor

Als Versuchsträger wurde ein modifizierter 5 Zylinder Vollmotor verwendet. Das Dieselaggregat aus dem Hause Volvo verfügt über eine Direkteinspritzung mit Commonrail Technologie und einer einstufigen Abgasturboaufladung mit variabler Turbinengeometrie (VTG). Zusätzlich ist der Motor mit einer Hochdruck- und einer Niederdruck-AGR ausgestattet. Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, wird das Abgas für die HD-AGR vor dem Abgasturbolader entnommen und der Frischluft ungekühlt beigemengt. Das Abgas für die

ND-AGR hingegen wird nach dem Dieselpartikelfilter entnommen und durch einen Kühler geführt. Für die Hochdruckindizierung der 5 Zylinder wurden anstelle der Glühstifte die Druckaufnehmer verschraubt.

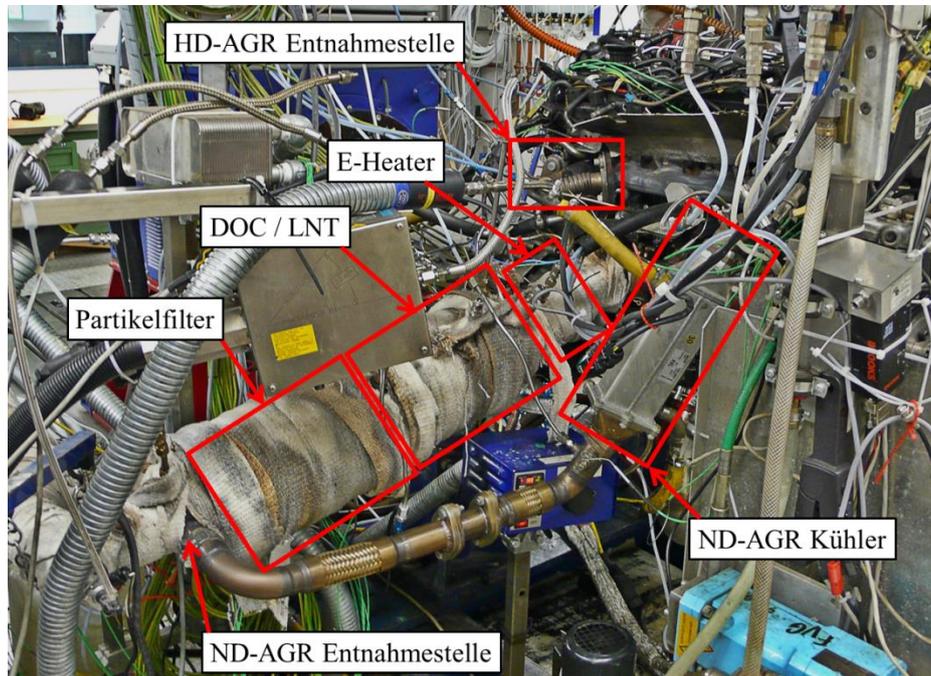


Abbildung 3.2: Entnahmestelle für das ND-AGR bzw. das HD-AGR

Die technischen Daten des Motors sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Technische Daten des Versuchsträgers

Hersteller:	Volvo	
Bezeichnung:	I5D	
Type:	TCI	4-Takt
Zylinderanordnung:	Reihe	
Zylinderanzahl:	5	
Hubvolumen:	2,4 dm ³	
Nennleistung:	151 kW	bei 4000 min ⁻¹
Drehmoment:	Max: 420 Nm	Drehzahlbereich: 1500 - 3250 min ⁻¹
Drehzahl:	Min: 550 min ⁻¹	Max: 4800 min ⁻¹
Hubraummaße:	Bohrung: 81mm	Hub: 93,15mm
Verdichtungsverhältnis:	16,5:1	
Ventiltrieb:	4 Ventile, DOHC ⁷	

⁷ Double Overhead Camshaft: Doppelte Obenliegende Nockenwelle

3.3 Messtechnik

Das zentrale Element bei den durchgeführten Versuchen besteht in der Analyse der Abgase. Verwendung fanden unterschiedliche Messgeräte. Neben einer CEB (Combustion Emission Bench) wird ein FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) verwendet. Die Geräte werden von der AVL List GmbH hergestellt und können an unterschiedlichen Messstellen im Abgasstrang angebracht werden.

Folgend werden die einzelnen Messgeräte genauer beschrieben.

3.3.1 FTIR

Ein als FTIR (Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) bezeichnetes Messgerät erfasst mittels einer optischen Messmethode zeitgleich eine Vielzahl an Abgaskomponenten. Im Spektrometer durchdringt ein breites Wellenband im Infrarotbereich das Abgas. Die unterschiedlichen Gaskomponenten adsorbieren einzelne Wellenlängen und erzeugen ein Interferogramm. Diese kann über eine Fourier Transformation in ein Infrarot Spektrum überführt werden, welches die Konzentration der einzelnen Gaskomponenten darstellt. [5] Das Messgerät kann folgende Gaskomponenten detektieren:

CO, CO₂, H₂O, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈, C₄H₆, C₂H₅OH, CH₃HO, CH₃CHO, HCHO, HCOOH, SO₂, IC₅, NC₅, NC₈, HNCO, HCN, COS, AHC

Die Abtastrate ist mit 1 Hz gering und kann unter Umständen zu Messungenauigkeiten führen. [19] Im Laufe der Untersuchungen wurde ein SESAM i60 FTIR des Herstellers AVL LIST GmbH eingesetzt.

3.3.2 CEB

Eine CEB (Combustion Emission Bench) erfasst die Abgaskomponenten mit einzelnen speziellen Messgeräten. Obwohl durch dieses Konzept die Anzahl der zu erfassenden Gaskomponenten limitiert wird, sind die Genauigkeit und die Abtastrate mit 10 Hz höher als beim FTIR. Mit der verwendeten Konfiguration können folgende Abgaskomponenten detektiert werden:

- CO und CO₂ mittels eines NDIR⁸-Analysator
- THC (Total Hydro Carbons) mit FID⁹
- NO und NO_x mittels CLD¹⁰
- O₂ mit Paramagnetischen Analysator

Eingesetzt wurde eine CEB1 des Herstellers AVL LIST GmbH.

⁸ NDIR: Nicht dispersive Infrarotabsorption

⁹ FID: Flammenionisationsdetektor

¹⁰ CLD: Chemilumineszenzdetektor

3.4 Versuchsaufbau

Im Zuge der Untersuchungen wurden 3 verschiedene Abgasnachbehandlungskonzepte validiert. Den grundlegenden Versuchsaufbau zeigt Abbildung 3.3. Nach dem Turbolader befindet sich der E-Heater. Diesem folgt je nach Konzept jeweils ein DOC bzw. LNT und ein katalytisch bzw. selektiv katalytisch beschichteter Partikelfilter. Nach dieser Komponente ist die Entnahmestelle für die ND-AGR angeordnet. Am Ende des Abgasstranges ist ein Unterboden SCR verbaut. Abbildung 3.2 zeigt zudem die Anordnung der Temperatur- und Druckmessstellen. Die Analyse der Emissionen ist durch verschiedene Entnahmestellen vor bzw. nach jeder Komponente möglich. Zusätzlich sind im Abgasstrang Lambdasonden und Entnahmestellen zur H₂ Messung angeordnet. Die Anordnung der Temperaturmessstellen in den Katalysatoren bzw. im Filter ist in Anhang B dargestellt.

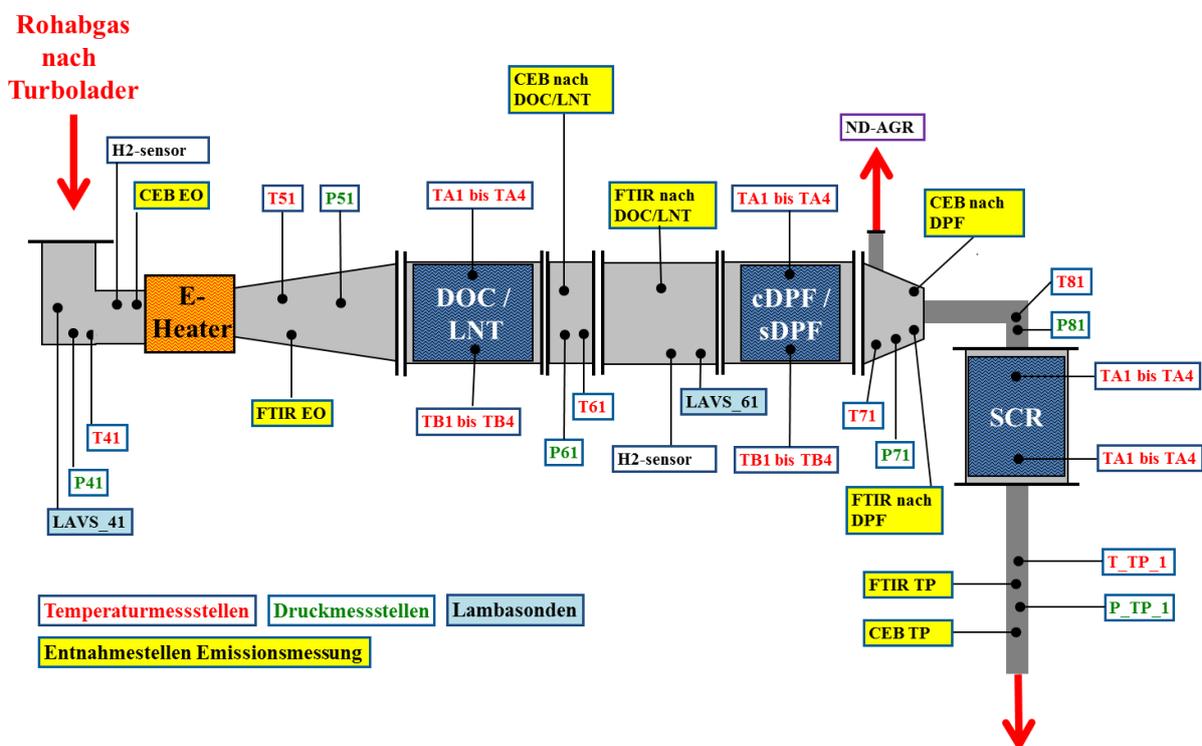


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Um die Wärmeverluste des Abgasstranges und der Nachbehandlungskomponenten möglichst gering zu halten, wurden diese thermisch isoliert. Wie in Abbildung 3.4 ersichtlich, erfolgte diese Maßnahme durch das Ummanteln mit Streifen aus einem Glasfasergewebe.

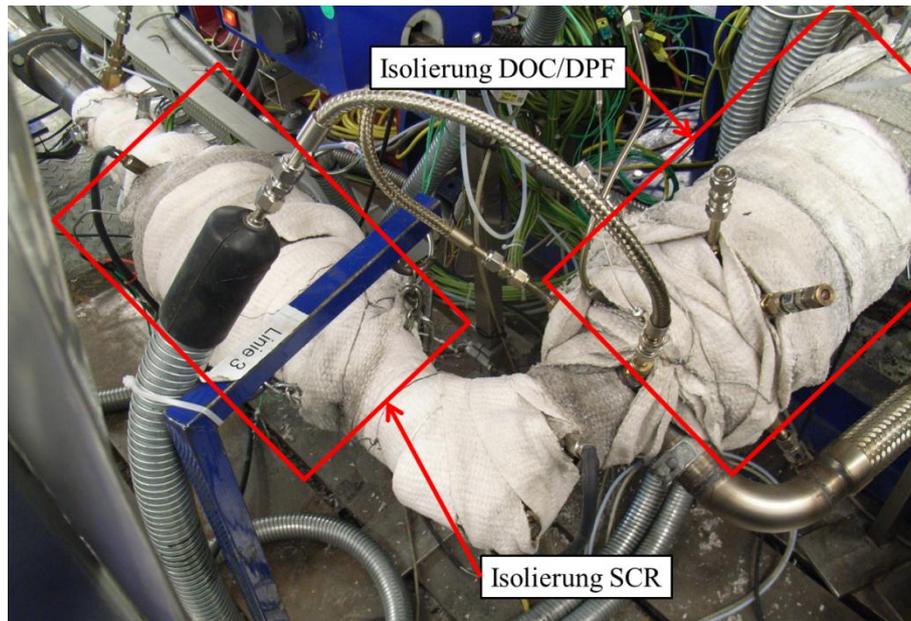


Abbildung 3.4: Maßnahmen zur thermischen Isolierung

3.5 Am Prüfstand abgebildete Fahrzeuge

Die hohe Flexibilität des Prüfstandes ermöglicht die Darstellung eines beliebigen Drehmoment- und Drehzahlverlaufs. Dies ermöglicht die Simulation verschiedenster Fahrzeuge und Testzyklen. Vom Projektpartner AVL List GmbH wurden die Zyklen für zwei Fahrzeuge berechnet und in weiterer Folge zur Verfügung gestellt:

- Volvo S80: Oberer Mittelklassewagen aus dem D-Segment mit Doppelkupplungsgetriebe. Das Leergewicht des Fahrzeuges beträgt 1718 kg, der Luftwiderstand kann mit einem c_w -Wert von 0,28 beziffert werden [20] [21].
- Volvo XC90: Sport Utility Vehicle aus dem J-Segment mit Doppelkupplungsgetriebe. Das Fahrzeug hat mit 2115 kg im Vergleich zum Volvo S80 ein höheres Leergewicht. Der c_w -Wert des Fahrzeuges beträgt 0,36 [20].

Die beiden Fahrzeuge sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Im Laufe der Untersuchungen wurde, falls nicht anders aufgeführt, standardmäßig das Fahrzeug Volvo S80 simuliert.



Abbildung 3.5: Links der Volvo S80, rechts der Volvo XC90 [22] [23]

3.6 Berechnungen verschiedener Größen

Das folgende Kapitel widmet sich der Berechnung jener mathematischen Größen, welche für die Untersuchungen und die Auswertung der Ergebnisse verwendet wurden.

3.6.1 Ermittlung der Massenemissionen

Da die in Kapitel 0 beschriebenen Messgeräte die Abgaszusammensetzung in Molanteilen (v_i / ppm) angeben, ist eine Umrechnung der gemessenen Schadstoffemissionen nach Formel 3.1 nötig, welche auf internationalen Standards beruht. Die molaren Massen die zur Berechnung der einzelnen Schadstoffe herangezogen werden, sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Die Berechnung der NMHC-Werte erfolgt nach Formel 3.2, die der NO nach Formel 3.3.

$$m_x = v_x * \frac{M_x}{M_{AG}} * m_{f_{exh}} \quad \text{in mg/s} \quad 3.1$$

$$m_{NMHC} = m_{THC} - m_{CH_4} \quad \text{in mg/s} \quad 3.2$$

$$m_{NO} = m_{NO_x} - m_{NO_2} \quad \text{in mg/s} \quad 3.3$$

Tabelle 3.2: Molare Masse verschiedener Schadstoffe

M_{AG}	M_{NO_x}	M_{THC}	M_{CO}	M_{CH_4}	M_{N_2O}	M_{NO_2}
kg/kmol	kg/kmol	kg/kmol	kg/kmol	kg/kmol	kg/kmol	kg/kmol
28.96	46	13.86	28.01	16.04	44.01	46

3.6.2 Bestimmung des AdBlue- und NH_3 -Verbrauchs

Die Berechnung des AdBlue-Bedarfs errechnet sich nach Formel 3.4. Neben der NO_x -Konzentration vor SCR, dem Abgasmassenstrom sowie dem Dosierverhältnis α sind des Weiteren noch Umrechnungsfaktoren einzusetzen, die Tabelle 3.3 zu entnehmen sind.

$$m_{AdBlue} = v_{NO_x} * m_{f_{exh}} * \frac{M_{Harnstoff}}{M_{AG}} * \alpha * \frac{1}{2} * \frac{1}{\mu_{Harnstoff}} \quad \text{in mg/s} \quad 3.4$$

Tabelle 3.3: Größen und Faktoren für die Berechnung des AdBlue-Verbrauchs

M_{AG}	$M_{Harnstoff}$	α	1/2	$\mu_{Harnstoff}$	M_{NH_3}
kg _{AG} /kmol _{AG}	kg _{Harnstoff} /kmol _{Harnstoff}	kmol _{NH3} /kmol _{NOx}	kmol _{Harnstoff} /kmol _{NH3}	kg _{Harnstoff} /kg _{AdBlue}	kg _{NH3} /kmol _{NH3}
28.96	60.055	1..100	-	32.5	17.03

Analog dazu erfolgt die Berechnung des NH_3 -Verbrauchs laut Formel 3.5:

$$m_{NH_3} = v_{NO_x} * m_{f_{exh}} * \frac{M_{NH_3}}{M_{AG}} * \alpha \quad \text{in mg/s} \quad 3.5$$

3.6.3 Errechnung der gespeicherten NH₃-Menge im SCR

Die während der Vorbeladung im SCR gespeicherte NH₃-Menge errechnet sich laut Formel 3.6, die angegebenen NO_x beziehen sich hierbei auf die gemessenen Werte vor dem SCR:

$$m_{NH_3 \text{ gespeichert}} = \int_0^t v_{NO_x} * m_{f_{exh}} * \frac{M_{NH_3}}{M_{AG}} * (\alpha - 1) * dt \quad \text{in mg/s} \quad 3.6$$

3.6.4 Berechnung des Uniformity-Index

Um die Gleichverteilung des eingebrachten AdBlue bzw. Ammoniaks beurteilen zu können, wird ein sogenannter „Uniformity Index“ (UI) nach Formel 3.7 berechnet:

$$UI = 1 - \frac{1}{2} * \frac{\sum_{i=1}^n |s_i - \bar{s}| * A_i}{\bar{s} * \sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{mit } \bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{und } A_i = \pi * \frac{(r_{i+0.5})^2 - (r_{i-0.5})^2}{4} \quad 3.7$$

A_i bezeichnet dabei die Fläche des Messpunktes i mit dem dazugehörigen Messwert s_i, siehe Abbildung 3.6

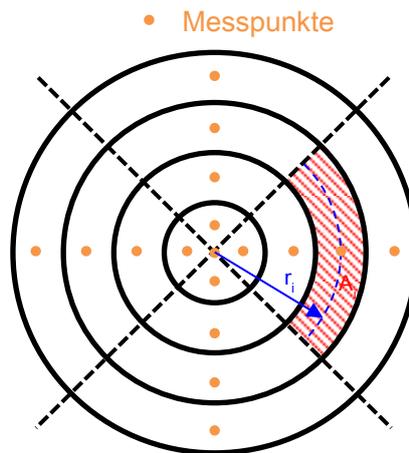


Abbildung 3.6: Schematischer Katalysatorquerschnitt zur Erörterung von A_i

3.7 Vorkonditionierung

Um für die Testläufe reproduzierbare Bedingungen zu gewährleisten, musste vor jedem FTP75 eine definierte Konditionierung durchgeführt werden. Zunächst erfolgte die Regeneration des Partikelfilters bei 3000min⁻¹ und 20bar effektivem Mitteldruck. Anschließend erfolgte eine schrittweise Abkühlung des Abgassystems bei niederlastigen Betriebspunkten, erst dann wurde mit der Vorbeladung des SCR bzw. des SDPF begonnen. Die Zielbeladung des SCR wurde für System 1 und 3 mit 2g NH₃ festgelegt, für System 2 mit 3g. Entsprechend der unterschiedlichen Systeme war auch die Zeit bis zum Erreichen der vorgegebenen Beladung für jedes System unterschiedlich. Nach erfolgter Beladung, wurde der Motor für die Systeme 1 und 2 sofort abgestellt, für System 3 erfolgte vor dem Abstellen noch eine LNT-Regeneration für 20s. In Abbildung 3.7 ist der Konditioniervorgang exemplarisch ersichtlich.

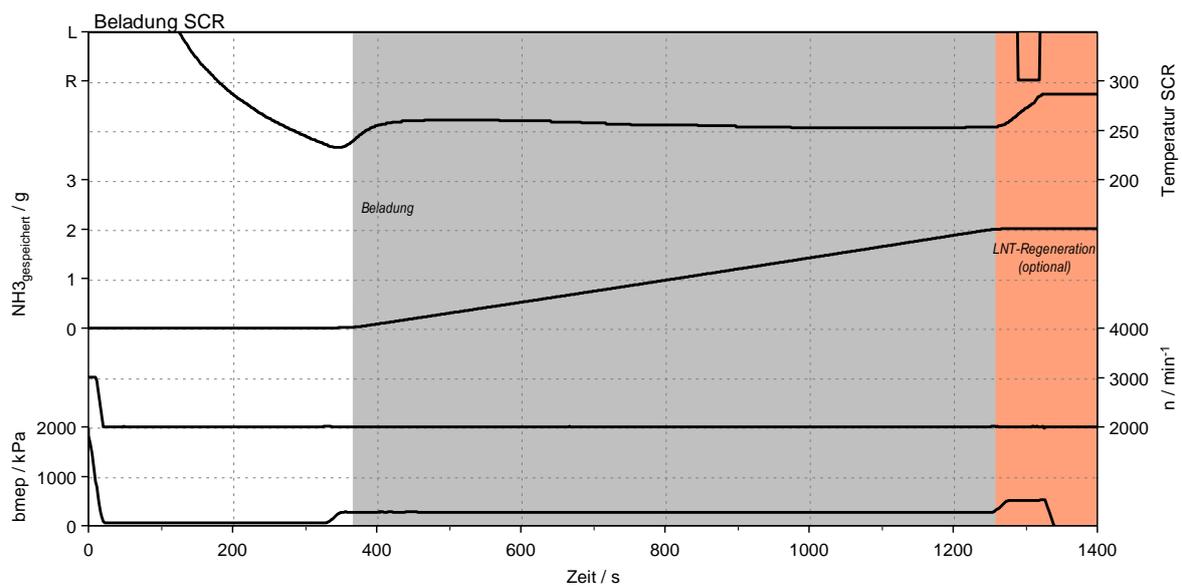


Abbildung 3.7: Konditioniervorgang

3.8 Rapide Cool Down

Da der FTP75 bei kaltem Motor gestartet wird und zwischen den Tests ein Motorstillstand von mindestens 10 Stunden gefordert ist, um einen kalten Betriebszustand zu garantieren, nur ein gültiger kalter Test pro Tag möglich. Um die Anzahl der an einem Tag durchführbaren Tests zu erhöhen, verfügt die Versuchsanordnung über die Möglichkeit einer schnelleren Abkühlung. Bei diesem als Rapid Cool Down (RCD) bezeichneten Prozess wird der heiße Motor innerhalb kürzester Zeit auf Umgebungstemperatur gekühlt. Über das schaltbare Ventil 1 wird das heiße Kühlmittel über einen zusätzlichen externen Kühler geleitet, der seinerseits wieder mit der Haustechnik verbunden ist, siehe Abbildung 3.8. Der Motor befindet sich zunächst im Schleppbetrieb und wird nach dem Erreichen einer bestimmten Temperatur abgestellt. Anschließend wird die zusätzliche externe Pumpe 2 aktiviert, um ein Zirkulieren des Kühlmittels trotz abgestelltem Motor zu garantieren bzw. den Motorkühler zu umgehen. Diese Maßnahmen erlauben es den Versuchsträger innerhalb einer Stunde auf eine Kerntemperatur von ca. 25°C zu konditionieren, die thermische Belastung des Aggregates ist in dieser Zeit allerdings entsprechend hoch.

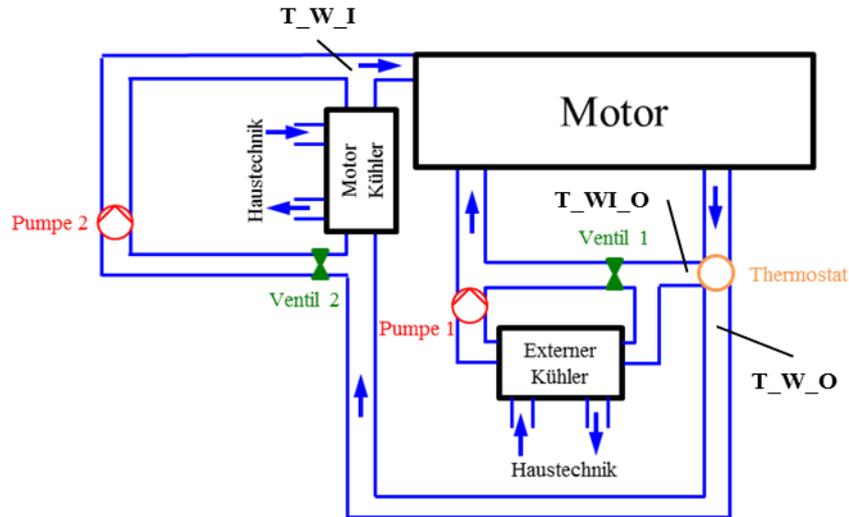


Abbildung 3.8: Aufbau RCD

3.9 Uniformity Index

Gemäß der Formel 3.7 ist nachfolgend der Uniformity Index für das eingebrachte NH_3 und die Stickoxide vor und nach dem SCR Katalysator aufgelistet. Mit einem steigendem UI nimmt auch der Grad der Gleichverteilung zu, wobei der Zahlenwert 1 das Optimum bedeutet. Die Konzentration der Schadstoffe wurde durch einen Messring ermittelt. Dabei wurde in horizontaler und vertikaler Richtung die Zusammensetzung der Emissionen bestimmt. In Abbildung 3.9 ist der Uniformity Index für NO_x und NH_3 vor und nach SCR dargestellt. Zusätzlich ist die Gleichverteilung des Reduktionsmittels NH_3 vor SCR aufgetragen. Die ermittelten Werte stellen die Situation in den Systemen 1 und 3 dar. Die Gleichverteilung beim System 2 wird in einem eigenen Kapitel beschrieben.

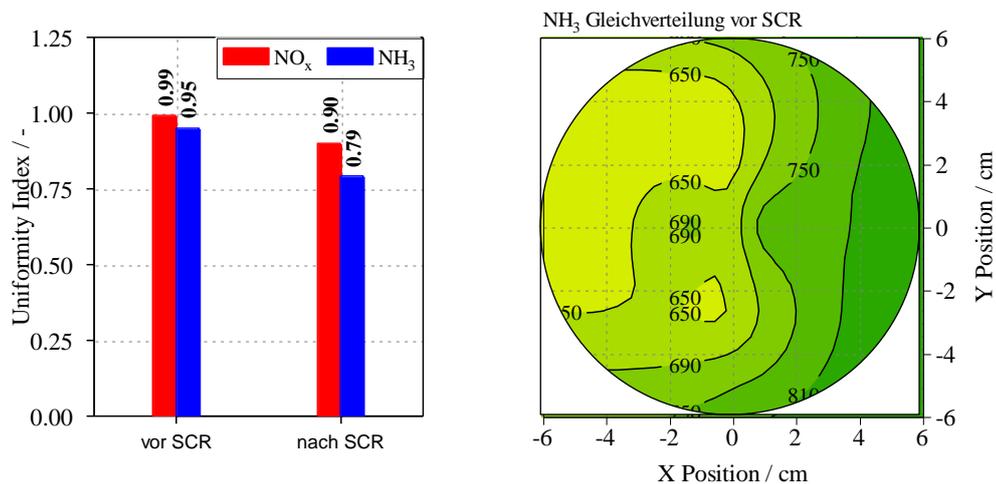


Abbildung 3.9: Links der Uniformity Index des Schadstoffes NO_x und des Reduktionsmittels NH_3 vor bzw. nach SCR. Rechts die Gleichverteilung von NH_3 vor SCR

4 SULEV System 1

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen zum SULEV System 1, in weiterer Folge als System 1 bezeichnet, beschrieben. Dabei soll ermittelt werden, ob der SULEV30 Grenzwert mit einem Dieselmotor und dem vorliegenden Nachbehandlungskonzept eingehalten werden kann. Des Weiteren sollen die dieseltypischen Vorteile des geringen Verbrauchs beibehalten werden. Aktuell ist am Weltmarkt noch kein dieseltreibener PKW erhältlich, der die erwähnten Schadstoffgrenzen unterschreiten kann [8]. Die größte Herausforderung stellt der hohe Schadstoffausstoß im Warmlauf dar. Um die Emissionen in dieser Phase möglichst gering zu halten, ist ein früher Light Off der Komponenten und besonders des SCR anzustreben. Verschiedene Heizmaßnahmen sollen dies ermöglichen.

Nach der Beschreibung der Versuchsanordnung wird der Ausgangspunkt des Nachbehandlungskonzeptes festgehalten. In weiteren Schritten wird auf die Betriebsstrategie, die Kalibrierung und die Heizmaßnahmen des Systems eingegangen. Abschließend wird die Schadstoffumsetzung an den einzelnen Nachbehandlungskomponenten und das Gesamtergebnis des Systems 1 dargestellt und diskutiert.

4.1 Versuchsanordnung

Der Aufbau des System1, ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

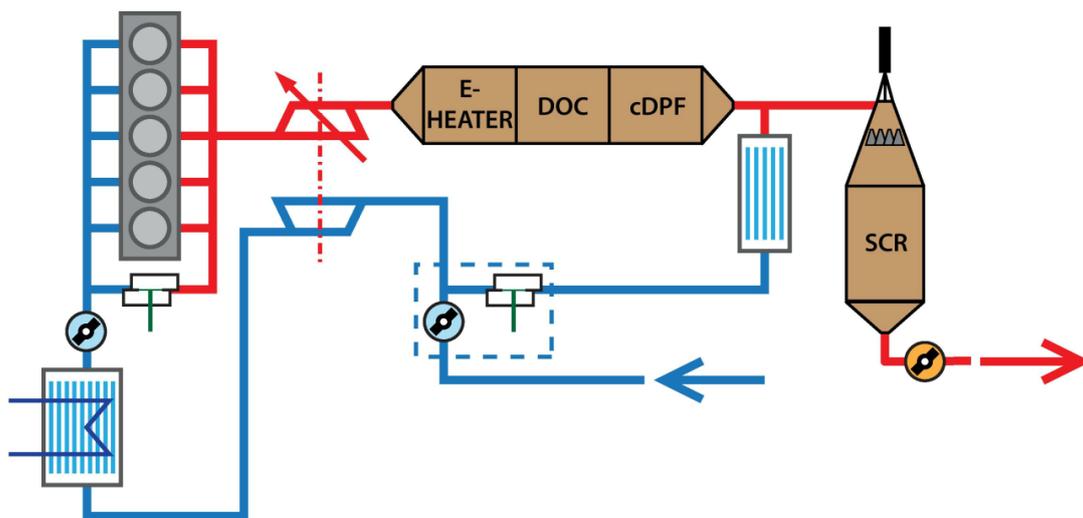


Abbildung 4.1: Schema der Abgasnachbehandlung im System 1

Dem Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) folgt der E-Heizer. Durch elektrische Energie wird in diesem Bauteil die Abgastemperatur erhöht, Schadstoffe werden aber nicht umgesetzt. Der nachgeschaltete Oxidationskatalysator oxidiert an der katalytischen Schicht CO- und HC Emissionen. Die dabei freigesetzte exotherme Wärmemenge erhöht die Temperatur des Abgases und ermöglicht dadurch einen früheren Light Off der nachfolgenden Nachbehandlungskomponenten. Zusätzlich wird durch die Oxidation von NO das NO_2/NO Verhältnis erhöht. Vor der Entnahmestelle für die ND-AGR befindet sich der Partikelfilter. Dieser verfügt über eine katalytische Beschichtung. Das Unterboden SCR-System bildet den abschließenden Teil der Nachbehandlung. Die AdBlue® Eindosierung erfolgt vor dem Katalysator. Um eine gleichmäßige NH_3 Verteilung zu erreichen, ist nach der Eindosierung

ein Mischblech angebracht (siehe Abbildung 4.2). Die im Laufe der Versuchsreihe verwendeten Katalysatoren und Filter sind im Anhang C aufgelistet.



Abbildung 4.2: Mischblech zur gleichmäßigen Verteilung des eingebrachten NH_3

4.2 Abschätzung der FTP75 Ergebnisse

Im Laufe der Untersuchungen wurde in einigen Fällen das Emissionsergebnis nicht in einem vollständigen FTP75 Zyklus, sondern in einem FTP72 Testlauf bestimmt. Dieser stellt den Kaltstart und die stabile Phase dar, der Warmstart wird nicht abgebildet. Da in der Warmstartphase nur noch ein geringer Ausstoß an Schadstoffen zu verzeichnen ist, verringert sich das Emissionsergebnis in Summe. Um auf das Summenergebnis im gesamten Zyklus schließen zu können, wurden in einem vollständigen Zyklus die Umrechnungsfaktoren zwischen dem FTP75 Zyklus und dem FTP72 ermittelt. Der Faktor stellt dabei prozentuell den verringerten Emissionsausstoß eines FTP75 Zyklus gegenüber einem FTP72 Zyklus dar. Der erwähnte Faktor ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Dabei muss beachtet werden, dass die ermittelten Werte für den FTP75 Zyklus nur eine Abschätzung wiedergeben.

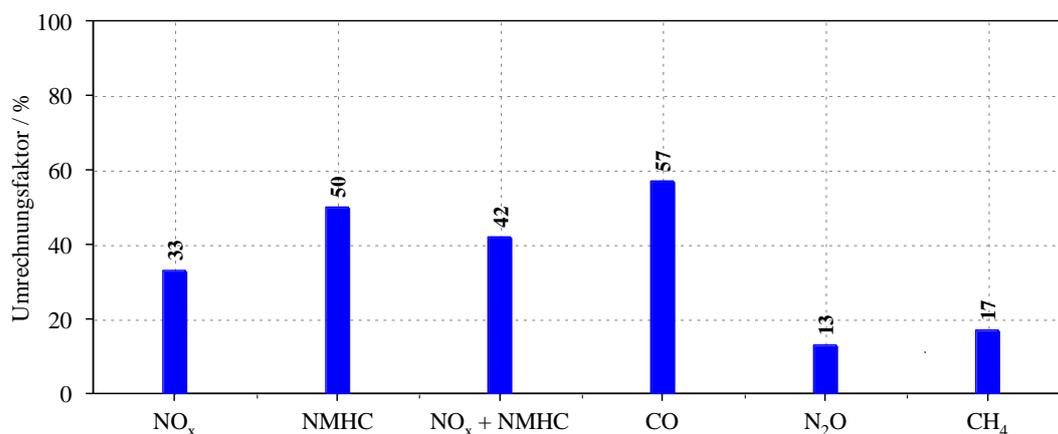


Abbildung 4.3: Umrechnungsfaktor FTP75 auf FTP72

4.3 Ausgangspunkt

Als Ausgangspunkt für das Projekt galt eine Abgaskonfiguration, welche ohne eine aktive NO_x Nachbehandlung die Euro6 Grenzwerte unterschreiten kann. Das System 1 verfügt zusätzlich über ein Unterboden SCR System, welches die NO_x Emissionen senken soll. Um die Wirkung der am System 1 umgesetzten Anpassungen bewerten zu können, wird folgend der Ausgangspunkt für das Konzept festgehalten. Abbildung 4.4 gibt die Ergebnisse eines FTP75 Zyklus wieder. Dargestellt sind die Temperaturen in den einzelnen Nachbehandlungskomponenten und die kumulierten Emissionen der Schadstoffe NO_x und NMHC. Während des Zyklus sind keine Heizmaßnahmen aktiv, der Datenstand entspricht der Euro6 Konfiguration.

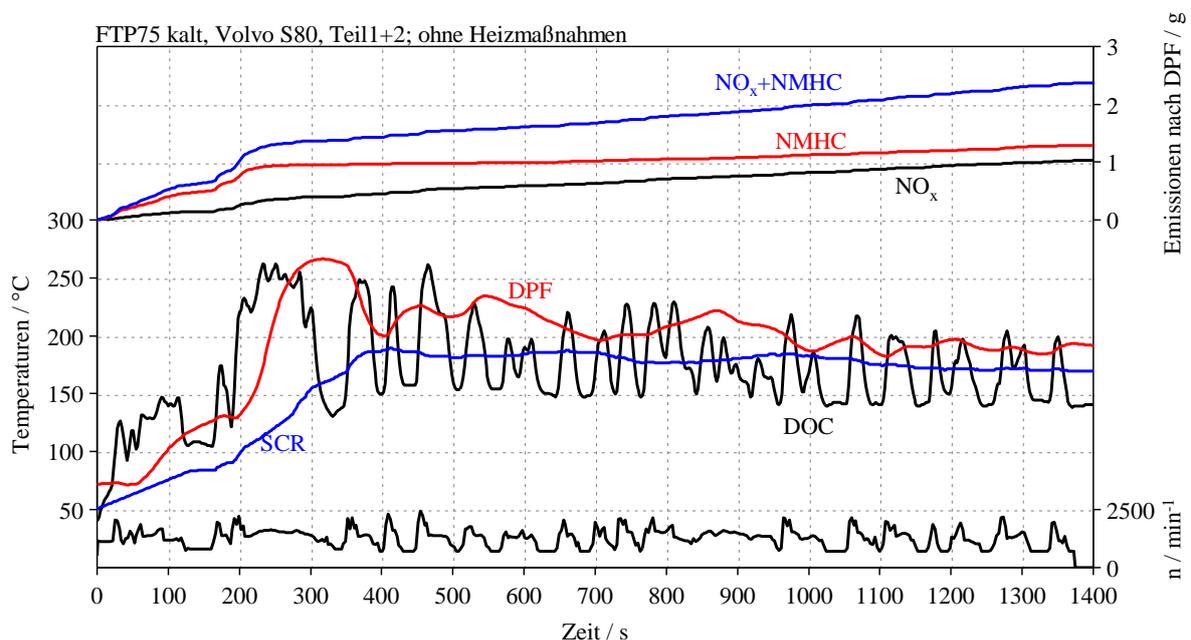


Abbildung 4.4: Temperaturverläufe und kumulierte Emissionen des System1 mit Basiskonfiguration

Der Temperaturverlauf des Oxidationskatalysators zeigt, dass dieser nach 200 Sekunden seine Betriebstemperatur erreicht. Nach diesem Zeitpunkt unterliegt der Verlauf starken Schwankungen. Dies schlägt sich auch in den Emissionsergebnissen nieder. Vor Light Off wird nur ein geringer Teil der Kohlenwasserstoffe oxidiert. Nach Erreichen der Betriebstemperatur kann das System diese zwar effektiv reduzieren, doch führt die zunehmende Auskühlung des DOC am Ende des Zyklus zu einem weiteren geringen Anstieg der Schadstoffwerte. Das SCR System kann im gesamten Zyklus die 200°C Temperaturmarke nicht überschreiten. Hohe Konvertierungsraten sind bei der selektiv katalytischen Reduktion aber nur im Temperaturbereich zwischen 200°C und 450°C möglich [4]. Im System 1 hingegen erreicht der SCR Katalysator nach 400 Sekunden mit 190°C seine maximale Temperatur. Da die Messung der Emissionen vor SCR erfolgte, stellt das Emissionsergebnis die NO_x Rohemissionen ohne aktive Nachbehandlung dar.

Abbildung 4.5 stellt das Gesamtergebnis der im FTP75 Zyklus ermittelten Schadstoffwerte dar. Sowohl NO_x , als auch HC- Emissionen weisen einen hohen Wert auf. Dabei ist zu beachten, dass die NO_x Emissionen vor SCR gemessen wurden und den Schadstoffwert der Rohemissionen wiedergeben. Zusammen ergeben diese einen Summenwert von 176

mg/Meile. Das SULEV Limit liegt im Vergleich dazu bei 30 mg/Meile. Die Grenzwerte für CO (1000mg/Meile) und CH₄ (30 mg/Meile) können bereits mit diesem System eingehalten werden. Das Limit für Lachgas (10 mg/Meile) wird hingegen überschritten. Der Kraftstoffverbrauch kann mit 6,32 l/100 km beziffert werden. Da es sich bei dem vorliegenden Ergebnis um den Ausgangspunkt handelt, ist kein Mehrverbrauch (Fuel Penalty) zu verzeichnen.

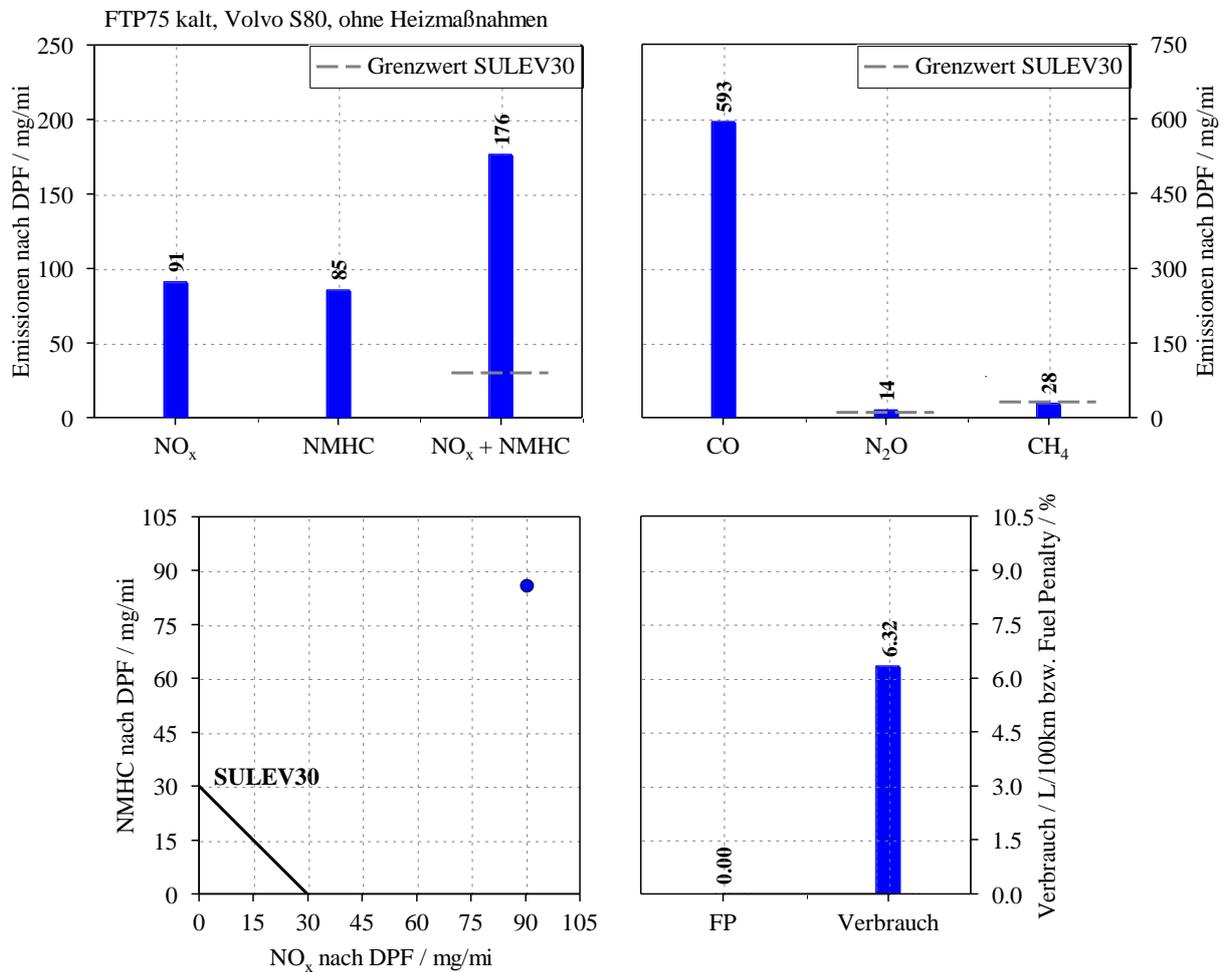


Abbildung 4.5: FTP75 Gesamtergebnis

Die Ausgangsmessungen zeigen die Herausforderungen an das System 1. Ein Großteil der Emissionen wird im Warmlauf gebildet. Um den Schadstoffausstoß zu senken, ist ein rasches Erreichen der Betriebstemperaturen in den Katalysatoren anzustreben. Dies gilt besonders für das SCR System.

4.4 Basiskalibrierung

Dem System 1 stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, um die Abgastemperaturen im Warmlauf zu erhöhen. Dabei ist darauf zu achten, dass infolge des Thermomanagements die Emissionen nicht zusätzlich ansteigen. Auch der Verbrauch soll wenn möglich nicht beeinflusst werden. Im folgenden Kapitel wird auf die Basiskalibrierung des Systems 1 eingegangen. In einer Versuchsreihe wurde die optimale Wahl der Parameter für ein effektives Thermomanagement im Warmlauf ermittelt. Die möglichen Maßnahmen sind folgend beschrieben. Anschließend erfolgt die Diskussion der Versuchsergebnisse.

4.4.1 Abgasrückführung (AGR)

Der Versuchsträger verfügt über eine ungekühlte HD-AGR und eine gekühlte ND-AGR. Die ungekühlte HD-AGR mischt heißes Abgas der Frischluft zu und führt zu einem Anstieg der Temperatur im Saugrohr und somit der Verbrennungs- bzw. Abgastemperatur. Durch die Abzweigung des Abgases vor dem Turbolader wird der Abgasmassenstrom verringert. Bei niedriger Last können zudem die HC- und NO_x Rohemissionen reduziert werden. In Bereichen höherer Last führt die ungekühlte HD-AGR zu einem Anstieg der NO_x Emissionen. Gekühlte ND-AGR kann in diesen Bereichen Abhilfe schaffen.

4.4.2 Abgasstauklappe

Das Schließen der Abgasstauklappe erhöht die Ausschleubarkeit und führt dadurch zu einer Lasterhöhung. Zudem wird intern Abgas rückgeführt und die Temperatur im Abgasstrang erhöht sich. Das Schließen der Klappe führt aber unweigerlich zu einer Erhöhung des Treibstoffverbrauchs.

4.4.3 Betriebsstrategie

In Tabelle 4.1 sind die unterschiedlichen Betriebsstrategien der Testläufe aufgelistet. Das Zyklusergebnis des Ausgangspunktes dient als Referenz und soll die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen darstellen.

Tabelle 4.1: Betriebsstrategien der Testläufe

Testlauf	HD-AGR	ND-AGR	Abgasstauklappe
Ausgangspunkt	-	-	-
1	bis 2 bar	Basis	-
2	bis 2 bar	bis 60%	-
3	-	bis 100%	aktiv

4.4.4 Ergebnisse

Um die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf das Nachbehandlungssystem zu erfassen, wurden in den Testläufen die Temperaturverläufe in den Katalysatoren bzw. im Filter gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die linke Seite des Diagramms gibt die Stellung der einzelnen Ventile und Klappen wieder. Auf der rechten Seite sind die Temperaturverläufe in den Nachbehandlungskomponenten aufgelistet. Darüber hinaus ist in den Diagrammen die 200°C Temperaturmarke hervorgehoben. Der DOC kann ab diesem Wert Kohlenwasserstoffe zum Großteil umsetzen [6]. In den Nachbehandlungskomponenten kann die festgelegte Temperatur als die mindestens erforderliche Betriebstemperatur angenommen werden.

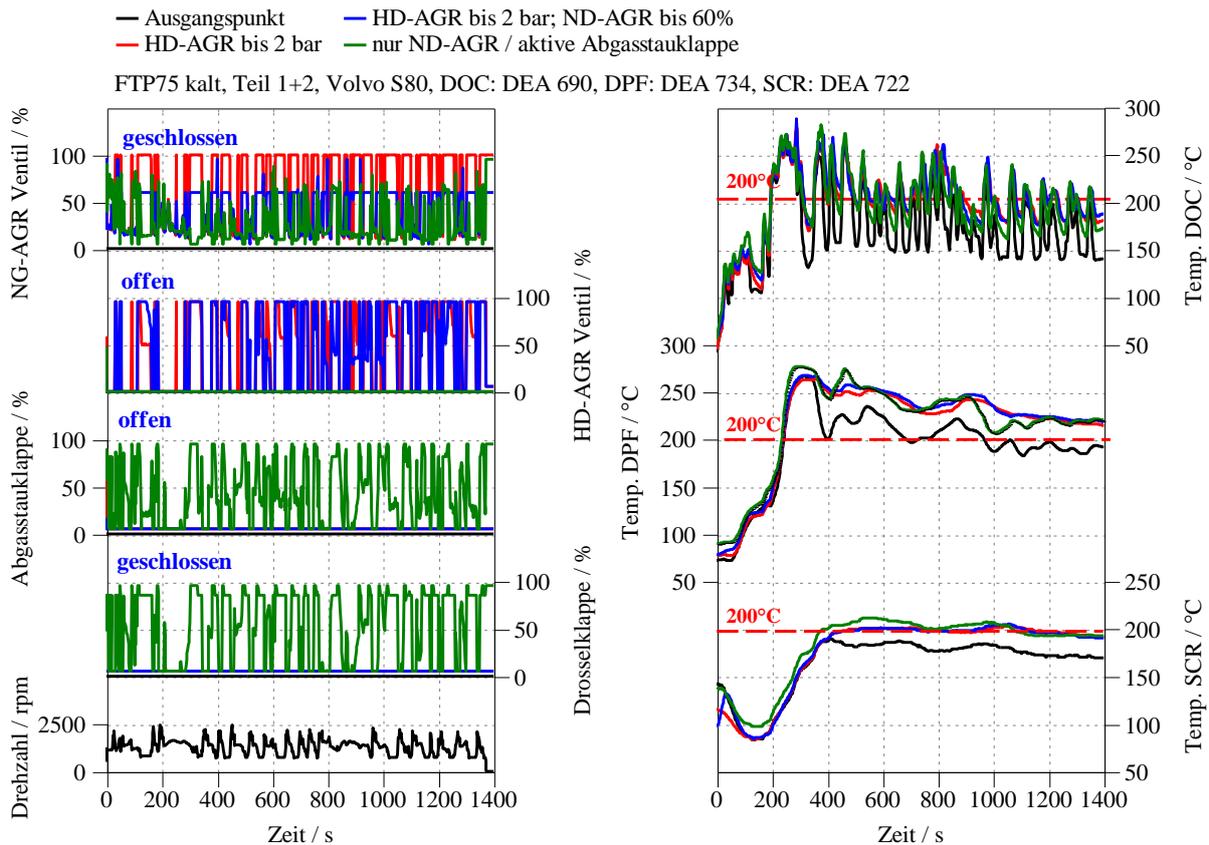


Abbildung 4.6: Darstellung der Maßnahmen und der Temperaturverläufe der jeweiligen Maßnahme

Das Schließen der Abgasstauklappe führt im Warmlauf zum stärksten Temperaturanstieg im SCR-Katalysator. 200°C werden bei dieser Applikation schon bei Sekunde 385 erreicht. Im Referenztest wird diese Marke nicht überschritten. Die beobachtete Temperaturüberhöhung wird im restlichen Zyklus beibehalten und führt zu einer Temperatursteigerung von durchschnittlich 22°C bezogen auf den Ausgangspunkt. Bei der Aktivierung der HD-AGR bis 2 bar effektiven Mitteldruck zeigt sich im Warmlauf kein auffälliger Unterschied zum Referenztest. Nach 390 Sekunden steigt die Temperatur weiter an und nähert sich anschließend der 200°C Marke. Eine zusätzliche Aktivierung der ND-AGR bis maximal 60% bewirkt keine großen Unterschiede im Temperaturverlauf. Als relevant für das Gesamtsystem erweist sich auch das Verhalten des Oxidationskatalysators. Es zeigt sich, dass sich die Temperaturverläufe des Referenztests als auch der Tests mit Stauklappe und AGR bis 300s gut decken. Erst ab diesem Zeitpunkt ist eine Temperaturerhöhung zu verzeichnen. Zudem wird in Phasen geringerer Last das Auskühlen des Abgasstranges verringert. Bis auf einzelne Temperaturspitzen ist der Temperaturverlauf bei geschlossener Drosselklappe geringfügig geringer als bei zugeschalteter HD-AGR. Wie auch schon im SCR-Katalysator beobachtet werden konnte, verändert eine Aktivierung der ND-AGR den Temperaturverlauf nicht wesentlich.

Abbildung 4.7 gibt die Emissionen der jeweiligen Maßnahmen wieder. Abbildung 0.3 im Anhang D listet zudem die Emissionsverläufe auf. Die Aktivierung der Stauklappe zu einem verstärkten Ausstoß an NMHC. Die effektivste Schadstoffreduzierung kann durch die Rückführung des hochdruckseitigen Abgases erreicht werden. Der reduzierte Massenstrom nach der Turbine und die hohen Abgastemperaturen zeigen eine positive Wirkung auf das

Oxidationsvermögen des Katalysators. Bei zusätzlicher ND-AGR kann ein geringfügiger Anstieg der NMHC beobachtet werden.

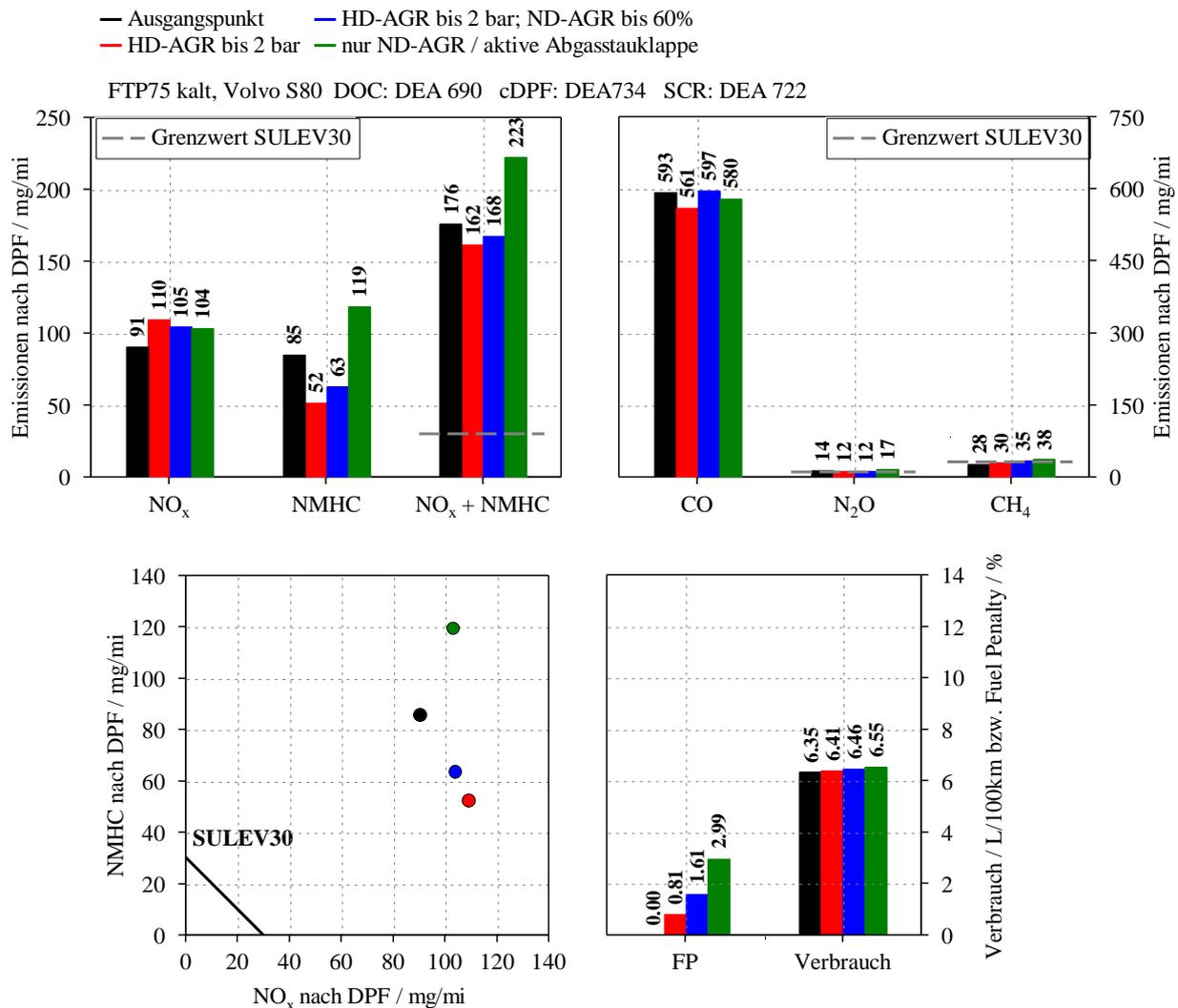


Abbildung 4.7: Emissionsergebnisse der Maßnahmen

Da die Entnahme des Abgases vor dem SCR-Katalysator erfolgt, kann die Reduktion in dieser Komponente nicht aufgezeigt werden. Die gemessenen NO_x Emissionen geben die Mengen nach DPF wieder. Auch wenn die Unterschiede nicht sehr ausgeprägt sind, ist die Menge des Schadstoffes beim Referenztest am geringsten. Das heiße Abgas der HD-AGR führt zu einem Anstieg des Schadstoffes. In Kombination mit der ND-AGR kann die Menge der NO_x geringfügig gesenkt werden. Die Aktivierung der Stauklappe führt zu vergleichbaren NO_x Emissionen wie die Kombination aus HD-AGR und ND-AGR. Im NO_x und NMHC Summenergebnis kann mit der HD-AGR der geringste Schadstoffausstoß erzielt werden. Die Menge der CO wird von allen Maßnahmen deutlich unterschritten. Der Grenzwert für N₂O kann von keiner Betriebsstrategie eingehalten werden, CH₄ wird bei aktiver Abgasstauklappe und der Kombination von HD-AGR und ND-AGR überschritten.

Der Kraftstoffverbrauch wird bei aktivierter AGR nur in geringem Maße beeinflusst. Die erhöhte Ausschubarbeit bei geschlossener Abgasstauklappe führt jedoch zu einem merklichen Mehrverbrauch an Treibstoff.

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass sowohl die AGR, als auch das Schließen der Abgasstauklappe zu einem wirkungsvollen Temperaturanstieg in den Nachbehandlungskomponenten führen. Besonders das SCR System profitiert von diesen Maßnahmen. Die HD-AGR bis 2 bar effektiven Mitteldruck ermöglicht dabei das niedrigste Emissionsergebnis und führt zusätzlich zu einer markanten Verminderung der HC-Emissionen. Das schließend der Abgasstauklappe ermöglicht zwar den höchsten Temperaturanstieg, erzeugt aber zusätzliche Emissionen und führt zu einem Kraftstoffmehrverbrauch. Für weitere Untersuchungen wird somit eine Luftpfadkalibrierung mit HD-AGR bis 2 bar Mitteldruck beibehalten. Die Applikation der ND-AGR entspricht den Basiseinstellungen.

4.5 Heizmaßnahmen

Dem System 1 stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, um die Temperatur des Abgases zu erhöhen. Im Warmlauf soll die Betriebstemperatur der Katalysatoren rasch erreicht werden.

Im folgenden Kapitel werden die Heizmaßnahmen beschrieben. Im weiteren Verlauf werden die Auswirkungen dieser auf die Katalysatortemperaturen aufgeführt. In einem FTP75 Zyklus wird anschließend das Emissionsergebnis mit aktiven Heizmaßnahmen festgehalten. Es soll gleichzeitig auch den aktuellen Emissionsstand wiedergeben.

4.5.1 E-Heater

Der E-Heater ist ein Heizelement, welches im Abgasstrang vor dem Oxidationskatalysator angeordnet ist. Die in Abbildung 4.8 dargestellte Komponente wandelt elektrischen Strom in Wärmeenergie um, welche dem Abgas zugeführt wird und dessen Temperatur erhöht. Im Unterschied zu einem elektrisch beheizten Katalysator (siehe Kapitel 2.4.6) verfügt der E-Heater nicht über einen katalytisch beschichteten Vorkatalysator. Die Komponente setzt keine Reaktionswärme frei, da an ihrer Oberfläche keine HC- und CO-Emissionen oxidieren können. Die Stromversorgung erfolgt über die Batterie des Motors; die Heizleistung muss somit von der Lichtmaschine erzeugt werden. Das Heizelement führt dem Abgas so lange Wärme zu, bis dieses vor DOC (Temperaturmessstelle T51) eine definierte Temperatur überschreitet. Im „normalen“ Betriebsmodus ist diese mit 320°C festgelegt. Die Komponente kann maximal 2250 Watt Wärmeleistung bereitstellen, wird im normalen Betrieb aber nur mit 80% der Maximalleistung betrieben.



Abbildung 4.8: E-Heater

4.5.2 Rapid Heat Up

Der Rapid Heat up (RHU) ermöglicht innermotorisch einen Anstieg der Abgastemperatur. Die Strategie kann in 2 Betriebsmodi eingeteilt werden.

- RHU Mode1: Durch eine Androsselung wird der Wirkungsgrad des Motors verringert. Die Abgastemperaturen steigen. Als Referenztemperatur für diesen Modus gilt die Temperatur nach dem Abgasturbolader (T51)
- RHU Mode2: Das Abgas wird durch eine späte Nacheinspritzung mit HC und CO angereichert. Diese oxidieren am DOC und erzeugen exotherme Wärme. Die Abgastemperaturen steigen. Als Referenztemperatur für diesen Modus gilt die Temperatur nach Abgasturbolader (T51) bzw. die Temperatur nach DOC (T61).

4.5.3 Ergebnisse

Die Auswirkungen der Heizmaßnahmen auf die Temperaturen in den Nachbehandlungskomponenten sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Sowohl der E-Heater als auch die RHU sind im Warmlauf aktiv. Der DOC überschreitet bereits nach 25 Sekunden die 200°C-Marke und erreicht somit seine Betriebstemperatur. Nach 90 Sekunden erreicht die Komponente im Zyklus ihre maximale Temperatur von 400°C. Im restlichen Teil des Testlaufes bewegt sich der Oxidationskatalysator im Temperaturbereich zwischen 200°C und 400°C. Der katalytisch beschichtete Partikelfilter erreicht nach 90 Sekunden seinen Light Off. Auch er zeigt anschließend eine starke Temperaturerhöhung auf. 400°C werden bis 400 Sekunden im Zyklus erreicht. Das SCR System überschreitet die 200°C Temperaturmarke nach 200 Sekunden und erreicht kurz den optimalen Temperaturbereich zwischen 250°C und 300°C. Im restlichen Zyklus wird dieser nicht unterschritten.

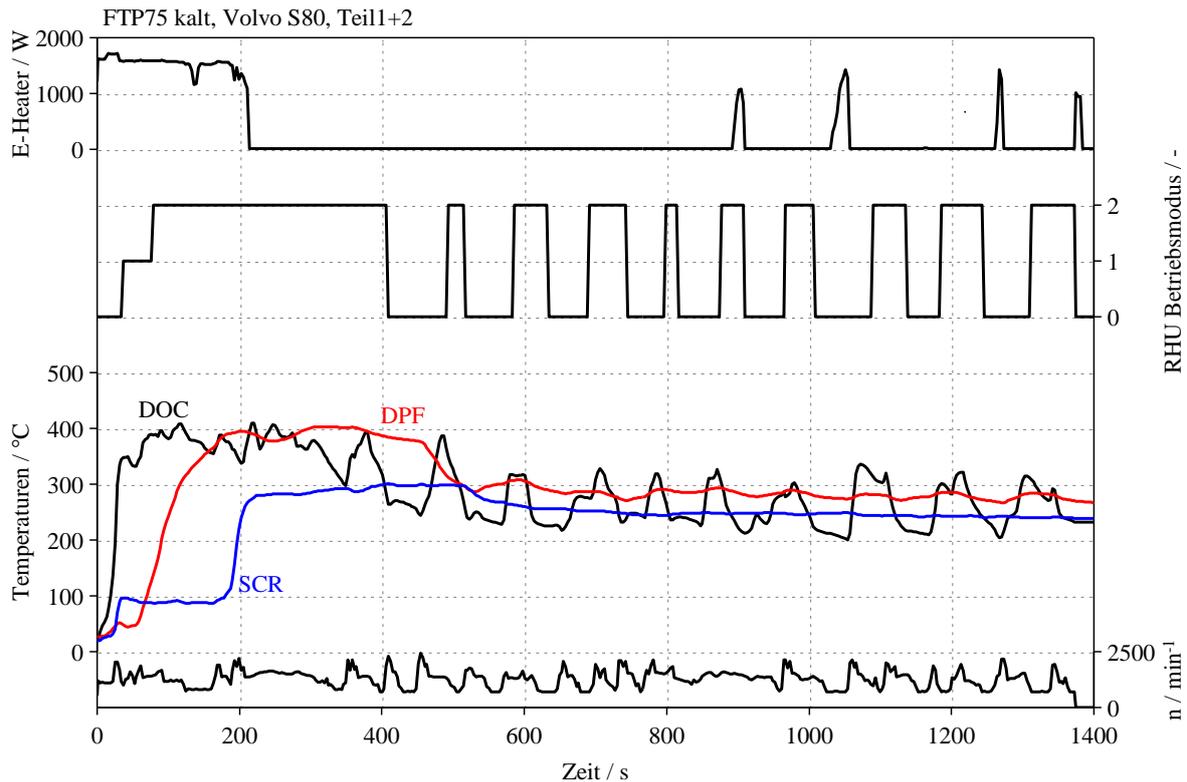


Abbildung 4.9: Auswirkungen der Heizmaßnahmen auf die Katalysortemperaturen

4.5.4 Emissionsstand mit Heizmaßnahmen

Die Auswirkungen der Heizmaßnahmen auf die Emissionen zeigt Abbildung 4.10. Der frühe Light Off der Komponenten ermöglicht besonders im Warmlauf eine wirkungsvolle Reduktion der Schadstoffe. Dies zeigt sich besonders in den NMHC Werten. Im gesamten Zyklus werden zudem nur noch 23mg NO_x pro Meile ausgestoßen. Auch die CO können drastisch reduziert werden. Bei einem Limit von 1000 mg/Meile werden nur noch 100 mg/Meile ausgestoßen. Der späte Light Off des SCR Systems (nach 200 Sekunden) ergibt im Warmlauf immer noch ein geringes Reduktionsvermögen der Stickoxide. Im Vergleich zum Ausgangspunkt konnten diese aber massiv verringert werden. Die Heizmaßnahmen führen aber zu einer Zunahme der Schadstoffe N₂O und CH₄.

Der Kraftstoffverbrauch des Systems 1 nimmt mit aktivierten Heizmaßnahmen stark zu. Es kann ein Mehrverbrauch von 9,2% festgestellt werden. Die zusätzliche Nacheinspritzung der RHU und die innermotorische Erzeugung der elektrischen Energie für den E-Heater erklären diesen zusätzlichen Treibstoffverbrauch.

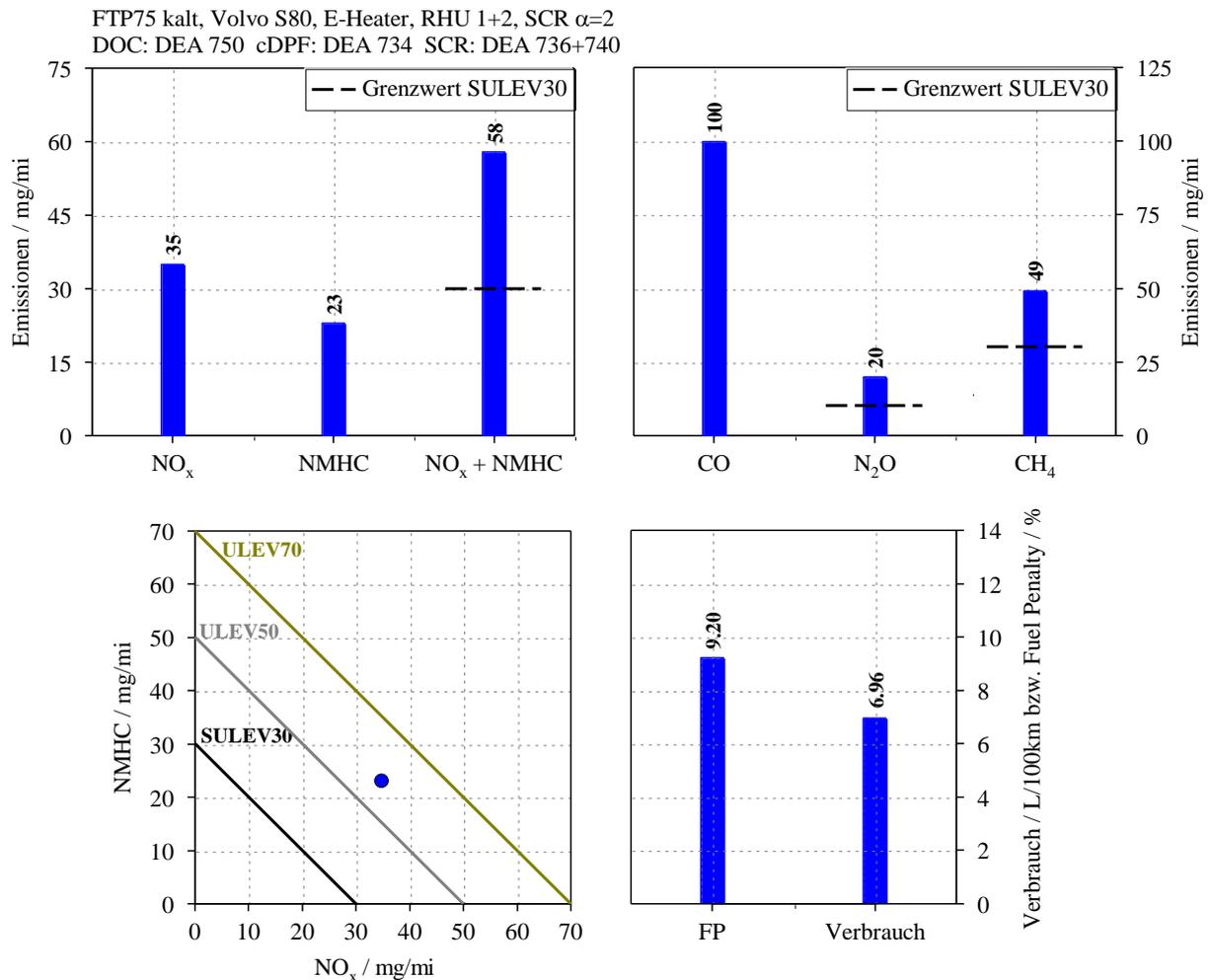


Abbildung 4.10: Emissionen des Systems 1 mit aktivierten Heizmaßnahmen

4.6 Kalbrierarbeiten

Wie in Kapitel 4.5 gezeigt werden konnte, können die Temperaturen der Nachbehandlungskomponenten durch Heizmaßnahmen wirkungsvoll angehoben werden. Dies führt besonders im Warmlauf zu einem starken Rückgang der Emissionen. Der Einsatz der Heizmaßnahmen ist aber mit einer starken Zunahme des Kraftstoffverbrauches verbunden. Um diesen Mehrverbrauch einzuschränken, wurden am Motor verschiedene Kalbrierarbeiten durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden diese näher beschrieben. Dabei wird auch der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Katalysatortemperaturen und das Emissionsergebnis berücksichtigt.

4.6.1 Durchgeführte Kalibriermaßnahmen

Im Zuge der Kalbrierarbeiten wurde eine Vielzahl an Testläufen mit unterschiedlichen Heizparametern durchgeführt. Die markantesten Schritte listet Tabelle 4.2 auf. In den 3 Testzyklen wurden dabei die Menge der ND-AGR im Warmlauf und die Parameter der RHU verändert. Letztere ermöglicht eine Anpassung der Nacheinspritzmenge und der Zieltemperatur für den Modus 2 der Heizmaßnahme (weiterhin definiert als RHU Temperaturschwelle). Der Testlauf mit der Bezeichnung „Kalibrierung 1“ gilt als Ausgangspunkt und soll die Auswirkungen der Maßnahmen aufzeigen.

Tabelle 4.2: Änderungen an der Motorkalibrierung

Testlauf	ND-AGR Warmlauf	Menge Nacheinspritzung	RHU Temperaturschwelle	
			Warmlauf	nach Warmlauf
	-	mg/Hub	°C	°C
Kalibrierung 1	-	2,5	420	280
Kalibrierung 2	erhöhte Menge	1,5	325	270
Kalibrierung 3	erhöhte Menge	1,5	285	230

4.6.2 Ergebnisse

Den Einfluss der Kalibrierarbeiten auf die Temperaturen in den Katalysatoren zeigt Abbildung 4.11. Die linke Seite des Diagramms stellt die Regelparameter der Motorsteuerung dar. Die verringerte Aktivität der RHU in den Kalibrierungen 2 und 3 sind dabei gut ersichtlich.

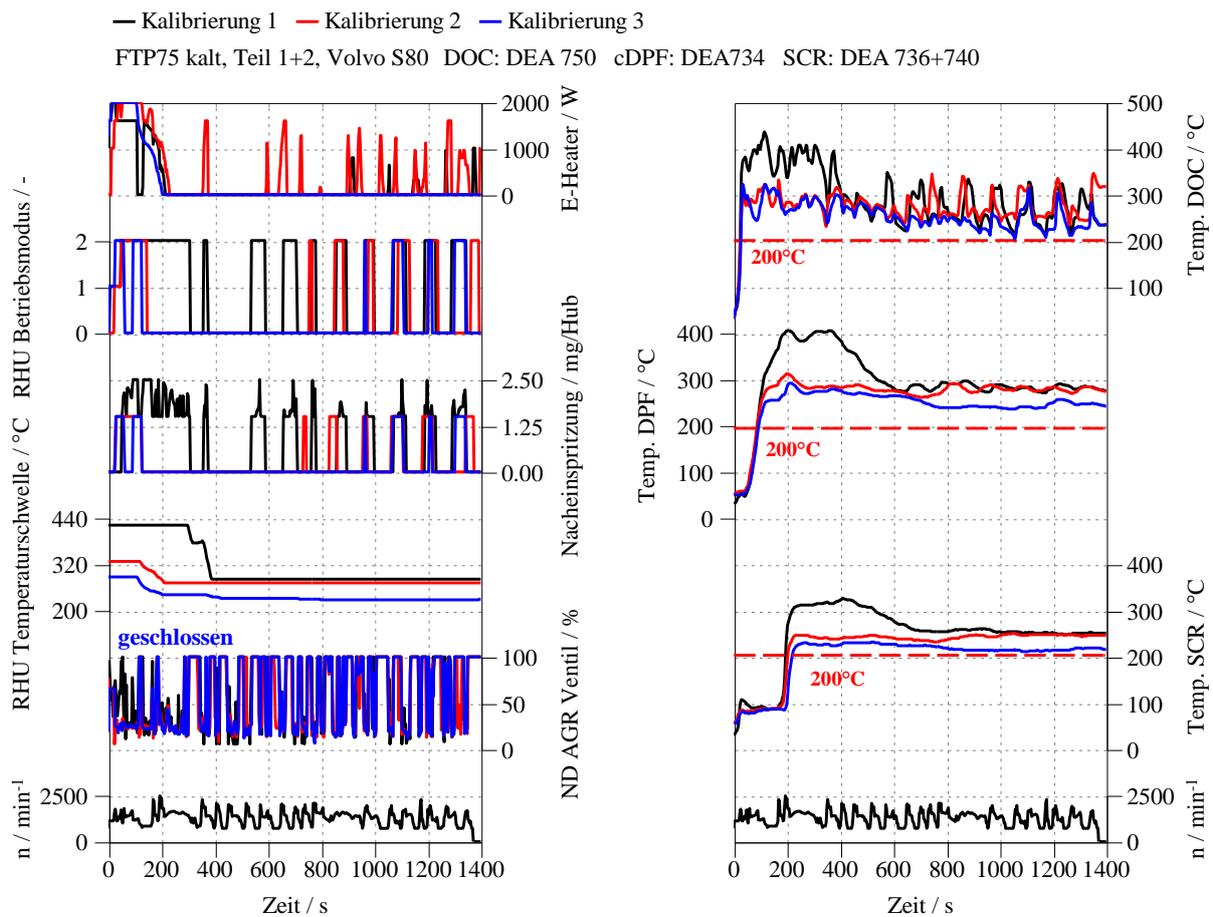


Abbildung 4.11: Auswirkungen der Kalibrierarbeiten im System 1

Trotz reduzierter Heizmaßnahmen steigen im Warmlauf die Katalysatortemperaturen unverändert rasch an. Der Zeitpunkt des Light Off kann beibehalten werden. Nach Erreichen der Betriebstemperatur steigen die Temperaturen aber nicht mehr so stark an. Im Gegensatz zur Kalibrierung 1, zeigen die Temperaturverläufe der Kalibrierung 2 und 3 einen weit gleichmäßigeren Temperaturverlauf. Die verminderte RHU Aktivität führt auch im SCR zu einer deutlichen Temperaturabnahme. Die Betriebstemperatur wird dabei aber an keinem Punkt unterschritten.

Abbildung 4.12 stellt die Emissionsergebnisse der unterschiedlichen Kalibrierungen dar. Die zusätzliche ND-AGR im Warmlauf ermöglicht durch Senkung der Verbrennungstemperaturen eine effektive Reduzierung der NO_x Emissionen. Da die Menge des HC-Ausstoßes beibehalten werden kann, führt dies zu einer Abnahme der für die Gesetzgebung relevanten Summenergebnisse. Zusätzlich kann mit der Reduzierung der Heizmaßnahmen ein Rückgang der N_2O und CH_4 Emissionen festgestellt werden. Die Änderungen der Kalibrierung haben einen positiven Einfluss auf den Mehrverbrauch. Dieser kann von 9,2 % bei Kalibrierung 1 auf 7,49 % bei Kalibrierung 3 reduziert werden.

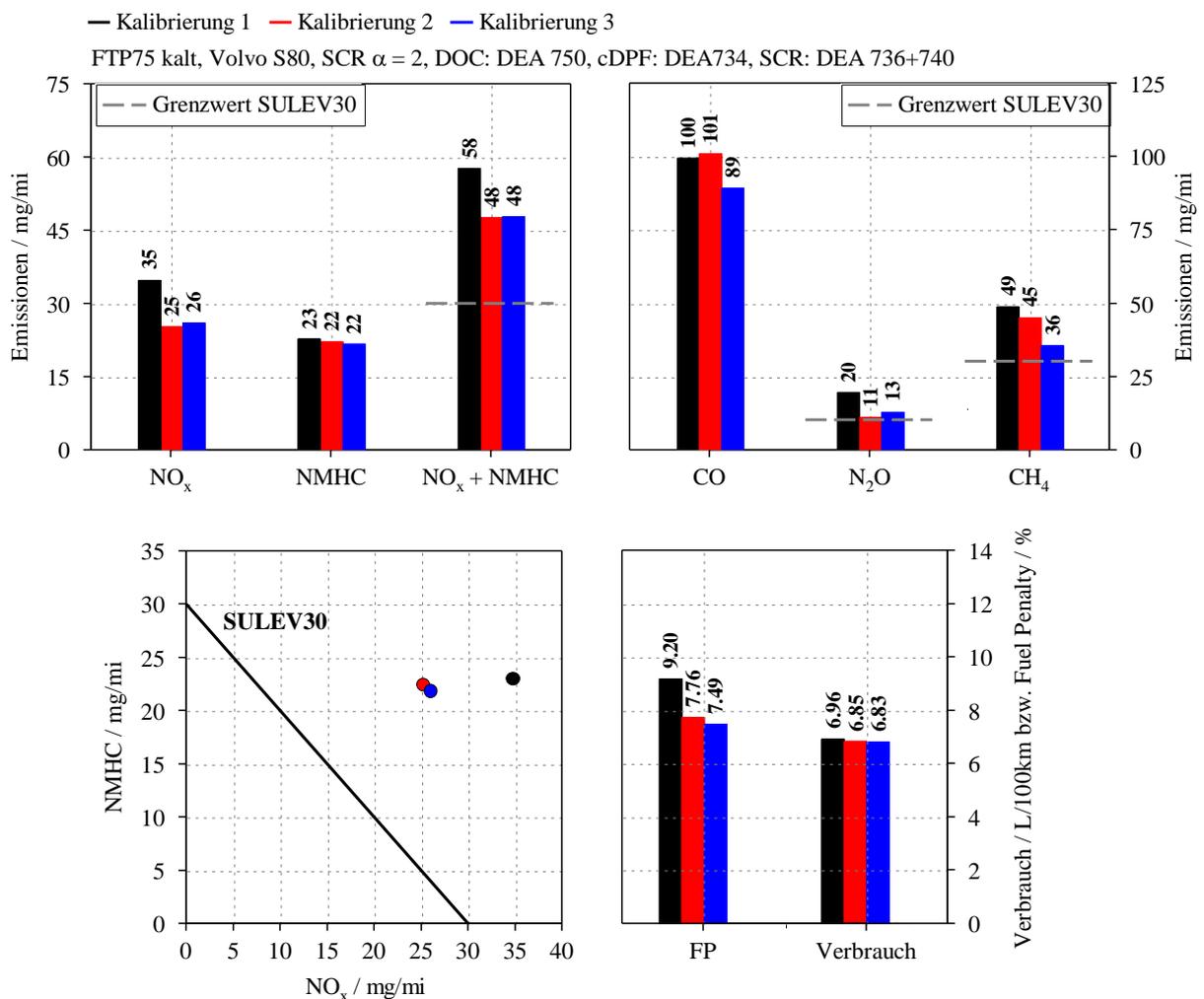


Abbildung 4.12: Emissionsergebnisse der unterschiedlichen Kalibrierungen

Die durchgeführten Kalibrierarbeiten erweisen sich als sehr wirkungsvoll. Die Reduzierung der RHU-Maßnahmen ermöglicht eine Absenkung des Verbrauches bei Beibehaltung der

Schadstoffreduzierung. Trotz geringerer Temperaturen im SCR kann dieser die Stickoxide im selben Maße reduzieren. Der Hauptgrund dafür ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Durch die RHU wird ein Großteil der Wärmemenge im DPF gespeichert [24]. In Leerlaufphasen und Zyklusteilen mit geringer Last wird diese Wärmemenge an die Umgebung und die ND-AGR abgegeben. Somit kann nur ein Teil der investierten Wärmemenge von SCR System genutzt werden.

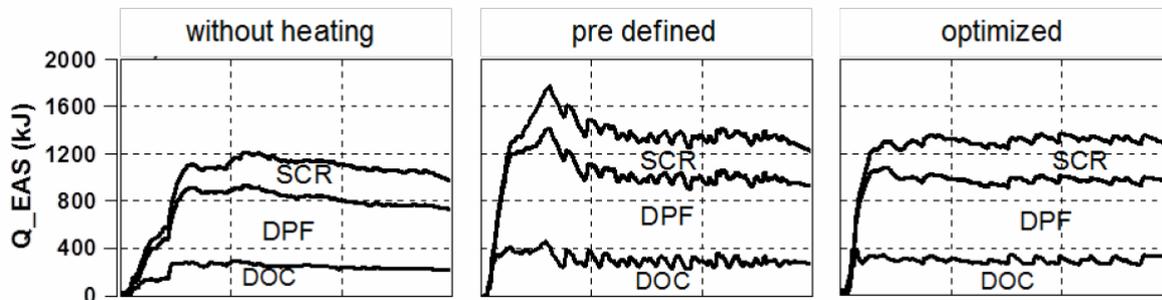


Abbildung 4.13: Einfluss der Heizmaßnahmen auf die Wärmemenge in den Katalysatoren [24]

Neben den Änderungen an den Heizmaßnahmen führt die ND-AGR im Warmlauf zusätzlich zu einer Reduzierung der Stickoxidemissionen. Die Parameter der Kalibrierung 3 werden weiterhin beibehalten.

4.7 Analyse der Schadstoffreduzierung an verschiedenen Messpositionen

Im folgenden Kapitel ist die Schadstoffreduzierung an den einzelnen Messpositionen dargestellt. Dabei wird aufgeführt, an welchem Katalysator der jeweilige Schadstoff in welchem Maße umgesetzt wird. In jeweils einem Zyklus wurde bei identischen Testparametern die Zusammensetzung des Abgases gemessen. Somit kann der Emissionsverlauf und das Summenergebnis der Schadstoffe nach jeder Komponente ermittelt werden. Während die RHU im Betriebsmodus 1 und 2 aktiviert wurde, wurde der E-Heater deaktiviert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind folgend dargelegt.

4.7.1 Emissionsverläufe

Die Emissionsverläufe an den einzelnen Messstellen sind in Abbildung 4.14 aufgetragen. Die Deaktivierung des E-Heaters sorgt für einen späten Light Off der Komponenten. Der DOC überschreitet seine Betriebstemperatur erst nach 200 Sekunden, das SCR System nach 280 Sekunden. Sowohl NMHC als auch CO werden im Oxidationskatalysator umgewandelt. Während die CO erst nach dem Light Off der Komponente oxidiert werden, können NMHC bereits bei geringeren Temperaturen reduziert werden. Erreicht der SCR seine Betriebstemperatur, ist dieser für die Reduzierung der Stickoxide verantwortlich. Im Warmlauf kann zudem eine NO_2 mindernde Wirkung im DOC beobachtet werden. Da dieses Gas reaktiver als Sauerstoff ist, dient es vor überschreiten der Betriebstemperatur im DOC als Oxidationsmittel für die CO- und HC Emissionen [13]. Lachgas wird nur zu geringen Anteilen innermotorisch gebildet. Hauptsächlich entsteht dieser Schadstoff durch die Oxidation am DOC. Der Einsatz der Nacheinspritzung (RHU Mode 2) ermöglicht reduzierende Bedingungen an der Edelmetallbeschichtung. Die unvollständige Reduzierung von NO_2 am DOC ist verantwortlich für die Lachgasbildung. Diese ist somit an das Thermomanagement gebunden [24]. Das entstandene Lachgas kann durch die folgenden

Nachbehandlungskomponenten nicht reduziert werden. Der Verlauf der Emissionen im Zeitbereich von 0-300 Sekunden ist in Abbildung 0.4 im Anhang D dargestellt.

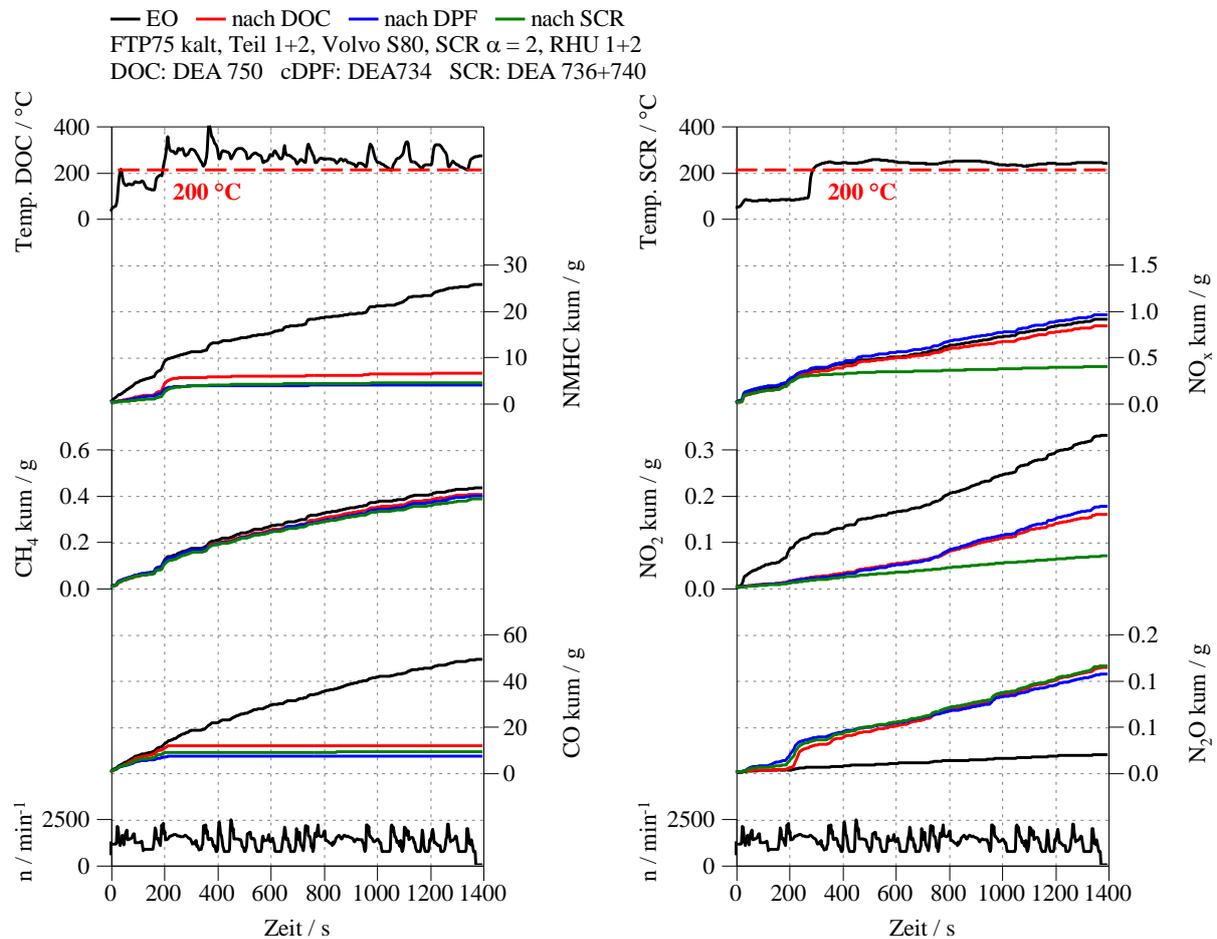


Abbildung 4.14: Emissionsverläufe an den verschiedenen Messpositionen

4.7.2 Ergebnisse

Die Emissionsergebnisse an den verschiedenen Messstellen zeigt Abbildung 4.15. Wie schon gezeigt werden konnte, werden HC und CO hauptsächlich am DOC oxidiert. Da der E-Heater in der Versuchsreihe deaktiviert wurde, erreichen die Nachbehandlungskomponenten erst sehr spät ihre Betriebstemperatur. Dies erklärt die hohen Schadstoffmengen, insbesondere der HC-Emissionen. Der SCR sorgt für die Reduzierung der NO_x. Die Zusammensetzung der Stickoxide kann durch das Verhältnis NO₂/NO_x bzw. NO/NO_x ausgedrückt werden. Reduzierende Vorgänge am DOC ändern dessen Zusammensetzung zugunsten einer höheren NO- und Lachgasmenge.

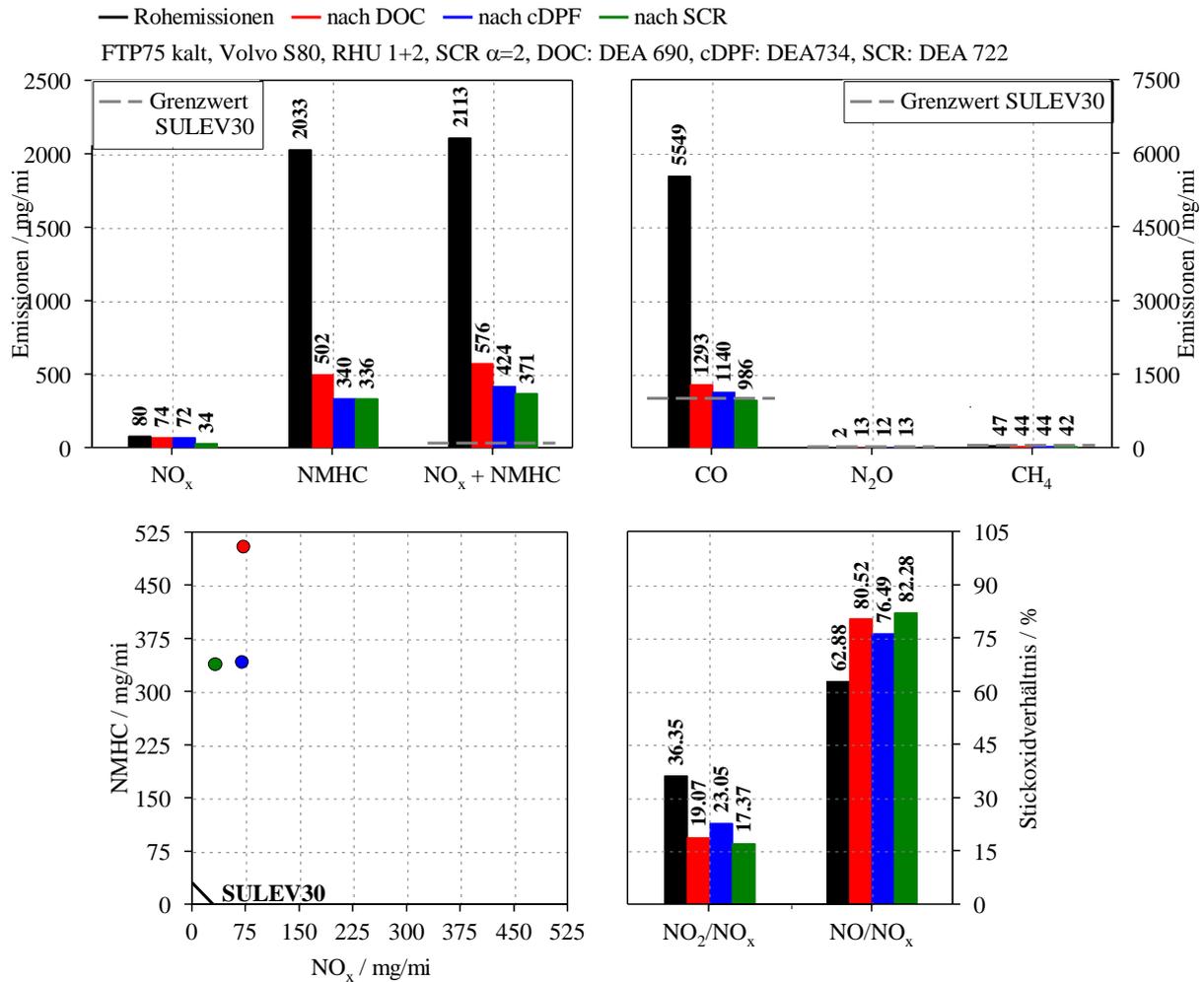


Abbildung 4.15: Emissionsergebnis an den verschiedenen Messstellen

Die relativen und absoluten Konvertierungsraten des Systems 1 sind in Abbildung 4.16 dargestellt. HC- und CO Emissionen können vom System zu insgesamt 83% oxidiert werden. Der DOC nimmt daran mit 75 % relativer Konvertierung den größten Anteil. Die Schadstoffminderung im cDPF ist verglichen dazu gering. Stickoxide können vom System 1 zu 57 % reduziert werden. Der Schadstoff wird dabei hauptsächlich im SCR verringert. Der späte Light Off und ein ungünstiges NO_2/NO_x ¹¹ Verhältnis verhindern dabei eine höhere Konvertierungsrate. Um die Reduzierung der NO_x anzuheben, ist ein früheres Erreichen der Betriebstemperatur anzustreben.

¹¹ Optimal $\text{NO}_2/\text{NO}_x = 0.5$ [4]

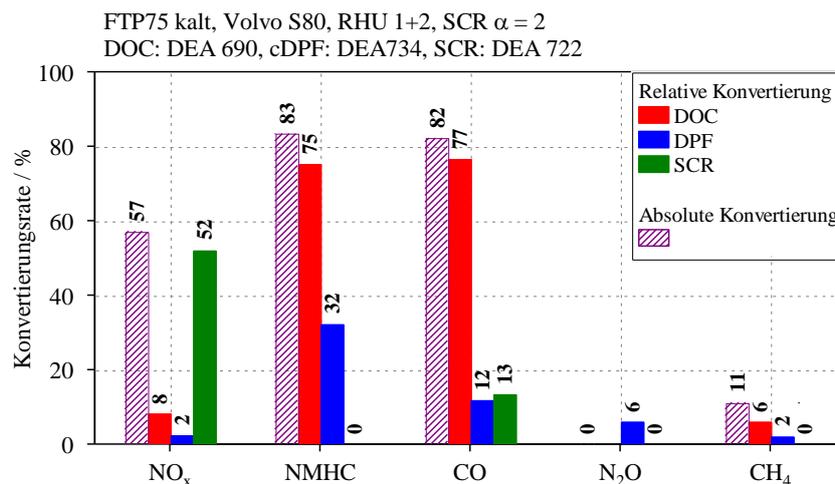


Abbildung 4.16: Absolute und relative Konvertierungsraten des System 1

4.8 SCR Alterung

Die SULEV30 Gesetzgebung schreibt für das Nachbehandlungssystem eine definierte Langzeitstabilität vor. Die Grenzwerte dürfen auch nach 150.000 Meilen die vorgegebenen Schadstoffwerte nicht überschreiten. Um den Einfluss der Alterung auf die Nachbehandlungskomponenten und deren Auswirkung auf die Schadstoffreduktion festzustellen, wird im folgenden Kapitel das Emissionsergebnis des SCR Katalysators genauer analysiert.

4.8.1 Ergebnisse

Im Zuge der Untersuchungen wurde mit dem eingebauten SCR Katalysator am Prüfstand eine Strecke von ca. 30.000km dargestellt. Beim Regenerationsbetrieb des Partikelfilters und bei der Entschwefelung des Speicherkatalysators führen Abgastemperaturen von 600°C zu einer beschleunigten Alterung der SCR Beschichtung. Mit zunehmender Nutzungsdauer kann somit eine verringerte Reduktion der Komponente festgestellt werden. Dabei muss beachtet werden, dass, dass die Komponente am Prüfstand einer wesentlich höheren Belastung als in einem Serienfahrzeug ausgesetzt ist.

Abbildung 4.17 zeigt den Einfluss der Alterung auf das Emissionsergebnis. Die Rohemissionen der beiden Testzyklen decken sich dabei sehr gut, womit die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden kann. Während der neue SCR nach Erreichen der Betriebstemperatur die Stickoxide effektiv reduzieren kann, wird beim gealterten System nur noch ein sehr geringer Teil des Schadstoffes umgesetzt. Auch nach Light Off steigen die Emissionen stetig an.

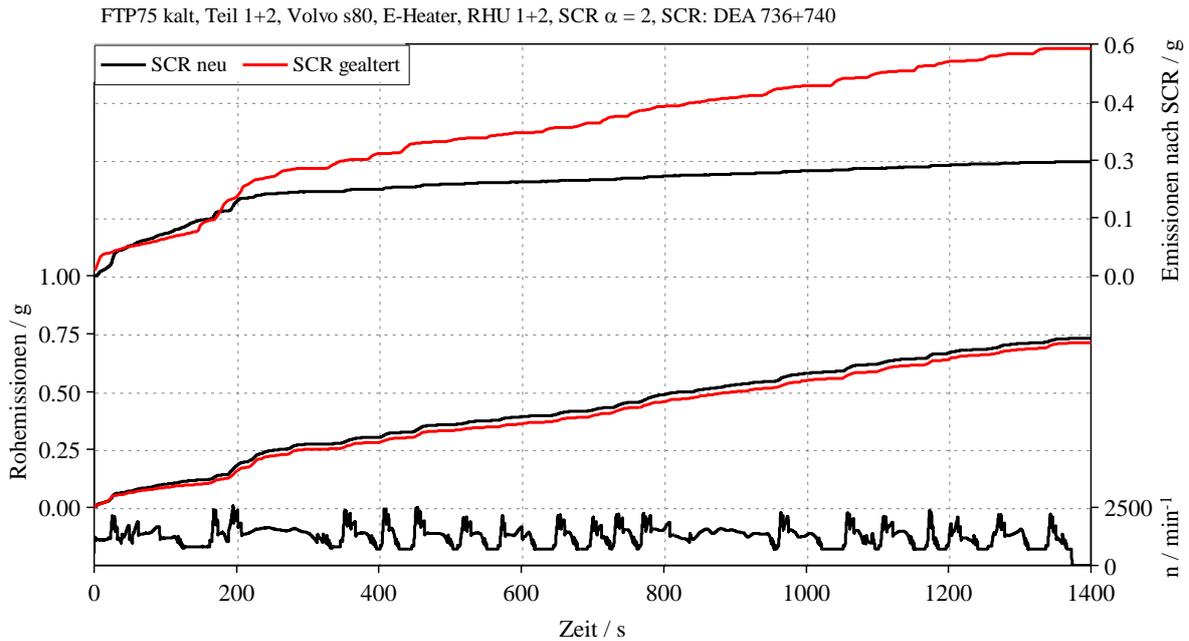


Abbildung 4.17: Einfluss der Alterung auf das Reduktionsvermögen des SCR

Abbildung 4.18 stellt das Emissionsergebnis des neuen und des gealterten SCR Systems für die Schadstoffe NO_x , NO und NO_2 dar. Zudem sind die Konvertierungsraten für die einzelnen Stickoxide aufgetragen. Während beim neuen System die Reduktion der Stickoxide zu 66% erfolgt, sinkt die Konvertierungsrate beim gealterten System auf 39%. Hauptursache für diesen stark gesunkenen Wert ist sehr geringe Reduzierung der NO Emissionen. Das hochreaktive NO_2 kann durch das gealterte System zwar immer noch effektiv vermindert werden, doch führt der Alterungseffekt auch hier zu einem Rückgang des Reduktionsgrades.

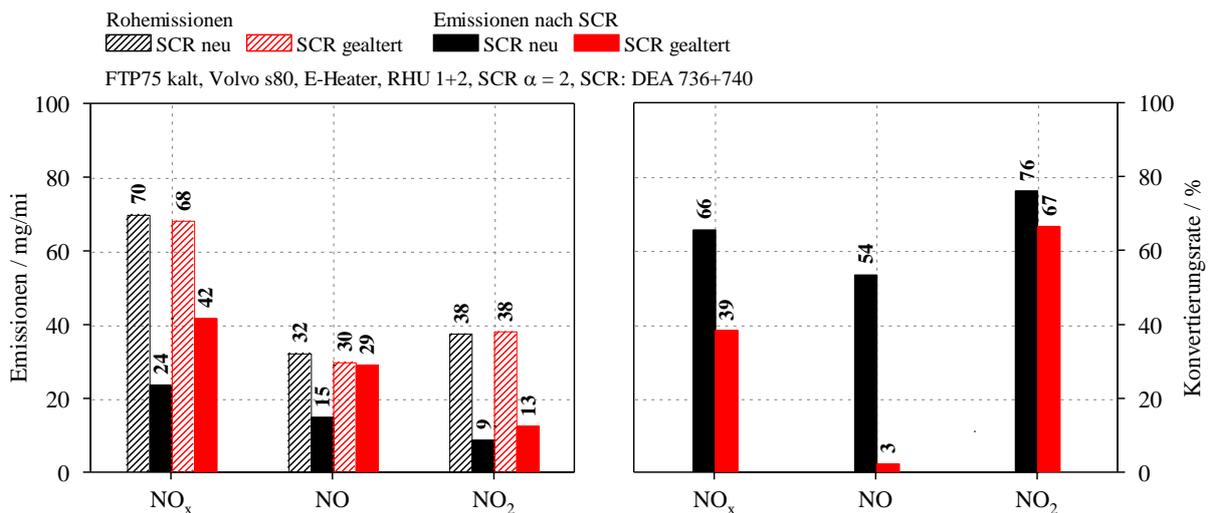


Abbildung 4.18: Emissionsergebnis bzw. Konvertierungsrate des gealterten und des neuen SCR Systems

Wie in den Untersuchungen gezeigt werden konnte, hat die Alterung der Katalysatoren einen sehr starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Abgassystems.

4.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass durch die Konfiguration im System 1 eine effektive Schadstoffreduzierung möglich ist. Dabei konnte der große Einfluss der Katalysatortemperaturen, insbesondere im SCR, festgestellt werden. Um die Schadstoffmengen im Warmlauf zu reduzieren, ist ein möglichst früher Light Off der Nachbehandlungskomponenten anzustreben. Untersuchungen zur Bestimmung der Basiskalibrierung ergaben, dass die HD-AGR bis 2 bar effektivem Mitteldruck im Warmlauf zu einer effektiven Temperatursteigerung in den Nachbehandlungskomponenten und insbesondere im SCR führt. Dabei kann zudem die Menge der Kohlenwasserstoffemissionen vermindert werden. Heizmaßnahmen, zu denen im System 1 der E-Heater und der Rapid Heat Up Modus zählen, ermöglichen einen frühen Light Off des SCR Systems und somit eine wirkungsvolle Reduktion der Schadstoffmengen. Dieser Vorteil ist aber mit einem Mehrverbrauch an Kraftstoff verbunden.

Durch eine Optimierung der Motorkalibrierung konnte in den beschriebenen Untersuchungen eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei beinahe gleichbleibenden Emissionen erzielt werden. Trotz Reduzierung der Heizmaßnahmen werden im SCR immer noch die notwendigen Mindesttemperaturen eingehalten. Das Emissionsergebnis der optimierten Kalibrierung am Ende der Untersuchungen zeigt Abbildung 4.19. Dabei wird zusätzlich die Schadstoffmenge eines neuen und eines gealterten SCR Systems verglichen. Mit einem neuen SCR stößt das Nachbehandlungssystem jeweils 23 mg NO_x und 22 mg NMHC pro Meile aus. Insgesamt kann ein NO_x und NMHC Summenwert von 45 mg/Meile ermittelt werden. ULEV50 wird vom System unterschritten, SULEV30 kann durch eine Steigerung der Heizmaßnahmen ermöglicht werden. Diese führen aber unweigerlich zu einem höheren Verbrauch. Das untersuchte System 1 benötigt mit der optimierten Strategie bereits 7.5% mehr Kraftstoff als ein System ohne Heizmaßnahmen. Eine große Herausforderung stellt zudem die Alterung der Nachbehandlungskomponenten dar. Wie die Ergebnisse verdeutlichen, sinkt das Reduktionsvermögen des SCR mit zunehmender thermischer Alterung. Die Menge der NO_x verdoppelt sich dabei.

Der Grenzwert für CO (1000mg/Meile) kann vom System deutlich unterschritten werden. Da die Bildung der N₂O in einem hohen Maße an die Heizmaßnahmen gebunden ist [24], kann im vorliegenden System ein hoher Messwert festgestellt werden. Die Menge der CH₄ Emissionen überschreitet ebenso den Grenzwert.

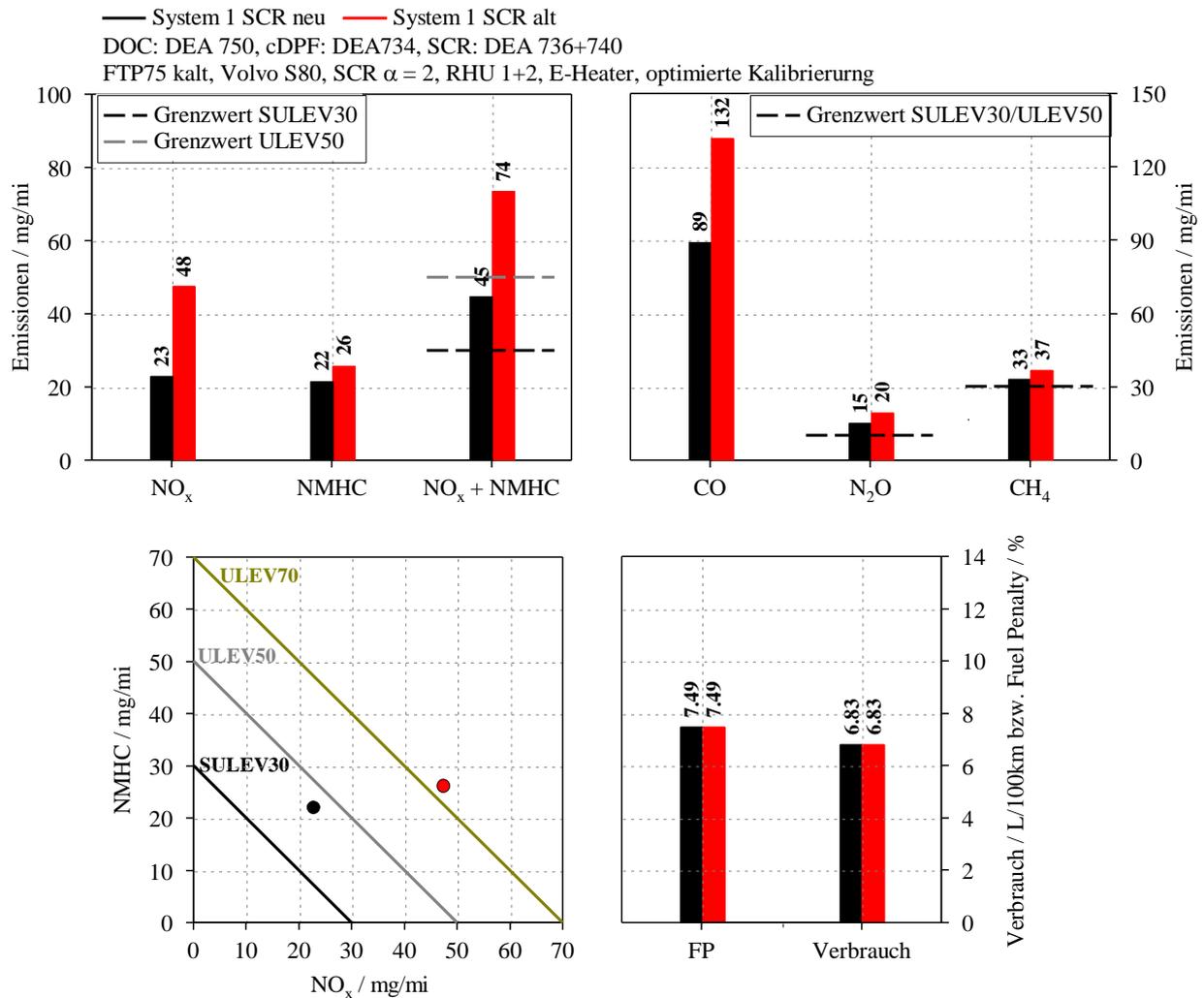


Abbildung 4.19: Emissionsergebnis des System 1 mit neuem und gealterten SCR System

Um eine weitere Reduzierung der Emissionen zu erzielen, ist ein frühes Erreichen der Katalysatortemperaturen und insbesondere des SCR Systems zu gewährleisten.

4.10 Gegenüberstellung mit Simulationsergebnissen

Ein mit dem System 1 vergleichbares Nachbehandlungskonzept (E-Kat, DOC, cDPF, Unterboden SCR) wurde in der AVL List GmbH durch Computersimulationen untersucht [24]. Dabei wurde bewertet, wie sich eine weitere Steigerung der Heizmaßnahmen auf die SCR Temperaturen und in weiterer Folge auf das Emissionsverhalten auswirkt. Die RHU wurde dabei auf einen möglichst geringen Mehrverbrauch und niedrigen HC-Rohemissionen optimiert. Der Zusammenhang ist in [24] dargestellt. Mit einer Zunahme der Heizmaßnahmen kann eine höhere Zieltemperatur im SCR erreicht werden. Dadurch können Stickoxide bei weiterhin geringen HC-Emissionen effektiver reduziert werden. Die zusätzlichen Heizmaßnahmen führen aber zu einem Anstieg des Verbrauchs.

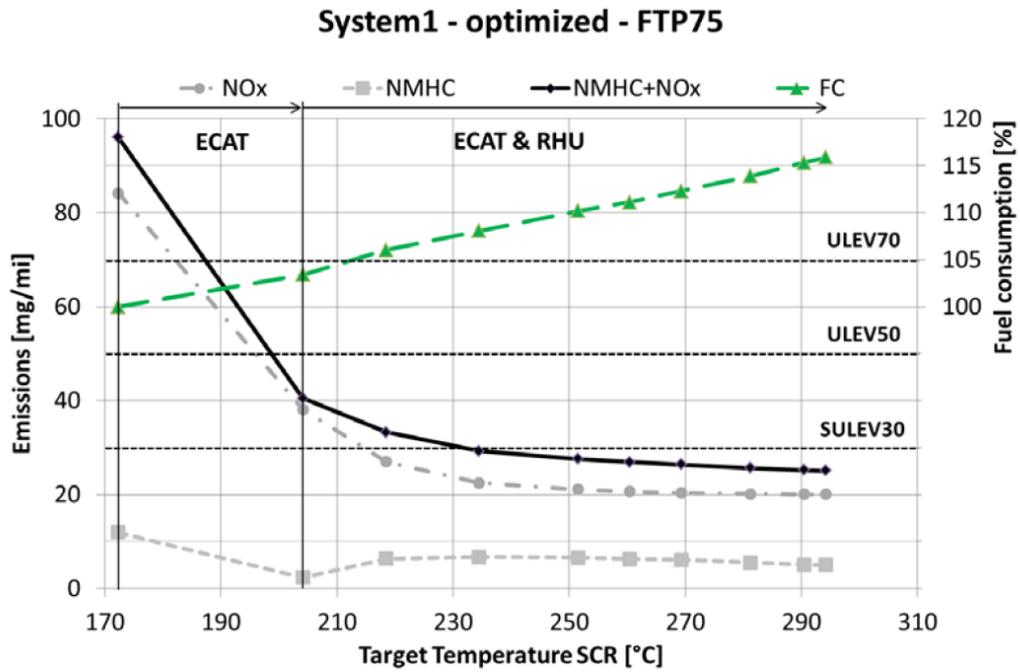


Abbildung 4.20: Einfluss der Heizmaßnahmen auf das Emissionsergebnis [24]

5 SULEV System 2

Das folgende Kapitel widmet sich der Beschreibung des SULEV System 2, welches weiterhin als System2 bezeichnet wird. Aufbauend auf dem System1, sollen durch verschiedene Maßnahmen die Emissionen weiter reduziert werden. Um dies zu verwirklichen, muss insbesondere die Reduktion der Stickoxide verbessert werden. An Stelle des cDPF erfolgt der Einbau eines Partikelfilters mit SCR-Beschichtung. Die motornahe Anbringung der Komponente ermöglicht ein rasches Erreichen der Betriebstemperatur. Das SCR-System am Ende des Abgasstranges bleibt weiterhin erhalten. Insgesamt sind somit eine oxidierende und zwei reduzierende Komponenten verbaut. Die Ergebnisse dieser Strategie sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Nach der Beschreibung der Versuchsanordnung wird näher auf die Gleichverteilung des Reduktionsmittels eingegangen. Der Bestimmung des Ausgangspunktes folgt die Analyse des Schadstoffumsatzes an den verschiedenen Messpositionen. Die Relevanz des E-Heaters wird ebenso beschrieben wie eine vergleichende Darstellung des Systems bei unterschiedlichen Fahrzeugen. Abschließend erfolgt eine Bewertung und Diskussion des Systems 2.

5.1 Versuchsanordnung System 2

Den Versuchsaufbau des Systems 2 zeigt Abbildung 5.1.

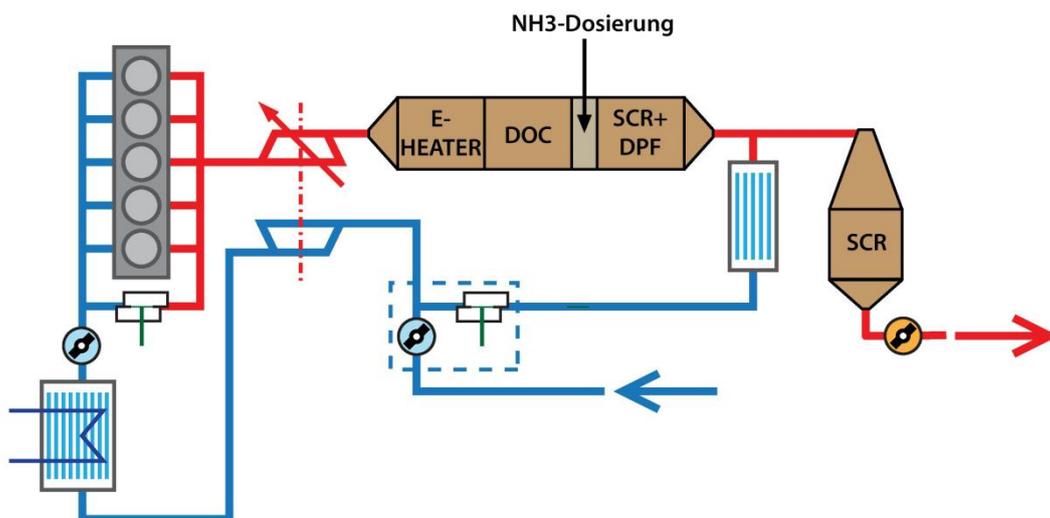


Abbildung 5.1: Schema der Abgasnachbehandlungssysteme im System 2

Nach dem Abgasturbolader befinden sich der E-Heater und der Oxidationskatalysator. Die Eigenschaften dieses Bauteils zeigt Tabelle 0.4. An der katalytischen Beschichtung werden HC- und CO Emissionen oxidiert. Vor der Entnahmestelle für die ND-AGR ist der Partikelfilter angeordnet. Dieser verfügt über eine selektiv katalytisch wirkende Beschichtung. In Kombination mit dem Reduktionsmittel Ammoniak werden Stickoxide selektiv katalytisch reduziert. Die Komponente erfüllt somit die Funktion eines Partikelfilters und eines SCR-Katalysators. Die motornahe Anbringung des sDPF¹², ermöglicht ein rasches Erreichen der Betriebstemperatur und somit eine effektive NO_x Minderung im Warmlauf. Die Eigenschaften der Komponente zeigt Tabelle 0.5 im Anhang E. Die Beimengung des

¹² Selektiver katalytisch beschichteter Dieselpartikelfilter

Reduktionsmittels erfolgt vor dem sDPF. Dabei wird nicht wie in den Systemen 1 und 3 AdBlue eindosiert, sondern das Gas NH_3 direkt über einen Dosierring in das Abgas eingebracht. Durch diese Vorgehensweise kann auf die Berechnung, die Auslegung und den Bau einer komplexen Mischstrecke verzichtet werden. Der zusätzliche Aufwand wird dadurch stark minimiert. Zudem ermöglicht die direkte Eindosierung des Reduktionsmittels eine kürzere Abgasstrecke, was sich positiv auf den Temperaturverlauf im Partikelfilter auswirkt. Als letzte Nachbehandlungskomponente befindet sich ein SCR-Katalysator im Abgassystem. Durch einen definierten NH_3 Schlupf des sDPF wird dieser mit Reduktionsmittel beliefert und kann somit die restlichen Stickoxide eliminieren. Die Eigenschaften des verwendeten SCR-Katalysators sind in Tabelle 0.6 aufgelistet.

5.2 NH_3 Gleichverteilung

Beim System 2 wird das für die Verringerung der Stickoxide notwendige Reduktionsmittel NH_3 direkt vor dem sDPF in das Abgas eingebracht. Dies geschieht über einen spiralförmigen Dosierring, dargestellt im Anhang F. Damit der sDPF gleichmäßig mit dem Reduktionsmittel beaufschlagt wird, ist es wichtig, dass die zugeführte NH_3 Menge einheitlich im Abgasstrom verteilt ist. Um die optimale Form des Mischers zu bestimmen, wurden die Gleichverteilung und der Uniformity Index verschiedener Konzepte ermittelt. Die Ergebnisse sind folgend dargestellt.

5.2.1 Eindüsungsvariationen

Zur flächenmäßig gleichförmigen Verteilung des NH_3 stehen verschiedene Eindüsungsvariationen zur Verfügung:

- NH_3 Variation 1: Flügelmischer vor dem Lochblech mit spiralförmiger Eindosierung.
- NH_3 Variation 2: Flügelmischer vor dem Lochblech mit spiralförmiger Eindosierung und Blende. Verschlussene Eindüsungslöcher gegen den Abgasmassenstrom.
- NH_3 Variation 3: Flügelmischer vor dem Lochblech mit spiralförmiger Eindosierung. Blende mit zentralem 1 cm Loch. Verschlussene Eindüsungslöcher gegen den Abgasmassenstrom und Dummy.

Die einzelnen Komponenten sind im Anhang F dargestellt. Um die Gleichverteilung der jeweiligen NH_3 Einbringung zu bestimmen, werden im Abgasstrang mehrere Messungen vorgenommen. Dies geschieht unter Zuhilfenahme des in Anhang G dargestellten Messrings. Die Menge des Reduktionsmittels wird im Zentimeterabstand in horizontaler und vertikaler Richtung bestimmt.

5.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche sind in der Abbildung 0.10 und Abbildung 0.11 im Anhang G dargestellt. Die NH_3 Variation 3 bringt das Gas sehr gleichmäßig in den Abgasstrom ein. Es wird ein Uniformity Index von 0,9 erreicht. Bei dieser Variante wird das Gas sternförmig gegen die Flussrichtung des Massenstromes eingedüst und durch einen Flügelmischer mit Mittelblende und einem zentimetergroßen Loch durchmischt. Die Konfiguration ist mit der Darstellung der NH_3 Gleichverteilung in Abbildung 5.2 abgebildet. Für die weiteren Untersuchungen wird die beschriebene Eindüsungsvariation weiter verwendet.

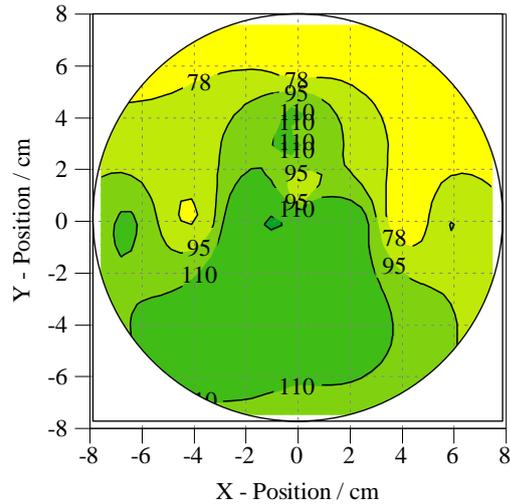


Abbildung 5.2: Optimierter NH₃ Mischer mit Darstellung der Gleichverteilung

5.3 Ausgangspunkt System 2

Im folgenden Kapitel wird der Ausgangspunkt des Systems 2 festgehalten. Dabei werden der Temperaturverlauf in den Katalysatoren und die Menge der Emissionen bestimmt. Die Kalibrierung des Testlaufes ist bereits an die Eigenschaften des Nachbehandlungssystems angepasst. Da das Nachbehandlungskonzept mit dem sDPF und dem SCR über zwei reduzierenden Komponenten verfügt, kann das System Stickoxide in einem höherem Maße reduzieren. Dies wird in den Kennfeldern der ECU durch eine höhere Luftmasse berücksichtigt, womit das Niveau der NO_x in den Rohemissionen steigt und eine Verringerung der Kohlenwasserstoffemissionen im Rohabgas erreicht werden kann. Die Regelparameter des Systems 2 sind in Abbildung 0.12 im Anhang H aufgelistet. Als Heizmaßnahme wird beim System 2 nur der E-Heater aktiviert. Die Deaktivierung des Rapid Heat Up Modus ermöglicht eine Verringerung des Treibstoffverbrauchs bei einer weiteren Reduzierung der HC-Rohemissionen. Der Verlauf der Temperaturen und der Emissionen ist in Abbildung 5.3. dargestellt. Durch den Einsatz des E-Heaters steigen die Katalysatortemperaturen rasch an. Der DOC überschreitet bei 30 Sekunden die 200°C¹³ Temperaturgrenze, im sDPF findet dies bei 175 Sekunden statt. Es zeigt sich, dass der DOC die Kohlenwasserstoffemissionen effektiv verringern kann. In den ersten 100 Sekunden kann nur ein relativ geringer Anteil der HC-Emissionen durch die Nachbehandlung umgesetzt werden. Ein ähnliches Verhalten ist bei den Stickoxidemissionen zu erkennen. In den ersten 100 Sekunden wird auch hier der Schadstoff verstärkt ausgestoßen. Erreicht der sDPF seinen Light Off, können die NO_x Emissionen aber effektiv reduziert werden.

¹³ Definierte Light Off Temperatur

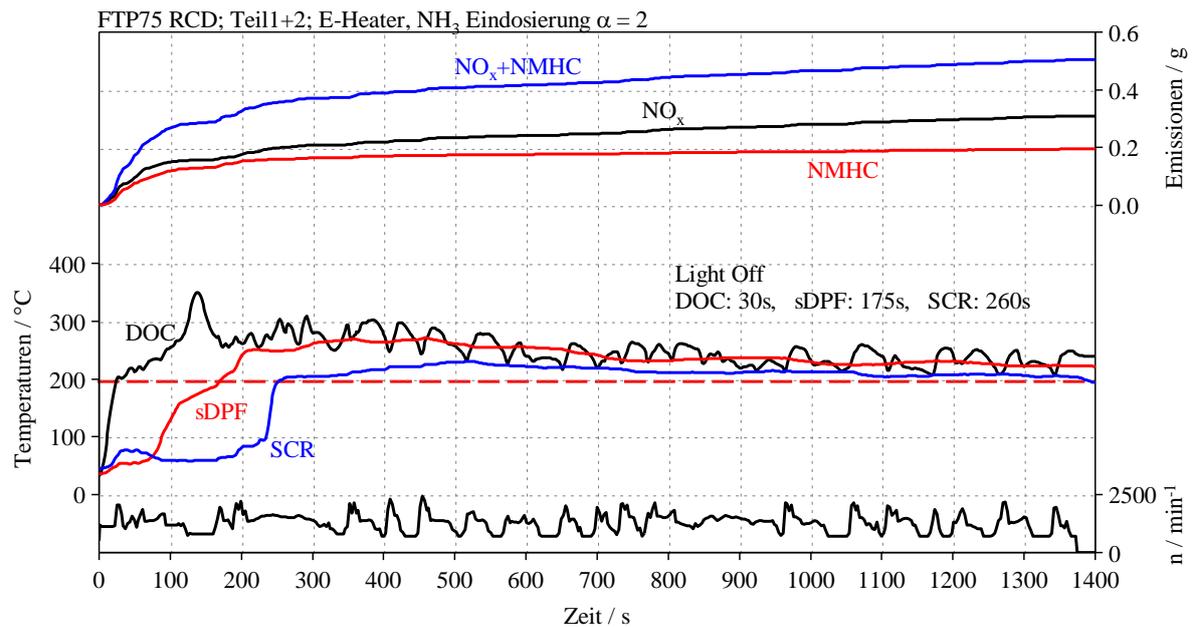


Abbildung 5.3: Emissions- und Temperaturverlauf des Systems 2 im FTP75 Zyklus

Das Emissionsergebnis des gesamten FTP75 Zyklus ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Ein massiver Rückgang kann bei den NMHC beobachtet werden. Die an das Nachbehandlungssystem angepasste Kalibrierung führt zu einer wirkungsvollen Verringerung der Kohlenwasserstoffemissionen. Der immer noch relativ späte Light Off des sDPF führt besonders im Warmlauf zu einem Anstieg der NO_x Emissionen. In Summe kann somit ein NO_x und NMHC Gesamtwert von 40 mg/Meile erreicht werden. Der Grenzwert für CO-Emissionen kann durch das System deutlich unterschritten werden. Der Ausstoß an Lachgas und Methan kann durch das System aber nicht eingehalten werden.

Im Gegensatz zu einem System ohne Heizmaßnahmen (Verbrauch 6,25 l/100km), führt die Aktivierung des E-Heaters zu einem Mehrverbrauch von ca. 2%. Im Vergleich zum System 1 kann somit ein wirkungsvoller Verbrauchsvorteil erreicht werden. Dieses Ergebnis ergibt sich durch die Deaktivierung des Rapid Heat Up.

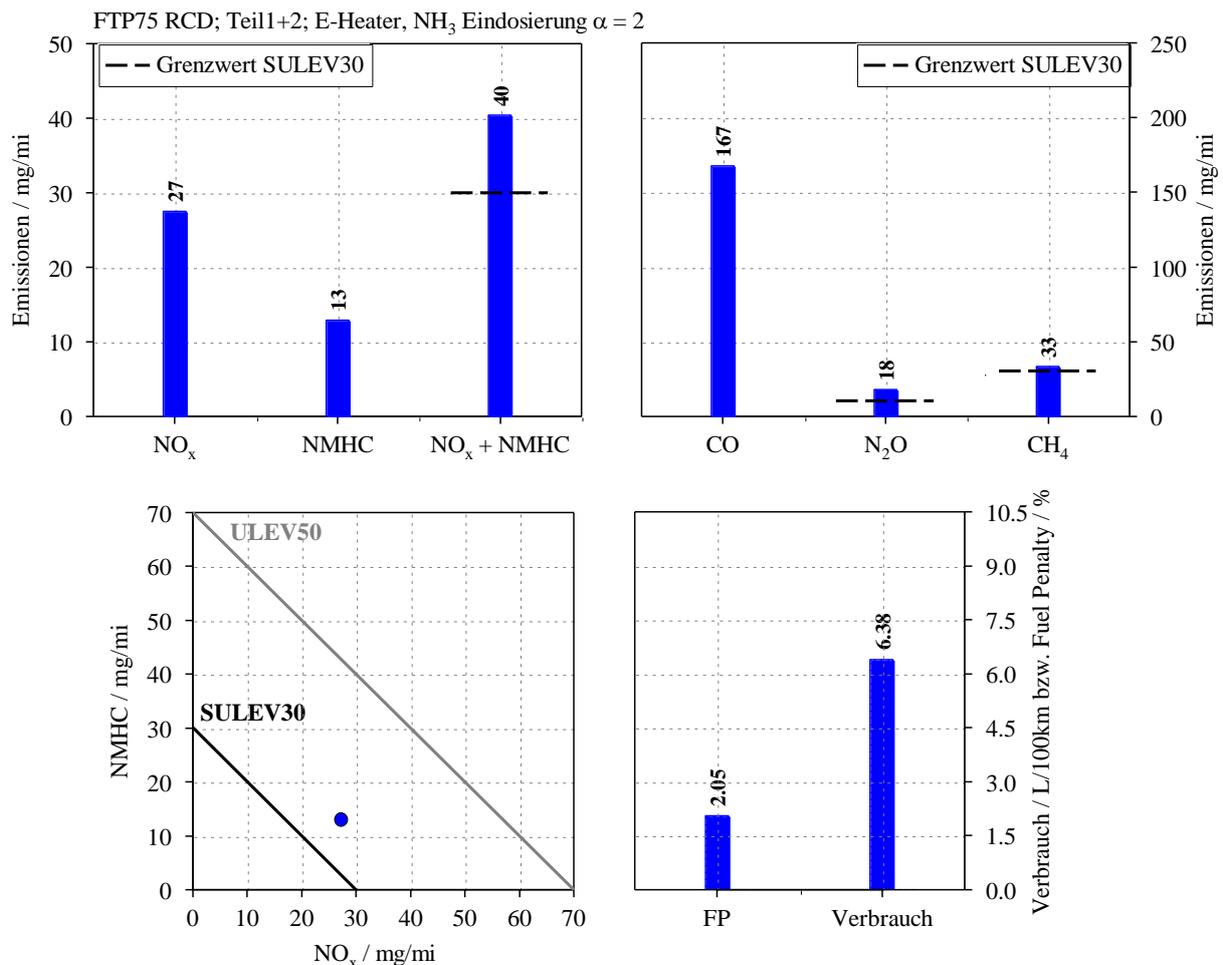


Abbildung 5.4: Emissionsergebnis des Systems 2

Wie in diesem Kapitel klar verdeutlicht wird, zeigt das System 2 bereits in seiner Ausgangskonfiguration einen sehr geringen Schadstoffausstoß bei niedrigem Verbrauch auf.

5.4 Analyse der Schadstoffreduzierung an verschiedenen Messpositionen

Im folgenden Kapitel ist der Schadstoffumsatz an den einzelnen Komponenten der Nachbehandlung dargestellt. Bei identischen Testparametern wurde in einem Versuchslauf die Zusammensetzung an den verschiedenen Messpositionen bestimmt. Während des Versuchslaufs war der E-Heater aktiviert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind folgend beschrieben.

5.4.1 Emissionsverläufe

Der Verlauf der Emissionen an den einzelnen Messpositionen ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass HC- und CO-Emissionen vom DOC oxidiert werden. Wie Abbildung 0.13 im Anhang H aufzeigt, wird CO erst ab Erreichen der 200°C Temperaturschwelle oxidiert. HC-Emissionen können bereits bei geringeren Temperaturen umgesetzt werden. Innermotorisch gebildetes Methan kann vom Abgasstrang aufgrund zu niedriger Temperaturen nicht oxidiert werden. Der Großteil der Stickoxidreduzierung findet im sDPF statt. Überschreitet dieser die 200°C Temperaturmarke, wird der Schadstoff effektiv

umgesetzt. In den ersten 200 Sekunden wird NO_2 zusätzlich durch den DOC verringert. Im weiteren Verlauf des Zyklus wird der Schadstoff aber hauptsächlich im sDPF umgesetzt. Die unvollständige Oxidation von Stickoxiden am DOC führt an dieser Komponente zu einer Bildung von Lachgas [24]. Der Schadstoff kann durch den restlichen Abgasstrang nicht umgesetzt werden.

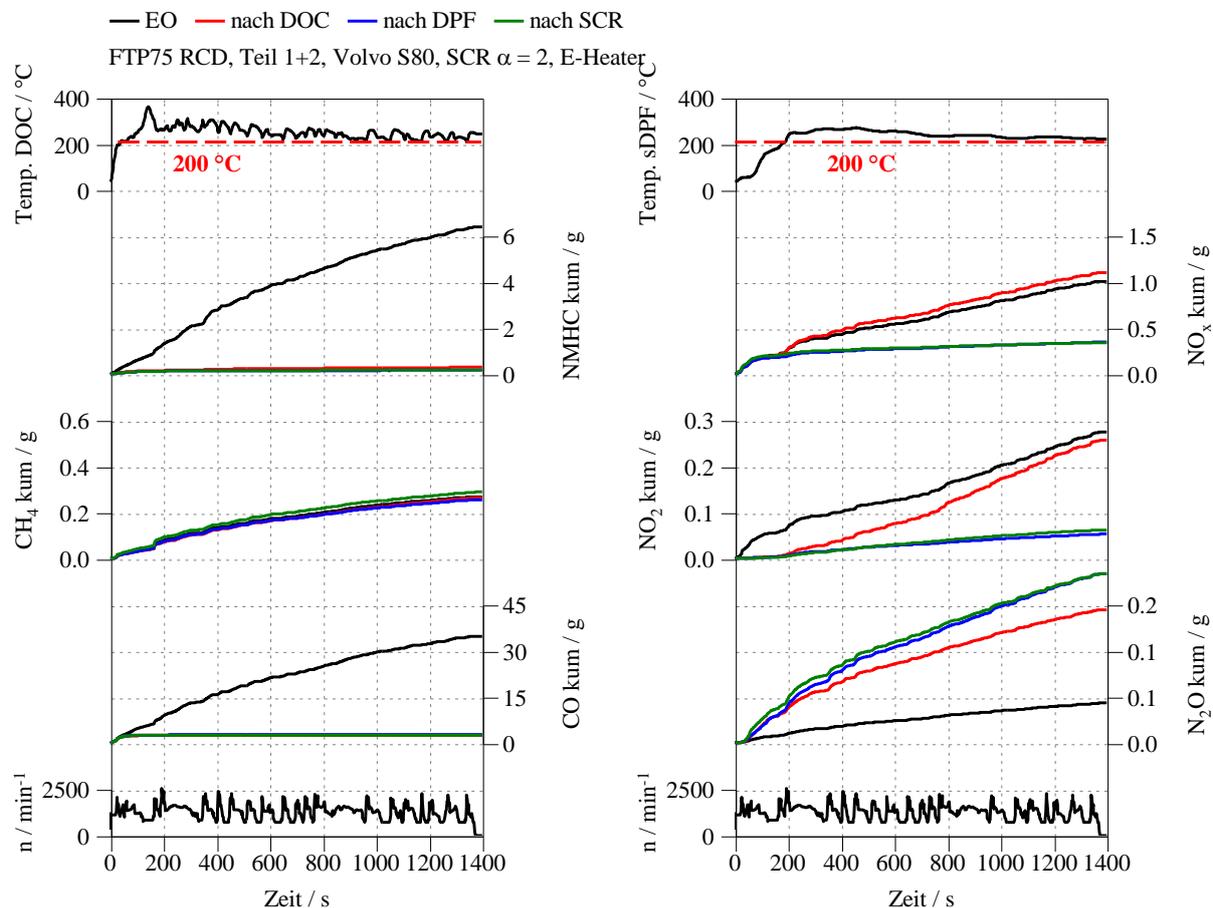


Abbildung 5.5: Emissionsverlauf an den einzelnen Messstellen

5.4.2 Ergebnisse

Die Emissionsergebnisse an den einzelnen Messpositionen zeigt Abbildung 5.6. Wie schon beobachtet werden konnte, werden HC- und CO-Emissionen am DOC oxidiert. Die Reduktion der Stickoxide findet hauptsächlich am sDPF statt. Der Anteil des SCR an der Schadstoffreduzierung ist verschwindend gering. Bereits nach dem Partikelfilter ergibt sich das endgültige Emissionsergebnis, welches ULEV50 unterschreitet. Lachgas wird zum Großteil am DOC gebildet und kann durch die folgenden Komponenten nicht umgesetzt werden. Der Schadstoff überschreitet wie Methan den vorgeschriebenen Grenzwert.

Die Zusammensetzung der Stickoxide verändert sich im Laufe des Abgasstranges. Reduzierende Reaktionen verringern zunehmend die Konzentration des NO_2 . Das SCR System wird somit nur noch mit einem geringen Anteil an NO_2 beaufschlagt, womit auch der Grad der Reduzierung sinkt. Zudem wird dem SCR System nur noch eine sehr geringe NO_x Konzentration zugeführt. Da die Konvertierungsrate von der Konzentration der Reaktionspartner abhängig ist, sinkt bei geringen Schadstoffanteilen auch die Fähigkeit des Systems diese zu eliminieren.

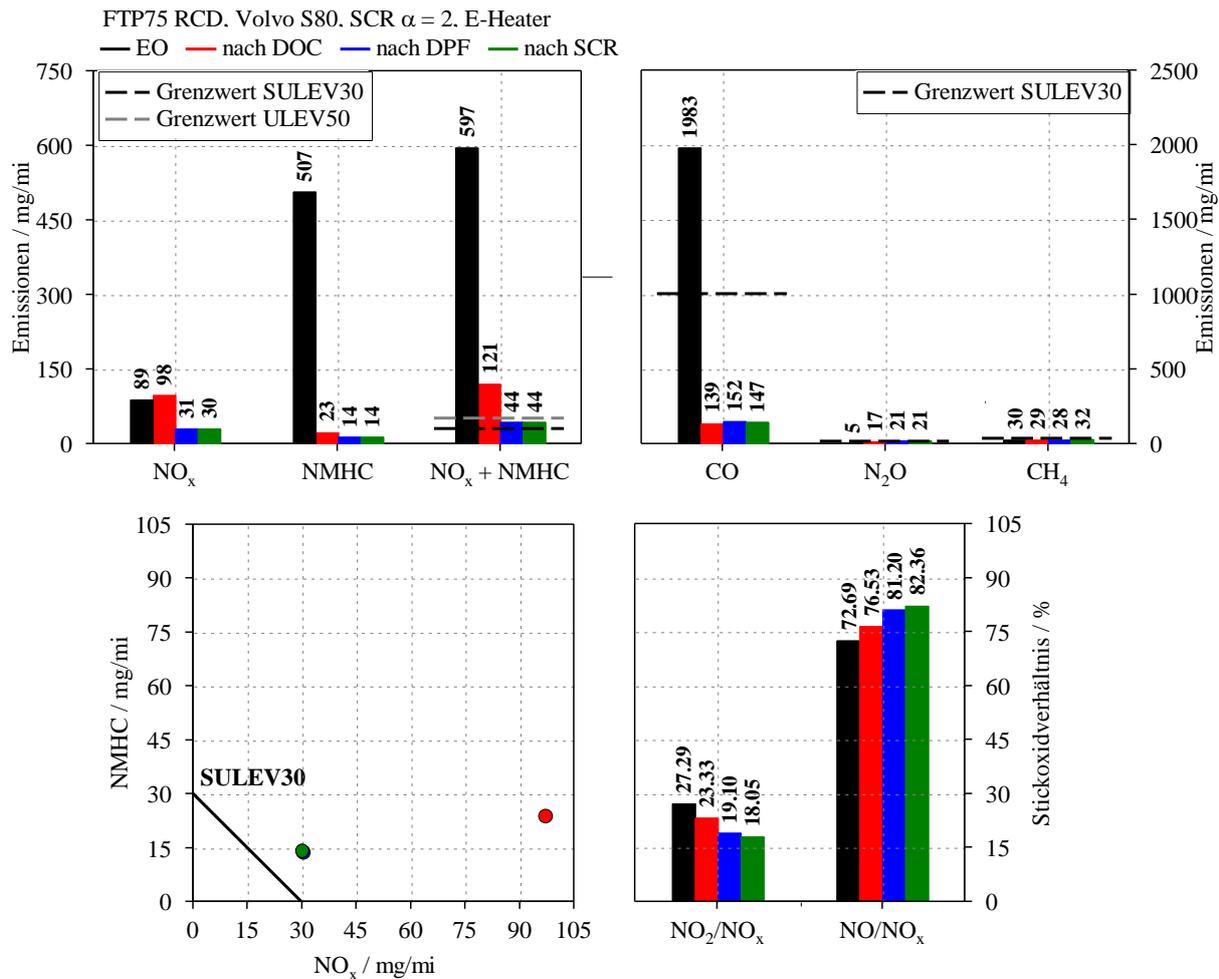


Abbildung 5.6: Emissionsergebnisse und Zusammensetzung der Stickoxide an den einzelnen Messpositionen

Die Konvertierungsraten des Systems 2 sind in Abbildung 5.7 aufgelistet. Stickoxide werden durch das System zu 66% umgesetzt, wobei der sDPF hauptsächlich für den Schadstoffumsatz verantwortlich ist. HC und CO Emissionen können durch die Abgasnachbehandlung zu über 90 % umgesetzt werden. Der DOC übernimmt dabei einen Großteil der Konvertierung. Die Schadstoffe Lachgas und Methan können durch die Abgasnachbehandlung nicht umgesetzt werden und passieren das System beinahe ungehindert.

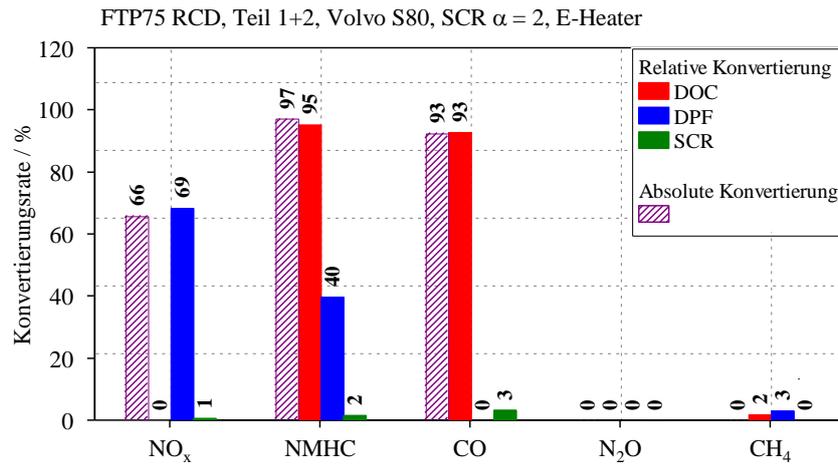


Abbildung 5.7: Relative und Absolute Konvertierungsraten der Abgasnachbehandlung

5.5 Relevanz des E-Heater

Um die Relevanz des E-Heaters auf die Temperaturen im Abgassystem und somit auch auf den Grad der Schadstoffkonvertierung aufzuzeigen, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Bei identischen Testparametern wurde der E-Heater in einem Zyklus aktiviert (Zieltemperatur 250°C bei T51) und in einem weiteren deaktiviert. Die Ergebnisse sind folgend dargestellt.

5.5.1 Energiebereitstellung

Abbildung 5.8 stellt die im System 2 verrichteten Arbeiten des E-Heaters, der Lichtmaschine und des Kraftstoffes dar. Der linke Abschnitt des Diagramms fasst die Teile 1+2, der rechte den Teil 3 des FTP75 Zyklus zusammen. Die über den E-Heater in das Abgas eingebrachte Energie muss von der Lichtmaschine (LiMa) und in weiterer Folge vom Aggregat aufgewendet werden. Somit steigt in einem geringen Maße auch die erforderliche Treibstoffmenge. Im 3. Teil des FTP75 Zyklus sind diese Energien weit geringer, da der Motor noch warm ist.

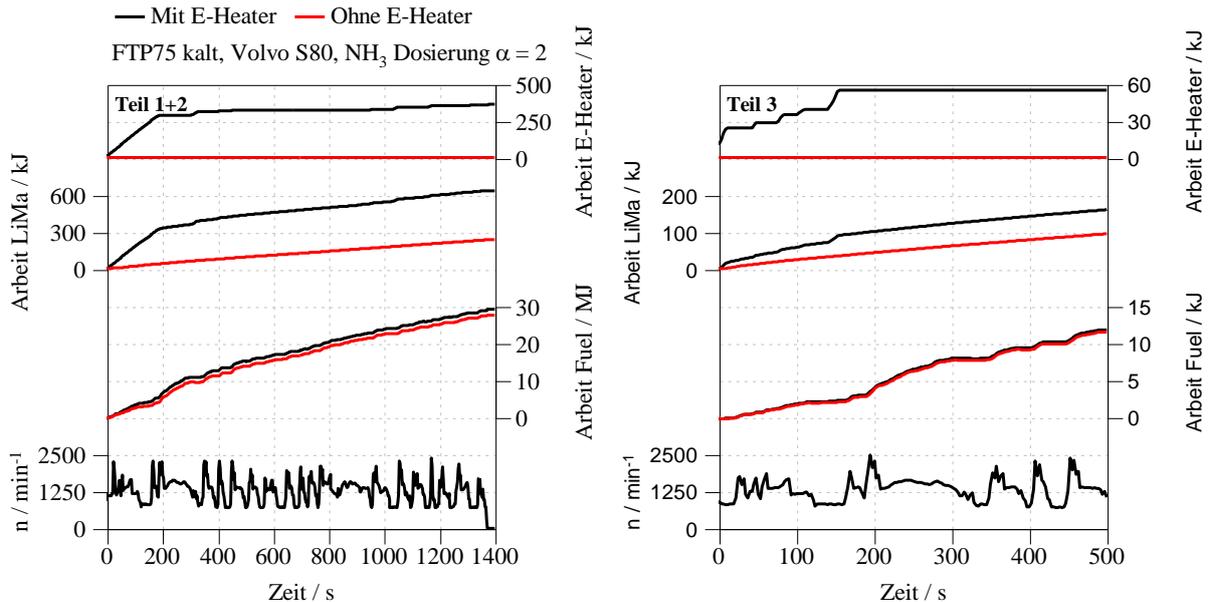


Abbildung 5.8: Im System 2 verrichtete Arbeit

5.5.2 Ergebnisse

Der Einfluss der Heizkomponente hat, wie in Abbildung 0.14 (Anhang H) ersichtlich, einen massiven Einfluss auf die Katalysatortemperaturen in den ersten 200 Sekunden. Während der DOC mit Aktivierung des E-Heaters die 200°C Temperaturmarke schon nach 30 Sekunden überschreitet, findet dieser Vorgang ohne Heizen 160 Sekunden später statt. Auch im sDPF führt die Deaktivierung des E-Heaters zu einem verspäteten Erreichen der Betriebstemperatur. 65 Sekunden liegen dabei zwischen dem Überschreiten der 200°C Marke. Im 3. Teil des FTP Zyklus ist der Einfluss des E-Heaters bei weitem nicht so markant wie im ersten Teil. Nach DOC sind nur geringe Temperaturunterschiede zu erkennen.

Der Zeitpunkt des Light Off wirkt sich besonders im Warmlauf stark auf die Emissionsergebnisse aus. Wie Abbildung 0.15 (Anhang H) zeigt, steigen durch das späte Erreichen der Betriebstemperatur besonders die HC-Emissionen stark an. Bei den Stickoxid-Emissionen ist ein weiteres Phänomen zu erkennen. Bis zum Light Off des sDPF können durch das Abschalten des E-Heaters NO_x vermindert werden. Da durch die fehlende Energiebereitstellung für die Heizkomponente ein niedriger Lastpunkt erforderlich ist, sinken die Rohemissionen und demzufolge auch die Schadstoffe nach SCR. Der verspätete Light Off des sDPF führt aber zu einer Verschlechterung des Summenergebnisses.

Die Emissionsergebnisse der Versuchsreihe sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Bei Deaktivierung des E-Heaters kann bei den NO_x, HC und CO-Emissionen ein starker Anstieg beobachtet werden. Besonders die Menge der NMHC und CO nimmt durch den späten Light Off des DOC stark zu. Der hohe Anstieg der Schadstoffe führt in Summe zur Überschreitung des ULEV70 Grenzwerts für NO_x und NMHC. Bei den Emissionen von Lachgas und Methan kann keine Relevanz des E-Heaters auf das Emissionsergebnis beobachtet werden.

Die Aktivierung des E-Heater ermöglicht zwar eine effektive Reduzierung der Emissionen, ist aber mit einem Mehrverbrauch an Treibstoff verbunden. Die Heizmaßnahmen haben einen zusätzlichen Kraftstoffverbrauch von 3% zur Folge.

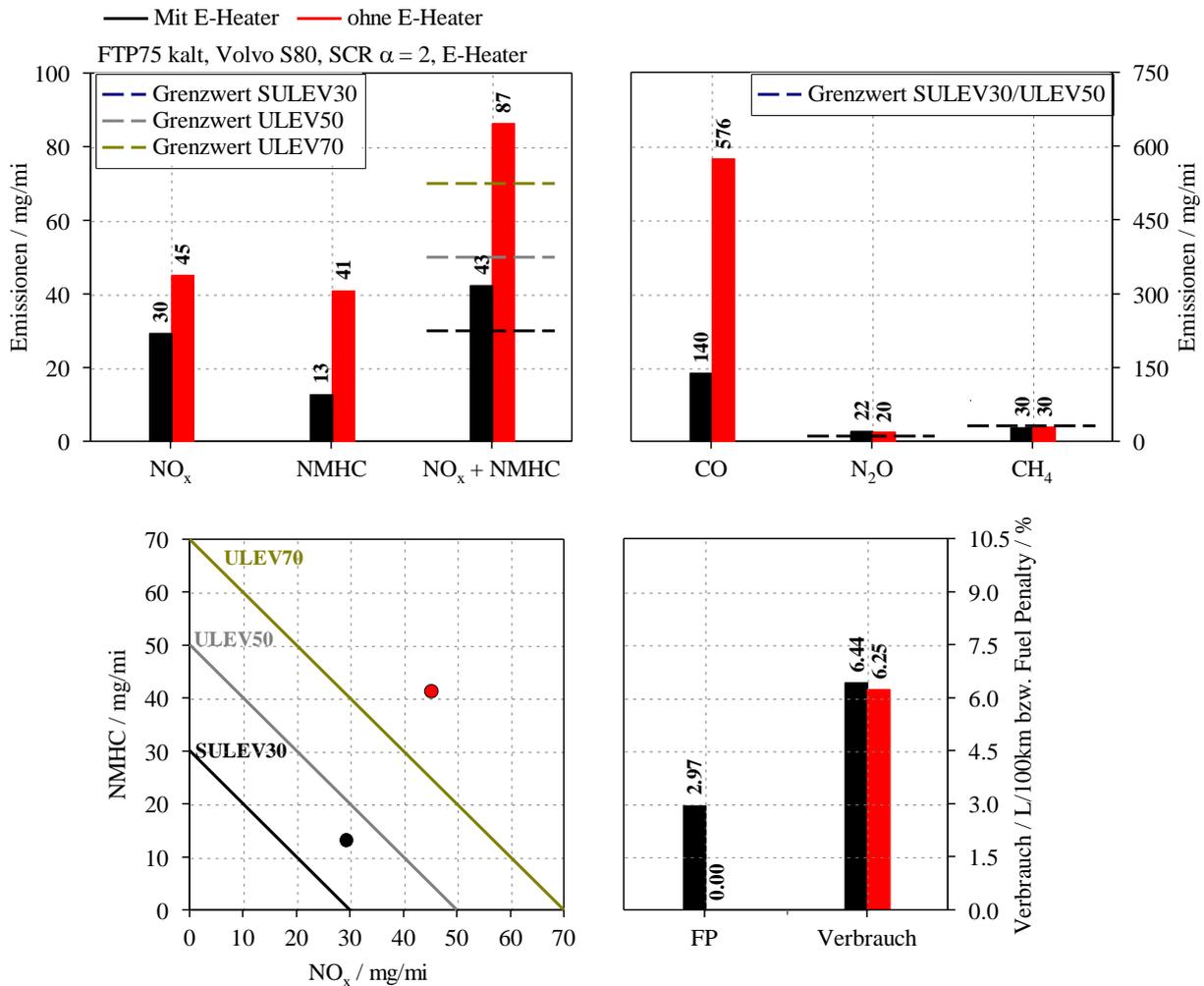


Abbildung 5.9: Emissionsergebnis mit bzw. ohne Heizmaßnahmen

Die Untersuchungen zeigen wie groß der Einfluss des E-Heaters auf die Leistungsfähigkeit des Abgassystems ist.

5.6 Fahrzeugvergleich

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss des Fahrzeuges auf die Leistungsfähigkeit der Abgasnachbehandlung beschrieben. Dabei werden die aufzuwendenden Arbeiten, die Temperaturen und Emissionen verglichen. Die Ergebnisse sind folgend dargestellt.

5.6.1 Vergleich der Lastpunkte und der aufzuwendenden Arbeit

Bei den Untersuchungen konnten für die geforderten Emissionierungszyklen zwei verschiedene Fahrzeuge simuliert werden (siehe Kapitel 3.5). Bis zu diesem Punkt des Projektes erfolgte die Bestimmung der Messwerte auf Basis des Fahrzeuges Volvo S80. Bei der Darstellung des weit schwereren SUV¹⁴ Volvo XC90 wird ein höheres Drehmoment und

¹⁴ Sport Utility Vehicle

in weiterer Folge das Anfahren höherer Lastpunkte gefordert. Dies ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

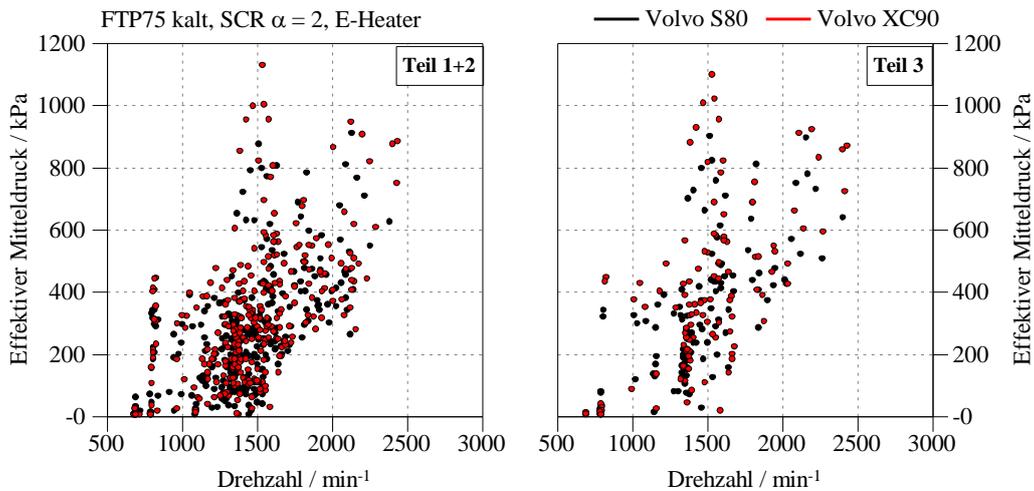


Abbildung 5.10: Lastpunkte der Fahrzeuge Volvo S80 bzw. XC90 im FTP75 Zyklus

Das höhere Gewicht des Volvo XC90 führt zu einem Anstieg der mechanisch bereitzustellenden Arbeit und. Wie in Abbildung 5.11 dargestellt, steigt somit auch die eingebrachte Kraftstoffmenge.

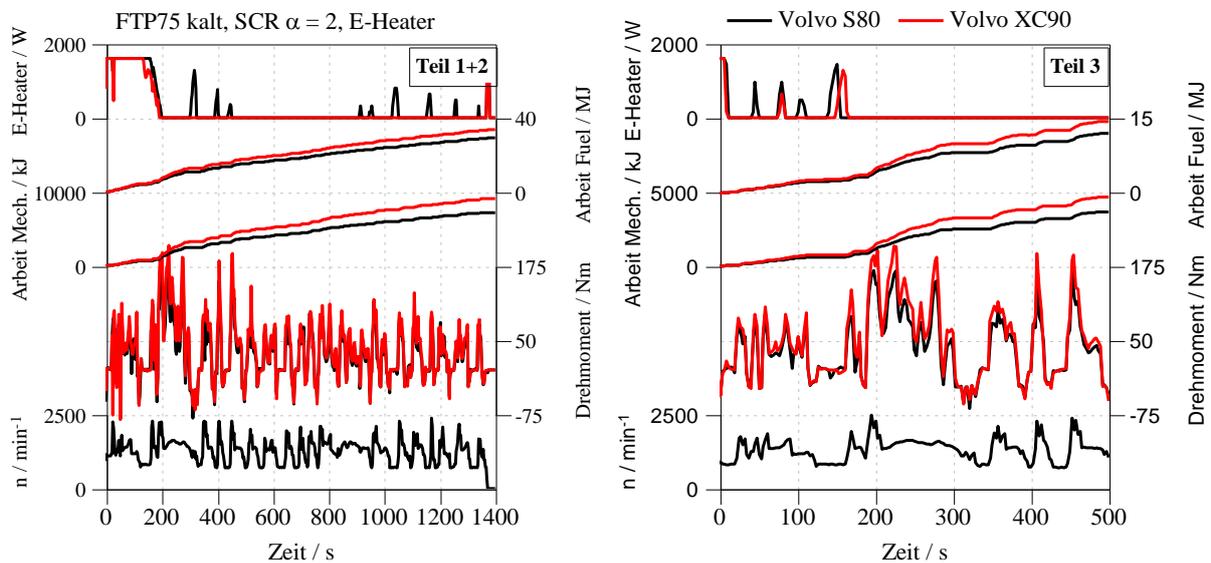


Abbildung 5.11: Von den verschiedenen Fahrzeugen geleistete Arbeit

5.6.2 Ergebnisse

Durch das Anfahren höherer Lastpunkte steigen die Abgastemperaturen, womit in den Katalysatoren optimale Bedingungen für die Schadstoffreduzierung geschaffen werden. Dies zeigt Abbildung 0.16 im Anhang H. Auch wenn im Warmlauf nur geringe Temperaturunterschiede zu beobachten sind, kann nach Erreichen der Betriebstemperaturen in

den Katalysatoren eine Differenz von durchschnittlich 10°C-15°C festgestellt werden. Im 3. Teil des Testzyklus sind Temperaturunterschiede von bis zu 30°C erkennbar.

Den Einfluss des simulierten Fahrzeuges auf das Emissionsergebnis zeigt im Abbildung 0.17 im Anhang H. Durchwegs ist ein Anstieg der Schadstoffe zu erkennen. Höhere Brennraumtemperaturen sind verantwortlich für den Anstieg der Stickoxide in den Rohemissionen. Durch die höhere Raumgeschwindigkeit können die Schadstoffe trotz des Temperaturanstieges nicht effektiv genug reduziert werden. Nur im 3. Teil können die HC-Emissionen durch die höheren Katalysatortemperaturen besser oxidiert werden.

Abbildung 5.12 stellt die Gesamtemissionen der beiden Fahrzeuge Volvo S80 und XC90 im FTP75 Zyklus dar. Mit Ausnahme des Lachgases sind beim Fahrzeug XC90 durchwegs höhere Emissionen festzustellen. Besonders bei den Stickoxiden kann ein markanter Anstieg des Schadstoffausstoßes bemerkt werden. Während das System 2 im Volvo S80 die Grenzwerte der ULEV50 Gesetzgebung einhalten kann, überschreitet der XC90 mit dem System 2 das Schadstofflimit für ULEV70. Zudem kann bei der Darstellung des Fahrzeuges XC90 ein weit höherer Verbrauch festgestellt werden. Im Vergleich zur Darstellung des Volvo S80 ohne Heizmaßnahmen führt die Simulation des XC 90 zu einem Kraftstoffmehrverbrauch von 16.3 %.

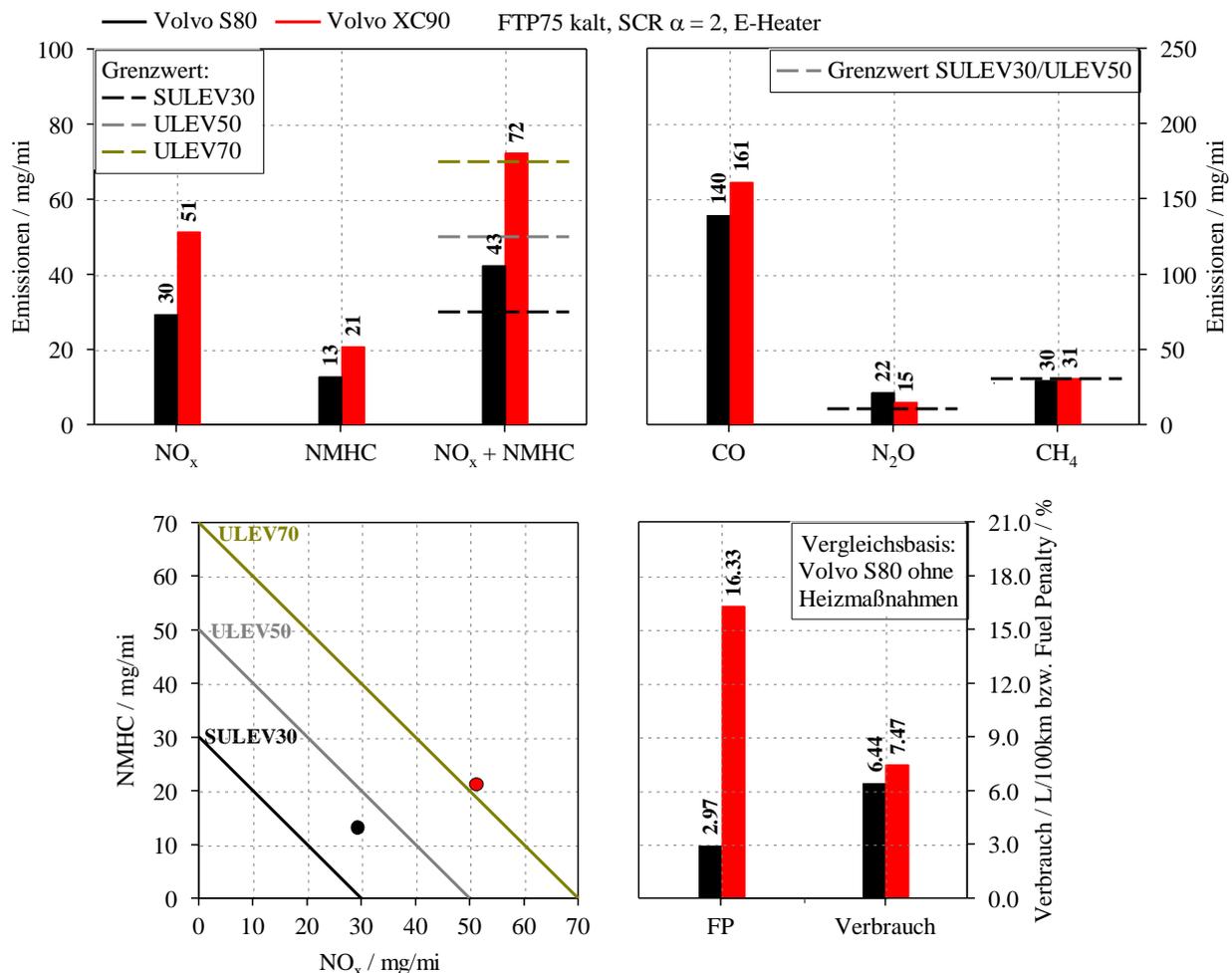


Abbildung 5.12: Gesamtemissionen der Fahrzeuge Volvo S80 bzw. XC 90 im FTP75 Zyklus

Die Untersuchungen zeigen, dass derselbe Abgasstrang mit einer bestimmten Anordnung und Größe der Nachbehandlungskomponenten nicht beliebig in jedes Fahrzeug verbaut werden kann. Um eine effektive Schadstoffreduzierung gewährleisten zu können, muss die Betriebsstrategie der Abgasnachbehandlung individuell an das Fahrzeug angepasst werden.

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zu dem System 2 konnten zeigen, dass mit der Kombination eines DOC, eines sDPF und eines SCR Systems Schadstoffe effektiv reduziert werden können. Die motornahe Anbringung des Partikelfilters mit selektiv katalytischer Beschichtung ermöglicht im Vergleich zum Unterboden SCR einen früheren Light Off der reduzierenden Komponente. Durch diese Maßnahme können Heizmaßnahmen verringert werden, womit der Kraftstoffmehrverbrauch sinkt. Da das System 2 mit dem DOC nur über eine oxidierende Komponente verfügt, ist bei der Kalibrierung auf ein geringeres HC-Niveau bei den Rohemissionen zu achten. Zudem wird die Bildung von NO_2 an der Edelmetallbeschichtung verringert. Üblicherweise wird das für die selektiv katalytische Reaktion notwendige NO_2 im cDPF gebildet [24]. Der Unterboden SCR wird beim Wegfallen dieser Komponente mit einem verringerten NO_2/NO_x Verhältnis beaufschlagt. Die geringe NO_x Konzentration nach sDPF sorgt neben diesem Umstand für ein verringertes Reduktionsvermögen des Unterboden SCR.

In den Untersuchungen konnte zudem der starke Einfluss der Heizmaßnahmen auf die Schadstoffminderung gezeigt werden. Dabei wurde nur der E-Heater eingesetzt, auf eine RHU wurde verzichtet. Beim Vergleich des Systems 2 in verschiedenen Fahrzeugen konnte gezeigt werden, dass sich ein höheres Fahrzeuggewicht und somit eine Verschiebung der Lastpunkte negativ auf das Emissionsergebnis auswirkt. Für unterschiedliche Fahrzeuge ist es somit notwendig, die Betriebsstrategie individuell anzupassen.

Abbildung 5.13 stellt das Emissionsergebnis des Systems 2 dar. Der ULEV50 Grenzwert kann mit der untersuchten Konfiguration eingehalten werden. Besonders der geringe NMHC Ausstoß hat einen großen Anteil an dem Ergebnis. Der immer noch späte Light Off des sDPF führt besonders im Warmlauf zu einem Anstieg der NO_x Emissionen. Der Grenzwert für CO (1000 mg/mi) und CH_4 kann eingehalten werden. Der hohe Ausstoß an Lachgas stellt immer noch eine große Herausforderung an das System 2 dar. Die motornahe Anbringung der reduzierenden Komponenten ermöglicht eine starke Reduzierung der Heizmaßnahmen. Dabei soll insbesondere die Deaktivierung der RHU genannt werden. Dies macht sich wirkungsvoll im Kraftstoffverbrauch bemerkbar. Im Vergleich zu einem System ohne Heizmaßnahmen kann in der untersuchten Konfiguration ein Mehrverbrauch von 2,9% beobachtet werden.

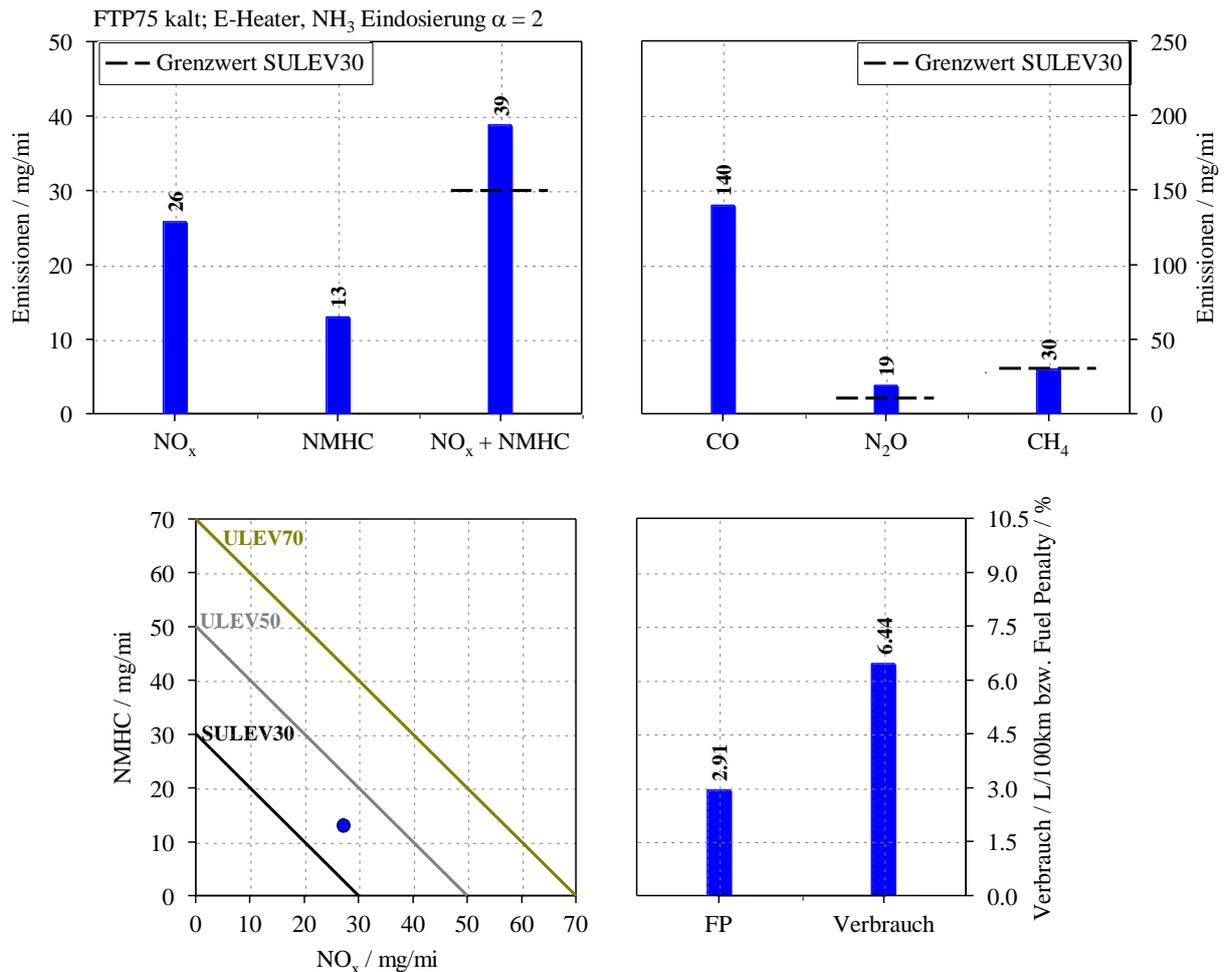


Abbildung 5.13: Emissionsergebnis des Systems 2

5.8 Gegenüberstellung mit Simulationsergebnissen

In der AVL List GmbH wurde ein mit dem System 2 vergleichbares Abgasnachbehandlungskonzept (E-Kat, DOC, sDPF und Unterboden SCR) am Computer simuliert. Dabei wurde ermittelt, wie sich verschiedene Heizmaßnahmen auf die SCR Temperaturen und in weiterer Folge auf das Emissionsverhalten auswirken. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Die Simulationen konnten zeigen, dass durch eine Anpassung der RHU Kalibrierung mit stark verminderter Nacheinspritzung eine weitere Anhebung der Temperaturen im SCR möglich ist. Dadurch steigt bei weiterhin geringen HC Emissionen der NO_x Konvertierungsgrad des Konzepts [24]. Das System weist dabei aber eine hohe Komplexität auf und ist anfällig für hohe HC Emissionen. Zudem kann ein Anstieg des Kraftstoffverbrauchs festgestellt werden

System2 - refined operating strategy - FTP75

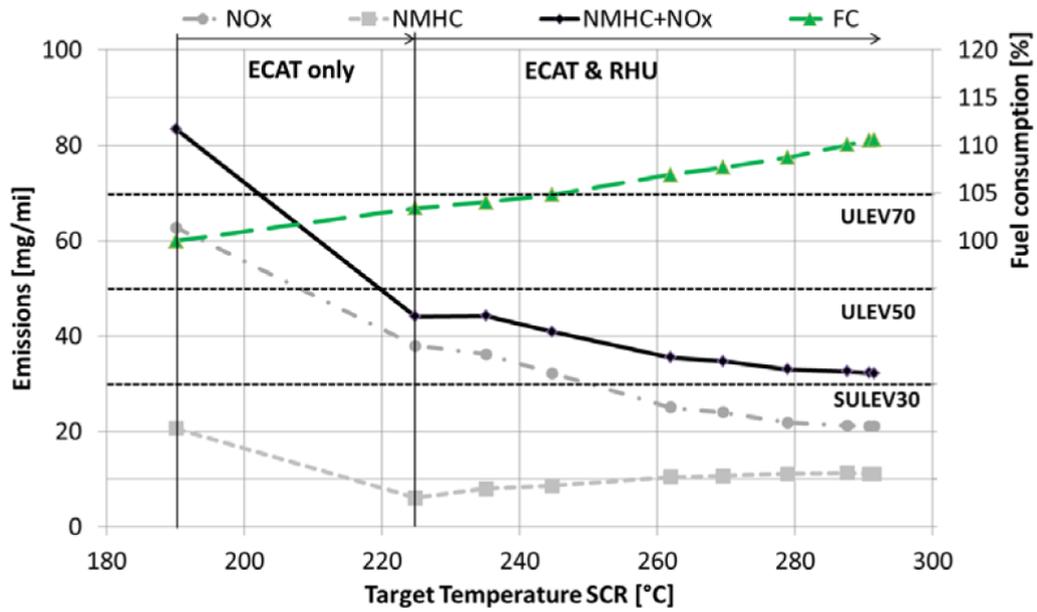


Abbildung 5.14: Simulationsergebnisse zum System 2 [24]

6 SULEV System 3

Das folgende Kapitel widmet sich der Beschreibung des SULEV System 3, welches in weiterer Folge als System 3 bezeichnet wird. In den bisherigen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass insbesondere der Warmlauf außerordentlich relevant für das Emissionsergebnis ist. NO_x Speicherkatalysatoren, auch bezeichnet als Lean NO_x Trap (LNT), bieten eine wirkungsvolle Methode um die Stickoxide im Warmlauf zu reduzieren. Bereits vor Erreichen der Betriebstemperatur kann die Komponente Stickoxide in der aktiven Schicht binden. Dieser Vorgang wird als Kalteinspeicherung bezeichnet. Das System 3 macht sich diese Eigenschaft zunutze. In Kombination mit einem Unterboden SCR System und einem katalytisch beschichteten Partikelfilter, sollen Schadstoffe wirkungsvoll vermindert werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen am System 3 sind im folgenden Kapitel festgehalten. Der Beschreibung der Versuchsanordnung folgt die Bestimmung des Ausgangspunktes. Durch eine Anpassung der Luftpfadkalibrierung, der LNT Regeneration und verschiedener Heizmaßnahmen im Warmlauf soll die optimale Betriebsstrategie ermittelt werden. Den Einfluss der Katalysator-technologie auf das Emissionsergebnis beschreibt ein weiterer Abschnitt. Die Analyse des Schadstoffumsatzes an den verschiedenen Messpositionen gibt einen Einblick in die Reduzierung der Emissionen an den jeweiligen Komponenten. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert.

6.1 Versuchsanordnung

Abbildung 6.1 stellt die Versuchsanordnung des Systems 3 schematisch dar.

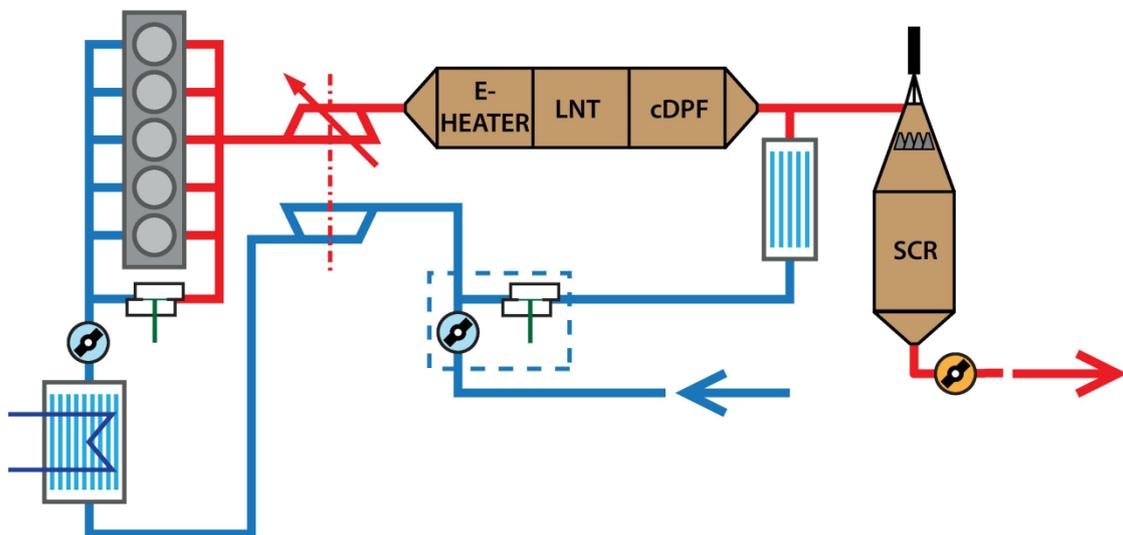


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des SULEV Systems 3

Nach der Turbine des Abgasturboladers ist der E-Heizer angeordnet. Dieser Komponente folgt schlüssig der NO_x Speicherkatalysator. Die im Laufe der Untersuchungen eingesetzten LNT-Katalysatoren stellt Tabelle 0.7 im Anhang I dar. Nach dem Speicherkatalysator ist der Dieselpartikelfilter mit einer katalytisch wirkenden Edelmetallbeschichtung angeordnet. Die Eigenschaften der Nachbehandlungskomponente listet Tabelle 0.8 (Anhang I) auf. An letzter Stelle des Abgasstranges befindet sich das SCR System. Die Eindosierung des

Reduktionsmittels AdBlue® befindet sich nach der Entnahmestelle für das ND-AGR. Die Eigenschaften des SCR-Katalysators sind in Tabelle 0.9 im Anhang I aufgelistet.

6.2 Ausgangspunkt

In diesem Kapitel wird die Ausgangssituation des Systems 3 beschrieben. Maßnahmen am System und ihre Auswirkungen können somit bewertet werden. Abbildung 6.2 stellt den Verlauf der Temperaturen und der Emissionen in einem FTP Zyklus dar. Der Speicherkatalysator wird dabei nach 235 Sekunden für 10 Sekunden regeneriert.

Die Katalysatoren zeigen im Warmlauf einen raschen Temperaturanstieg. Der LNT erreicht nach 60 Sekunden seine Betriebstemperatur, der Partikelfilter nach 110 Sekunden und das SCR System nach 280 Sekunden. Im restlichen Teil des Zyklus unterschreitet dabei keine Komponente die 200°C Temperaturmarke. Die Regeneration des LNT erzeugt in der Komponente einen kurzen, aber starken Temperaturanstieg der sich in den DPF fortsetzt. Auf den weiteren Verlauf hat die Temperaturspitze aber keinen Einfluss. Die Kalteinspeicherung der Stickoxide zeigt sich deutlich im Warmlauf. Der Schadstoff kann in diesem Zeitbereich effektiv reduziert werden. Bis zum Light Off des LNT werden die HC-Emissionen nur in einem geringen Maße oxidiert. Die Regeneration des Speicherkatalysators erzeugt eine starke Emissionsspitze. Sowohl die Menge der NO_x als auch der NMHC steigen stark an und beeinflussen das Emissionsergebnis massiv.

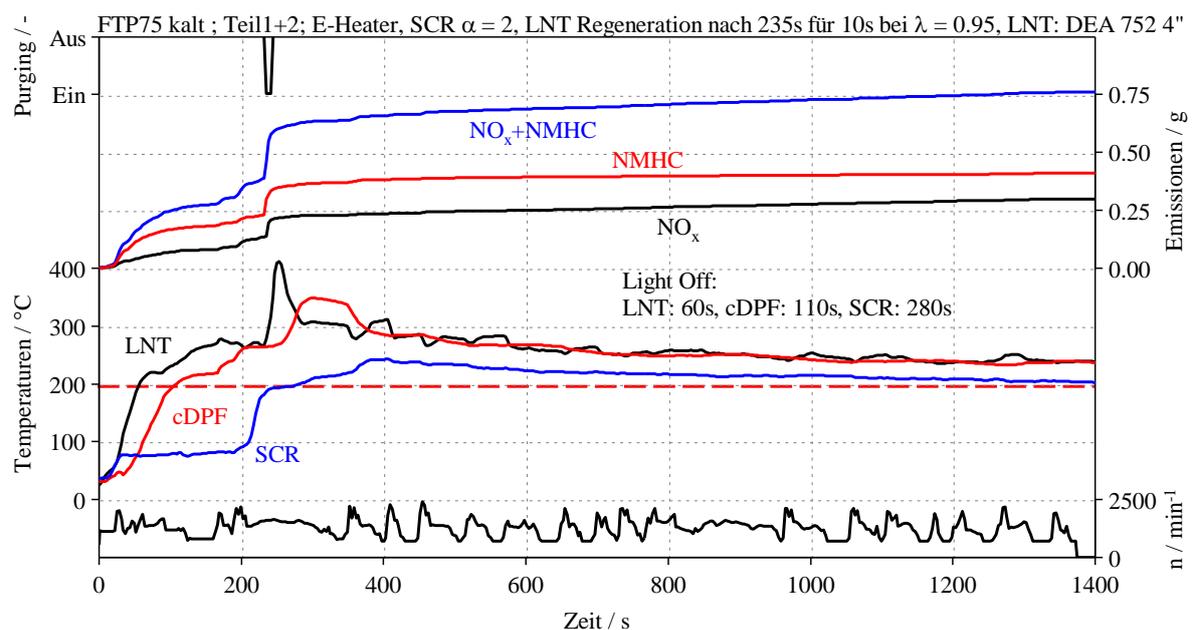


Abbildung 6.2: Verlauf der Temperaturen und Emissionen mit LNT Regeneration

Den Emissionsverlauf ohne LNT Regeneration zeigt Abbildung 6.3. Dabei kann eine starke Reduzierung der Schadstoffe festgestellt werden. Sowohl die massiven NO_x als auch NMHC-Spitzen können eliminiert werden. Die fehlende Regeneration des Speicherkatalysators zeigt sich auch im Verlauf der Katalysatortemperaturen. Starke Temperaturerhöhungen sind nicht zu beobachten.

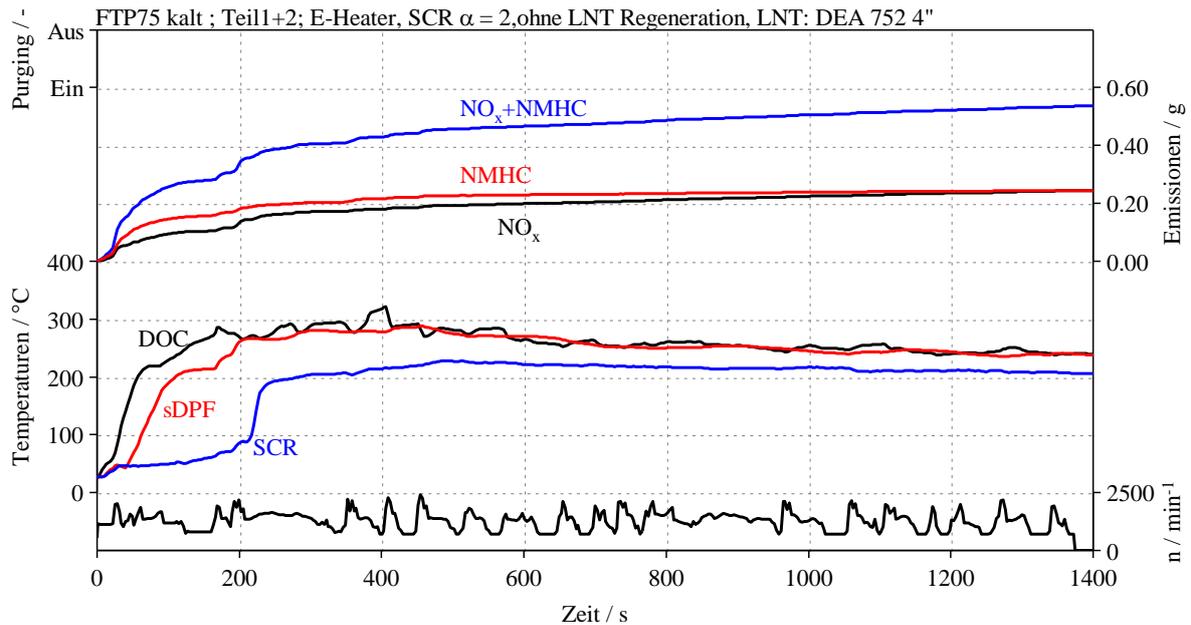


Abbildung 6.3: Verlauf der Temperaturen und der Emissionen im System 3 ohne LNT Regeneration

Das Gesamtergebnis des Systems 3 zeigt Abbildung 6.4. Die LNT Regeneration führt bei der vorliegenden Betriebsstrategie zu einem vermehrten Ausstoß an NO_x und NMHC. In Summe ergibt sich somit ein Gesamtwert von 57mg/Meile. Das ULEV50 Limit kann nicht eingehalten werden. Ohne LNT Regeneration bzw. dem Purger kann der Schadstoffausstoß verringert werden. Ein Betrieb des Speicherkatalysators ohne Regeneration ist aber nicht möglich. Mit zunehmender Beladung nimmt die Fähigkeit der Komponente Stickoxide zu reduzieren stetig ab. In gewissen Abständen ist die Auslagerung der Stickoxide somit notwendig. Das Emissionsergebnis ohne Regeneration stellt das Grenzpotential des Systems 3 dar.

Der Grenzwert für CO kann durch das Konzept eingehalten werden. Die Menge des Lachgases und des Methans liegt in einem geringen Maße über den gesetzlichen Limitierungen. Ohne LNT Regeneration kann aber auch dieser Schadstoff vermindert werden. Daraus ergibt sich, dass die Bildung der N₂O- und CH₄ – Emissionen größtenteils mit dem Purger in Verbindung gebracht werden kann.

Im Vergleich zu einem identischen Konzept ohne Heizmaßnahmen (Verbrauch 6,12 l/100km) kann beim System 3 ein Mehrverbrauch von 3,2% festgestellt werden. Ohne LNT-Regeneration sinkt dieser Wert auf 2,9%. Der zusätzliche Bedarf an Treibstoff erklärt sich jeweils durch die Aktivierung des E-Heaters im Warmlauf und durch die Regeneration des Speicherkatalysators.

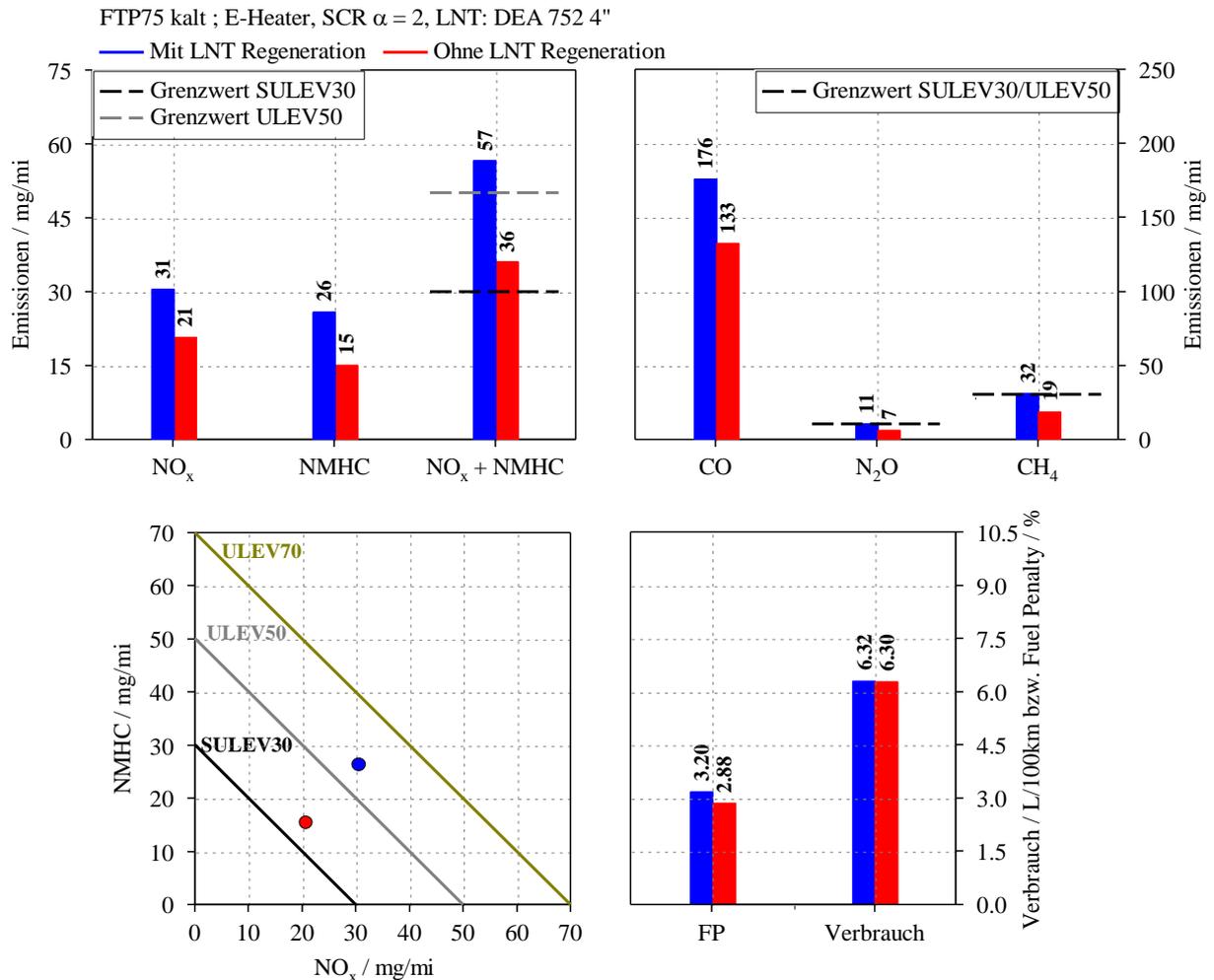


Abbildung 6.4: Gesamtergebnis des System 3 mit bzw. ohne LNT Regeneration

Der Betrieb ohne LNT Regeneration zeigt das hohe Potential des Systems 3. Die Reduzierung des Schadstoffausstoßes bei der LNT Regeneration und die verminderte Oxidation im Warmlauf stellen dabei eine große Herausforderung dar.

6.3 Kalibrierung

Die Fähigkeit des LNT zur Kalteinspeicherung ermöglicht im Warmlauf eine effektive Reduktion der Stickoxide. Diese Eigenschaft lässt sich durch eine Anpassung der Luftmassenkalibrierung nützen. Ein Anstieg der angeforderten Luftmasse führt bei den Rohemissionen zu einer Reduzierung der Kohlenwasserstoffe bei höheren Stickoxiden. Die Ergebnisse der Kalibrierarbeiten sind folgend dargestellt.

Im Verhältnis zum Ausgangspunkt ohne LNT Regeneration wurde in einem weiteren Zyklus die Luftmenge angehoben. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Emissionsverläufe sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Durch die Erhöhung der Luftmasse können HC-Emissionen reduziert werden. Die Menge der Stickoxide steigt nach dem Warmlauf stärker an. Im NO_x und NMHC Summenwert kann ein Emissionsvorteil festgestellt werden.

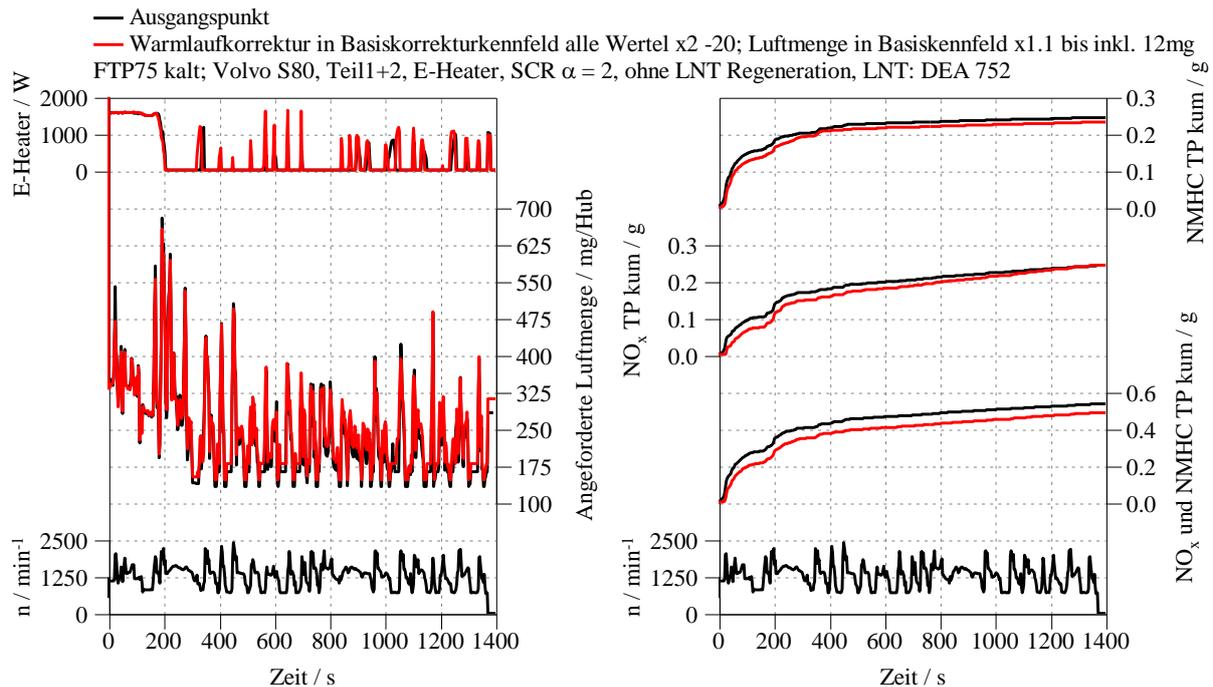


Abbildung 6.5: Einfluss der Kalibrierung auf die Emissionsverläufe ohne LNT Regeneration

Die Auswirkungen der Kalibrierarbeiten auf das Gesamtergebnis zeigt Abbildung 6.6. Auch hier kann der Einfluss der erhöhten Luftmasse beobachtet werden. Die Menge der NO_x steigt an, wobei die NMHC Emissionen verringert werden können. In Summe ergibt sich somit in reduziertem NO_x und NMHC Gesamtergebnis. Die Unterschiede sind aber relativ gering. Die fehlende LNT Regeneration der beiden Tests führt zu einem niedrigen Emissionsergebnis, welches als Grenzpotential des Systems angesehen werden kann.

Trotz der höheren Luftmasse kann bei der optimierten Kalibrierung ein höherer Kraftstoffverbrauch beobachtet werden. Dieser Umstand kann durch eine erhöhte Aktivität des E-Heaters erklärt werden.

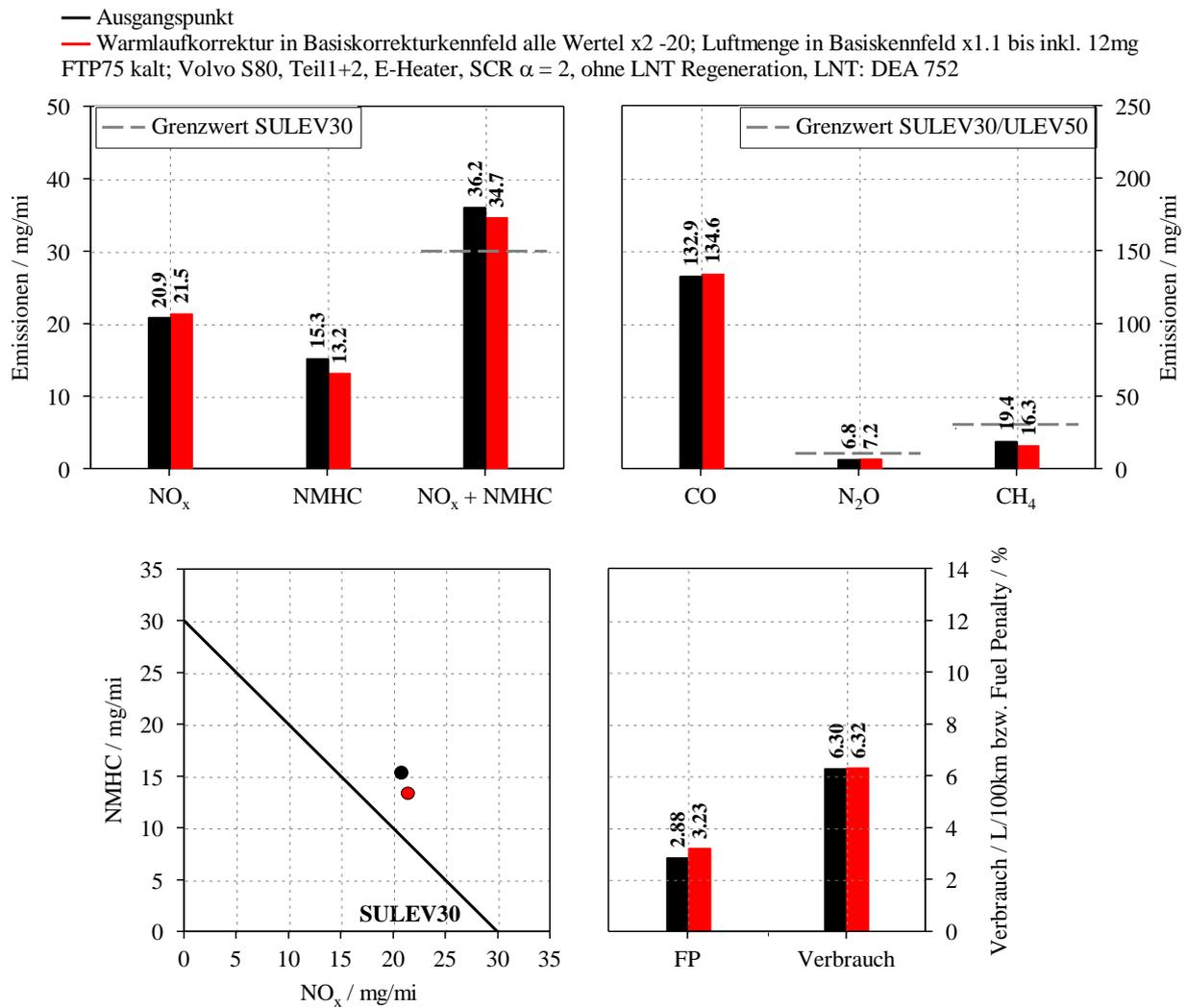


Abbildung 6.6: Auswirkungen der Kalibrierarbeiten auf das Gesamtergebnis

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass mit der Kalibrierung die Anteile der Schadstoffe beeinflusst werden können. Die Erhöhung der Luftmenge erweist sich als wirkungsvoll und wird in den folgenden Untersuchungen beibehalten.

6.4 Anpassung der LNT Regeneration

Wie im Kapitel 6.2 beobachtet werden konnte, hat die LNT Regeneration einen massiven Einfluss auf das Emissionsergebnis. Eine optimale Wahl der Regenerationsparameter ist aus diesem Grund von hoher Wichtigkeit. In diesem Kapitel wird die Auswirkung der Maßnahme auf das Emissionsergebnis beschrieben.

6.4.1 Betriebspunkte

Die für das Purgung notwendige Abgaszusammensetzung wird mit einer sogenannten Fettkalibrierung erreicht. Durch Androsselung des Motors, einer HD-AGR und einer Nacheinspritzung wird ein unterstöchiometrisches Abgas erzeugt. Der Betriebspunkt ist für das verwendete Aggregat nur im Bereich zwischen 2bar und 8bar effektivem Mitteldruck appliziert, was einer Last von 38Nm bis 152Nm entspricht.

6.4.2 Grundlegende Anpassungen der LNT Regeneration

Um den hohen Emissionsausstoß während der Regeneration zu verringern, wurden verschiedene Parameter der Fettkalibrierung verändert. Die Applikationen sind folgend aufgelistet:

- Im Fettbetrieb Erhöhung des Luftverhältnisses von $\lambda=0.95$ auf $\lambda=0.98$
- Die Schwelle für die Zustellung des ND-AGR beim Sprung von fett auf mager wird nicht plötzlich, sondern linear über 30 Zyklen geschaltet. Verbrennungsaussetzer können dadurch vermieden werden.
- Begrenzung der maximalen Menge für die Nacheinspritzung. Somit wird ein Überregeln verhindert.
- Der Zeitpunkt für die LNT Regeneration wird über den Prüfstandsrechner gesteuert. Somit kann eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet werden.

Die Ergebnisse der Anpassungen zeigt Abbildung 0.18 im Anhang J. Die Wirksamkeit der Optimierungen schlägt sich massiv in den Emissionsverläufen wieder. Es kann ein starker Rückgang der Emissionen, insbesondere der HC und CH₄ beobachtet werden. Einen großen Anteil an diesem Ergebnis hat die Limitierung der maximal möglichen Einspritzmenge. Ein weiterer positiver Effekt des angepassten Purgers ist der verringerte und kürzere Temperaturanstieg im Katalysator.

6.4.3 Regenerationszeitpunkt

Ein weiterer wichtiger Faktor für eine emissionsarme LNT Regeneration stellt der Betriebspunkt dar. Ein geringer Massenstrom wirkt sich aufgrund der verringerten Raumgeschwindigkeit im Speicherkatalysator vorteilhaft auf den Auslagerungs- und Reduzierungsvorgang aus. Das Ergebnis verschiedener Regenerationszeitpunkte auf den Schadstoffausstoß zeigt Abbildung 6.7. Die höchsten Schadstoffspitzen sind bei einer Regeneration nach 270 Sekunden zu verzeichnen. Der Betriebspunkt mit einem hohen Abgasmassenstrom führt zu einer ungünstigen Auslagerung der NO_x bei geringen Konvertierungsraten im LNT. In weiterer Folge ist eine lang anhaltende Temperaturerhöhung im Katalysator zu verzeichnen. Ein niedrigeres Emissionsergebnis ist bei einer Regeneration nach 235 Sekunden zu beobachten. Das geringste Emissionsergebnis wird bei einem Purgung nach 370 Sekunden erreicht. Der Betriebspunkt mit einem geringen Abgasmassenstrom führt zur sehr niedrigen Emissionsspitzen während der Regeneration. Eine im Vergleich zu den anderen Regenerationszeitpunkten geringere Temperaturspitze untermauert diese Beobachtung zusätzlich.

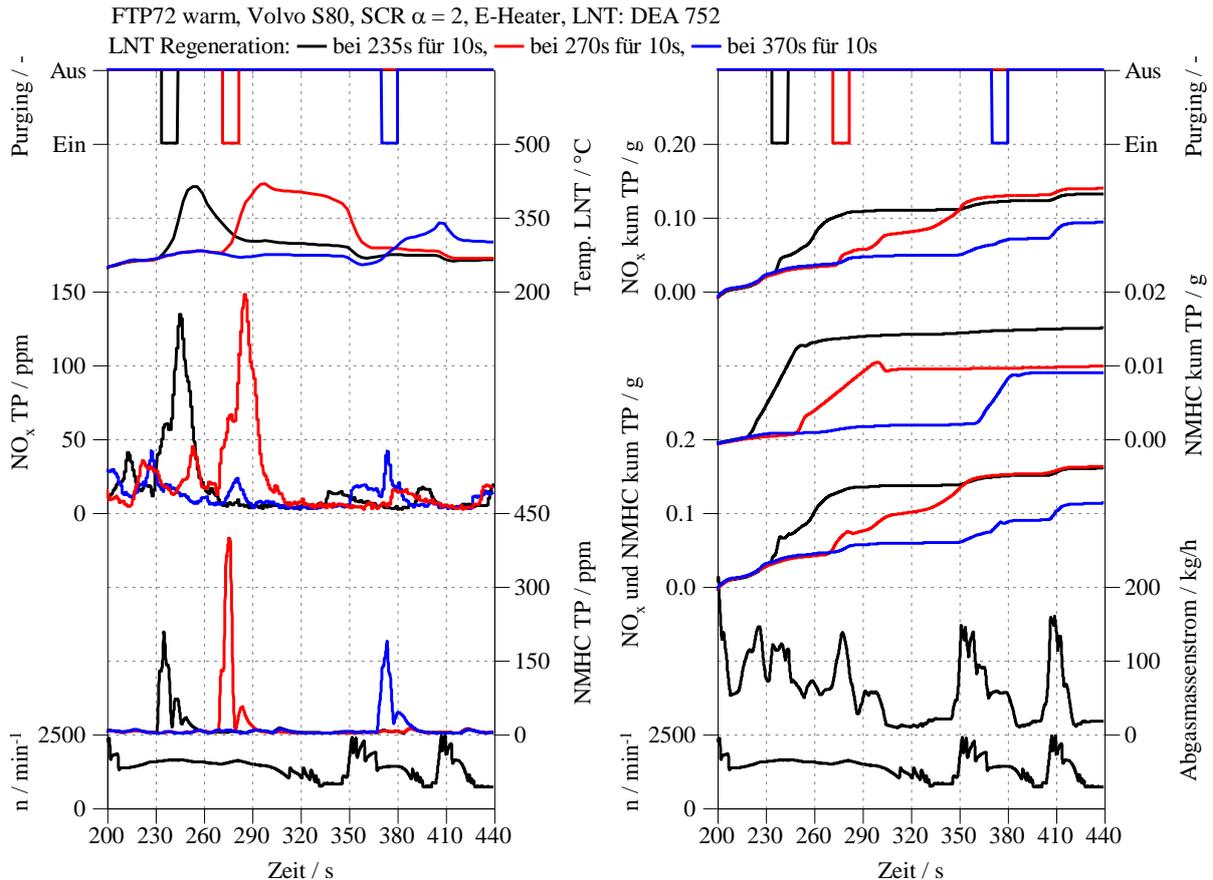


Abbildung 6.7: Auswirkung der Regenerationszeitpunktes auf das Emissionsergebnis

6.5 Betriebsstrategie im Warmlauf

Dieses Kapitel widmet sich der Betriebsstrategie im Warmlauf. Mit verschiedenen Maßnahmen kann in diesem Bereich die Temperatur in den Katalysatoren angehoben werden. Durch den früheren Light Off können Schadstoffe rascher umgesetzt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind folgend festgehalten.

6.5.1 HD-AGR

Wie schon bei den Systemen 1 und 2 nachgewiesen werden konnte, hat die ungekühlte HD-AGR einen positiven Effekt auf den Warmlauf. Wie Abbildung 6.8 zeigt, führt die hohe Temperatur des Abgases und der verringerte Abgasmassenstrom nach Turbolader zu einem schnellen Temperaturanstieg der motornahen Nachbehandlungskomponenten. Ein früher Light Off, insbesondere des Speicherkatalysators kann somit effektiv erreicht werden. Der Enthalpiestrom, dargestellt in Formel 6.1, ist bei Annahme einer gleichbleibenden Abgastemperatur nach LNT und einer konstanten Wärmekapazität c_p direkt proportional zum Massenstrom \dot{m} . Nimmt dieser ab, sinkt auch der Enthalpiestrom.

$$\dot{H} = \dot{m} * c_p * T \quad 6.1$$

Den Nachbehandlungskomponenten nach LNT wird durch die HD-AGR ein geringerer Massenstrom und somit eine niedrigere Wärmemenge zugeführt. Dies kann in den Temperaturverläufen im DPF und im SCR beobachtet werden.

Die HD-AGR im Warmlauf wirkt sich positiv auf das Emissionsergebnis aus. Durch den früheren Temperaturanstieg im LNT und den verringerten Abgasmassenstrom können die Schadstoffe effektiver oxidiert bzw. eingespeichert werden.

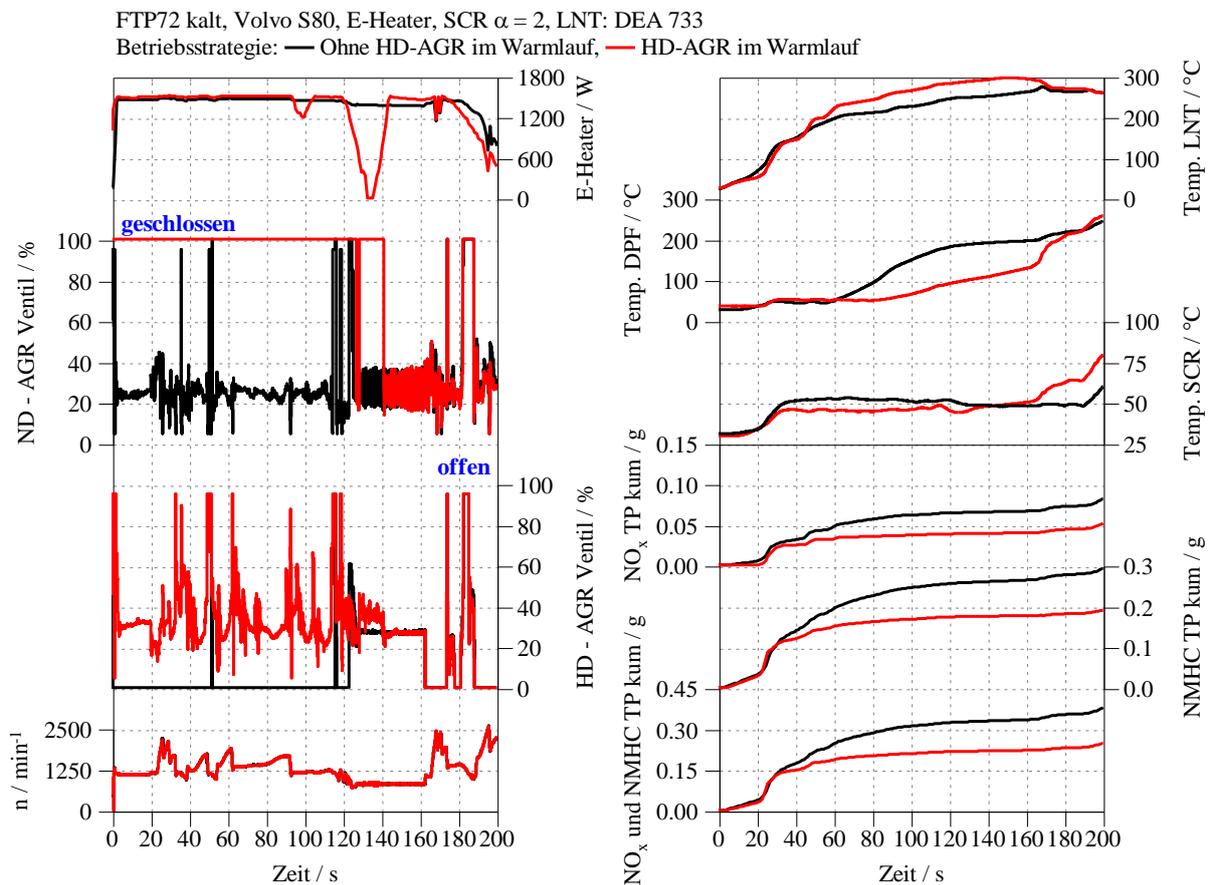


Abbildung 6.8: Auswirkung der HD-AGR auf die Emissionen und den Temperaturverlauf

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass für den Temperaturanstieg motornaher Komponenten primär die Abgastemperatur einen hohen Stellenwert hat. Motorferne Komponenten profitieren hingegen von einem hohen Enthalpiestrom des Abgases. Die HD-AGR im Warmlauf bis 40°C Motortemperatur erweist sich beim System 3 als sehr wirkungsvoll und wird in den weiteren Untersuchungen beibehalten.

6.5.2 Rapid Heat Up

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Katalysatortemperaturen im Warmlauf bietet die Rapid Heat Up (RHU) Kalibrierung. Abbildung 6.9 zeigt die Auswirkungen der Heizmaßnahme auf die Temperaturverläufe und die Emissionen. Die RHU im Betriebsmodus 1 (Androsselung, ohne Nacheinspritzung) führt im Warmlauf zu einem stärkeren und höheren Anstieg der Katalysatortemperaturen. Die Betriebstemperatur der Katalysatoren wird somit etwas früher erreicht. Der Effekt der Heizmaßnahme ist aber nur gering.

Die Aktivierung der RHU führt zu einem Anstieg der HC Emissionen im Warmlauf. Bei gleichbleibenden Stickoxidemissionen steigt in weiterer Folge auch der für die Gesetzgebung relevante NO_x und NMHC Summenwert.

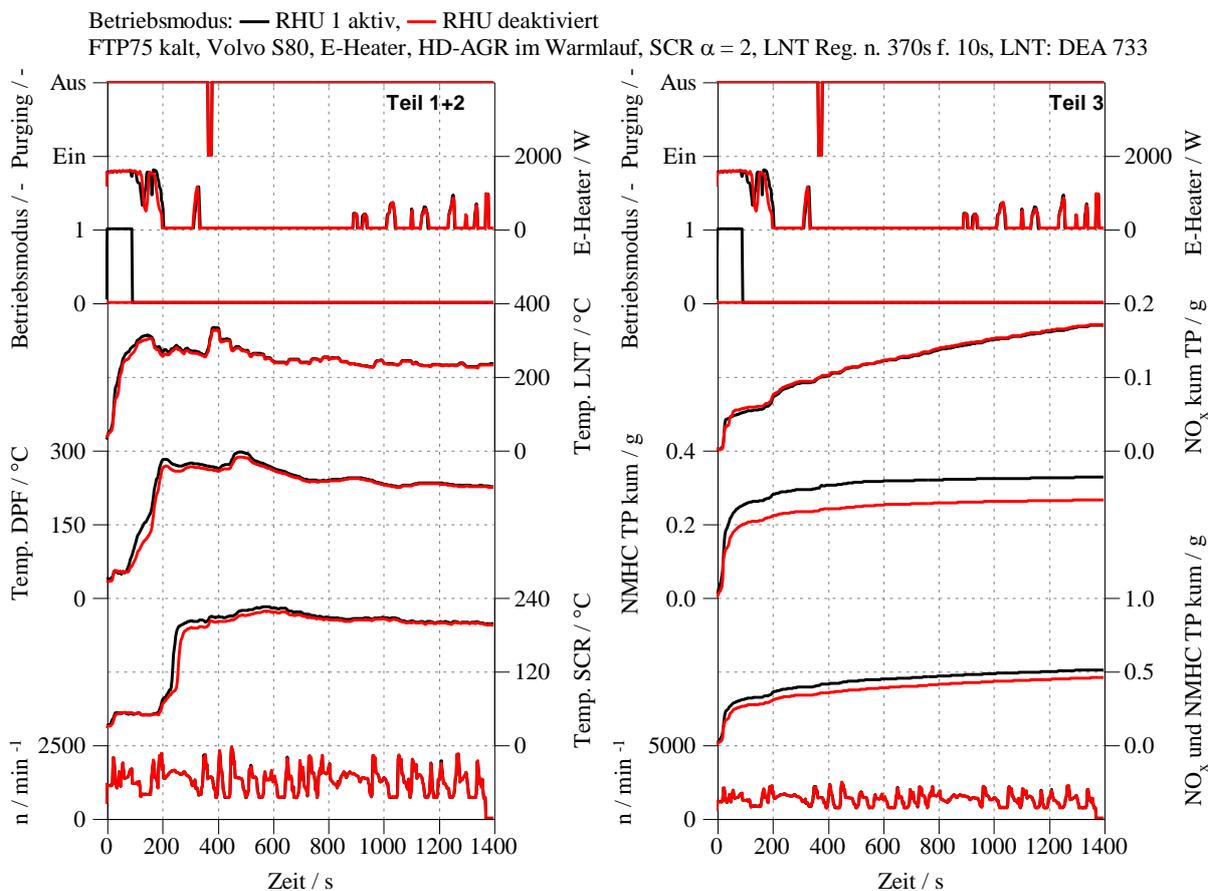


Abbildung 6.9: Auswirkungen der RHU auf den Verlauf der Temperaturen und Emissionen

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die RHU in der aktuellen Konfiguration beim System 3 keine Vorteile erwirkt. Durch eine weitere Anpassung der Heizmaßnahme ist ein reduziertes Emissionsergebnis vorhersehbar. Für die weiteren Untersuchungen wird auf die RHU verzichtet.

6.6 LNT Technologiefortschritt

Das zentrale Element der Abgasnachbehandlung im System 3 stellt der NO_x Speicherkatalysator dar. Seine Funktion hat den größten Anteil am Emissionsergebnis. Um den Einfluss des Technologiefortschrittes auf das Abgassystem abschätzen zu können, werden im folgenden Kapitel zwei Katalysatoren verglichen.

6.6.1 Untersuchte Speicherkatalysatoren

Am Prüfstand wurden die Speicherkatalysatoren DEA 752 und DEA 753 untersucht. Die Eigenschaften dieser Nachbehandlungskomponenten sind in Tabelle 0.7 im Anhang J aufgelistet. Während der LNT DEA 752 den Technologiestand des Modelljahres 2011 darstellt, entspricht die Komponente DEA 753 dem aktuellen technischen Stand. Der erhöhte Anteil an Platin und Palladium ermöglicht eine erhöhte Oxidationsrate. HC- und CO

Emissionen können effektiver reduziert werden. Die bessere Oxidation an der Katalysatoroberfläche führt zudem zu einer gesteigerten NO_2 Bildung, womit die Einspeicherung der Stickoxide begünstigt wird.

6.6.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen zeigt Abbildung 6.10. Die höhere Oxidationsfähigkeit des LNT DEA 753 zeigt sich wirkungsvoll im Warmlauf. NMHC Emissionen können durch die Beschichtung effektiver umgesetzt werden. Die Beschichtung ermöglicht auch eine Verminderung der NO_x Emissionen. Dabei muss beachtet werden, dass die fehlende HD-AGR im Warmlauf die Schadstoffminderung beim DEA 752 einschränkt.

Im 3. Teil des Zyklus kann beim DEA 752 eine verbesserte Reduktionsfähigkeit festgestellt werden. Da der Speicherkatalysator im Unterschied zum DEA 753 am Ende des 2. Teils regeneriert wird, weist er eine geringere NO_x Beladung auf und kann in der letzten Phase des Zyklus den Schadstoff besser einspeichern. Der Katalysator DEA 753 wird am Ende des 3. Teils regeneriert und weist in dieser Phase des Testlaufes einen höheren NO_x – Schlupf auf. Dieser kann vom SCR System, welches durch die fortgeschrittene Alterung ein verringertes Reduktionsvermögen aufweist, nicht mehr abgefangen werden.

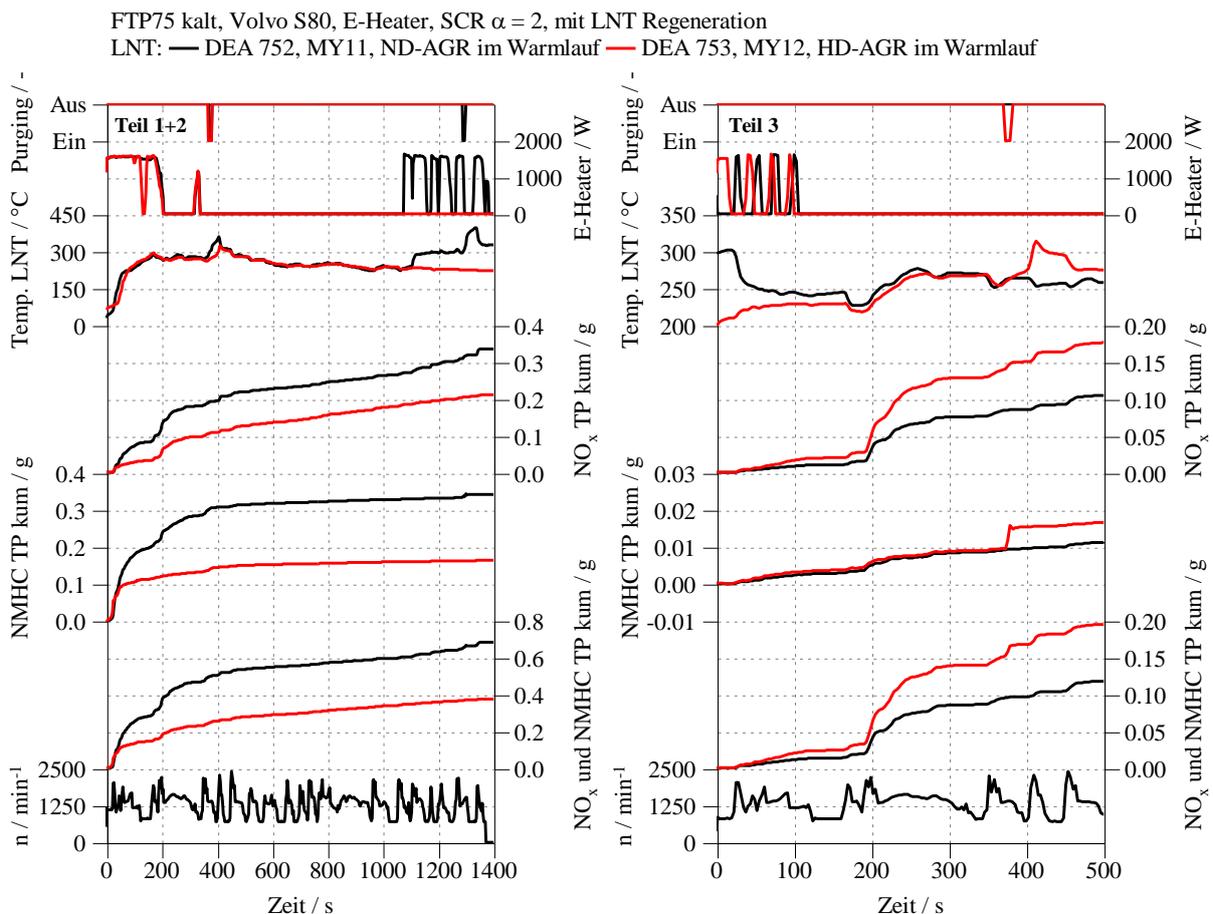


Abbildung 6.10: Verlauf der Emissionen bei unterschiedlichen Speicherkatalysatoren

Das Gesamtergebnis der Untersuchungen zeigt Abbildung 6.11. Die Beschichtung des moderneren LNT DEA 753 ermöglicht eine effektivere Reduktion der Stickoxide. Zudem

kann auch ein positiver Einfluss auf die NO_x Einspeicherung beobachtet werden. In Summe kann mit diesem Speicherkatalysator ein geringeres Gesamtergebnis der NO_x und NMHC Emissionen erzielt werden. Die höhere Oxidationsfähigkeit ermöglicht zudem eine Verminderung des CO. Die Menge der Lachgas- und Methan-Emissionen wird durch die Katalysatorertechnologie nur in einem geringen Maße beeinflusst.

Der unterschiedliche Kraftstoffmehrverbrauch in den Zyklen ergibt sich als Folge einer abweichenden Betriebsstrategie des E-Heaters. Dieser wurde bei den Untersuchungen mit dem LNT DEA 752 häufiger aktiviert.

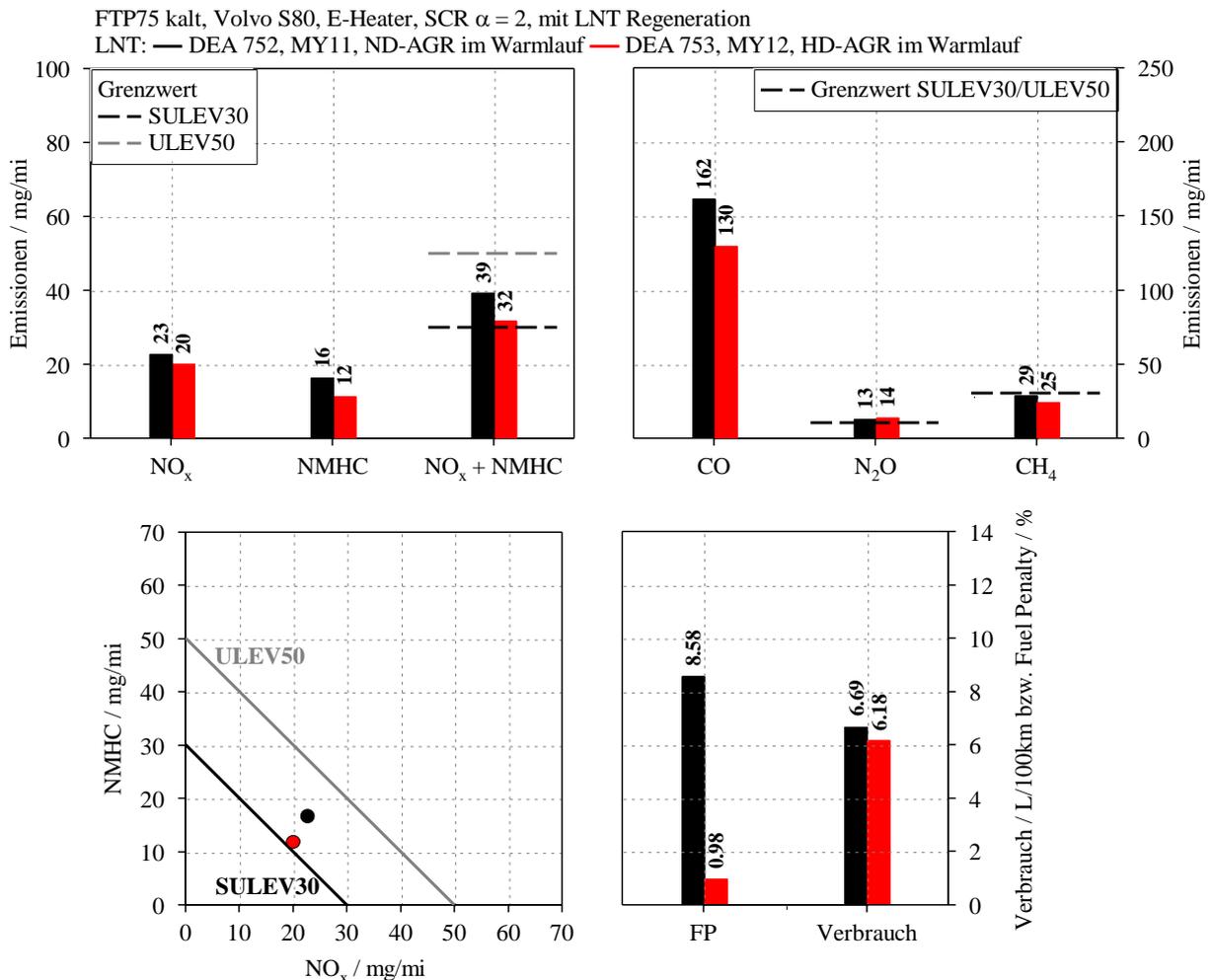


Abbildung 6.11: Gesamtemissionen der unterschiedlichen Katalysatoren

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die Beschichtung des Speicherkatalysators einen massiven Einfluss auf das Emissionsergebnis hat. Einen tieferen Einblick in diesem Zusammenhang ermöglicht [25].

6.7 Analyse der Schadstoffreduzierung an den einzelnen Messpositionen

In diesem Kapitel wird für das System 3 der Schadstoffumsatz an den einzelnen Katalysatoren beschrieben. In einem Versuchslauf wurde bei identischen Testparametern die Zusammensetzung des Abgases an den verschiedenen Messpositionen bestimmt. Während des Versuchslaufs waren der E-Heater und die HD-AGR im Warmlauf aktiviert. Der LNT

wurde im 1. und 3. Teil der Zyklen nach 370 Sekunden für 10 Sekunden regeneriert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind folgend beschrieben.

6.7.1 Emissionsverläufe

Den Emissionsverlauf an den unterschiedlichen Messpositionen stellt Abbildung 6.12 dar. Sowohl die NMHC, als auch die CO Emissionen werden zum Großteil im LNT oxidiert. Bei Betrachtung der Emissionsverläufe in den ersten 100 Sekunden (Abbildung 0.20 im Anhang J) kann beobachtet werden, dass der Umsatz der Schadstoffe bereits nach 30 Sekunden beginnt. Innermotorisch gebildetes Methan kann durch die Abgasnachbehandlung so gut wie gar nicht reduziert werden. Der Schadstoff wird zudem während der LNT Regeneration verstärkt am Speicherkatalysator gebildet.

Wie bei den HC-Emissionen findet die Reduzierung der Stickoxide hauptsächlich im LNT statt. Bereits kurz nach Motorstart werden die Schadstoffe kalt in der Komponente eingespeichert. Das SCR System erreicht erst nach ca. 300 Sekunden seine Betriebstemperatur (Abbildung 0.19 im Anhang J) und trägt nur geringfügig zum Schadstoffumsatz bei. Wie die Verläufe für Lachgas zeigen, wird der Schadstoff während der Regeneration des Speicherkatalysators gebildet. Im restlichen Abgasstrang kann der Schadstoff nicht mehr umgesetzt werden.

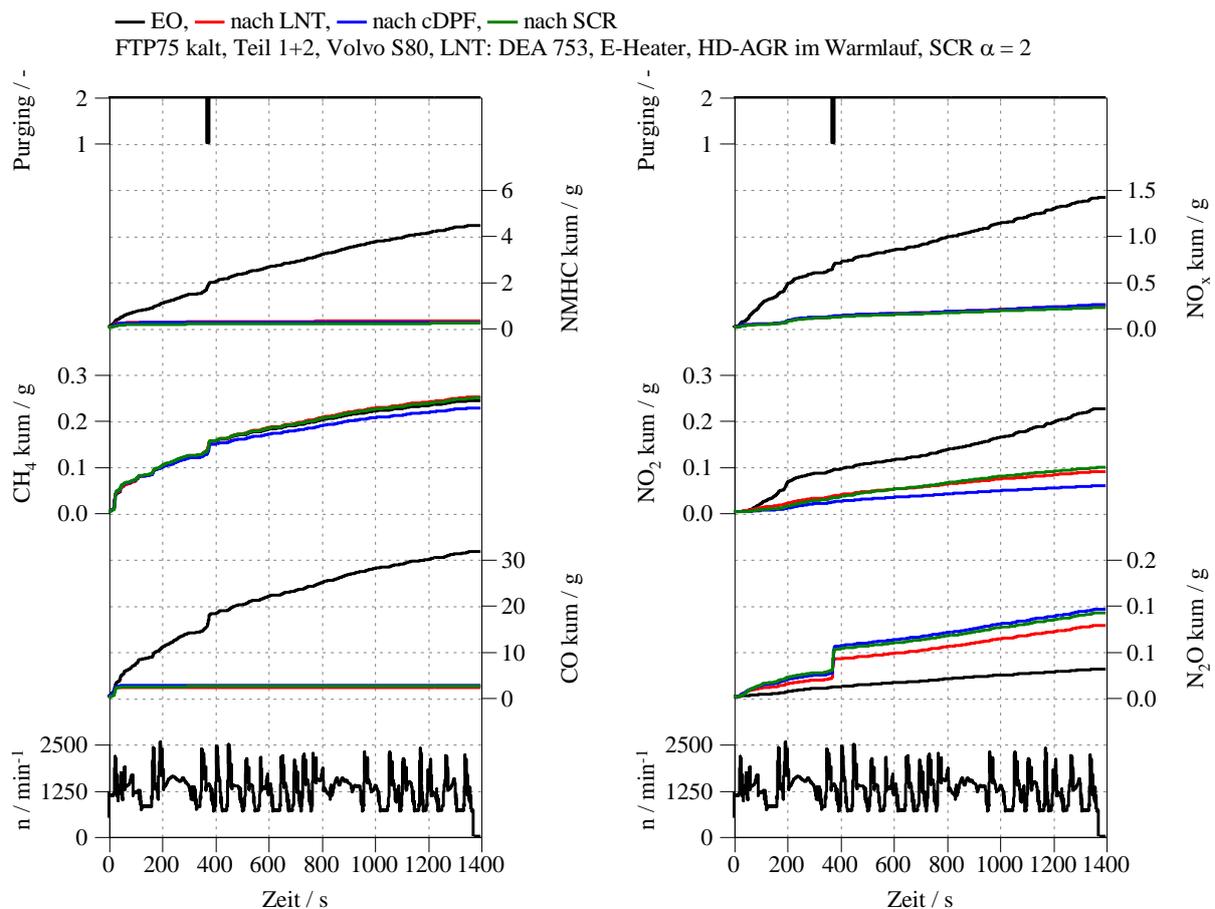


Abbildung 6.12: Emissionsverläufe an den unterschiedlichen Messpositionen

6.7.2 Ergebnisse

Die Gesamtemissionen an den einzelnen Messstellen stellt Abbildung 6.13 dar. Auch hier zeigt sich, dass die Schadstoffe zum größten Teil im LNT oxidiert und reduziert werden. Nach dieser Komponente ist nur noch eine geringe Menge an NO_x , NMHC und CO feststellbar. Die Menge an Lachgas nimmt nach dem Speicherkatalysator zu. Besonders in der Regeneration wird eine höhere Menge des Schadstoffes gebildet. Die Menge an Methan unterschreitet durchwegs die SULEV Grenzwert (30 mg/Meile) kann durch den Abgasstrang aber nicht umgesetzt werden.

Die Zusammensetzung der Stickoxide verändert sich nach jeder Nachbehandlungskomponente zusehends. Nach LNT bzw. nach SCR nimmt das NO_2/NO_x Verhältnis weiter zu.

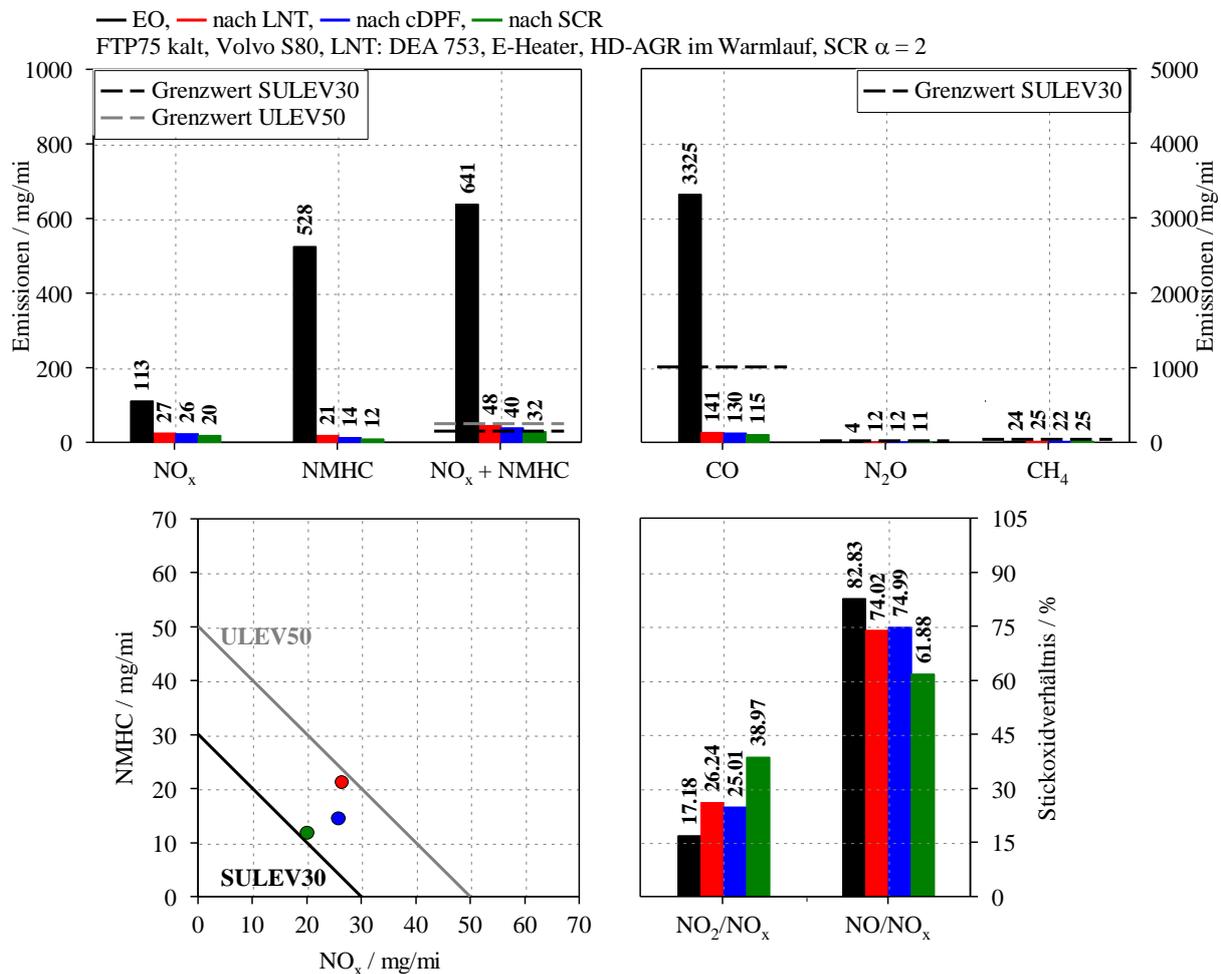


Abbildung 6.13: Gesamtemissionen an den einzelnen Messpositionen im System 3

Die absoluten und relativen Konvertierungsraten im System 3 stellt Abbildung 6.14 dar. Das Konzept kann sowohl HC- als auch NO_x Emissionen in einem hohen Maße reduzieren. NO_x werden mit über 80%, HC und CO mit beinahe 100% umgesetzt. Der Speicherkatalysator übernimmt dabei den Großteil der Schadstoffminderung. Der katalytisch beschichtete Partikelfilter unterstützt die Oxidation von HC-Emissionen. Der Konvertierungsgrad des SCR Systems ist mit 22 % sehr gering. Die Schadstoffe Lachgas und Methan können durch das System so gut wie gar nicht umgesetzt werden.

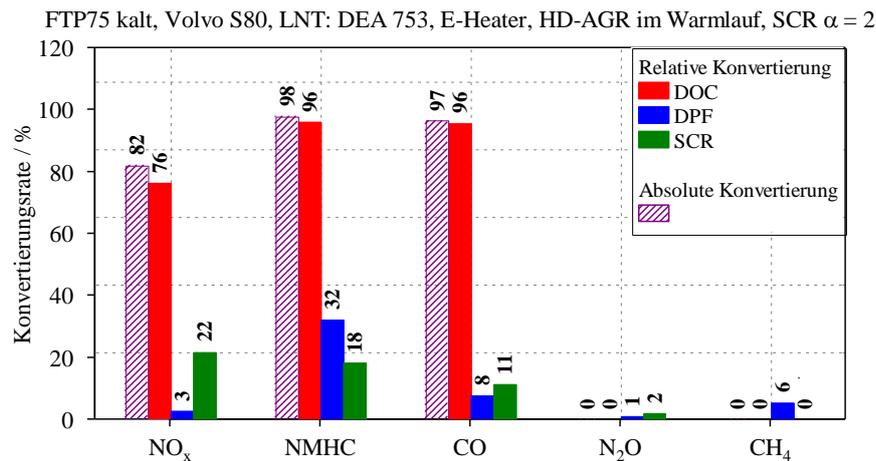


Abbildung 6.14: Absolute und relative Konvertierungsraten im System 3

6.8 Betriebsstrategie E-Heater

Um im Warmlauf in den Katalysatoren, darunter insbesondere im SCR System, einen raschen Temperaturanstieg zu ermöglichen, verfügt das System 3 über ein elektrisches Heizelement. Die Betriebsstrategie dieser Komponenten hat einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Um die Auswirkungen unterschiedlicher E-Heater Betriebsarten auf das Emissionsverhalten des Konzepts zu bestimmen, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Dabei wurden die Zieltemperaturen (Messpunkt T51 vor LNT) des Heizelements variiert:

- E-Heater aus: Deaktivierung des E-Heaters
- E-Heater normale Leistung: Zieltemperatur 240°C, Deaktivierung nach 500 Sekunden
- E-Heater erhöhte Leistung: Zieltemperatur 280°C
- E-Heater maximale Leistung: Zieltemperatur 320°C

Zudem soll durch die Versuchsreihe die Funktionalität des SCR Systems ermittelt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind folgend dargestellt.

6.8.1 Energiebereitstellung

Die elektrische Leistung für das Heizelement wird von der Lichtmaschine und somit vom Aggregat selbst zur Verfügung gestellt. Dabei steigt der Kraftstoffverbrauch. Dies wird in Abbildung 6.15 für die drei Teile des FTP Zyklus dargestellt.

FTP75 RCD, Volvo S80, HD-AGR im Warmlauf, SCR $\alpha = 2$
 LNT: DEA 753, LNT Regeneration nach 370s für 10s im 1. und 3. Teil
 Leistung E-Heater: — deaktiviert, — normal, — erhöht, — maximal

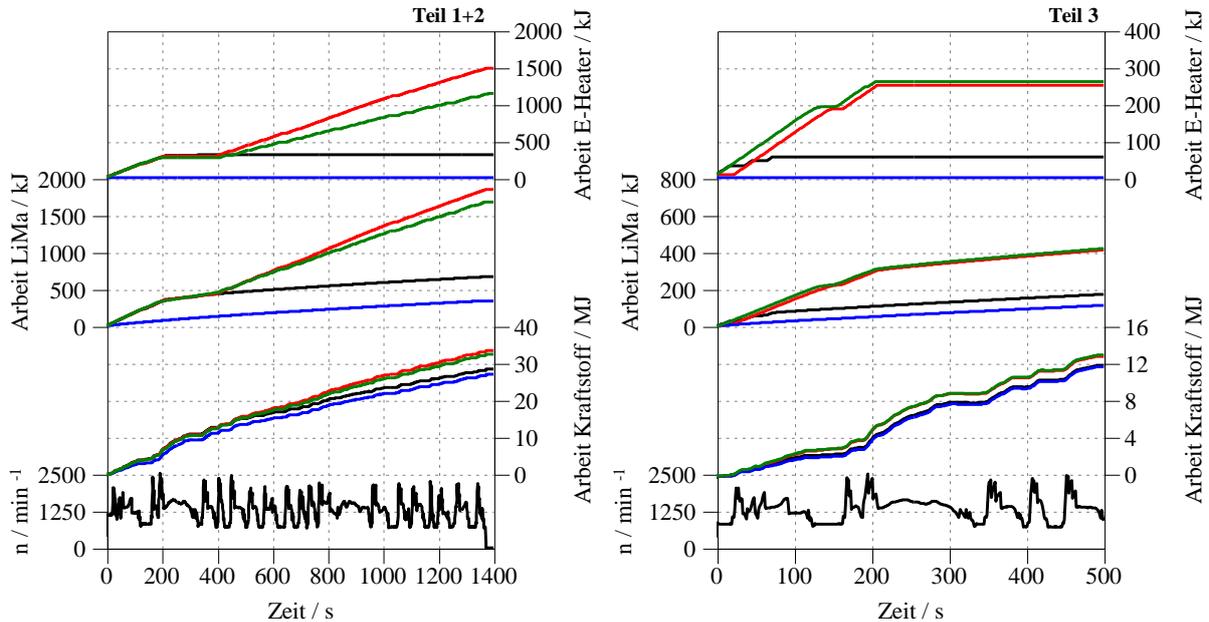


Abbildung 6.15: Auswirkung verschiedener E-Heater Leistungen auf die Arbeiten im System

6.8.2 Ergebnisse

Den Temperatureinfluss verschiedener E-Heater Leistungen auf die Katalysatoren stellt Abbildung 6.16 dar. Die Deaktivierung des E-Heaters führt im Warmlauf zu einem stark verzögerten Anstieg der Katalysatortemperaturen. Nach Erreichen der Betriebstemperaturen deckt sich der Temperaturverlauf aber mit dem Zyklus bei normaler E-Heater Aktivität. Wird die Heizkomponente aktiviert, ist sowohl bei normaler Betriebsstrategie, als auch bei erhöhter und maximaler Leistung derselbe Temperaturverlauf im Warmlauf zu beobachten. Ab 400 Sekunden führt die höhere Zieltemperatur der anderen Tests zu einer zusätzlichen Wärmeeinbringung in das Abgas. Das SCR System weist bei erhöhter und maximaler Leistung durchwegs eine höhere Temperatur auf. Zudem kann im 3. Teil eine höhere Starttemperatur in den Nachbehandlungskomponenten festgestellt werden.

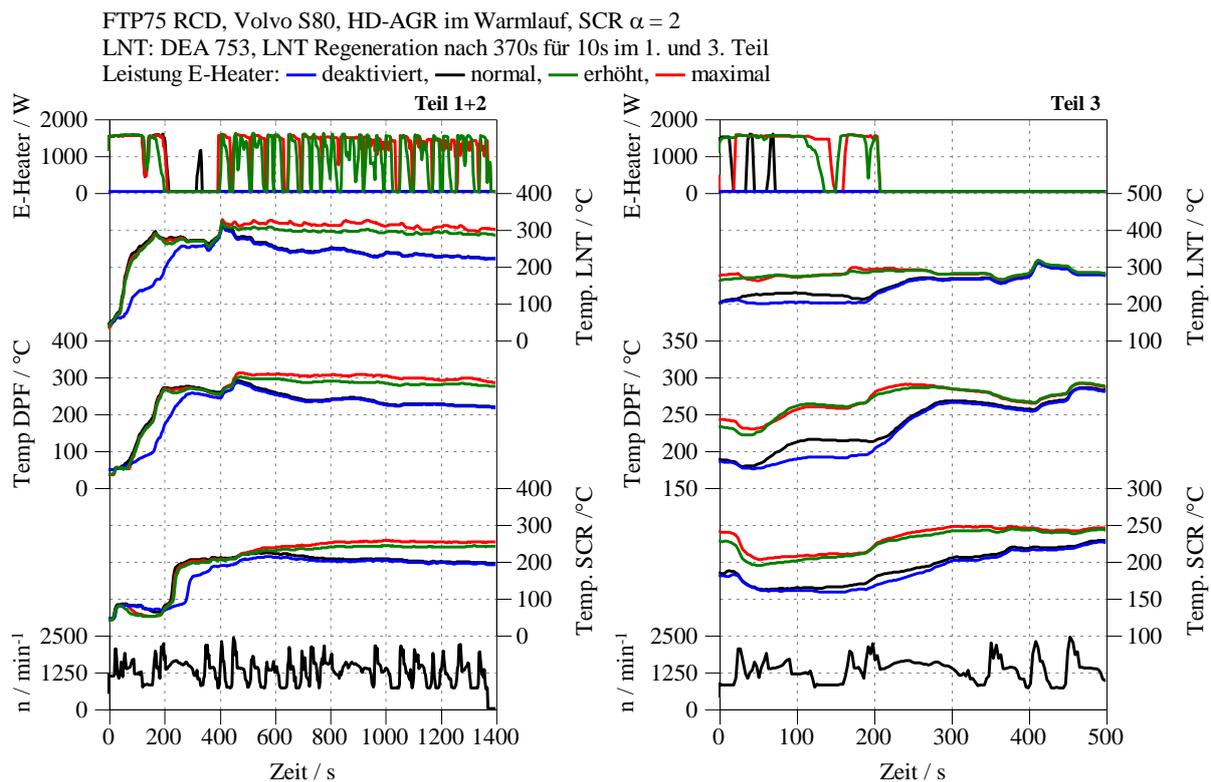


Abbildung 6.16: Einfluss der E-Heater Aktivität auf die Katalysatortemperaturen

Den Verlauf der Emissionen stellt Abbildung 6.17 dar. Durch die Deaktivierung des Heizelements erreichen die Komponenten später ihre Betriebstemperatur. Somit kann im Warmlauf ein starker Anstieg der Emissionen beobachtet werden. Die erhöhte bzw. maximale Aktivität des E-Heaters führt zu einem Anstieg der NO_x Emissionen. Dies kann durch den längeren Betrieb des Motors im Hochlastbereich erklärt werden. Der SCR Katalysator kann trotz der erhöhten Temperatur den Schadstoff nur in einem geringen Maße reduzieren. Die fortgeschrittene Alterung der Komponente erklärt diese Beobachtung.

Im 3. Teil des Zyklus ist nur ein geringer Einfluss der E-Heater Aktivität auf die Emissionen festzustellen. Zwar sinken die Schadstoffwerte durch die höheren Katalysatortemperaturen, doch ist dieser Vorteil nicht ausschlaggebend.

FTP75 RCD, Volvo S80, HD-AGR im Warmlauf, SCR $\alpha = 2$
 LNT: DEA 753, LNT Regeneration nach 370s für 10s im 1. und 3. Teil
 Leistung E-Heater: — deaktiviert, — normal, — erhöht, — maximal

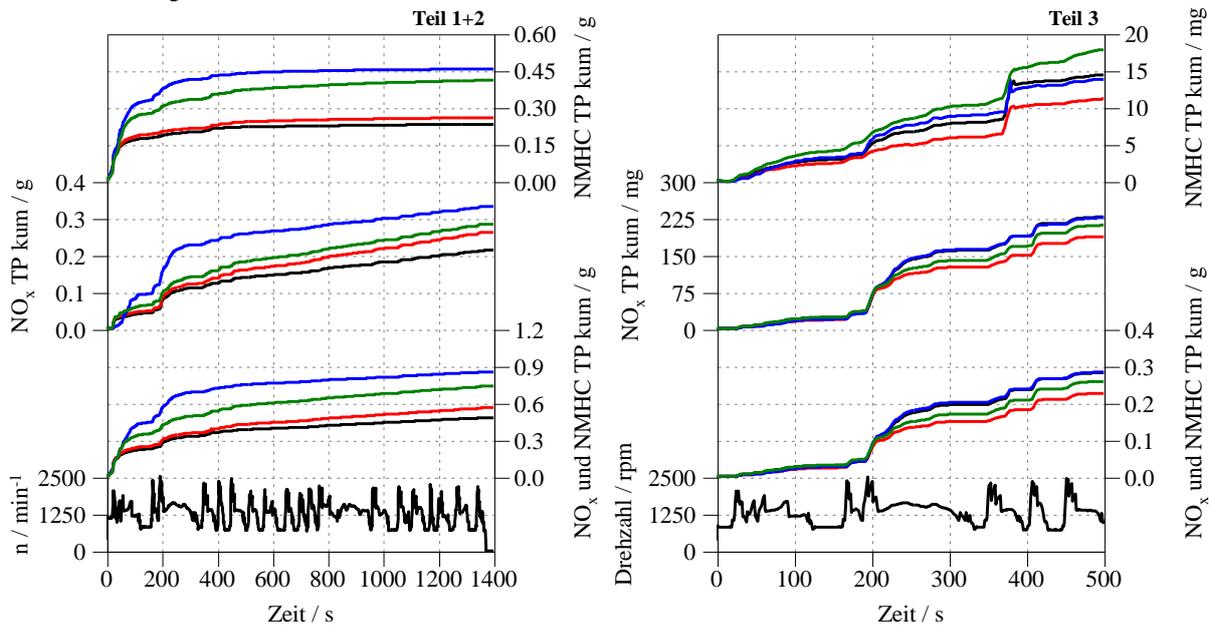


Abbildung 6.17: Verlauf der Emissionen bei unterschiedlichen Aktivitäten des E-Heaters

Abbildung 6.18 stellt das Gesamtergebnis der Versuchsreihe dar. Das geringste Emissionsergebnis kann durch den normalen Betrieb des E-Heaters erreicht werden. Sowohl die Deaktivierung des Heizelements, als auch eine gesteigerte Aktivität sorgen für eine Erhöhung des Schadstoffausstoßes. Die Untersuchungen zeigen zudem den großen Einfluss der Heizmaßnahmen auf den Kraftstoffverbrauch. Bei erhöhter bzw. maximaler Aktivität des E-Heater kann ein Mehrverbrauch von bis zu 18,5 % festgestellt werden. Der normale Betrieb der Komponente führt zu einer Verbrauchszunahme von lediglich 2,6 % in Bezug auf ein System ohne Heizmaßnahmen.

Zudem kann eine verringerte Funktionalität des SCR Systems festgestellt werden. Trotz höherer Abgastemperaturen kann der Katalysator die NO_x Emissionen nicht effektiver reduzieren. Die hohe Alterung der Komponente behindert den Schadstoffumsatz.

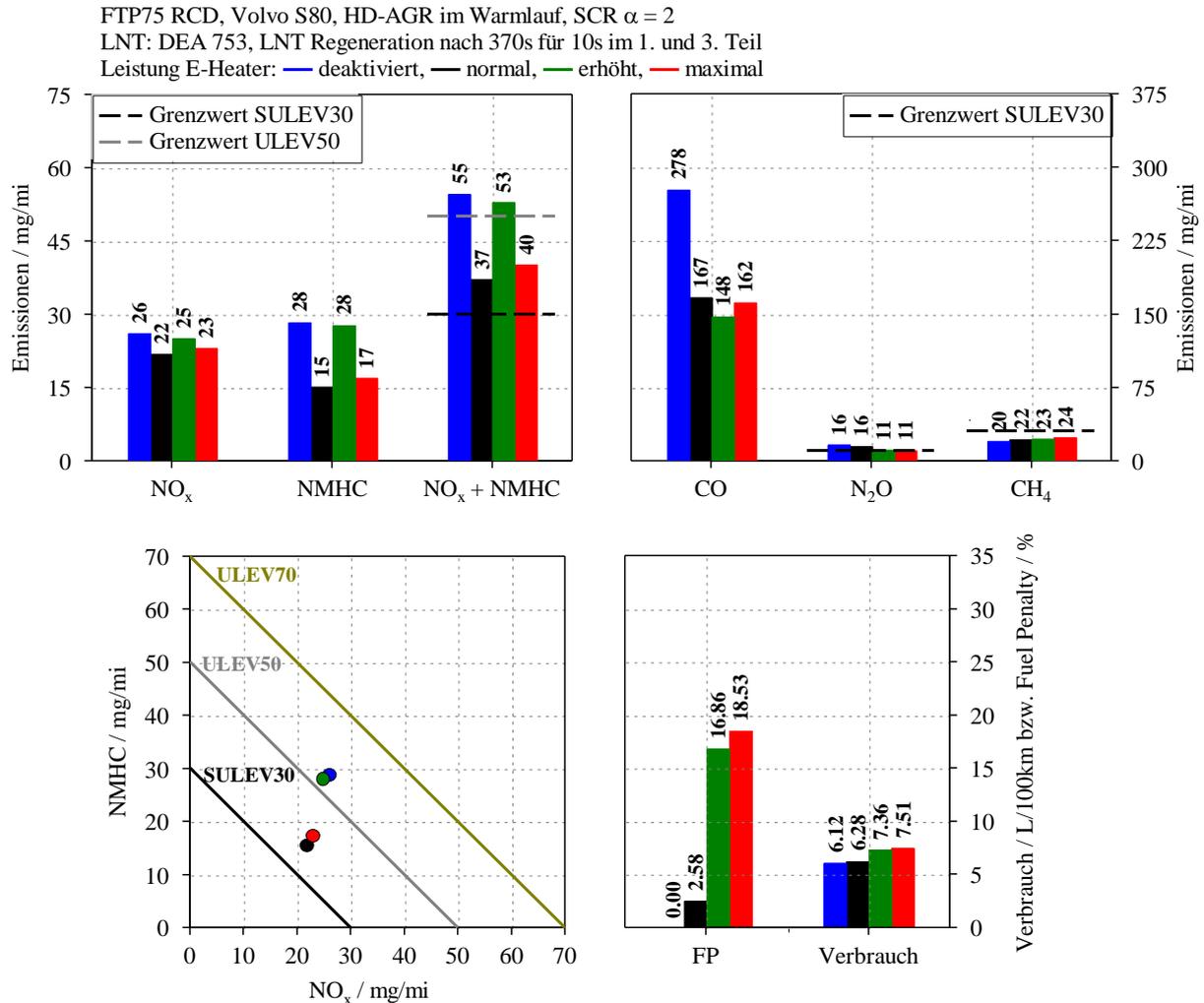


Abbildung 6.18: Gesamtergebnis der Versuchsreihe

6.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit dem System 3 eine hocheffektive Schadstoffminderung möglich ist. Das zentrale Element bei dem Konzept ist dabei der Speicherkatalysator. Dessen Fähigkeit zur Kalteinspeicherung ermöglicht im Warmlauf eine außerordentliche Reduzierung der Stickoxide. HC Emissionen können nach Erreichen der Betriebstemperatur effektiv oxidiert werden. Die motornaher Anbringung und der Einsatz des E-Heaters garantieren im Warmlauf einen raschen Anstieg der Katalysatortemperaturen. Durch die ungekühlte HD-AGR im Warmlauf (bis 40°C Motortemperatur) kann der LNT bei geringem Abgasmassenstrom zusätzlich aufgeheizt werden. Der Einsatz einer RHU erwies sich mit der aktuellen Konfiguration nicht als vorteilhaft. Eine ausgesprochene Herausforderung stellt die Regeneration des Speicherkatalysators dar. Diese Maßnahme führt zu einem zusätzlichen Ausstoß von Schadstoffen. Der Betriebspunkt hat dabei einen starken Einfluss auf das Emissionsergebnis. Als vorteilhaft erweist sich ein geringer Abgasmassenstrom. Ein weiterer wichtiger Faktor des Systems 3 ist die Beschichtung des LNT. Wie in den Untersuchungen gezeigt werden konnte, führen der technologische Fortschritt und die dabei geänderte Zusammensetzung des aktiven Substrats zu einem maßgeblichen Anstieg des Konvertierungsgrades.

Das Emissionsergebnis des Systems 3 mit optimierter Betriebsstrategie zeigt Abbildung 6.19. Sowohl die NO_x als auch die HC-Emissionen können effektiv reduziert werden. In Summe erzielt das System bei den NO_x und NMHC Gesamtemissionen einen Wert von 32 mg/Meile. Der SULEV Grenzwert wird dabei nur in einem geringen Maße überschritten. Dabei muss beachtet werden, dass das SCR System bereits einen hohen Alterungszustand aufweist. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes, kann von einer zusätzlichen Reduzierung der NO_x Mengen ausgegangen werden. Während der Grenzwert für Lachgas überschritten wird, kann das System das Limit für Methan einhalten.

Im Verhältnis zu einem System ohne Heizmaßnahmen, führt der Einsatz des E-Heaters beim System 3 zu einem sehr geringen Mehrverbrauch. Der Kraftstoffverbrauch nimmt nur um ein Prozent zu.

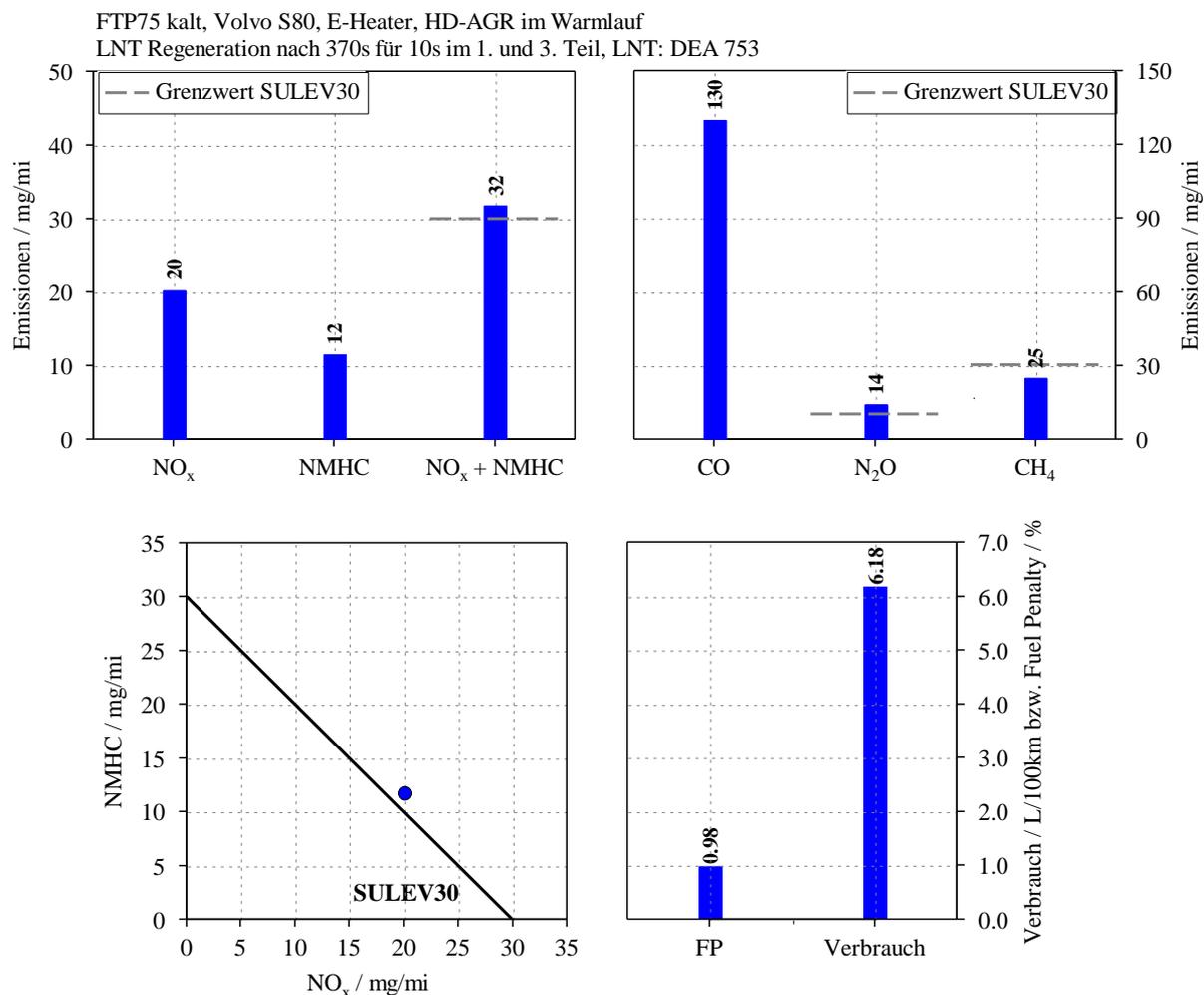


Abbildung 6.19: Emissionsergebnis des Systems 3

6.10 Gegenüberstellung mit Simulationsergebnissen

Ein mit dem System 3 vergleichbares Nachbehandlungskonzept wurde in der AVL List GmbH durch Computersimulationen ausführlich untersucht. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Heizmaßnahmen auf das Emissionsergebnis des Konzeptes analysiert. Das Nachbehandlungssystem ist aus einem E-Kat, einem LNT mit erhöhter Beschichtung, einem cDPF und einem Unterboden SCR Katalysator aufgebaut. Die hohe Beschichtung des

Speicher-katalysators ermöglicht eine wirkungsvolle Reduzierung der Schadstoffe. Heizmaßnahmen können dadurch verringert werden (siehe Abbildung 6.20). Bei einer reduzierten Heizleistung des E-Heaters kann der SULEV Grenzwert noch eingehalten werden. Dabei sinkt auch der zusätzliche Kraftstoffverbrauch. Mit innermotorischem Heizen bzw. einer adaptierten Kalibrierung kann der Grenzwert auch ohne den E-Heater unterschritten werden [26].

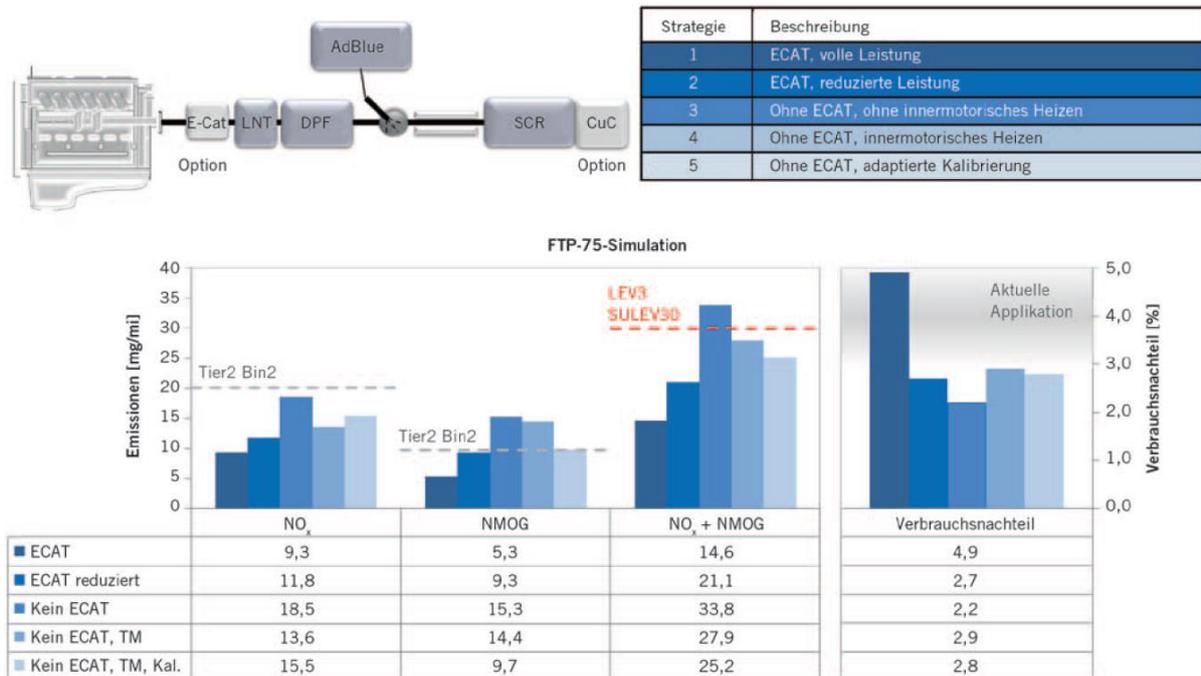


Abbildung 6.20: Simulationsergebnisse des System 3 [26]

7 Vergleich der Systeme

Im folgenden Kapitel werden die untersuchten Nachbehandlungssysteme miteinander verglichen. Berücksichtigt werden dabei der jeweilige Emissionsausstoß und der Kraftstoffverbrauch. Die Ermittlung der Schadstoffwerte erfolgte in definierten Testzyklen am Motorenprüfstand. Gemäß der US-Amerikanischen Gesetzgebung wurden dabei die beiden Testzyklen FTP75 und US06 dargestellt. Die Betriebsstrategie der einzelnen Nachbehandlungskonzepte wurde auf geringste Emissionen bei einem gleichzeitig niedrigen Kraftstoffverbrauch ausgelegt. Dabei sollte ermittelt werden, welches Konzept das größte Potential für die LEV3 SULEV Gesetzgebung bietet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind folgend dargestellt.

7.1 Heizstrategie

Um im Warmlauf ein rasches Erreichen der Betriebstemperaturen in den Katalysatoren zu ermöglichen, verfügen die einzelnen Nachbehandlungskonzepte über verschiedene Heizstrategien. Diese sind in Tabelle 7.1 aufgelistet.

Tabelle 7.1: Maßnahmen zur Temperatursteigerung im Warmlauf

Abgas-konfiguration	E-Heater	RHU	HD-AGR
System 1	aktiv	Mode 1+2	-
System 2	aktiv	-	-
System 3	aktiv	-	bis 40°C Motortemperatur

7.2 Emissionsergebnis des FTP75 Zyklus

Abbildung 7.1 stellt den Temperaturverlauf in den einzelnen Nachbehandlungskonzepten dar. Beim System 1 führt der Rapid Heat up zu einem starken Anstieg der Temperaturen im DOC. Durch die Oxidation von Kohlenwasserstoffen wird exotherme Wärme freigesetzt, welche die Temperatur in den nachfolgenden Nachbehandlungskomponenten ansteigen lässt. Im SCR System kann durch diese Heizmaßnahme die Betriebstemperatur 50 Sekunden früher als bei den anderen Konzepten erreicht werden. Die Systeme 2 und 3 nutzen im Warmlauf ausschließlich den E-Heater um die Abgastemperaturen anzuheben. Dies führt im Partikelfilter und besonders im SCR System zu einem verspäteten Light Off. Nach 400 Sekunden zeigen jedoch alle Systeme einen ähnlichen Temperaturverlauf. Die Regeneration des Speicherkatalysators erzeugt eine kurzzeitige Temperaturspitze. Im 3. Teil des Zyklus kann zwischen den Systemen 2 und 3 nur ein sehr geringer Unterschied beobachtet werden. Das System 1 kann auch in dieser Zyklusphase durch den Einsatz der RHU die Temperatur in den Katalysatoren erhöhen.

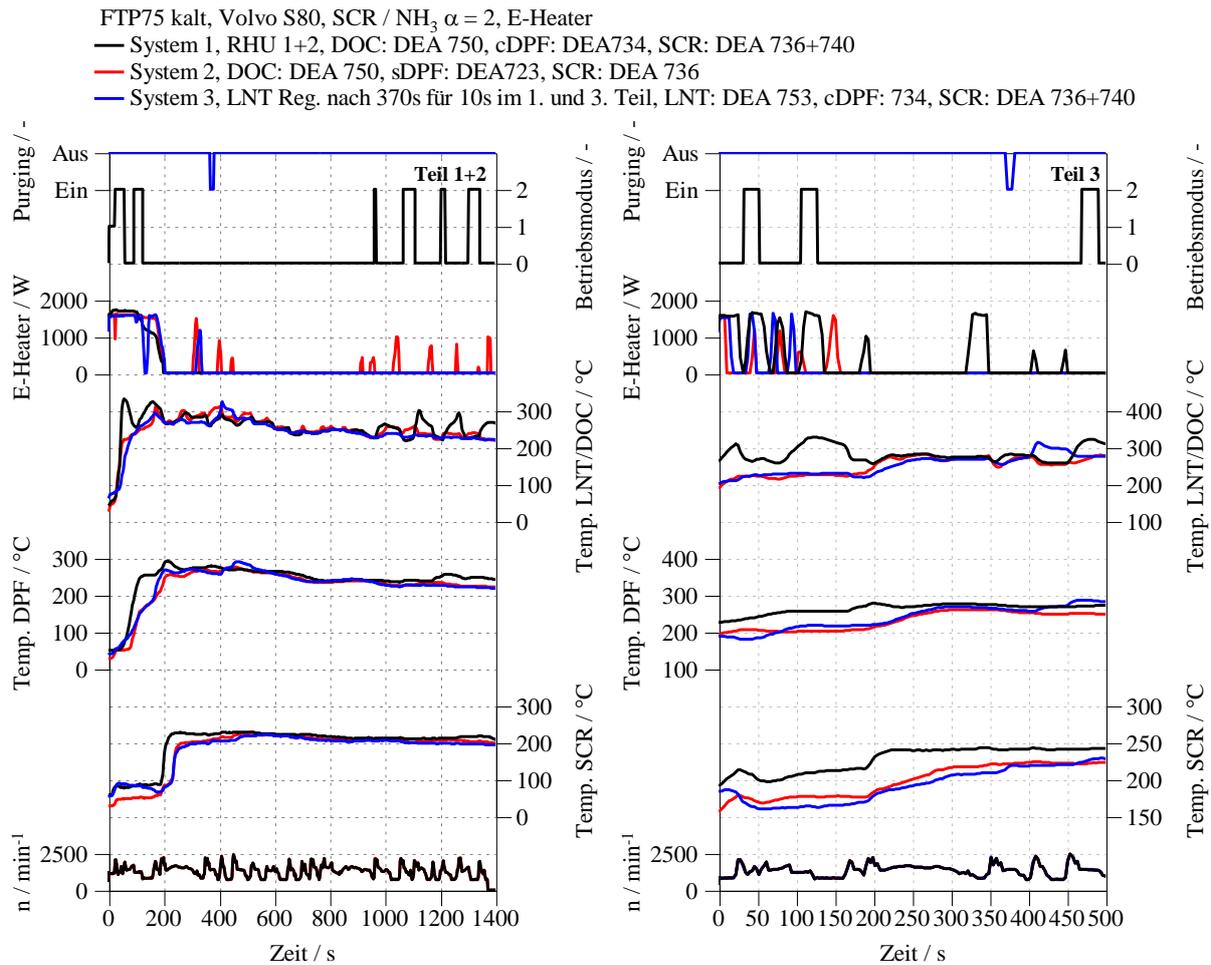


Abbildung 7.1: Verlauf der Katalysortemperaturen in den einzelnen Systemen

Abbildung 7.2 stellt den Emissionsverlauf der einzelnen Nachbehandlungssysteme dar. Die RHU Heizmaßnahme führt beim System 1 trotz der effektiven Temperatursteigerung zu einem starken Anstieg HC-Emissionen. Die NMHC Werte weisen im Warmlauf einen doppelt so hohen Wert als bei den Systemen 2 und 3 auf. Nach Erreichen der Betriebstemperatur können die Kohlenwasserstoffe effektiv am DOC oxidiert werden. Beim System 2 kann die Menge der NMHC Emissionen stark reduziert werden. Die Deaktivierung der RHU und die angepasste Kalibrierung (höhere NO_x Rohemissionen bei verringerten HC im Rohabgas) erweisen sich in diesem Zusammenhang als sehr wirkungsvoll.

Beim System 3 führt im Warmlauf die niedrige HC-Kalteinspeicherung zu einem Anstieg des Schadstoffes. Nach Erreichen der Betriebstemperatur können die HC-Emissionen auch im System 3 effektiv oxidiert werden. Im 3. Teil des Zyklus weisen alle Konzepte eine ähnlich effektive Oxidationsfähigkeit auf.

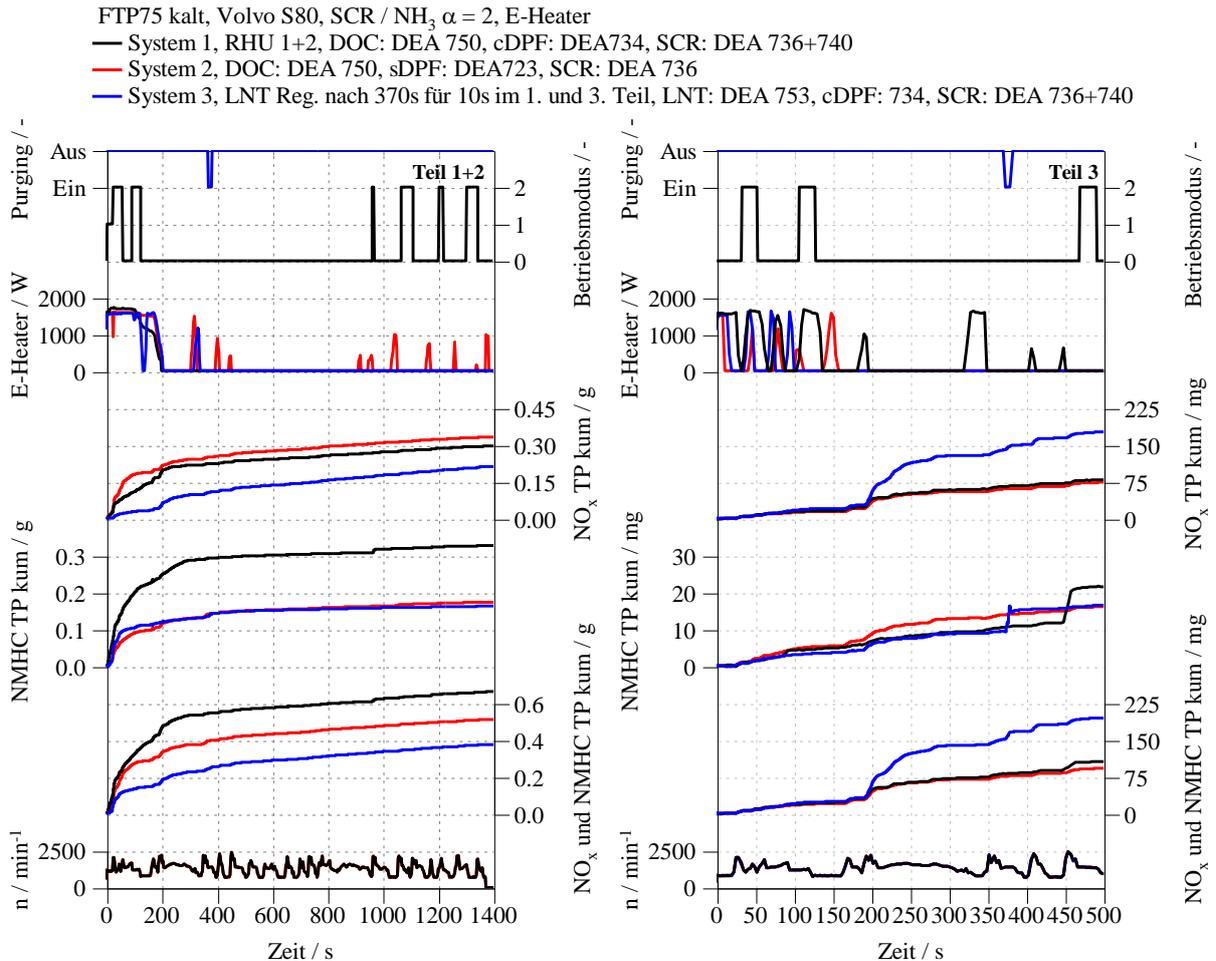


Abbildung 7.2: Emissionsverlauf der unterschiedlichen Nachbehandlungskonzepte

Bei Betrachtung der Stickoxide zeigt sich wirkungsvoll die Kalteinspeicherung im LNT. Nach 200 Sekunden kann beim System 3 eine um 70% geringere NO_x-Menge als bei den Systemen 1 und 2 festgestellt werden. Am Ende der ersten beiden Teile reduziert sich dieser Vorteil zusehends. Der geringe NO_x Schlupf des LNT kann vom SCR nur in einem geringen Maße bewältigt werden. Einerseits kann die geringe Konzentration des Schadstoffes vom SCR System nur schwer reduziert werden. Zudem weist der Katalysator beim System 3 bereits eine hohe Alterung auf und kann nach Erreichen der Betriebstemperatur nur noch einen geringen Anteil der Stickoxide konvertieren. Trotz zwei reduzierender Komponenten, weist das System 2 einen hohen Ausstoß an Stickoxiden auf. Die Kalibrierung zugunsten geringerer HC Emissionen im Rohabgas erzeugt einen Anstieg der NO_x bei den Rohemissionen. Bis zu Light Off des sDPF können diese nur in einem geringen Maße reduziert werden. Auch beim System 1 zeigt sich ein Anstieg der NO_x Emissionen im Warmlauf. Erreicht der SCR seine Betriebstemperatur, kann der Schadstoff effektiv umgesetzt werden. Im 3. Teil des Zyklus zeigen die Systeme 1 und 2 einen ähnlichen Schadstoffverlauf. Das verringerte Reduktionsvermögen des SCR sorgt beim System 3 für einen Anstieg der Stickoxide.

Das Gesamtergebnis der einzelnen Systeme ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Das beste Gesamtergebnis zeigt das System 3. Besonders die Kalteinspeicherung der Stickoxide wirkt sich stark auf das Ergebnis aus. Trotz des gealterten SCR Katalysators kann das Konzept den Schadstoff am effektivsten umzusetzen. Der Einsatz der RHU führt beim System 1 zu einem starken Anstieg der HC-Emissionen. Bis zum Light Off des SCR können diese nicht

vollständig vom DOC oxidiert werden. Sowohl die Systeme 1 und 2 können die ULEV50 Grenzwerte einhalten. Das System 3 überschreitet mit 32mg/Meile den SULEV Grenzwert für NO_x und NMHC nur um einen sehr geringen Teil. Mit einem neuen SCR System ist die Unterschreitung des Grenzwertes möglich. Sowohl die Grenzwerte für Lachgas als auch für Methan stellen für die Nachbehandlungskonzepte eine große Herausforderung dar. Auch hier zeigt das System 3 die geringsten Schadstoffwerte auf.

Der Einsatz von Heizmaßnahmen führt bei den Konzepten durchwegs zu einem Anstieg des Verbrauchs. Dies zeigt sich deutlich beim System 1. Im Vergleich zum selben Konzept ohne Heizmaßnahmen steigt der Verbrauch um 7,5 %. Bei einer Deaktivierung der RHU, appliziert in den Systemen 2 und 3, kann ein weit geringerer Mehrverbrauch festgestellt werden. Der reduzierte Einsatz des E-Heaters führt beim System 3 zu einem sehr geringen Mehrverbrauch von nur 1%.

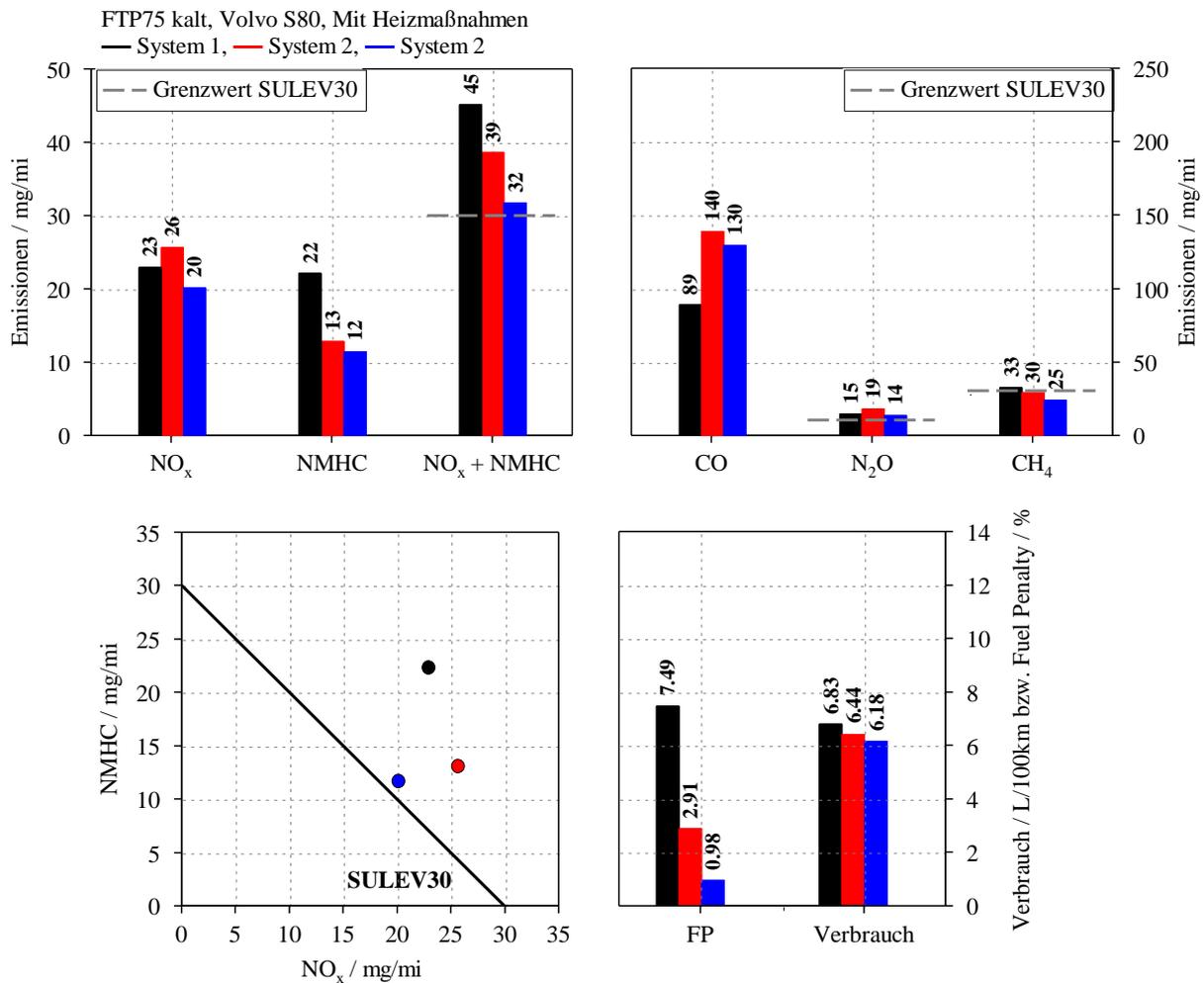


Abbildung 7.3: Gesamtergebnis der einzelnen Systeme im FTP Zyklus

7.3 Emissionsergebnis des US 06 Zyklus

Abbildung 7.4 stellt den Verlauf der Temperaturen und Emissionen im US06 Zyklus dar. Der Zyklus schließt direkt an den FTP75 Zyklus an. Der Motor und die Abgasnachbehandlung haben somit bereits ihre Betriebstemperatur erreicht. Dies zeigt sich in den Verläufen der Katalysatortemperaturen. Durch den Betrieb im Hochlastbereich können somit im DOC bzw. LNT Temperaturen von 300-350°C gemessen werden. Das SCR System erreicht

Temperaturen von 300°C. Die LNT Regeneration führt zudem zu einer starken Temperaturspitze. Durch die hohen Abgastemperaturen können HC-Emissionen effektiv vermindert werden. Die LNT Regeneration im System 3 führt jeweils zu einem Durchbruch des Schadstoffes. Stickoxide werden am effektivsten im System 2 vermindert. Beim System 3 führt die verminderte Reduktion im SCR zu einem verstärkten Anstieg des Schadstoffes.

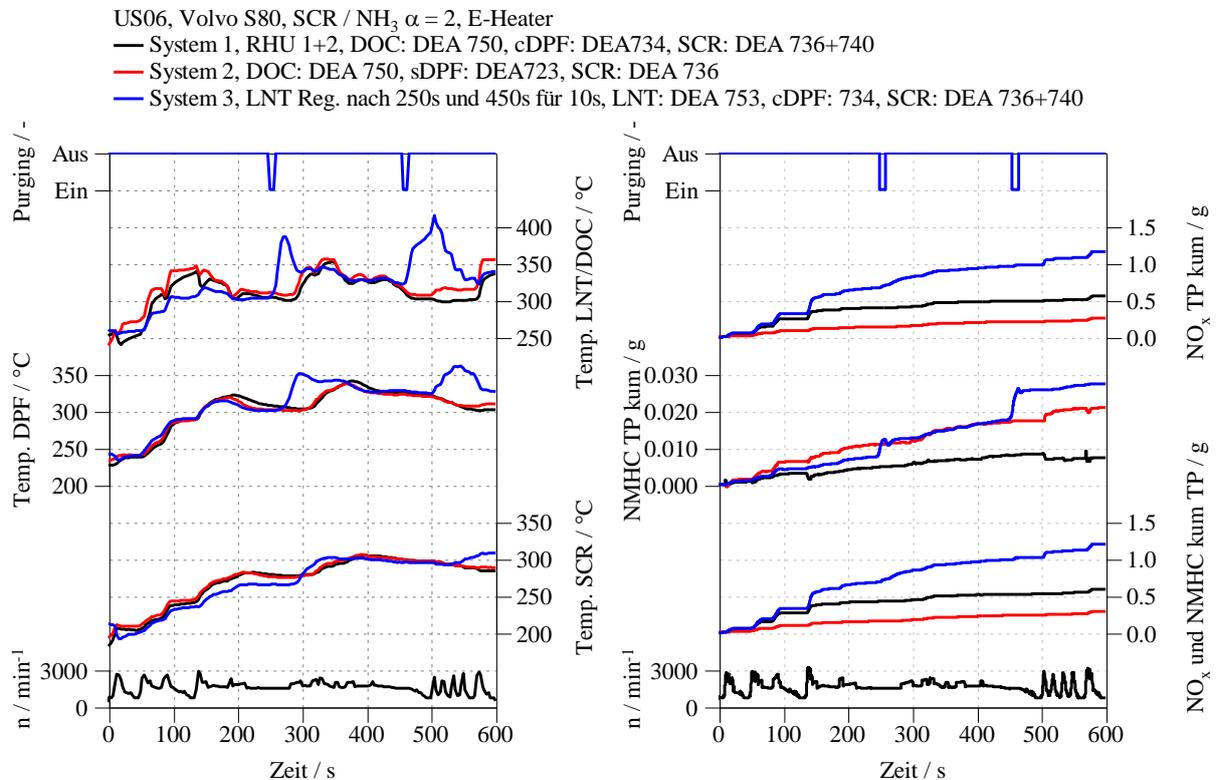


Abbildung 7.4: Verlauf der Emissionen und Temperaturen im US06 Zyklus

Das Gesamtergebnis des Zyklus ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Wie in den Emissionsverläufen schon beobachtet werden konnte, können durch die hohen Abgastemperaturen HC wirkungsvoll oxidiert werden. Der hochlastige Betrieb führt aber zu einem Anstieg der NO_x Emissionen. Das System 2 kann diese am effektivsten reduzieren. Beim System 3 stellt der Zyklus eine große Herausforderung dar. Das System kann die Stickoxide im Zyklus nur sehr schlecht reduzieren. Die hohe Alterung des SCR erklärt unter anderem diesen Umstand.

Insgesamt erzielt das System 2 im US06 Zyklus das beste Ergebnis und kann die SULEV Grenzwerte unterschreiten. Der Einsatz von 2 reduzierenden Komponenten ermöglicht eine effektive Minderung der Schadstoffe. Das System 1 kann noch den ULEV Grenzwert einhalten. Das geringere Reduktionsvermögen führt zu einem erhöhten Ausstoß an NO_x. Das System 3 erzielt insgesamt das höchste Emissionsergebnis.

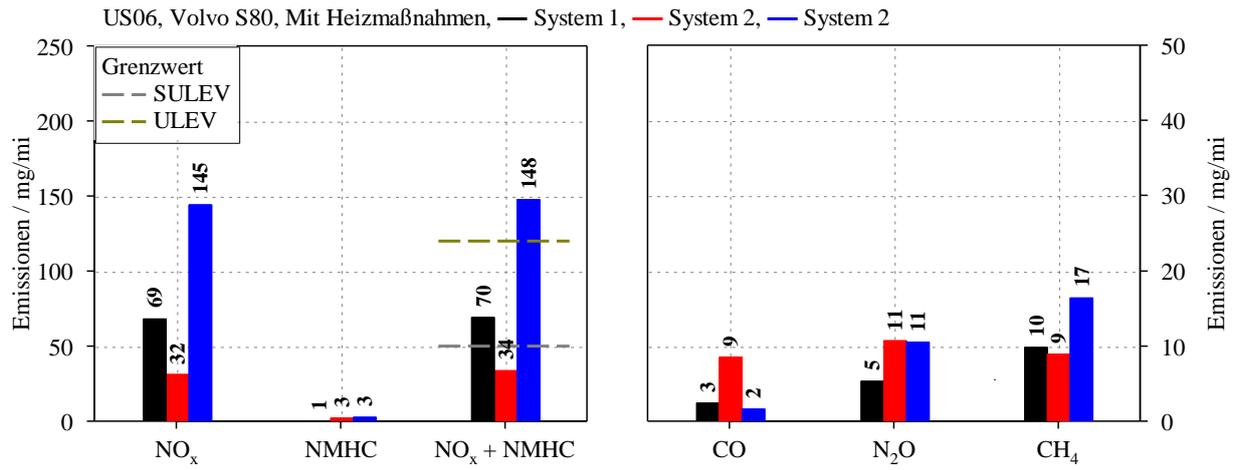


Abbildung 7.5: Gesamtergebnis der einzelnen Systeme im US06 Testlauf

8 Zusammenfassung

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass unter Einsatz modernster Katalysatortechnologien und angepasster Betriebsstrategien die Einhaltung der SULEV Grenzwerte mit einem Dieselmotor möglich ist. Ein wichtiger Aspekt dabei ist ein frühes Erreichen der Betriebstemperaturen in den Katalysatoren. Heizmaßnahmen erweisen sich dabei als eine sehr wirkungsvolle Maßnahme, führen aber zu einem Anstieg des Verbrauchs. Um eine hohe Effektivität der Nachbehandlung gewährleisten zu können, muss das jeweilige Abgassystem und die Betriebsstrategie an das Fahrzeug angepasst werden. Dies führt zu einer erheblichen Zunahme des Entwicklungsbedarfs. Eine große Herausforderung stellt die Langzeitstabilität der Komponenten dar. Wie in den Untersuchungen gezeigt werden konnte, führt eine hohe thermische Belastung zu einer starken Alterung der Katalysatoren. Dabei sinkt die Fähigkeit der Komponenten Schadstoffe umzusetzen stark ab. Dieser Umstand muss bei der Entwicklung der Nachbehandlungsstrategie miteinbezogen werden.

Im Zuge der Arbeit wurden drei verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme untersucht und verglichen. Das System 1 besteht aus einem motornahen Oxidationskatalysator, einem katalytisch beschichteten Partikelfilter und einem Unterboden SCR System. Um ein frühes Erreichen der Betriebstemperaturen in den Nachbehandlungskomponenten gewährleisten zu können, verfügt das Konzept über zwei Heizmaßnahmen. Durch den E-Heizer und den Rapid Heat Up (innermotorisches Heizen) können im Warmlauf die Katalysatortemperaturen, insbesondere im SCR System, effektiv angehoben werden. Trotz des wirkungsvollen Thermomanagements steigt auch der Verbrauch des Konzepts stark an. In einer Optimierung der Motorkalibrierung konnte durch eine verminderte RHU der Verbrauch bei gleichbleibenden Emissionen reduziert werden. Das Konzept kann mit der optimierten Betriebsstrategie die ULEV50 Grenzwerte einhalten. Besonders die hohen Emissionen im Warmlauf stellen eine große Herausforderung an das Konzept dar. Um eine weitere Reduzierung der Emissionen zu erzielen, ist ein frühes Erreichen der Katalysatortemperaturen, insbesondere im SCR System, anzustreben.

Beim System 2 sind motornah ein Oxidationskatalysator und ein Partikelfilter mit selektiv katalytischer Beschichtung angeordnet. Im Unterschied zu den Systemen 1 und 3 wird das Reduktionsmittel NH_3 direkt vor dem Partikelfilter eingedüst. Durch diese Vorgehensweise kann auf eine aufwändige Berechnung, Entwicklung und Bau einer AdBlue® Mischstrecke verzichtet werden. Zudem verfügt das Konzept über einen Unterboden SCR Katalysator. Da der selektiv katalytisch beschichtete Partikelfilter durch die motornaher Anordnung früher als der SCR Katalysator seine Betriebstemperatur erreicht, können NO_x rascher reduziert werden. Diese Konfiguration erlaubt eine Deaktivierung der RHU und somit eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs. Zudem kann die Menge der HC Emissionen im Rohabgas reduziert werden. Da das Konzept über zwei reduzierende und eine oxidierende Komponente verfügt, musste die Kalibrierung des Motors angepasst werden. Durch eine höhere Luftmasse kann die Menge der HC im Rohabgas gesenkt werden. Dabei steigen die NO_x Rohemissionen an. Das Konzept kann mit angepasster Betriebsstrategie die ULEV50 Grenzwerte einhalten. Im Vergleich zum System 1 können die HC Emissionen dabei wirkungsvoll reduziert werden. Auch der Verbrauch sinkt aufgrund der verminderten Heizmaßnahmen stark ab. Wie beim System 1 stellt auch beim System 2 die Schadstoffbildung im Warmlauf eine große Herausforderung dar.

Das zentrale Element beim System 3 ist der motornaher Speicherkatalysator. Die Kombination aus dieser Komponente, einem Partikelfilter und einem Unterboden SCR System erzielte die besten Emissionsergebnisse. Im FTP Zyklus konnten die Schadstoffe am effektivsten reduziert werden. Dabei wurde der geringste Mehrverbrauch erzielt. Den größten Anteil am Emissionsergebnis des Konzeptes hat der Speicherkatalysator. Dessen Fähigkeit zur

Kalteinspeicherung ermöglicht im Warmlauf eine effektive Reduzierung der Stickoxide. Im weiteren Verlauf des Zyklus kann aber ein verringertes Reduktionsvermögen des Systems festgestellt werden, was auf die hohe Alterung der SCR Katalysators zurückgeführt werden kann. HC-Emissionen können nach Erreichen der Betriebstemperaturen im Speicherkatalysator wirkungsvoll oxidiert werden, stellen bis zu diesem Zeitpunkt aber eine große Herausforderung an das System dar. Wie beim System 2 konnte beim System 3 auf eine RHU verzichtet werden. Dies wirkt sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. Eine ungekühlte HD-AGR im Warmlauf ermöglicht zudem eine wirkungsvolle Temperatursteigerung im LNT bei einem geringen Abgasmassenstrom. Die Regeneration des Speicherkatalysators stellt eine weitere große Herausforderung an das Konzept dar. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass der Betriebspunkt einen großen Einfluss auf die Maßnahme hat. Ein geringer Abgasmassenstrom erweist sich als vorteilhaft. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Beschichtung der Speicherkomponente. Durch einen höheren Edelmetallanteil kann ein maßgeblicher Anstieg des HC-Konvertierungsgrad erzielt werden. Mit angepasster Betriebsstrategie überschreitet das System 3 knapp den SULEV 30 Grenzwert. Dabei muss beachtet werden, dass der SCR Katalysator aufgrund seiner fortgeschrittenen Alterung nur eine geringe Schadstoffkonvertierung aufzeigt. Bei Berücksichtigung dieses Umstandes, ist zu erwarten, dass das Konzept den SULEV Grenzwert unterschreiten kann.

Zusammenfassend können die Untersuchungen zeigen, dass mit den vorliegenden Systemen eine effektive Reduzierung der Schadstoffe möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass der Prüfstands Aufbau stark von den Bedingungen eines Serienkonzeptes abweicht. Letzteres ermöglicht durch seine kompakte Bauweise eine markante Verringerung der Wärmeverluste und eine Verkürzung der Abgasstrecken. Im Vergleich zum Prüfstands Aufbau können dabei die Betriebstemperaturen in den Katalysatoren rascher erreicht werden. Zudem wird die Strecke für die AGR verkürzt. Diese Faktoren haben einen weiteren Einfluss auf die Betriebsstrategie und führen bei der Serienumsetzung der Konzepte zu einer weiteren Reduzierung der Emissionen und des Verbrauchs.

8.1 Ausblick

Um die Effektivität der Abgasnachbehandlung weiter zu steigern, bieten sich mehrere Schritte an. Wie in den Untersuchungen gezeigt werden konnte, verfügt das System 3 über das größte Potential. Dieses kann unter anderem durch die bessere Funktion eines neuen SCR-Katalysators genutzt werden. Eine höhere Beschichtung des LNT und des cDPF ermöglicht zudem eine zusätzliche Reduzierung der Emissionen. Beim Speicherkatalysator kann durch einen höheren Edelmetallanteil die Oxidation der HC gesteigert werden. Dies wirkt sich besonders positiv auf den Warmlauf aus. Eine weitere Möglichkeit bietet die selektiv katalytische Beschichtung des Partikelfilters. Stickoxide können durch diese Maßnahme noch wirkungsvoller reduziert werden. Nach wie vor spielt bei einem solchen System die Alterung und die Komplexität des Systems eine große Rolle und darf nicht vernachlässigt werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Konzentration der Schadstoffe im Dieselmotor über dem Luftverhältnis λ [2]	15
Abbildung 2.2: Zusammensetzung der Rohemissionen bei Dieselmotoren [3]	16
Abbildung 2.3: Typische Partikelzusammensetzung im Dieselmotor [5]	18
Abbildung 2.4: Temperaturabhängiger Geschwindigkeitskoeffizient der thermischen NO Bildung [3]	20
Abbildung 2.5: Abgasrückführung a Hochdruck AGR b Niederdruck AGR [2]	22
Abbildung 2.6: Flottenmittelwerte und LEVIII Emissionskategorien [8]	24
Abbildung 2.7: Geschwindigkeitsprofil FTP75 [7]	25
Abbildung 2.8: Vergleich unterschiedlicher Abgasnormen in USA und Europa	26
Abbildung 2.9: Reaktionsschritte einer heterogenen katalytischen Reaktion [10]	28
Abbildung 2.10: Energieschwelle bei katalytisch und nicht-katalytisch geführter Reaktion	28
Abbildung 2.11: Abhängigkeit des Stoffumsatzes von der Temperatur [10]	29
Abbildung 2.12: Prinzipieller Aufbau eines Abgaskatalysators [11]	31
Abbildung 2.13: Abhängigkeit der CO- und HC Konvertierung von der Temperatur [6]	32
Abbildung 2.14: NO ₂ Rate in Abhängigkeit der Temperatur im DOC [13]	33
Abbildung 2.15: Funktionsweise eines keramischen Dieselpartikelfilters. 1 Abgasstrom 2 Gehäuse 3 Keramikpropfen 4 Keramikgerüst 5 gereinigtes Abgas [6]	34
Abbildung 2.16: CRT System [2]	35
Abbildung 2.17: Schema eines SCR Systems [14]	36
Abbildung 2.18: NO _x Umsatz eines SCR Systems in Abhängigkeit der Temperatur [4]	37
Abbildung 2.19: Auswirkung des NO ₂ /NO Verhältnisses auf die Umsatzrate im SCR Katalysator [4]	38
Abbildung 2.20: Schematische Darstellung des NO _x Einspeichervorgangs im LNT	40
Abbildung 2.21: Shrinking Core Modells [17]	41
Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der Regeneration im LNT	41
Abbildung 2.23: Auswirkung von Schwefel auf die aktiven Komponenten im LNT [18]	42
Abbildung 2.24: Alterung der Speicherkatalysators [18]	43
Abbildung 2.25: Aufbau und Energiebilanz einer EHC-Kaskade [2]	43
Abbildung 3.1: Ansicht des Prüfstandaufbaus	46
Abbildung 3.2: Entnahmestelle für das ND-AGR bzw. das HD-AGR	47
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus	49
Abbildung 3.4: Maßnahmen zur thermischen Isolierung	50
Abbildung 3.5: Links der Volvo S80, rechts der Volvo XC90 [22] [23]	50
Abbildung 3.6: Schematischer Katalysatorquerschnitt zur Erörterung von A _i	52
Abbildung 3.7: Konditioniervorgang	53
Abbildung 3.8: Aufbau RCD	54
Abbildung 3.9: Links der Uniformity Index des Schadstoffes NO _x und des Reduktionsmittels NH ₃ vor bzw. nach SCR. Rechts die Gleichverteilung von NH ₃ vor SCR	54
Abbildung 4.1: Schema der Abgasnachbehandlung im System 1	55
Abbildung 4.2: Mischblech zur gleichmäßigen Verteilung des eingebrachten NH ₃	56
Abbildung 4.3: Umrechnungsfaktor FTP75 auf FTP72	56
Abbildung 4.4: Temperaturverläufe und kumulierte Emissionen des System1 mit Basiskonfiguration	57
Abbildung 4.5: FTP75 Gesamtergebnis	58
Abbildung 4.6: Darstellung der Maßnahmen und der Temperaturverläufe der jeweiligen Maßnahme	60
Abbildung 4.7: Emissionsergebnisse der Maßnahmen	61
Abbildung 4.8: E-Heater	63

Abbildung 4.9: Auswirkungen der Heizmaßnahmen auf die Katalysatortemperaturen	64
Abbildung 4.10: Emissionen des Systems 1 mit aktivierten Heizmaßnahmen.....	65
Abbildung 4.11: Auswirkungen der Kalibrierarbeiten im System 1	66
Abbildung 4.12: Emissionsergebnisse der unterschiedlichen Kalibrierungen.....	67
Abbildung 4.13: Einfluss der Heizmaßnahmen auf die Wärmemenge in den Katalysatoren [24]	68
Abbildung 4.14: Emissionsverläufe an den verschiedenen Messpositionen.....	69
Abbildung 4.15: Emissionsergebnis an den verschiedenen Messstellen	70
Abbildung 4.16: Absolute und relative Konvertierungsraten des System 1	71
Abbildung 4.17: Einfluss der Alterung auf das Reduktionsvermögen des SCR.....	72
Abbildung 4.18:Emissionsergebnis bzw. Konvertierungsrate des gealterten und des neuen SCR Systems	72
Abbildung 4.19: Emissionsergebnis des System 1 mit neuem und gealterten SCR System ...	74
Abbildung 4.20: Einfluss der Heizmaßnahmen auf das Emissionsergebnis [24]	75
Abbildung 5.1: Schema der Abgasnachbehandlungssysteme im System 2	76
Abbildung 5.2: Optimierter NH ₃ Mischer mit Darstellung der Gleichverteilung.....	78
Abbildung 5.3: Emissions- und Temperaturverlauf des Systems 2 im FTP75 Zyklus	79
Abbildung 5.4: Emissionsergebnis des Systems 2	80
Abbildung 5.5:Emissionsverlauf an den einzelnen Messstellen	81
Abbildung 5.6: Emissionsergebnisse und Zusammensetzung der Stickoxide an den einzelnen Messpositionen.....	82
Abbildung 5.7: Relative und Absolute Konvertierungsraten der Abgasnachbehandlung	83
Abbildung 5.8: Im System 2 verrichtete Arbeit	84
Abbildung 5.9: Emissionsergebnis mit bzw. ohne Heizmaßnahmen.....	85
Abbildung 5.10: Lastpunkte der Fahrzeuge Volvo S80 bzw. XC90 im FTP75 Zyklus	86
Abbildung 5.11: Von den verschiedenen Fahrzeugen geleistete Arbeit	86
Abbildung 5.12: Gesamtemissionen der Fahrzeuge Volvo S80 bzw. XC 90 im FTP75 Zyklus	87
Abbildung 5.13: Emissionsergebnis des Systems 2	89
Abbildung 5.14: Simulationsergebnisse zum System 2 [24]	90
Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des SULEV Systems 3	91
Abbildung 6.2: Verlauf der Temperaturen und Emissionen mit LNT Regeneration.....	92
Abbildung 6.3: Verlauf der Temperaturen und der Emissionen im System 3 ohne LNT Regeneration.....	93
Abbildung 6.4: Gesamtergebnis des System 3 mit bzw. ohne LNT Regeneration.....	94
Abbildung 6.5: Einfluss der Kalibrierung auf die Emissionsverläufe ohne LNT Regeneration	95
Abbildung 6.6: Auswirkungen der Kalibrierarbeiten auf das Gesamtergebnis	96
Abbildung 6.7: Auswirkung der Regenerationszeitpunktes auf das Emissionsergebnis	98
Abbildung 6.8: Auswirkung der HD-AGR auf die Emissionen und den Temperaturverlauf..	99
Abbildung 6.9: Auswirkungen der RHU auf den Verlauf der Temperaturen und Emissionen	100
Abbildung 6.10: Verlauf der Emissionen bei unterschiedlichen Speicherkatalysatoren	101
Abbildung 6.11: Gesamtemissionen der unterschiedlichen Katalysatoren	102
Abbildung 6.12: Emissionsverläufe an den unterschiedlichen Messpositionen	103
Abbildung 6.13: Gesamtemissionen an den einzelnen Messpositionen im System 3	104
Abbildung 6.14: Absolute und relative Konvertierungsraten im System 3	105
Abbildung 6.15: Auswirkung verschiedener E-Heater Leistungen auf die Arbeiten im System	106
Abbildung 6.16: Einfluss der E-Heater Aktivität auf die Katalysatortemperaturen	107

Abbildung 6.17: Verlauf der Emissionen bei unterschiedlichen Aktivitäten des E-Heaters .	108
Abbildung 6.18: Gesamtergebnis der Versuchsreihe	109
Abbildung 6.19: Emissionsergebnis des Systems 3	110
Abbildung 6.20: Simulationsergebnisse des System 3 [26]	111
Abbildung 7.1: Verlauf der Katalysatortemperaturen in den einzelnen Systemen	113
Abbildung 7.2: Emissionsverlauf der unterschiedlichen Nachbehandlungskonzepte	114
Abbildung 7.3: Gesamtergebnis der einzelnen Systeme im FTP Zyklus.....	115
Abbildung 7.4: Verlauf der Emissionen und Temperaturen im US06 Zyklus	116
Abbildung 7.5: Gesamtergebnis der einzelnen Systeme im US06 Testlauf	117
Abbildung 0.1: verschiedene Abgastestzyklen für PKW [5]	126
Abbildung 0.2: Verteilung der Temperaturmessstellen in den Abgasnachbehandlungskomponenten	127
Abbildung 0.3: Emissionsverläufe der Basiskalibrierung.....	129
Abbildung 0.4: Emissionsverläufe im Zeitbereich 0-300 Sekunden.....	129
Abbildung 0.5: Spiralförmige Eindosierung Abbildung 0.6: Flügelmischer	131
Abbildung 0.7: Lochblech mit Blende Abbildung 0.8: Flügelmischer / Lochblende	131
Abbildung 0.9: Messring zur Bestimmung der NH ₃ Verteilung	132
Abbildung 0.10: Horizontale NH ₃ Verteilung bei den verschiedenen Eindüsungsvariationen	132
Abbildung 0.11: Vertikale NH ₃ Verteilung bei den verschiedenen Eindüsungsvariationen.	132
Abbildung 0.12: Regelparameter und Temperaturverlauf des Systems 2.....	133
Abbildung 0.13: Verlauf der Emissionen an den einzelnen Messpositionen im Zeitbereich 0- 200 Sekunden	133
Abbildung 0.14: Einfluss des E-Heaters auf die Temperaturen im Abgasstrang.....	134
Abbildung 0.15: Einfluss des E-Heater auf das Emissionsergebnis	134
Abbildung 0.16: Vergleich der Abgastemperaturen bei verschiedenen Fahrzeugen	135
Abbildung 0.17: Vergleich der Emissionen bei verschiedenen Fahrzeugen.....	135
Abbildung 0.18: Detailansicht der LNT Regeneration	137
Abbildung 0.19: Temperaturverläufe im FTP75 Zyklus.....	137
Abbildung 0.20: Emissionsverläufe an den verschiedenen Messpositionen in den ersten 100 Sekunden	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Geschwindigkeitskoeffizienten für die Zeldovich Reaktion [3] 19

Tabelle 2.2: PKW Abgasgrenzwerte in Europa. Euro2² gilt für direkteinspritzende Dieselmotoren. Euro 5a wird ohne Partikelanzahl PN, Euro 5b mit Partikelanzahl gemessen. [7]..... 23

Tabelle 2.3: Tier2 Abgasgrenzwerte für PKW in den USA..... 23

Tabelle 2.4: LEVIII Abgasgrenzwerte für PKW [7]..... 24

Tabelle 2.5: Sulev-Grenzwerte..... 26

Tabelle 2.6: Wechselwirkung der Schadstoffe auf die Abgasnachbehandlungskomponenten [5] 44

Tabelle 3.1: Technische Daten des Versuchsträgers 47

Tabelle 3.2: Molare Masse verschiedener Schadstoffe 51

Tabelle 3.3: Größen und Faktoren für die Berechnung des AdBlue-Verbrauchs 51

Tabelle 4.1: Betriebsstrategien der Testläufe 59

Tabelle 4.2: Änderungen an der Motorkalibrierung..... 66

Tabelle 7.1: Maßnahmen zur Temperatursteigerung im Warmlauf 112

Tabelle 0.1: Verwendete Dieseloxidationskatalysatoren im System 1 128

Tabelle 0.2: Im System 1 eingesetzte Partikelfilter..... 128

Tabelle 0.3: Im System 1 eingesetzte SCR-Katalysatoren..... 128

Tabelle 0.4: Im System 2 verwendeter Dieseloxidationskatalysator 130

Tabelle 0.5: Im System 2 verwendeter Partikelfilter..... 130

Tabelle 0.6: Im Tier2Bin2 System 2 eingesetzter SCR Katalysator 130

Tabelle 0.7: Auflistung der verwendeten NOx Speicherkatalysatoren 136

Tabelle 0.8: Eigenschaften des eingesetzten Dieselpartikelfilters 136

Tabelle 0.9:Eigenschaften des im SULEV System eingesetzten SCR Katalysators..... 136

Quellen

- [1] A. Wimmer, Thermodynamik des Verbrennungsmotors, Graz: IVT TU Graz, 2012.
- [2] H. Eichlseder, Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung, IVT TU Graz, 2012.
- [3] M. P. Günther und C. Schwarz, Grundlagen Verbrennungsmotoren, Vieweg + Teubner, 2009.
- [4] T. Sams, Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz, IVT TU Graz, 2010.
- [5] K. Mollenhauer und H. Tschöke, Handbuch Dieselmotoren, Springer Verlag, 2007.
- [6] K. Reif, Dieselmotor Management, Springer Verlag, 2012.
- [7] Dieselnet, „<http://www.dieselnet.com/standards/>“, [Online]. [Zugriff am 11 November 2013].
- [8] L. Krämer, G. Buschmann, L. Stiegler und F. Bunar, „Mit der Diesel-Abgasnachbehandlung auf dem Weg zum „Super-Ultra-Niedrig-Emissionsfahrzeug (SULEV)“,“ Wiener Motorensymposium, Wiener Motorensymposium, 2013.
- [9] R. M. Heck, R. J. Farrauto und S. T. Gulati, Catalytic air pollution control Commercial Technology, Bd. 3. Auflage, John Wiley & Sons Verlag New York City, 2009.
- [10] C. Hagelüken, Autoabgaskatalysatoren Grundlagen - Herstellung - Entwicklung - Recycling - Ökologie, expert Verlag, 2005.
- [11] Hamburger Verkehrsverbund, „<http://www.hvv-mobility.com/>“, [Online]. Available: http://www.hvv-mobility.com/upload/redaktion/03_G_betriebsTemp.jpg. [Zugriff am 14 November 2013].
- [12] R. Basshuysen und F. Schäfer, Lexikon Motorenteknik: Der Verbrennungsmotor von A-Z, Bd. 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006.
- [13] P. C. Spurk, S. Frantz, F. W. Schütze, H. D. Noack und W. Müller, Die NO₂-Bildung am DOC/DPF-System - Eine Systemanalyse, Forum Abgas und Partikelemissionen: Umicore AG & Co KG, 2010.
- [14] Delphi, „www.delphi.com“, [Online]. Available: www.delphi.com. [Zugriff am 14 Januar 2014].
- [15] D. Chan, „Wechselwirkung zwischen Sauerstoff- und NO_x-Speicherung in Diesellabgaskatalysatoren“, Universität Karlsruhe - Institut für technische Chemie und Polymerchemie, Universität Karlsruhe, 2009.
- [16] J. Koop, Detaillierte Modellierung der Pt-katalysierten Schadstoffminderung in Abgasen moderner Verbrennungsmotoren, Universität Karlsruhe, 2008.
- [17] L. Olsson, R. J. Blint und E. Fridell, „Global Kinetic Model for Lean NO_x Traps“, Chalmers University of Technology - Competence Centre for Catalysis, Chalmers University of Technology - Competence Centre for Catalysis, 2005.
- [18] C. R. Wanek, A. Beichtbuchner und T. Überriegler, „DES/DEO Training - NSC NO_x Storage Catalyst“, AVL List GmbH, Graz, 2012.
- [19] AVL List GmbH, SESAM FTIR's User Guide, AVL List GmbH, 11.2007.
- [20] Carinf, „<http://www.carinf.com/>“, [Online]. Available: <http://www.carinf.com/>. [Zugriff am 29 Jänner 2014].
- [21] Süddeutsche Zeitung, „http://www.sueddeutsche.de“, [Online]. Available: http://www.sueddeutsche.de. [Zugriff am 29 Jänner 2014].
- [22] La revue automobile, „<http://www.larevueautomobile.com/>“, [Online]. Available: <http://www.larevueautomobile.com/>. [Zugriff am 21 Jänner 2014].

- [23] Better Parts LTD, „<http://srv2.betterparts.org/>,“ [Online]. Available: <http://srv2.betterparts.org/>. [Zugriff am 21 Jänner 2014].
- [24] A. Beichtbuchner, L. Bürgler, H. Wancura und M. Weißbäck, „HSDI Diesel on the Way to SULEV - Concept Evaluation,“ 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2012.
- [25] M. Brandecker, Experimentelle Untersuchungen an NO_x-Speicherkatalysatoren bei einem PKW Motor, Technische Universität Graz: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik TU Graz, 2013.
- [26] A. Beichtbuchner, H. Wancura, M. Weissbäck und K. Hadl, „Konzepte zur Diesel-Abgasnachbehandlung für die Richtlinie LEV 3,“ *Motortechnische Zeitschrift*, 2013.

Anhang

A. Testzyklen

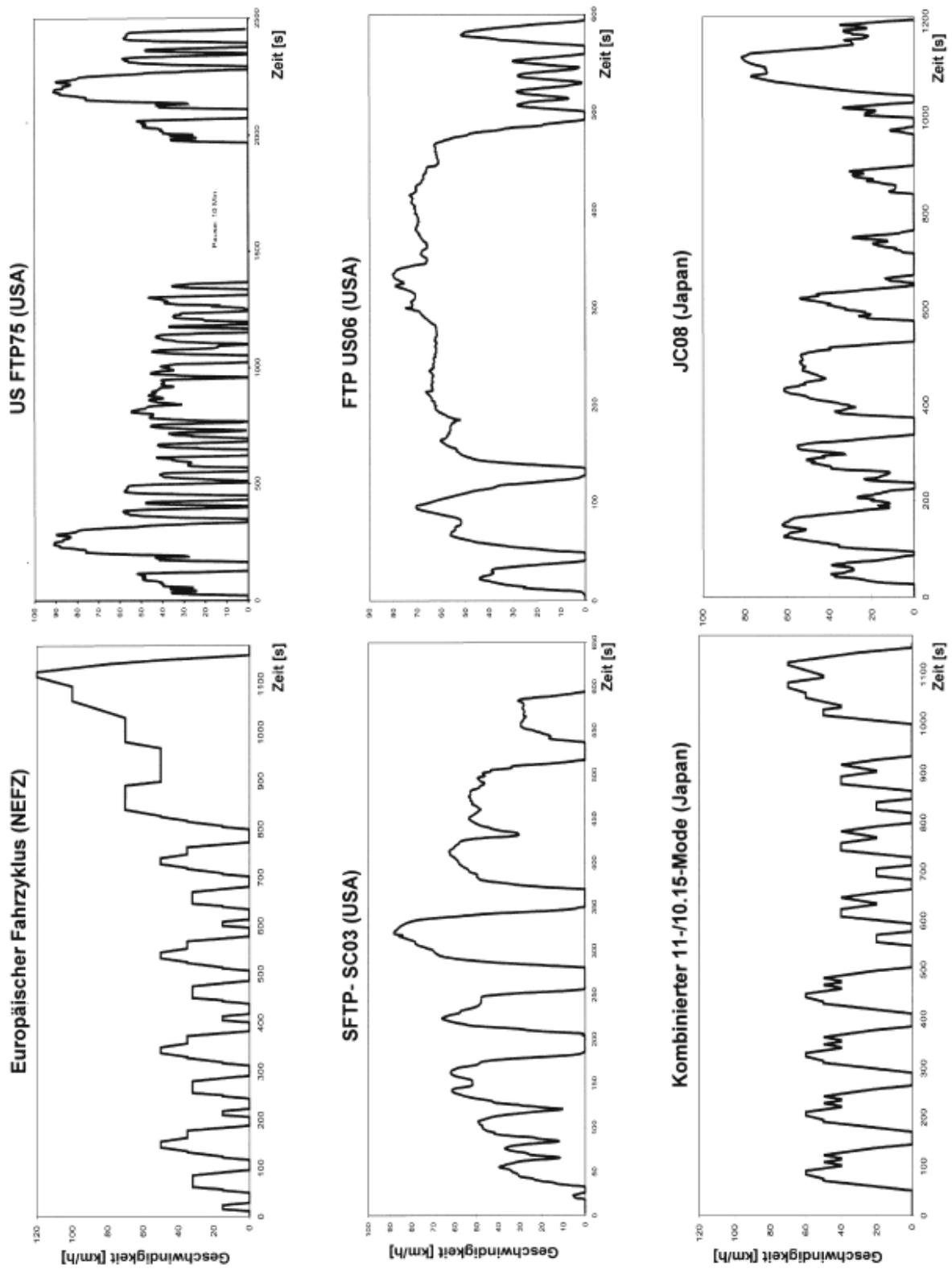


Abbildung 0.1: verschiedene Abgastestzyklen für PKW [5]

B. Temperaturmessstellen

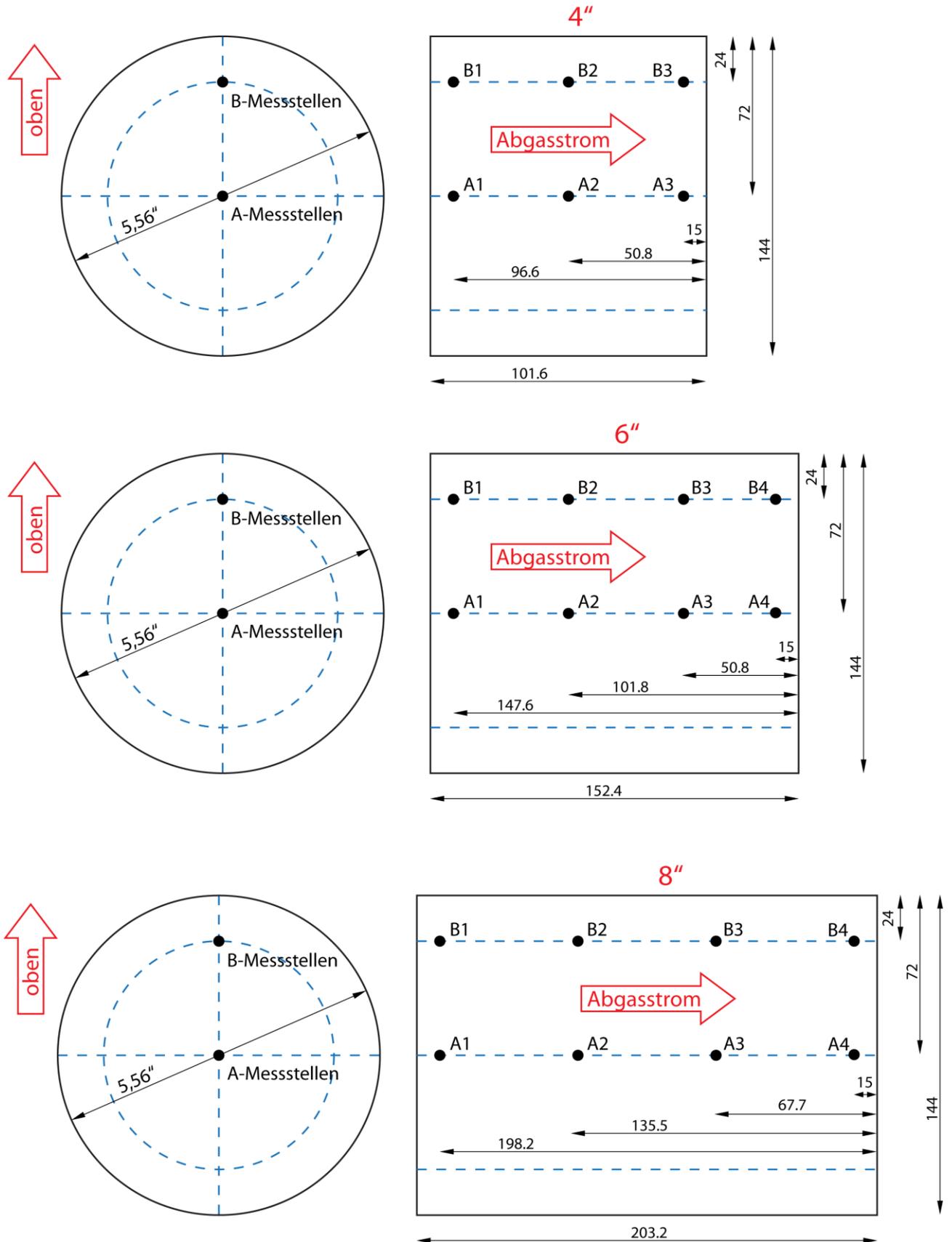


Abbildung 0.2: Verteilung der Temperaturmessstellen in den Abgasnachbehandlungskomponenten

C. Auflistung der in System 1 eingesetzte Nachbehandlungskomponenten

Tabelle 0.1: Verwendete Dieseloxidationskatalysatoren im System 1

Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
	[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DEA 690	4	117	5,66	Pt/Pd Verhältnis 2/1, 400cpsi, 4,3mil Wandstärke
DEA 750	4	117	5,66	Pt/Pd Verhältnis 3/2, 400cpsi, 4,3mil Wandstärke

Tabelle 0.2: Im System 1 eingesetzte Partikelfilter

Katalysator/ Filter	Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
		[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DPF	DEA 734	8	221	5,66	Pt/Pd, 300cpsi, 12mil Wandstärke

Tabelle 0.3: Im System 1 eingesetzte SCR-Katalysatoren

Katalysator/ Filter	Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
		[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
SCR	DEA 722	8	221	5,66	Cu-Zeolith, 300cpsi, 12 mil Wandstärke
SCR	DEA 736 / DEA 740	4 / 6	107 / 157	5,66	Cu-Zeolith, 400cpsi, 4.3 mil Wandstärke

D. System 1

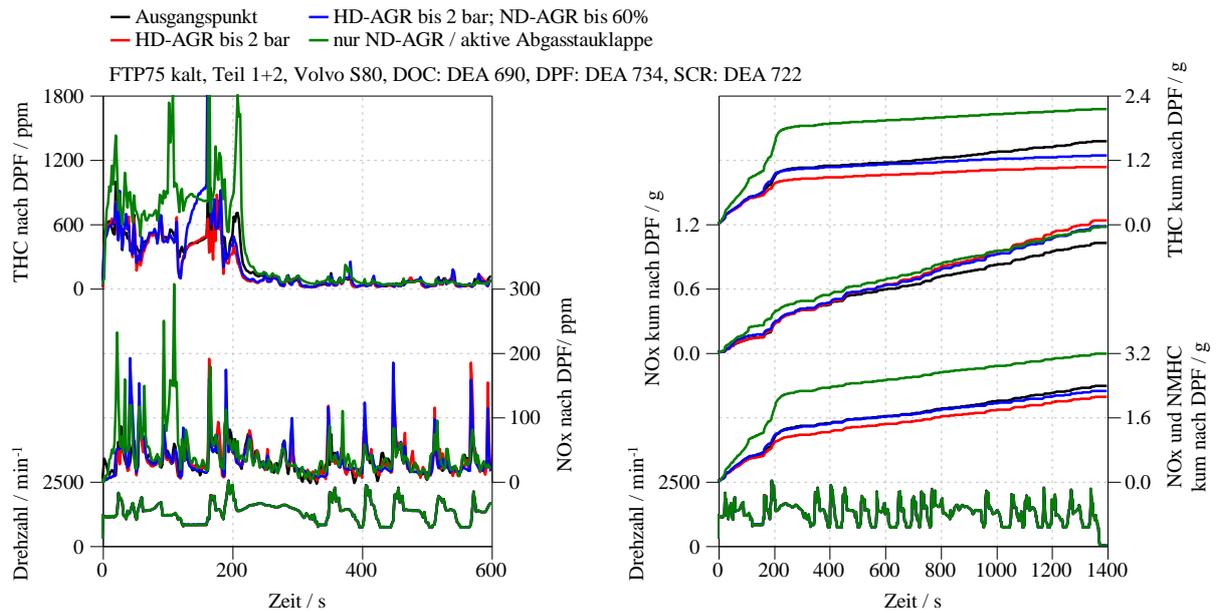


Abbildung 0.3: Emissionsverläufe der Basiskalibrierung

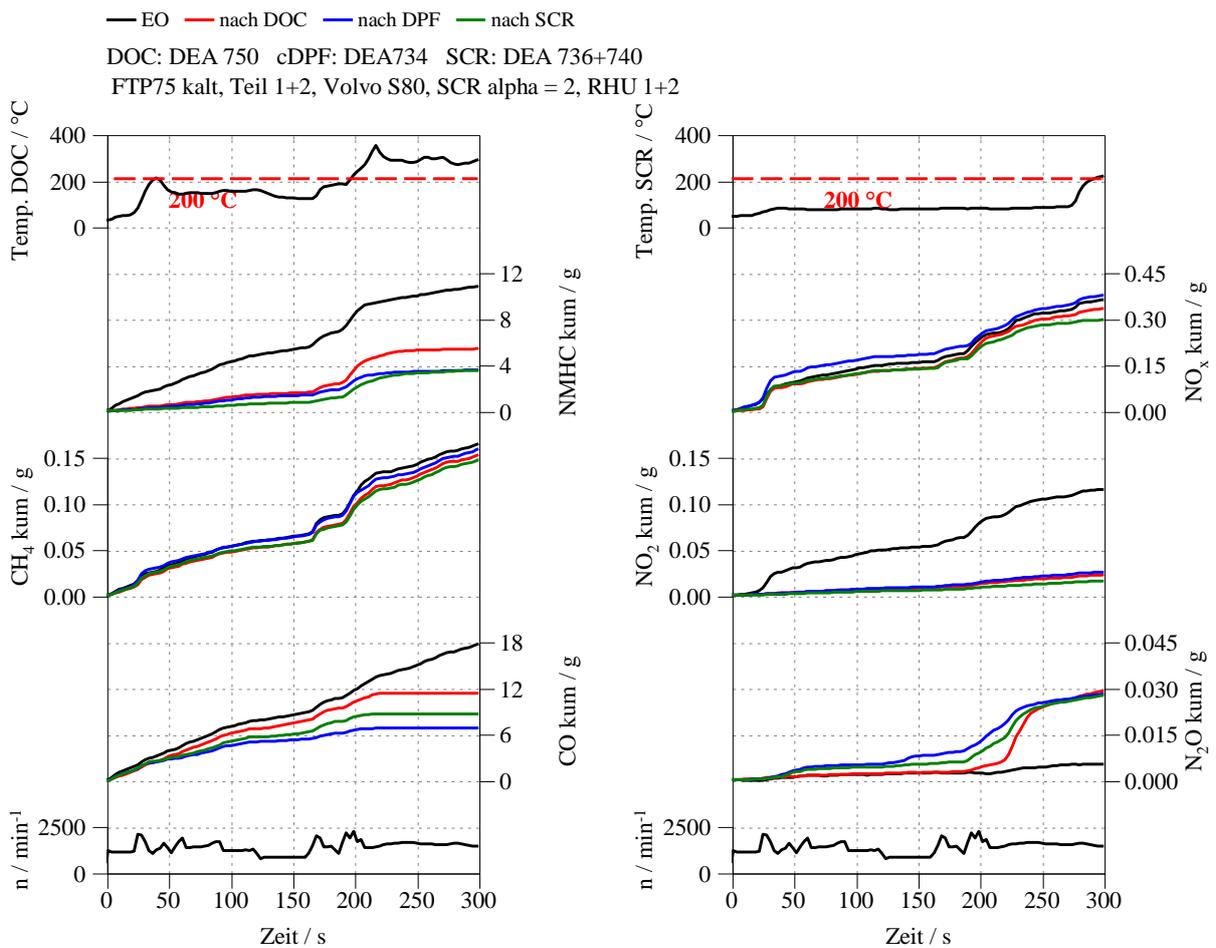


Abbildung 0.4: Emissionsverläufe im Zeitbereich 0-300 Sekunden

E. Auflistung der im System 2 eingesetzten Nachbehandlungskomponenten

Tabelle 0.4: Im System 2 verwendeter Dieseloxydationskatalysator

Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
	[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DEA 750	4	117	5,66	Pt/Pd Verhältnis 3/2, 400cpsi, 4,3mil Wandstärke

Tabelle 0.5: Im System 2 verwendeter Partikelfilter

Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
	[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DEA 723	8	221	5,66	Cu-Zeolith, 300cpsi, 12 mil Wandstärke

Tabelle 0.6: Im Tier2Bin2 System 2 eingesetzter SCR Katalysator

Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
	[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DEA 736	4	107	5,66	Cu-Zeolith, 400cpsi, 4.3 mil Wandstärke

F. NH₃ Mischer



Abbildung 0.5: Spiralförmige Eindosierung



Abbildung 0.6: Flügelmischer



Abbildung 0.7: Lochblech mit Blende



Abbildung 0.8: Flügelmischer / Lochblende

G. Versuchsaufbau und Ergebnisse der NH₃ Gleichverteilungsmessungen

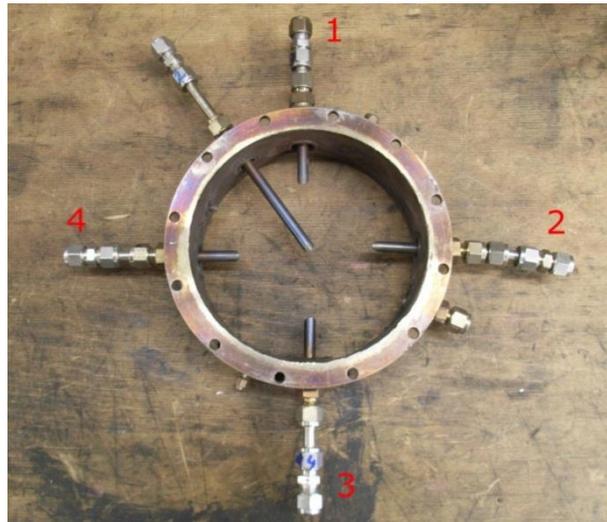


Abbildung 0.9: Messring zur Bestimmung der NH₃ Verteilung

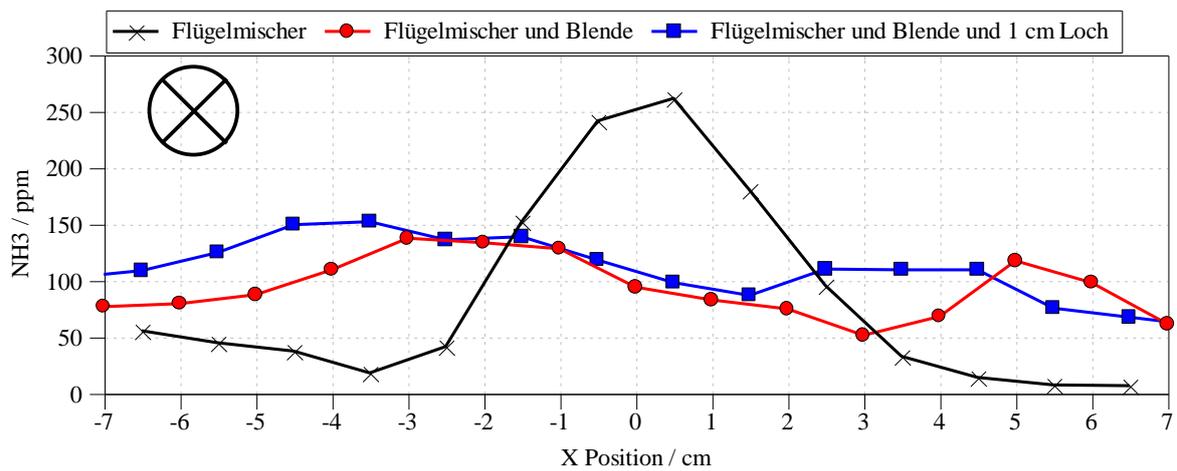


Abbildung 0.10: Horizontale NH₃ Verteilung bei den verschiedenen Eindüsungsvariationen

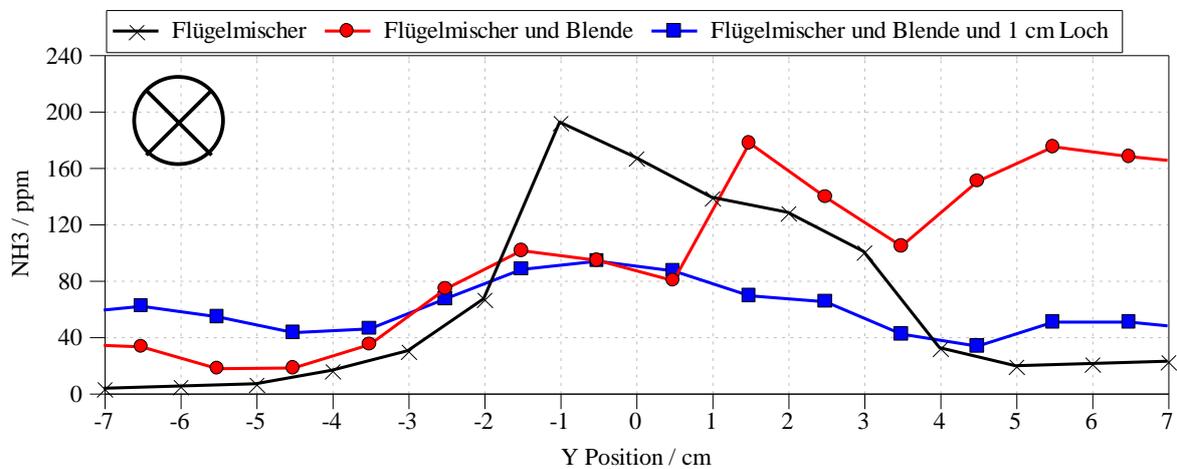


Abbildung 0.11: Vertikale NH₃ Verteilung bei den verschiedenen Eindüsungsvariationen

H. System 2

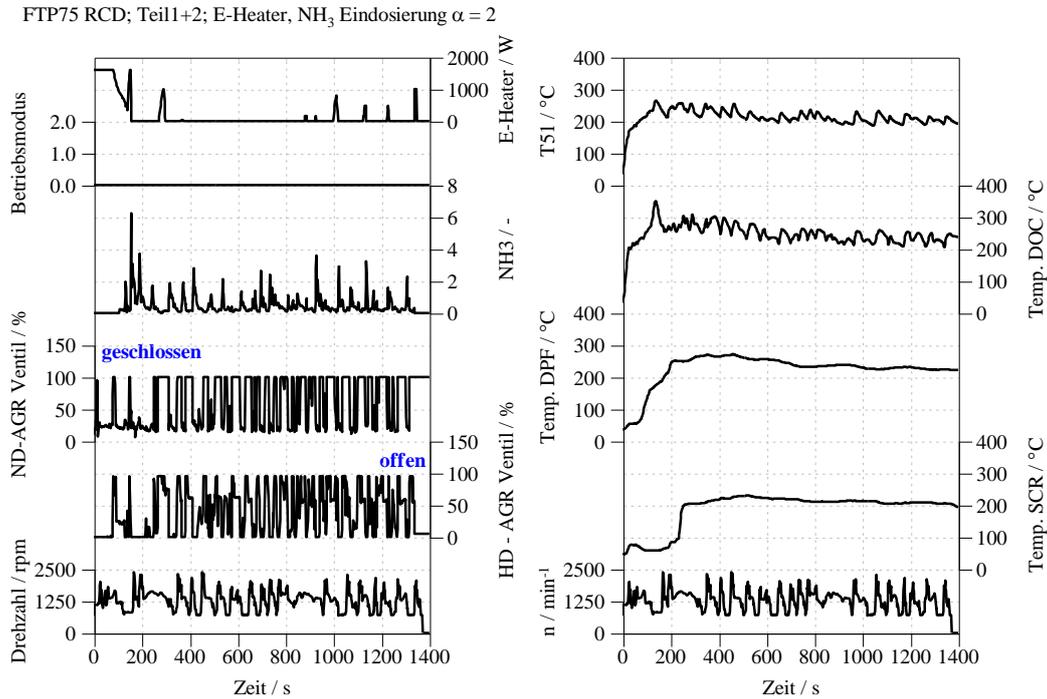


Abbildung 0.12: Regelparameter und Temperaturverlauf des Systems 2

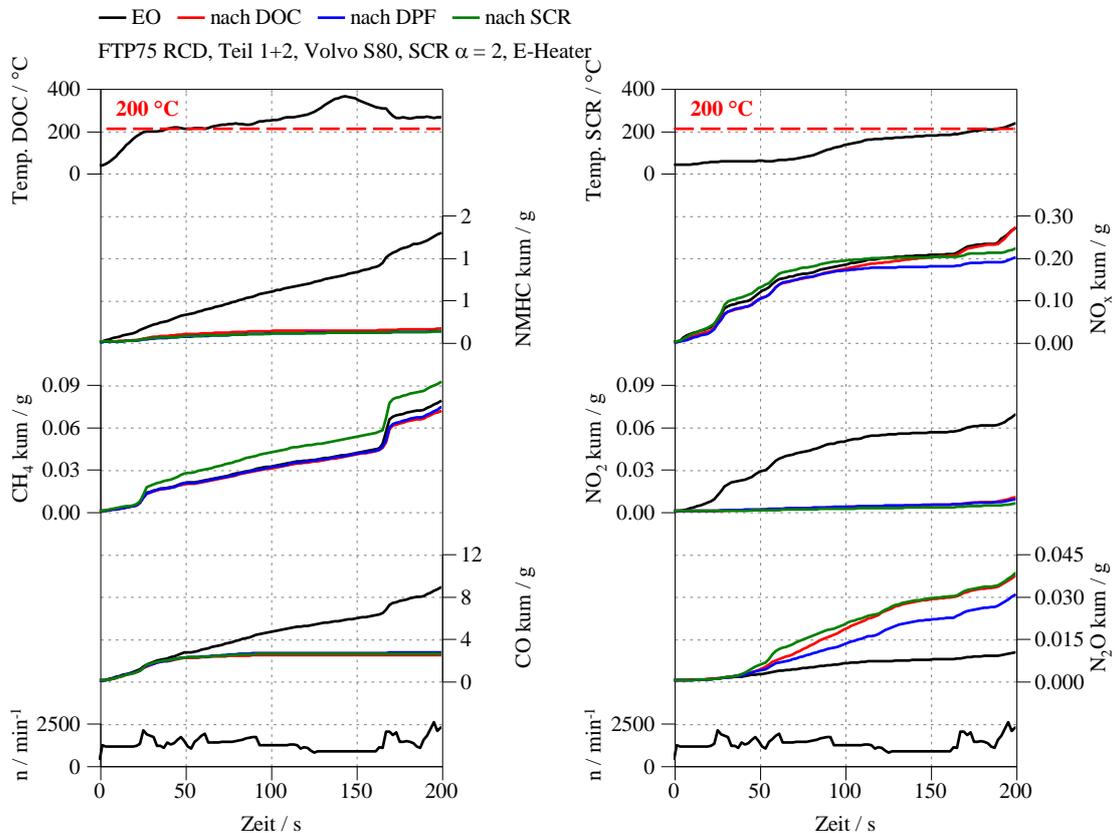


Abbildung 0.13: Verlauf der Emissionen an den einzelnen Messpositionen im Zeitbereich 0-200 Sekunden

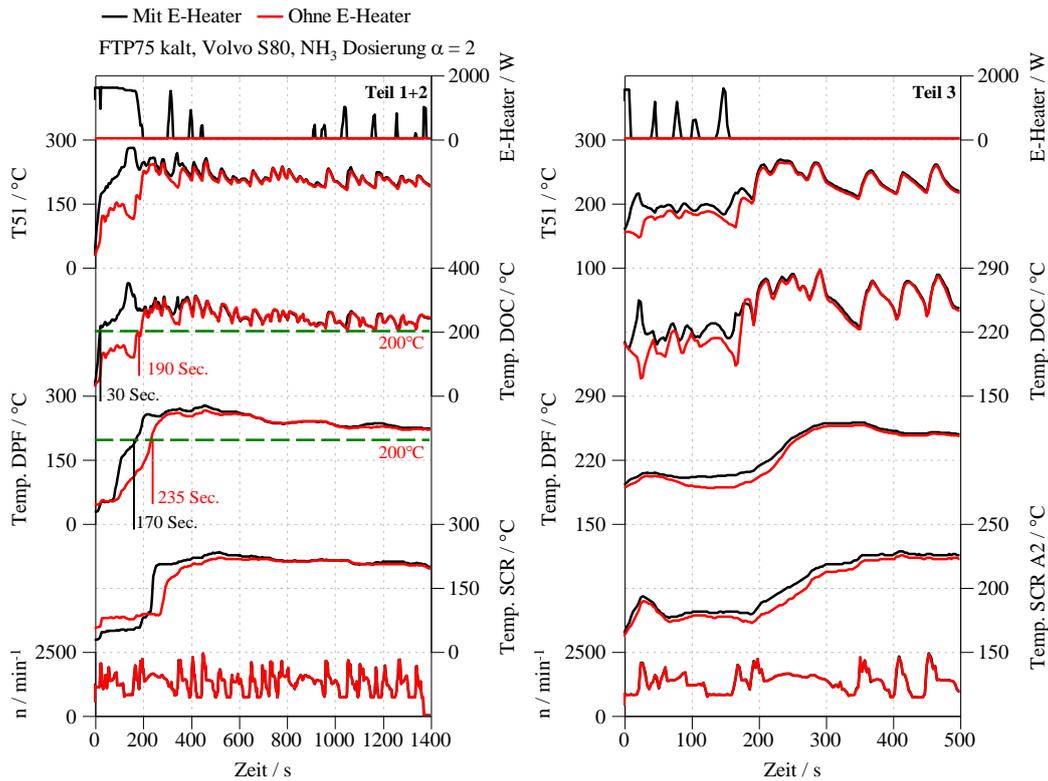


Abbildung 0.14: Einfluss des E-Heaters auf die Temperaturen im Abgasstrang

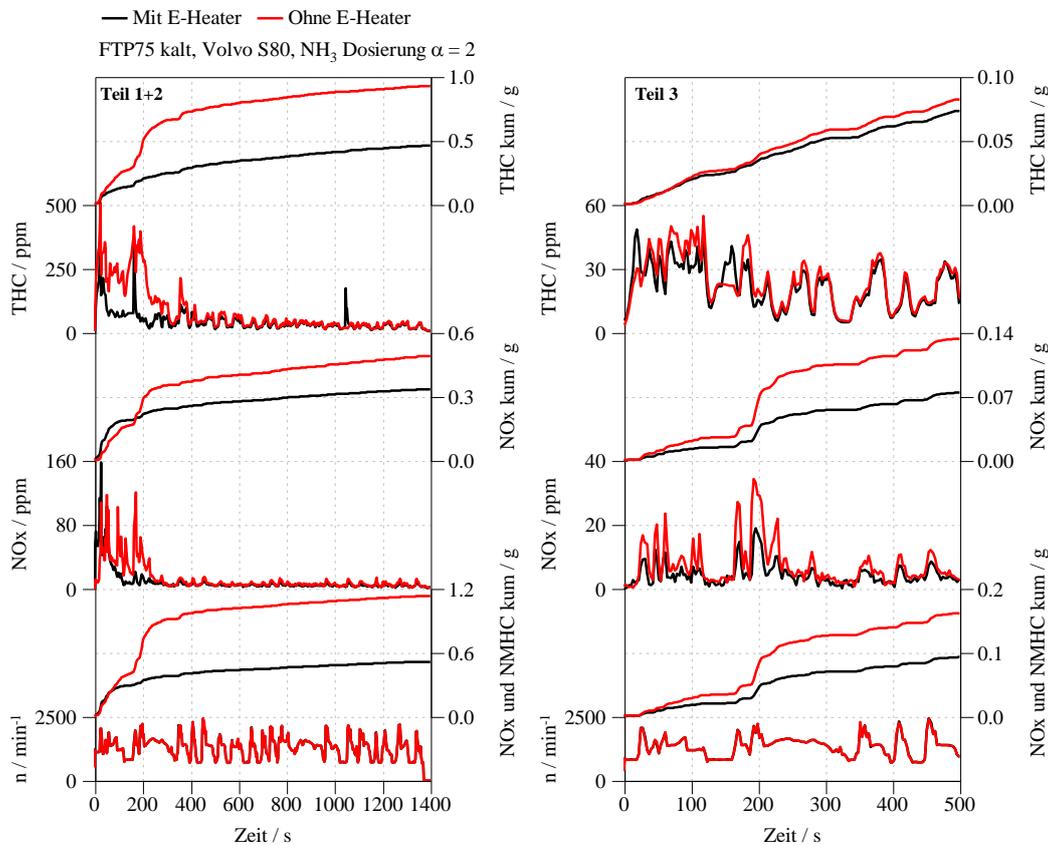


Abbildung 0.15: Einfluss des E-Heaters auf das Emissionsergebnis

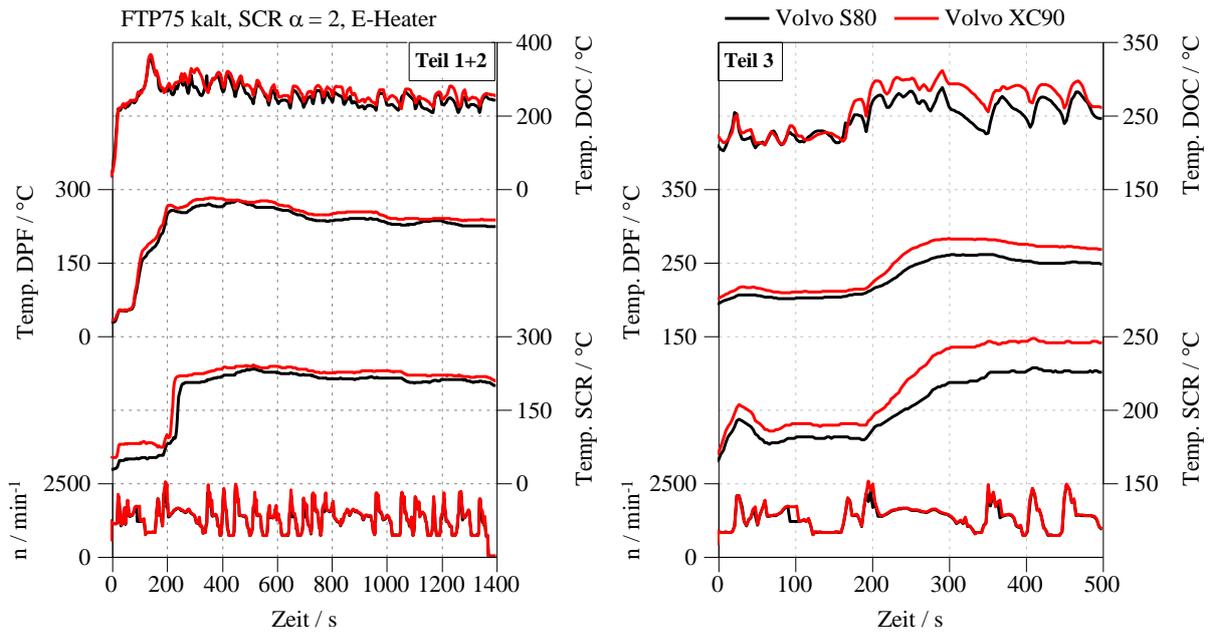


Abbildung 0.16: Vergleich der Abgastemperaturen bei verschiedenen Fahrzeugen

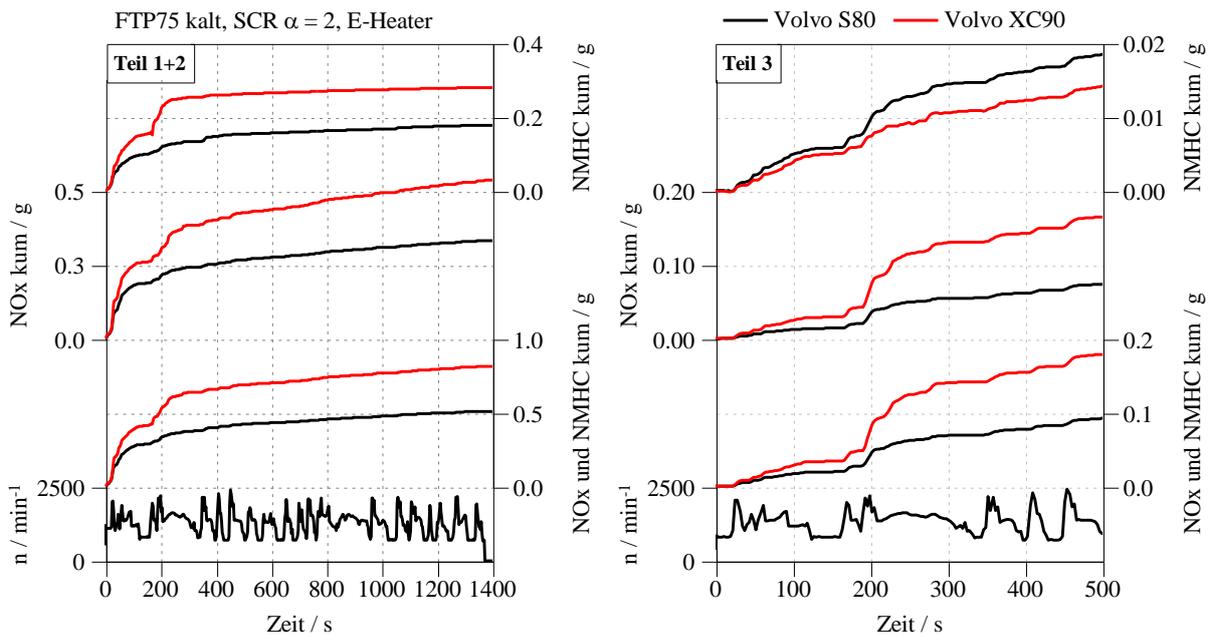


Abbildung 0.17: Vergleich der Emissionen bei verschiedenen Fahrzeugen

I. Auflistung der im System 3 eingesetzten Nachbehandlungskomponenten

Tabelle 0.7: Auflistung der verwendeten NOx Speicherkatalysatoren

Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
	[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DEA 752	4	117	5,66	MY11, Ba-based Pt/Pd/Rh, 20/5/1, 400cpsi, 4.3 mil Wandstärke
DEA 733	6	157	5,66	MY11, Ba-based Pt/Pd/Rh, 20/5/1, 400cpsi, 4.3 mil Wandstärke
DEA 753	4	117	5,66	MY12, Ba-based Pt/Pd/Rh, 25/8/1, 400cpsi, 4.3 mil Wandstärke

Tabelle 0.8: Eigenschaften des eingesetzten Dieselpartikelfilters

Katalysator/ Filter	Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
		[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
DPF	DEA 734	8	221	5,66	Pt/Pd, 300cpsi, 12mil Wandstärke

Tabelle 0.9: Eigenschaften des im SULEV System eingesetzten SCR Katalysators

Katalysator/ Filter	Typenbezeichnung	Länge nominell	Länge effektiv	Durchmesser	Beschichtung
		[Zoll]	[mm]	[Zoll]	[-]
SCR	DEA 736 / DEA 740	4 / 6	107 / 157	5,66	Cu-Zeolith, 400cpsi, 4.3 mil Wandstärke

J. System 3

FTP75 kalt, Volvo S80, SCR $\alpha = 2$, LNT: DEA 752
 — LNT Regeneration nach 270s für 10s, $\lambda = 0.95$
 — LNT Regeneration nach 370s für 10s, $\lambda = 0.98$,
 Schwellenwert für ND-AGR über 30 Zyklen, Begrenzung der maximalen Nacheinspritzmenge

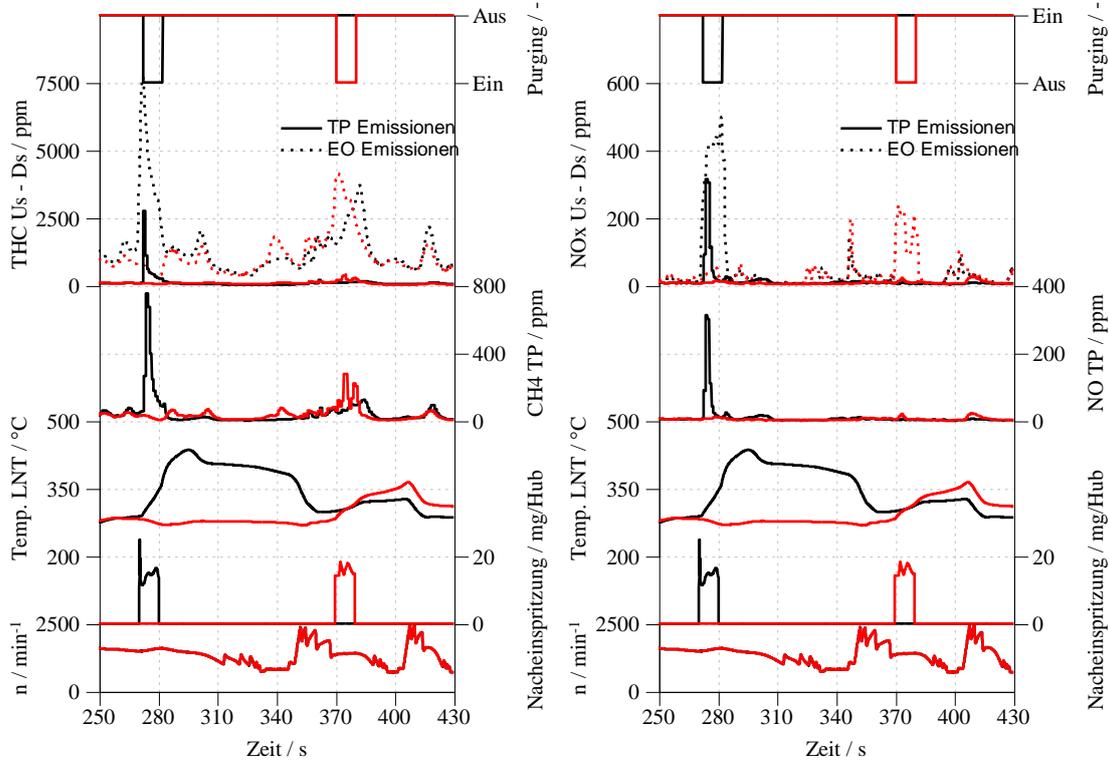


Abbildung 0.18: Detailansicht der LNT Regeneration

— EO, — nach LNT, — nach cDPF, — nach SCR
 FTP75 kalt, Volvo S80, LNT: DEA 753, E-Heater, HD-AGR im Warmlauf, SCR $\alpha = 2$

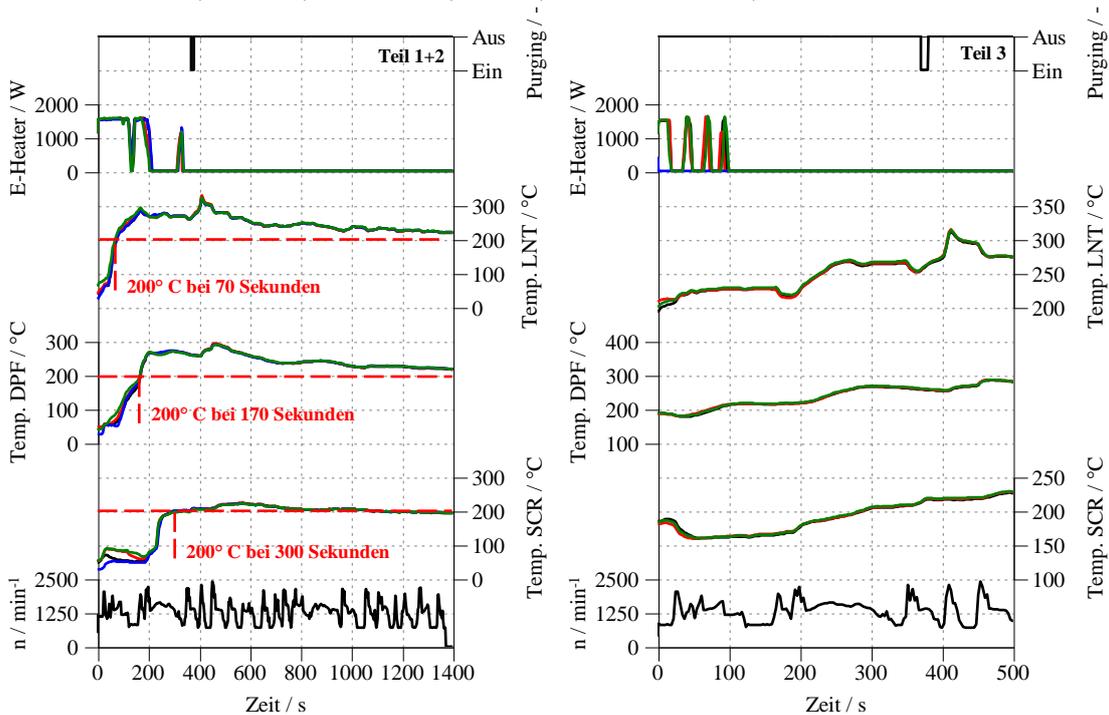


Abbildung 0.19: Temperaturverläufe im FTP75 Zyklus

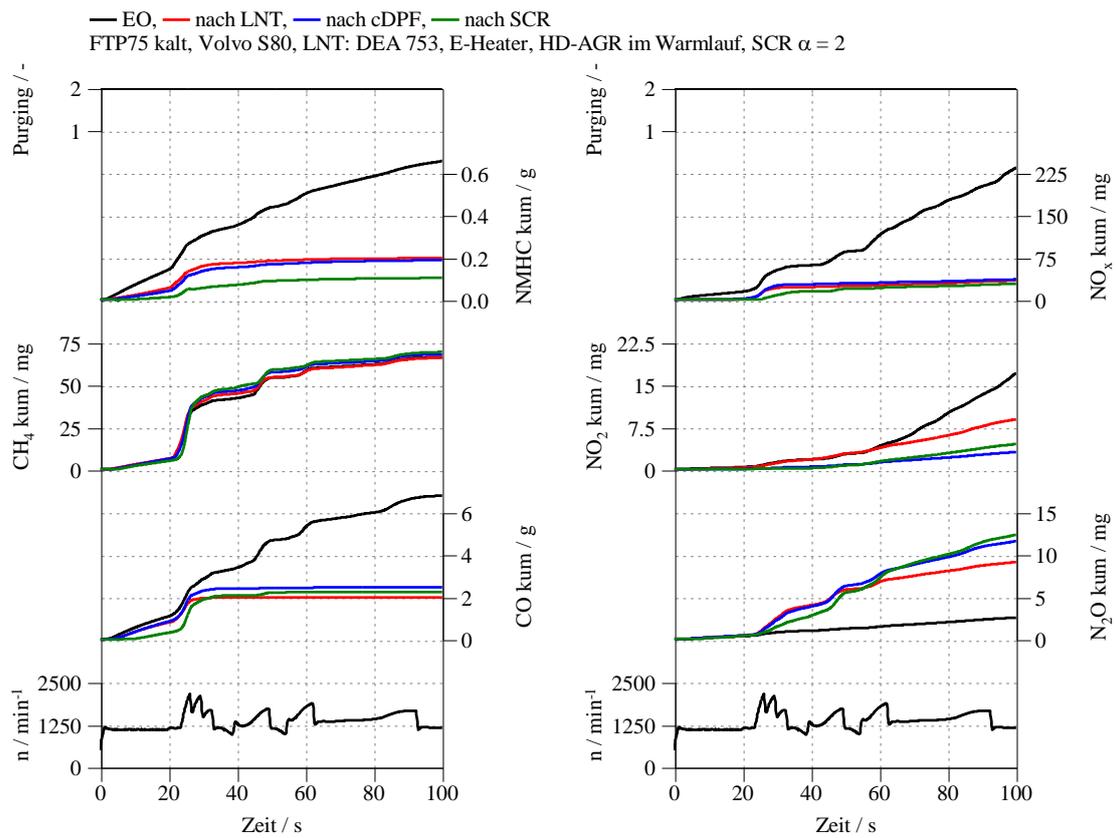


Abbildung 0.20: Emissionsverläufe an den verschiedenen Messpositionen in den ersten 100 Sekunden