

Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung moderner SCR-Systeme

**Masterarbeit
von
Jakob Kobald**

Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

Graz, im September 2014



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik



Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichseder

Dipl.-Ing. Klaus Hadl

.....

Externer Betreuer:

Dipl.-Ing. Bernhard Schausberger, BMW Motoren GmbH, Steyr

.....

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.

Graz, am

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei der „ANB-Runde“ der Abteilung ZM-E-10 der BMW Motoren GmbH in Steyr für die tolle Unterstützung während der Durchführung dieser Arbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Schausberger, sowie dem Leiter der Abteilung Emissionskonzepte, Herrn Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Brüne, die immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten und mir mit kompetentem Rat zur Seite standen. Ein großes Dankeschön gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Michael Fuchs, der mich in elektronischen Belangen unterstützt hat.

Auf universitärer Seite möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Klaus Hadl und Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Eichseder für die Betreuung dieser Arbeit danken.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern. Sie waren es, die mir dieses Studium ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich immer zählen konnte.

Sperrvermerk

Der Inhalt dieser Arbeit darf Dritten ohne Genehmigung der BMW Motoren GmbH nicht zugänglich gemacht werden.

Dieser Sperrvermerk gilt bis zum
xx.xx.20xx

Graz, am

.....

Kurzfassung

Die Einführung der RDE-Emissionsgesetzgebung (Real Driving Emissions) 2017 hat zur Folge, dass Emissionsgrenzwerte, deren Einhaltung bisher nur in gesetzlich vorgeschriebenen Testzyklen überprüft wurde, auch unter realen Fahrbedingungen eingehalten werden müssen. Dieser Umstand stellt erhöhte Anforderungen an die zur Minderung der NO_x-Emissionen eingesetzten SCR-Systeme, da diese nun in einem sehr breiten Betriebsbereich mit optimalem Wirkungsgrad arbeiten müssen. Ziel dieser Diplomarbeit war es, ein in Serie befindliches SCR-System durch Hard- und Softwareänderungen speziell in einem Betriebsbereich bei Katalysatortemperaturen größer 350°C zu optimieren.

Im Zuge dieser Arbeit wurden daher zwei Konzepte zur Wirkungsgradsteigerung von SCR-Systemen, wie sie bei modernen Diesel-PKW zum Einsatz kommen, erarbeitet und bezüglich ihrer Machbarkeit und Wirksamkeit bewertet. Dazu wurde zu Beginn eine Versuchsabgasanlage bestehend aus einem Diesel-Oxidationskatalysator, einem Partikelfilter sowie zwei in Serie angeordneten SCR-Katalysatoren mit dazwischenliegendem NH₃-Sensor am Motorprüfstand aufgebaut. Die darauffolgenden Untersuchungen am Motorprüfstand hatten das Ziel, Kenntnisse über das eingesetzte SCR-System sowie des NH₃-Sensors hinsichtlich Regelbarkeit zu erlangen. Da eine Regelung im herkömmlichen Sinn aufgrund der Trägheit des Systems und der Eigenschaften des verwendeten NH₃-Sensors als nicht realisierbar erachtet wurde, lag der weitere Fokus der Arbeit auf einem Konzept zur Korrektur des bisher verwendeten Modells zur Steuerung des Katalysatorfüllstands.

Dieses zweite Konzept wurde in MATLAB-Simulink erarbeitet und anschließend am HIL-Simulator (Hardware in the Loop) getestet. Im Anschluss wurde die Versuchsabgasanlage in einem Versuchsfahrzeug verbaut und Versuche im realen Fahrbetrieb auf Straße sowie auf dem Rollenprüfstand durchgeführt. Hierbei konnten signifikante Verbesserungen durch die Anwendung dieses Konzepts erzielt werden und somit der Grundstein für weiterführende Untersuchungen gelegt werden.

Abstract

With the entry into force of the RDE-emissions legislation in 2017 vehicles will have to meet the emission limits not only in pre-defined test cycles on the chassis dynamometer but also under real driving conditions. These circumstances are putting increased demands on NO_x-reducing SCR-systems, since they will have to operate at their optimum efficiency over a wide operating range. The objective of this thesis was to optimize a SCR series system under operating conditions with catalyst temperatures exceeding 350°C by implementing soft- and hardware changes.

In the course of this work two concepts for the efficiency enhancement of SCR-systems used in modern diesel passenger cars were developed and were evaluated with regard to their technical feasibility and effectiveness. Therefore basic experiments were carried out on an engine test bed using an exhaust system consisting of a diesel oxidation catalyst, a particulate filter as well as two SCR-catalysts in series. The aim of the examinations carried out on the engine test bed was to acquire knowledge about the SCR-system and the ammonia sensor used in terms of controllability. Since a closed-loop control of the system was not deemed to be feasible due to its inertia, the focus of the further examinations was placed on a concept to correct the existing ammonia filling level model of the of the SCR-catalyst.

This second concept was developed using MATLAB-Simulink and was tested on the HIL test bench. Following this, the developed exhaust system was implemented in a test vehicle and tests under real driving conditions and tests on the chassis dynamometer were carried out. Due to the application of this concept significant improvements in terms of NO_x-emissions were achieved thus laying the foundation for further studies on this topic.

Abkürzungen und Formelzeichen

α , alpha	Dosiermengenverhältnis
α_{od}	Überdosierungsfaktor
λ	Luftverhältnis
ρ	Dichte
AGR	Abgasrückführung
AMA	Abgasmessanlage
ARTEMIS	Assesment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories
ASC	Amonia Slip Catalyst
AWD	All Wheel Drive, Allradantrieb
BMW F07	interne Bezeichnung BMW 5er GT
BMW F11	interne Bezeichnung BMW 5er Touring
BMW F25	interne Bezeichnung BMW X3
c_{NOx}	Stickoxid-Konzentration
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CAN	Controller Area Network
CARB	Californian Air Resources Board
CO	Kohlenmonoxid
cpsi	cells per square inch
CRT	Continuously Regenarting Trap
CSF	Catalysed Soot Filter
DCU	Dosing Control Unit, Dosiersteuergerät
DDE	Digitale Diesel-Elektronik, BMW Diesel-Motorsteuerung
dm, \dot{m}	Massenstrom
dm_{AG}	Abgasmassenstrom
$dm_{NH3_{conv}}$	umgesetzte NH3-Menge
$dm_{NH3_{oxi}}$	oxidierte NH3-Menge
$dm_{NH3_{slip}}$	NH3-Schlupf nach dem SCR-Katalysator
$dm_{NH3_{inj}}$	eingespritzte NH3-Menge
$dm_{NH3_{ow}}$	NH3-Überdosiermenge
DOC	Diesel-Oxidations-Katalysator
DPF	Diesel-Partikelfilter

EMF	Elektromotorische Kraft
eta_SCR	Katalysator-Wirkungsgrad
F_NH3	NH3-Konzentration mittels FTIR gemessen
f_st	stöchiometrischer Faktor
fac_adap	Adaptionsfaktor Dosiermenge
fac_NH3/FTIR	Verhältnis NH3-Konzentration Sensor zu FTIR
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
FTP	Federal Test Procedure
FUL	Full Usefull Life
g/cft	grams per cubic foot
HC	Kohlenwasserstoffe
HIL	Hardware In the Loop
HWL	Harnstoff-Wasserlösung
k _i	Geschwindigkeitskoeffizient
LEV	Low Emission Vehicle
M	molare Masse
m_NH3 _{ld}	NH3 Füllstand im Katalysator
mABx	MicroAutoBox
\dot{n}	Molenstrom
NEDC	New European Driving Cycle
NH3	Ammoniak
NH3_conc	NH3-Konzentration mittels NH3-Sensor gemessen
NOx	Stickoxide
NOx_nSCR	NOx-Konzentration nach dem SCR-Katalysator
Nox_nSCR_kum	kumulierte NOx-Konzentration nach dem SCR-Katalysator
NSC	NOx Storage Catalyst
PAH	Polyzyklische Aromaten
RCA	Random Cycle Aggressive, BMW-interner Fahrzyklus
RDE	Real Driving Emissions
SCR	Selektive Katalytische Reduktion
SCR1	SCR-Katalysator 1
SCR2	SCR-Katalysator 2
SCR _{Ldg} _mNH3 _{LdNom}	NH3-Soll-Füllstand

SCRMod_mEstNH3Ld	berechneter NH3-Füllstand
T_SCR, SCRT_tAavg, T_iSCR	mittlere Katalysatortemperatur
t _g	Ausgleichszeit
TP_NOx_comm	kumulierte NOx-Konzentration nach dem 2. SCR-Katalysator
t _u	Verzugszeit
VehV_v	Fahrzeuggeschwindigkeit
WLTC	World Harmonized Light Duty Test Cycle
Za	Zündverzugszeit
ZEV	Zero Emission Vehicle

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	iii
Danksagung.....	iv
Sperrvermerk	v
Kurzfassung	vi
Abstract.....	vii
Abkürzungen und Formelzeichen.....	viii
Inhaltsverzeichnis.....	xi
1. Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
2. Grundlagen Dieselmotor	3
2.1 Allgemeines zum Dieselmotor.....	3
2.2 Gemischbildung	3
2.3 Verbrennungsablauf.....	7
2.4 Abgasemissionen des Dieselmotors	8
2.4.1 Kohlenmonoxid - CO.....	10
2.4.2 Kohlenwasserstoffe - HC.....	10
2.4.3 Stickoxide - NOx	11
2.4.4 Partikel.....	16
2.5 Abgasgesetzgebung	18
2.5.1 Europa	19
2.5.2 USA	21
2.6 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsminderung.....	23
2.7 Abgasnachbehandlungssysteme	25
2.7.1 Dieseloxidationskatalysator (DOC).....	25
2.7.2 Dieselpartikelfilter (DPF)	26
2.7.3 NOx-Speicherkatalysator (NSC).....	29
2.7.4 Selektive katalytische Reduktion (SCR)	31

2.8	Abgasmesstechnik.....	39
2.8.1	NOx-Sensor	39
2.8.2	NH3-Sensor	40
3.	Erweiterte Aufgabenstellung	41
3.1	Systembeschreibung Füllstandsberechnung.....	41
3.2	Problemstellung	44
4.	Systemkonzept Füllstandsregelung	49
4.1	Konzeptbeschreibung	49
4.2	Hardware Abgasanlage	50
4.3	Sensorik.....	51
4.4	MicroAutoBox	52
4.5	Software – EHOOKS	53
4.6	Versuchsprogramm Motorprüfstand.....	54
4.6.1	Ermittlung des NH ₃ -Speichervermögens	54
4.6.2	Ermittlung des Übertragungsverhaltens	57
4.6.3	Alterung des SCR-Katalysators.....	60
4.7	Versuchsaufbau Motorprüfstand	60
4.7.1	Versuchsmotor	60
4.7.2	Versuchs-Abgasanlage	62
4.8	Ergebnisse Motorprüfstandsbetrieb	66
4.8.1	NH ₃ -Speichervermögen im Neuzustand	66
4.8.2	NH ₃ -Speichervermögen in gealtertem Zustand	70
4.8.3	Übertragungsverhalten im Neuzustand	71
4.8.4	Übertragungsverhalten in gealtertem Zustand.....	76
4.8.5	Korrelation NH ₃ -Sensor – FTIR	76
4.9	Fazit Motorprüfstandsbetrieb	79
5.	Systemkonzept Schlupferkennung.....	80
5.1	Konzeptbeschreibung	80
5.2	MATLAB Simulink-Modell	84
5.2.1	Funktionsbeschreibung Modell.....	85
5.3	Funktionstest HIL-Prüfstand.....	87
5.3.1	Grundlagen HIL.....	87
5.3.2	Ergebnisse HIL-Simulation	88
5.4	Versuchsaufbau Fahrzeug	89

5.5	Versuchsprogramm Fahrzeug.....	91
5.5.1	Straßenversuche.....	91
5.5.2	Untersuchungen am Rollenprüfstand	92
5.6	Ergebnisse Fahrzeugtests	94
5.6.1	Ergebnisse Straßenversuche	94
5.6.2	Ergebnisse Rollenprüfstand	99
5.7	Fazit Fahrzeugbetrieb	102
6.	Zusammenfassung und Ausblick	104
7.	Literaturverzeichnis.....	106
8.	Anhang	109
8.1	MATLAB-Modell.....	109

1. Einleitung

Die immer stärkere Limitierung der Schadstoffkomponenten im Abgas moderner Diesel-PKW stellt für die Ingenieure in der Automobilentwicklung eine größer werdende Herausforderung dar. Neben der innermotorischen Emissionsminderung ist auch die Abgasnachbehandlung von zunehmender Bedeutung. War es bis heute ausreichend, die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte in definierten Prüfzyklen einzuhalten, wird mit Einführung der RDE-Gesetzgebung (Real Driving Emissions) ab September 2017 auch das Emissionsverhalten im realen Fahrbetrieb bewertet werden. Während im vorgeschriebenen Testzyklus (New European Driving Cycle – NEDC) sehr gute Ergebnisse bezüglich der Umsetzungsraten der Abgasnachbehandlungssysteme erzielt werden können, besteht für das Verhalten im realen Fahrbetrieb noch Optimierungsbedarf.

1.1 Motivation

Die beim Dieselmotor als kritisch anzusehenden Abgaskomponenten sind vor allem Partikel- und Stickoxidemissionen. Mit der Einführung des Partikelfilters konnte die Partikelemission von Diesel-PKW drastisch reduziert werden. Mit Inkrafttreten der EURO-6 Emissionsgrenzwerte für NO und NO₂ ist es vor allem bei schweren Fahrzeugen nicht mehr ohne weiteres möglich, eine ausreichende Emissionsminderung nur durch innermotorische Maßnahmen bei gleichbleibendem Kraftstoffverbrauch zu realisieren. Daher kommen zur Reduzierung der Stickoxidkomponenten im Abgas unter anderem SCR-Systeme (Selective Catalytic Reduction) in einer Vielzahl von unterschiedlichen Ausführungen zum Einsatz. Diese Systeme arbeiten nur unter bestimmten Bedingungen (Temperatur, optimale Dosiermenge des eingespritzten Reduktionsmittels, ...) in einem wirkungsgradgünstigen Bereich, was eine ausreichend genau Steuerung bzw. Regelung der betreffenden Parameter voraussetzt. Die in der Motorsteuerungssoftware zur Steuerung des SCR-Systems verwendeten Modelle müssen auf worst-case Szenarien (z.B. Vollastbeschleunigungen nach längerer Konstantfahrt) sowie auf die Erfüllung der vorgeschriebenen Testzyklen ausgelegt sein.

Das führt zu einer konservativen Bedatung der Modelle und somit zu einem verminderten Umsatz in bestimmten Betriebspunkten, die im realen Fahrbetrieb auftreten können. Um auch hier jederzeit optimale Umsatzgrade zu erreichen, ist in diesem Betriebsbereich eine Regelung des SCR-Katalysators bzw. ein Abgleich des Modells mit der Realität anstatt einer rein auf Modellen basierenden Steuerung erstrebenswert.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit war die Wirkungsgradsteigerung eines modernen SCR-Systems im Temperaturbereich oberhalb von 350°C mittlerer Katalysatortemperatur. Dazu sollten Hardwareänderungen am bestehenden System durchgeführt sowie ein neues Softwarekonzept entwickelt werden. Die Softwareänderungen sollten in einem Modell mit dem Programm MATLAB umgesetzt und am HIL-Prüfstand (Hardware in the Loop) getestet werden. Parallel dazu sollten, nach Auswahl und Aufbau der Test-Hardware, durch stationäre sowie dynamische Tests am Motorprüfstand das Verhalten der Regelstrecke (in diesem Fall die Abgasanlage mit SCR-System) sowie der Einfluss der Störgrößen auf das System untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Prüfläufe sollten zur Parametrierung des verwendeten Modells sowie zur weiteren Optimierung verwendet werden.

Das aus den Ergebnissen der Untersuchungen am Motorprüfstand abgeleitete SCR-System sowie das entwickelte Softwarekonzept sollten anschließend für die Verwendung in einem Versuchsfahrzeug adaptiert werden. Nach dem Einbau der Zielvariante und Inbetriebnahme des Versuchsträgers sollte zur Bestätigung der Ergebnisse Straßenversuche sowie Versuche auf dem Rollenprüfstand durchgeführt werden.

2. Grundlagen Dieselmotor

2.1 Allgemeines zum Dieselmotor

Bei dem von Rudolf Diesel 1893 patentierten Arbeitsverfahren erfolgt die Einleitung der Verbrennung des Kraftstoffs durch Selbstzündung. Die zur Selbstzündung notwendige Gastemperatur im Brennraum wird durch ein ausreichend hohes Verdichtungsverhältnis sichergestellt. Die Einspritzung des flüssigen Kraftstoffs erfolgt direkt in das heiße verdichtete Gas im Brennraum, weshalb diese Art der Gemischbildung auch als innere Gemischbildung bezeichnet wird. Die Lastregelung erfolgt beim Dieselmotor über die Menge des pro Arbeitszyklus eingespritzten Kraftstoffs, der sogenannten Qualitätsregelung (im Gegensatz zur Quantitätsregelung mittels Drosselung beim Ottomotor). Im Unterschied zum konventionellen Ottomotor wird der Dieselmotor bei überstöchiometrischem Luftverhältnis λ betrieben. Dieses bewegt sich je nach Lastzustand in einem Bereich von ungefähr 1,3 bis 6, wobei es nach unten hin durch die Rußgrenze limitiert wird. Dieser überstöchiometrische Betrieb hat gravierende Auswirkungen auf die Schadstoffbildung und Abgasnachbehandlung. [1]

2.2 Gemischbildung

Die Einspritzung des flüssigen Kraftstoffs erfolgt am Ende der Kompression direkt in den Brennraum. Hinsichtlich Schadstoffbildung und Verbrauchsoptimum ist dabei ein Zerfall des Kraftstoffstrahles in möglichst kleine Tropfen anzustreben, wodurch eine gute örtliche Homogenisierung von Luft und Kraftstoff gewährleistet wird.

In Abbildung 2.1 ist der Einspritzvorgang und die Spraybildung schematisch dargestellt:

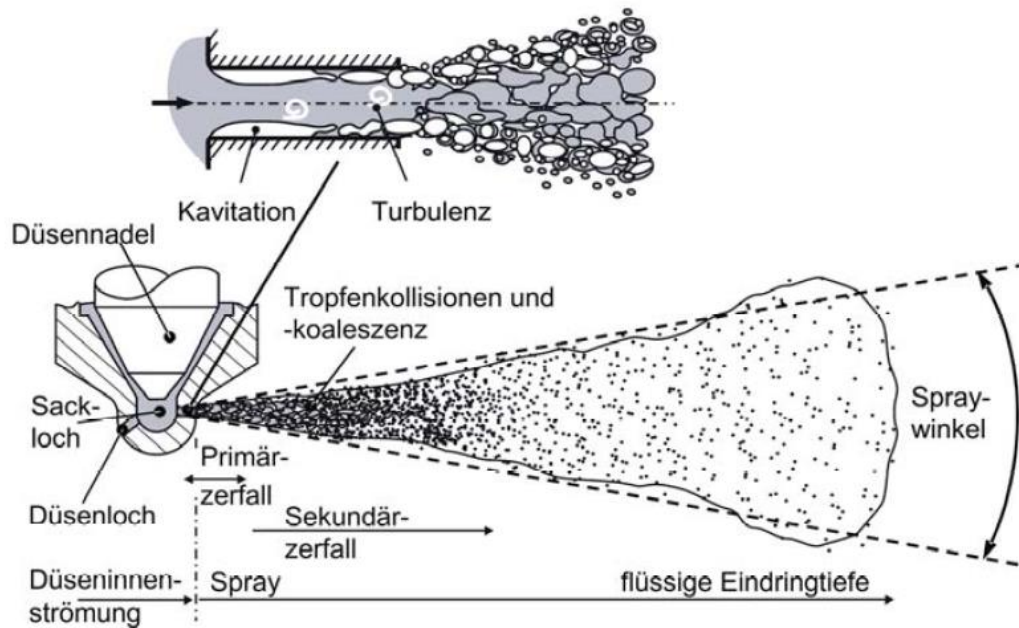


Abbildung 2.1: Spraybildung Einspritzstrahl [2]

Prinzipiell kann die Spraybildung in zwei Regionen unterteilt werden, nämlich den Primär- und den Sekundärzerfall. Ersterer entsteht nahe dem Düsenaustritt durch Kavitation und Turbulenz. Der Zerfall von größeren Tropfen in kleinere Tropfen weiter stromabwärts wird als Sekundärzerfall bezeichnet. Dieser tritt durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und dem umgebendem Gas sowie durch die Kollision mit anderen Tröpfchen auf. [2]

Um eine möglichst optimale örtliche Homogenisierung von Luft und Kraftstoff zu erreichen, die sogenannte Mikrogemischbildung, sollten die entstehenden Kraftstofftropfen eine möglichst geringe Größe aufweisen. Diese kann durch kleine Düsenlochdurchmesser und eine hohe Austrittsgeschwindigkeit aus der Einspritzdüse erreicht werden. Weiters sind auch eine möglichst große Luftdichte, eine hohe Kraftstoffviskosität sowie eine geringe Oberflächenspannung des Kraftstoffs förderlich für eine geringe Tropfengröße. [1]

Durch den Wärmeübergang zwischen dem komprimierten Gas und den Kraftstofftröpfchen kommt es zur Verdampfung des Kraftstoffs und somit örtlich zur Bildung eines zündfähigen Gemisches.

Die Entflammung durch Selbstzündung erfolgt dabei in kraftstoffreichen Gebieten, wobei das Luftverhältnis in der Zündzone im Bereich des stöchiometrischen Luftverhältnisses liegt (Abbildung 2.2). Bei dieser nicht-vorgemischten Verbrennung laufen die Mischungsvorgänge (molekulare und turbulente Diffusion) langsamer ab als die chemischen Reaktionen und sind somit für die dieselmotorische Verbrennung geschwindigkeitsbestimmend. [3]

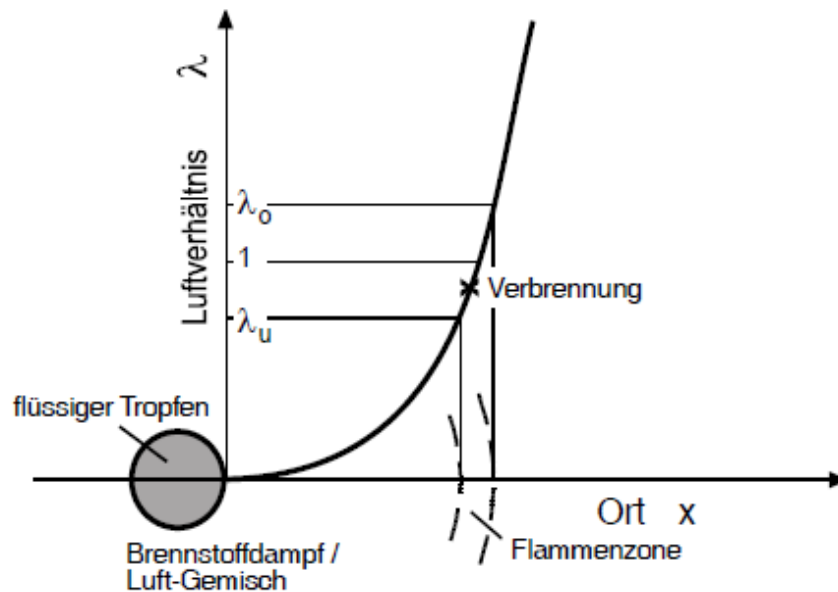


Abbildung 2.2: Kraftstofftropfen nicht-vorgemischte Verbrennung [3]

Obwohl global betrachtet ein überstöchiometrisches Luftverhältnis im Brennraum vorliegt, kommt es aufgrund der Zündung in den kraftstoffreichen Zonen zur Rußbildung bei Dieselmotoren. [3]

Bei direkter Einspritzung, wie sie bei modernen Dieselmotoren zum Einsatz kommt, ist neben der durch den Einspritzstrahl in den Brennraum eingebrachten Energie auch die Zylinderinnenströmung von großer Bedeutung für die Gemischbildung (Abbildung 2.3).

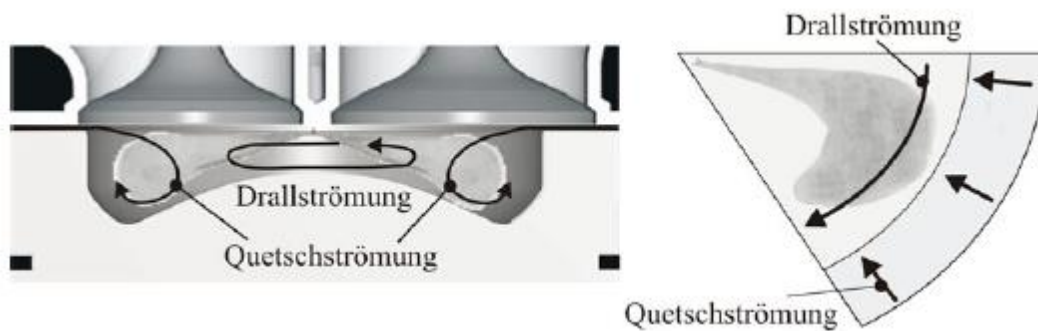


Abbildung 2.3: Strömungsverhältnisse im Brennraum [2]

Hierbei sind bei der Gemischbildung im Dieselmotor vor allem die Drall- und die Quetschströmung von Bedeutung. Die Tumbleströmung (die Strömung um die Achse normal zur Zylinderachse) zerfällt mit zunehmender Kompression und spielt nur eine untergeordnete Rolle. Während die Quetschströmung durch die Verdrängung der Luft aus der Quetschkante in der Kompressionsphase entsteht, wird die Drallströmung (um die Zylinderachse) durch die Form der Einlasskanäle bzw. der Ventilsitze beeinflusst. [2]

Zur individuellen Anpassung der Drallströmung an den jeweiligen Betriebspunkt kommen bei Vierventilmotoren Systeme mit Füllungskanal und Drallkanal zum Einsatz (Abbildung 2.4). Bei niedrigen Drehzahlen bleibt der Füllungskanal (5) durch die Drallklappe (6) verschlossen, so dass die Luft nur über den Drallkanal (2) angesaugt wird. Durch die spezielle Geometrie dieses Kanals entsteht eine starke Drallströmung im Zylinder. Mit steigender Last und Drehzahl wird der Füllungskanal geöffnet, um eine ausreichende Füllung zu gewährleisten. [4]

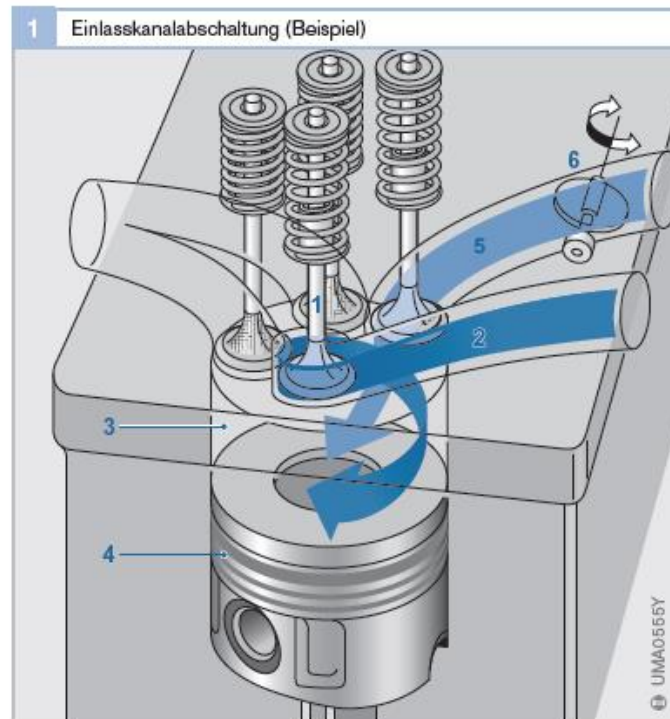


Abbildung 2.4: Drallsteuerung Dieselmotor [4]

2.3 Verbrennungsablauf

In Abbildung 2.5 ist der Einspritz- sowie der Verbrennungsvorgang schematisch dargestellt. Nach der Zündverzugszeit Z_{α} , während der es zur Bildung eines vorgemischten Anteils kommt, verbrennt dieser sehr rasch und mit steilem Druckanstieg, dem sogenannten Verbrennungsstoß. Der Zündverzug, welcher als Zeit zwischen dem Beginn der Einspritzung und der Zündung (dem ersten Druckanstieg durch die Verbrennung) definiert ist, sollte aus akustischen Gründen („Nageln“ von Dieselmotoren“ durch den großen Druckgradienten) möglichst kurz sein. Dadurch kann nur eine geringe Menge an Kraftstoff chemisch aufbereitet werden, welche im Verbrennungsstoß sehr schnell umgesetzt wird. Der Verbrennungsstoß kann durch eine Voreinspritzung gemindert werden. Dabei wird während des Zündverzugs nur eine kleine Menge Kraftstoff in den Brennraum eingespritzt, wodurch ein flacherer Druckanstieg und damit ein niedrigeres Geräuschniveau erreicht wird. Durch diese Maßnahme wird die Temperatur im Zylinder erhöht und so der Zündverzug der Haupteinspritzung minimiert.[5]

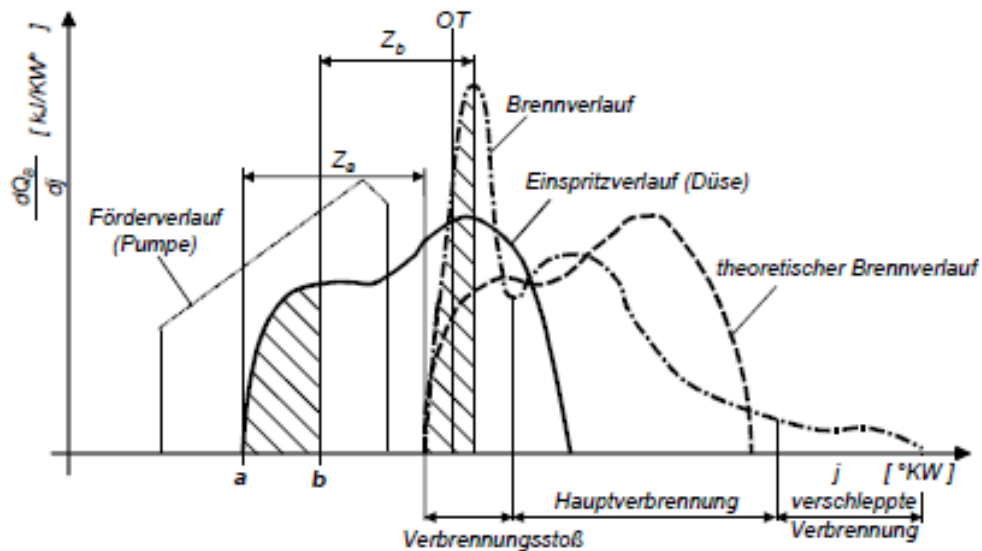


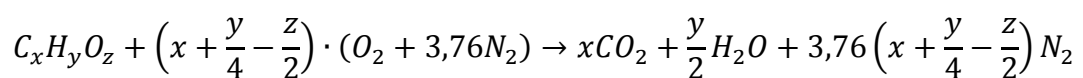
Abbildung 2.5: Verbrennungsablauf Dieselmotor [5]

Nach diesem wirkungsgradtechnisch günstigen Anteil (nahezu Gleichraumverbrennung) folgt die Hauptverbrennung, in der der größte Teil des Kraftstoffs umgesetzt wird. Wie bereits beschrieben, sind hier die Mischungsvorgänge geschwindigkeitsbestimmend. In dieser Phase der Verbrennung treten die Einspritzung, die Aufbereitung des flüssigen Kraftstoffs und die Gemischbildung sowie die Verbrennung und schließlich die Schadstoffbildung gleichzeitig auf. [1]

Die dritte Phase der Verbrennung wird als verschleppte Verbrennung bezeichnet. Diese ist aus thermodynamischer Sicht ungünstig und führt zu hohen Emissionen von Ruß und unverbrannten Kohlenwasserstoffen. [5]

2.4 Abgasemissionen des Dieselmotors

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (C_xH_y) bei stöchiometrischem Luftverhältnis entstehen nach der Bruttoreaktionsgleichung (Gleichung (2-1)) nur die Abgaskomponenten Kohlendioxid (CO_2) Stickstoff (N_2) sowie Wasser (H_2O) in dampfförmigem Zustand:



(2-1)

Bei realen Verbrennungsvorgängen treten auf Grund der unvollständigen Verbrennung jedoch auch die Komponenten Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Rußpartikel im Abgas auf. Weiters kommt es bei hohen Verbrennungstemperaturen zur Bildung von Stickoxiden (NO_x).

Wie in Abbildung 2.6 ersichtlich, kommt es beim Dieselmotor mit Direkteinspritzung zur Bildung der Schadstoffe in unterschiedlichen Zonen im Brennraum, abhängig vom lokalen Luftverhältnis:

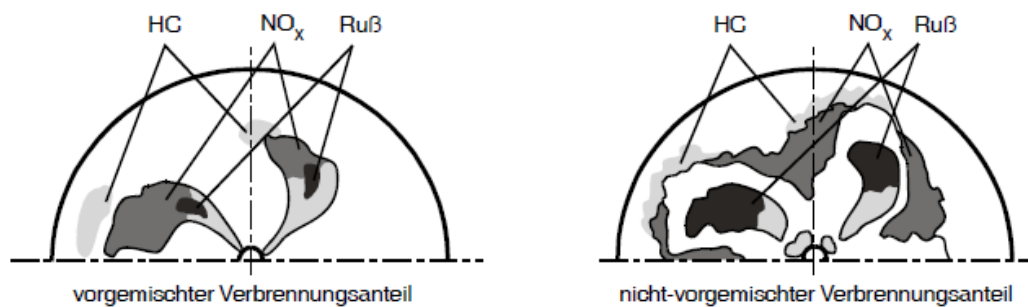


Abbildung 2.6: Zonen der Schadstoffentstehung im Brennraum [3]

In den mageren Zonen am Rand der Einspritzstrahlen kommt es zur Bildung von HC-Emissionen durch das Auslösen der Flamme an der Brennraumwand bzw. bei Nichterreichen der örtlichen Zündbedingungen. Stickoxidemissionen entstehen in den Zonen mit annähernd stöchiometrischem Luftverhältnis bei hoher Temperatur. In den Zonen mit stark unterstöchiometrischem Luftverhältnis im Inneren des Einspritzstrahls kommt es zur Rußbildung. [3]

In Abbildung 2.7 ist die Konzentration der Schadstoffe CO, NO_x sowie HC über dem globalen Luftverhältnis dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Rauchwert sowie die CO-Emission an der Vollast auf Grund des örtlichen Luftmangels stark ansteigen. Mit steigendem Luftverhältnis steigen auch die HC- und CO-Emissionen wieder, da es in den Randzonen zum Erlöschen der Flamme und zu unvollständiger Verbrennung kommt. Die Stickoxidemissionen haben ihr Maximum im leicht überstöchiometrischen Bereich und werden mit steigendem Luftverhältnis aufgrund der sinkenden Verbrennungstemperatur geringer. [3]

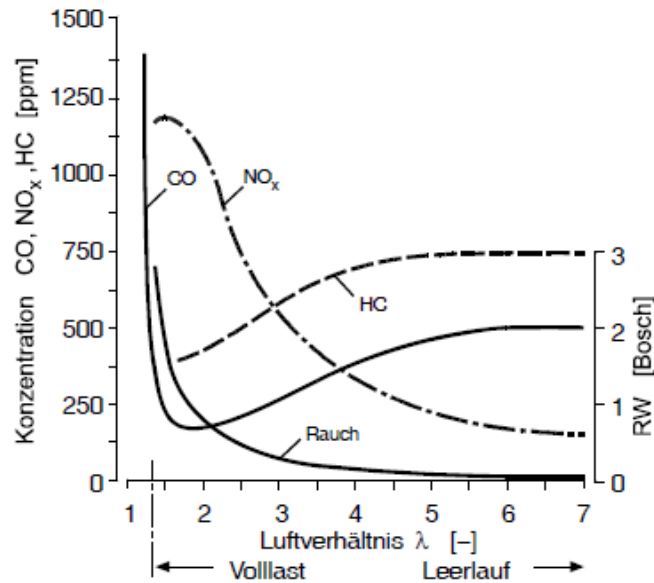


Abbildung 2.7: Schadstoffkonzentration über globalem Luftverhältnis [3]

2.4.1 Kohlenmonoxid - CO

Bei dem farb- und geruchlosen Gas Kohlenmonoxid handelt es sich um ein Atemgift, welches bei Sauerstoffmangel als Produkt der unvollständigen Verbrennung gebildet wird. Die Konzentration im Abgas steigt daher bei $\lambda < 1$ stark an. Auch bei überstöchiometrischem Luftverhältnis kommt es durch die Dissoziation von CO_2 zur Bildung von CO-Emissionen. Ein Teil des so gebildeten CO's wird während der Expansion wieder oxidiert, jedoch kommt diese Reaktion mit sinkender Temperatur zum Erliegen und die CO-Konzentration friert ein. Seine toxische Wirkung entsteht durch die Fähigkeit der CO-Moleküle, sich stärker an den Blutfarbstoff Hämoglobin zu binden als Sauerstoff.

Dadurch kommt es zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Blut und somit zu einer Unterversorgung der Organe im menschlichen Körper. [3], [6]

2.4.2 Kohlenwasserstoffe - HC

HC-Emissionen entstehen hauptsächlich durch nicht oder nur unvollständig verbrannten Kraftstoff. Des Weiteren können Kohlenwasserstoffemissionen jedoch auch durch das Abschaben des Schmierfilms durch die Kolbenringe von der Zylinderwand entstehen. [3]

Bei hohem Luftverhältnis kann es lokal zur Erlöschung der Flamme kommen, was durch die Streckung der Flammenfront durch starke Turbulenz im Brennraum begünstigt wird. Speziell an der Zylinderwand und in engen Spalten tritt die Flammenlöschung auf, da es hier aufgrund des erhöhten Wärmestroms zu einer Abkühlung der Ladung kommt. [3]

Auch kann es durch die Einspritzstrahlen zum Aufbringen von flüssigem Kraftstoff direkt auf die Zylinderwand kommen. Durch die kalte Brennraumwand kann der Kraftstoff nicht vollständig verdampfen, wodurch es speziell beim Kaltstart zu erhöhten HC-Emissionen kommt. Eine weitere Quelle von unverbrannten Kohlenwasserstoffen ist der nach Ende des Einspritzvorgangs im Sackloch der Einspritzdüse verbleibende Kraftstoff. Da es erst während der Expansion zur Verdampfung dieses Kraftstoffs kommt, nimmt dieser nicht mehr an der Verbrennung teil und verlässt den Zylinder somit unverbrannt. [7]

Speziell im Sommer bei starker Sonneneinstrahlung kann es durch die Bindung von Kohlenwasserstoffen mit Stickoxiden in der Luft zur Bildung von schleimhautreizenden Verbindungen sowie Ozonvorläufersubstanzen kommen. Von besonderer Bedeutung sind auch die bei der innermotorischen Verbrennung gebildeten polyzyklischen Aromaten (PAH), allen voran Benzoapyren, welches als krebserregend gilt. [6]

2.4.3 Stickoxide - NO_x

Der Überbegriff Stickoxide beinhaltet allgemein acht Verbindungen (NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₅, N₂O₆ sowie N₂O₅). Da bei der motorischen Verbrennung jedoch nur NO und NO₂ in ausschlaggebenden Mengen entstehen, wird der Begriff NO_x nur für die Verbindungen NO (Stickstoffmonoxid) und NO₂ (Stickstoffdioxid) verwendet. [7]

Prinzipiell kann zwischen vier verschiedenen NO_x-Bildungsmechanismen unterschieden werden. Nämlich der Bildung von Stickoxiden aus dem Luftstickstoff bei hohen Verbrennungstemperaturen (der sogenannten thermischen Stickoxidbildung), der Bildung von NO_x aus Luft-Stickstoff bei niedrigen Temperaturen (prompte NO-Bildung), der Bildung über den N₂O-Mechanismus und der

Bildung aus im Kraftstoff enthaltenem Stickstoff. Der für die Stickoxidbildung im Dieselmotor bedeutendste Mechanismus ist die thermische Stickoxidbildung nach Zeldovich. Bei niedrigen Verbrennungstemperaturen (in niedriglastigen Betriebspunkten unter Einsatz der Abgasrückführung) steigt allerdings die Bedeutung des N_2O -Mechanismus bei mageren Bedingungen sowie der prompten NO -Bildung in kraftstoffreichen Gebieten. Da die Umwandlung von im Brennstoff enthaltenem Stickstoff vor allem bei der Verbrennung von Kohle auftritt und somit für die innermotorische Verbrennung eine untergeordnete Rolle spielt, wird hier nicht weiter darauf eingegangen. [2]

Aus dem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen NO und NO_2 (Abbildung 2.8) ist ersichtlich, dass es bei niedrigen Verbrennungstemperaturen hauptsächlich NO_2 gebildet wird. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Gleichgewicht immer stärker in Richtung NO . [8]

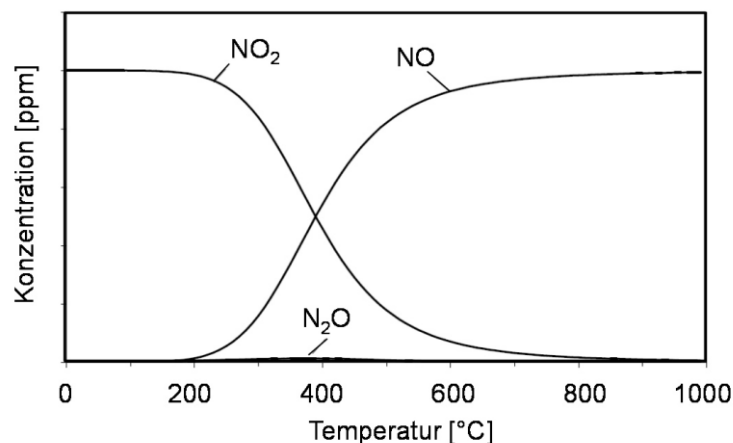


Abbildung 2.8: thermodynamisches Gleichgewicht NO/NO_2 [8]

Aus dem Verlauf des thermodynamischen Gleichgewichts lässt sich ableiten, dass NO_2 vermehrt in Betriebspunkten mit niedriger Last und Drehzahl gebildet wird.

Dieses Verhalten ist auch aus dem in Abbildung 2.9 abgebildeten Kennfeld eines modernen Dieselmotors ersichtlich, in dem das NO_2/NO_x -Verhältnis dargestellt ist.

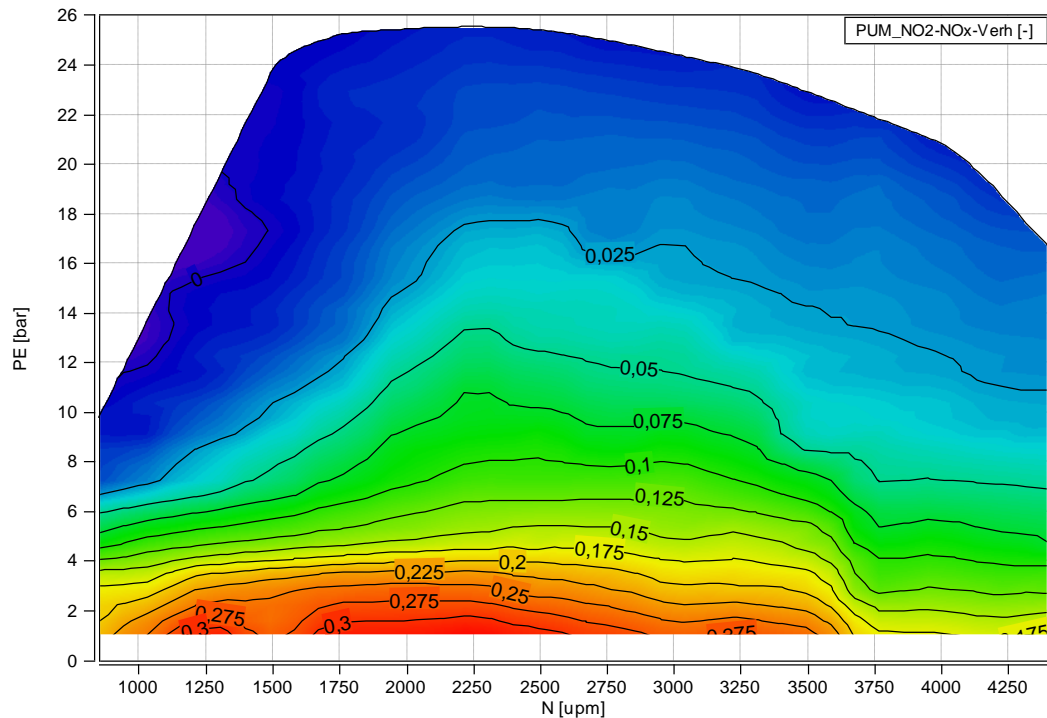


Abbildung 2.9: Kennfeld NO₂/NO_x-Verhältnis

Neben der innermotorischen NO₂-Bildung werden auch durch die Abgasnachbehandlungssysteme bei modernen Dieselmotoren (Oxidationskatalysator, Partikelfilter) größere Mengen an NO in NO₂ umgewandelt. [6]

Für den menschlichen Körper ist vor allem NO₂ von Bedeutung, da dieses giftige Reizgas wasserlöslich ist und somit tief in die Lunge eindringen kann. In höheren Dosen kann es sogar zu Lungenödemen führen. Unter der Einwirkung von UV-Licht wird auch ein beträchtlicher Teil des emittierten NO in NO₂ umgewandelt. [6]

2.4.3.1 Thermisches Stickstoffmonoxid (Zeldovich-NO)

Bei den meisten Verbrennungsreaktionen kann aufgrund ihres schnellen Ablaufs angenommen werden, dass sich hinter der Flammenfront chemisches Gleichgewicht einstellt. Im Gegensatz dazu laufen die Reaktionen bei der Stickoxidbildung wesentlich langsamer ab, sodass für die Berechnung der Schadstoffemission auf die Reaktionskinetik zurückgegriffen werden muss.

Bei diesen Nachflammenreaktionen kommt es während des Durchlaufens der Flammenfront nicht zum Erreichen des chemischen Gleichgewichts, die NO-Bildung kann somit als vom Verbrennungsvorgang entkoppelt gesehen werden. Die Bildung von NO aus dem in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoff bei hohen Temperaturen, dem sogenannten Zeldovich-Mechanismus kann durch folgenden Elementarreaktionen beschrieben werden [3]:



Da für die erste Reaktion (Gleichung (2-2)) die größte Aktivierungsenergie benötigt wird, ist diese Reaktion geschwindigkeitsbestimmend und läuft erst bei hohen Temperaturen ausreichend schnell ab. Da die Reaktionen in Gleichung (2-3) und Gleichung (2-4) sehr schnell ablaufen, kann die Stickstoffkonzentration in diesem Fall als quasistationär angenommen werden. Damit ergibt sich:

$$\frac{d[N]}{dt} = 0 \quad (2-5)$$

Mit weiteren vereinfachenden Annahmen (siehe [3]) ergibt sich der zeitliche Verlauf der Bildung des thermischen Stickstoffmonoxids:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O_2] \quad (2-6)$$

Daraus folgt, dass eine Senkung der NO-Konzentration durch die Senkung des Geschwindigkeitskoeffizienten k_1 , sowie durch eine geringer Stickstoff- bzw. Sauerstoffkonzentration erzielt werden kann.

Da der Geschwindigkeitskoeffizient stark temperaturabhängig ist, führt eine Senkung der Verbrennungstemperatur somit auch zu einer Senkung der NO-Konzentration. [3]

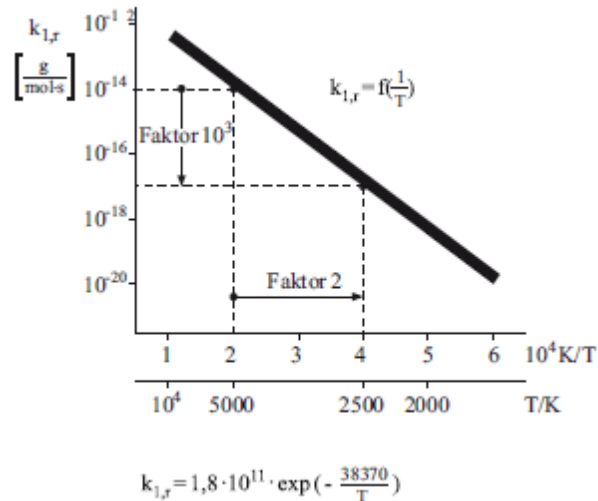


Abbildung 2.10: Geschwindigkeitskoeffizient erste Zeldovich-Reaktion [2]

Wie in Abbildung 2.10 ersichtlich, führt z.B. die Anhebung der Verbrennungstemperatur von 2000 auf 2500K zu einem Anstieg der NO-Konzentration um das 50-fache. [2]

Ein Verfahren, das sich die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration sowie die Absenkung der Verbrennungstemperatur zu Nutze macht, um die Stickoxidbildung zu verringern, ist die Abgasrückführung.

2.4.3.2 Prompte NO-Bildung (Fenimore-NO)

Die Bildung des prompten NO tritt direkt in der Flammenfront auf und ist von der Bildung des CH-Radikals abhängig. Dabei reagiert CH zunächst mit N_2 zu HCN bzw. NCN welches im Anschluss zu NO weiterreagiert. Diese Mechanismen treten nur unter brennstoffreichen Bedingungen auf. Aufgrund der niedrigen Aktivierungsenergie tritt die prompte NO-Bildung bereits ab ca. 1000K auf. [2]

2.4.3.3 NO-Bildung über N₂O-Mechanismus

Dieser Mechanismus ist unter mageren Bedingungen (keine prompte NO-Bildung) bei niedrigen Verbrennungstemperaturen (keine thermische NO-Bildung) für die innermotorische NO-Bildung von Bedeutung. Unter Anwesenheit eines Stoßpartners M kommt es zur Bildung von Lachgas (N₂O). Durch die Oxidation des Lachgases kommt es dann zur NO-Bildung:



Dieser NO-Bildungsmechanismus ist vor allem bei Verbrennung in Gasturbinen von Bedeutung, trägt aber auch bei modernen Dieselmotoren mit hohen Spitzendrücken entscheidend zur NO-Bildung bei. [2]

2.4.4 Partikel

Laut Definition sind Partikel alle Stoffe, die an einem speziellen Filter bei definierter Verdünnung des Abgases bei einer Temperatur größer 52°C abgeschieden werden. Dazu zählen neben dem elementaren Kohlenstoff, im Allgemeinen als Ruß bezeichnet, welcher den größten Teil ausmacht, auch Kohlenwasserstoffe sowie anorganische Partikel wie Asche oder Metallspäne. Mit steigender Last steigt auch der Anteil der Rußmasse an der gesamten Partikelmasse. [2]

In Abbildung 2.11 ist der Ablauf der Rußbildung schematisch dargestellt. Zu Beginn kommt es unter Luftmangel zur chemischen Reaktion der Kraftstoffmoleküle zu kleinen Kohlenwasserstoffen und zur Bildung von Benzolringen. Durch die Polymerisation dieser Ringe werden polyzyklische Aromaten (PAH) gebildet. Mit der Dehydrierung steigt der Kohlenstoffgehalt immer weiter an und es bilden sich die ersten Rußkerne durch die sogenannte Nukleation. Diese Keime besitzen zu Beginn einen Durchmesser von 1 bis 2 nm und wachsen durch die Koagulation zu Rußprimärteilchen in der Größenordnung von 20 bis 30 nm heran. Hier ist vor allem das Ethin-Molekül von besonderer Bedeutung.

An diese Primärteilchen lagern sich weitere Substanzen wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe oder Sulfate an und es kommt zur Bildung von kettenförmigen Strukturen. [2]

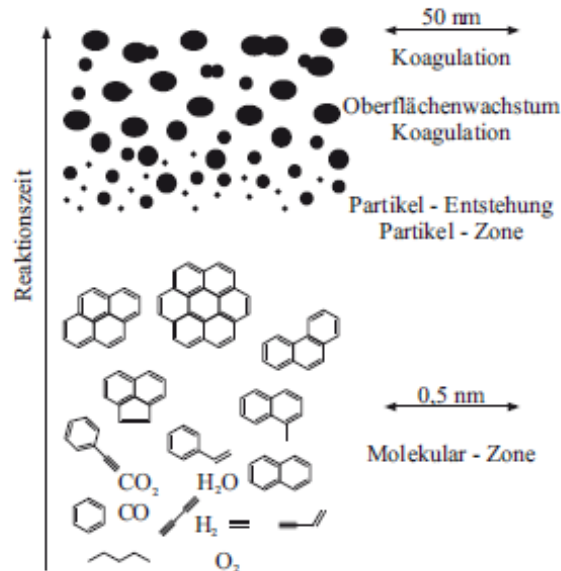


Abbildung 2.11: Ablauf der Rußbildung [2]

Für die Rußbildung ist vor allem der Temperaturbereich zwischen 1500K und 1900K bei lokalem Luftmangel ($\lambda < 0,6$) von Bedeutung (Abbildung 2.12). Mit steigender Temperatur steigt sowohl die Rußbildung in fetten Bereichen als auch die Rußoxidation in den mageren Bereichen des Brennraums. [2]

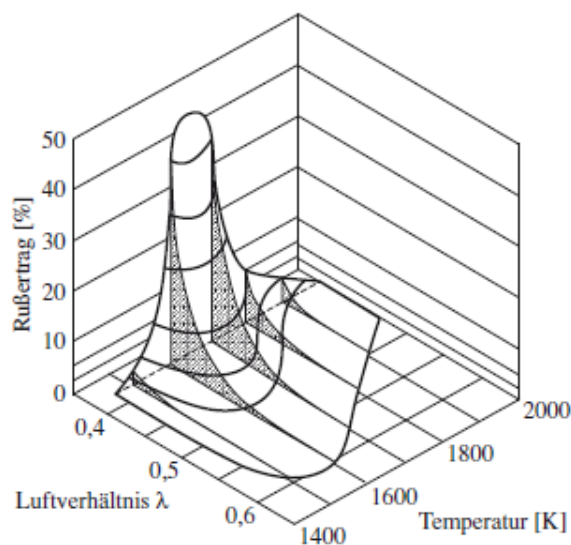


Abbildung 2.12: Rußbildung über Temperatur und Luftverhältnis [2]

Da ein Großteil der gebildeten Rußmenge während der Haupt- und der Nachverbrennung bei hohen Temperaturen und bei Luftüberschuss wieder verbrannt wird, gelangt nur ein Bruchteil davon in das Abgas (<10%, siehe Abbildung 2.13). [2]

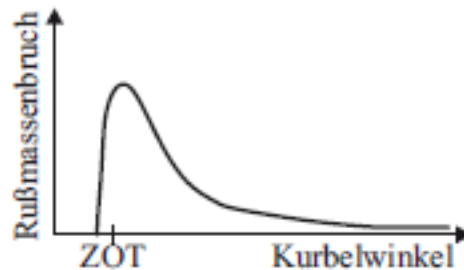


Abbildung 2.13: Rußkonzentration über Kurbelwinkel [2]

Die gefährliche Wirkung der durch die dieselmotorische Verbrennung entstehenden Partikel auf den menschlichen Körper resultiert aus ihrer geringen Größe. Die Partikel werden vor allem in den Bronchien und Alveolen (Lungenbläschen) abgeschieden und transportieren so die angelagerten kanzerogenen Stoffe (z.B. PAH) in die Lunge. [6]

2.5 Abgasgesetzgebung

Nach kalifornischem Vorbild, wo bereits in den 1960er Jahren die ersten Emissionsgrenzwerte eingeführt wurden, traten 1970 auch in Europa die ersten Abgasvorschriften in Kraft. Seit damals wurden diese Vorschriften ständig verschärft, wodurch es zur Einführung von Abgasnachbehandlungssystemen wie dem 3-Wege-Katalysator bei Ottomotoren sowie dem Oxidationskatalysator und dem Dieselpartikelfilter bei Dieselmotoren kam. Seit Inkrafttreten der EURO-6 Grenzwerte im September 2014 wird eine flächendeckende Einführung von Abgasnachbehandlungssystemen zur Reduzierung der Stickoxidemissionen bei Diesel-PKW erwartet. [9]

Im Folgenden soll auf die Abgasgesetzgebung in Europa sowie den USA näher eingegangen werden.

2.5.1 Europa

In Europa erfolgt die Typprüfung im NEDC-Test (New European Driving Cycle), einem Fahrzyklus, welcher auf dem Rollenprüfstand unter Laborbedingungen (definierte Lufttemperatur, Luftfeuchte, ...) nachgefahren wird. Der 1180 Sekunden dauernde Test besteht aus einem Stadt- sowie aus einem Überland- bzw. Autobahnteil, wobei die maximale Fahrgeschwindigkeit 120km/h beträgt. Das Geschwindigkeitsprofil des NEDC ist in Abbildung 2.14 dargestellt:

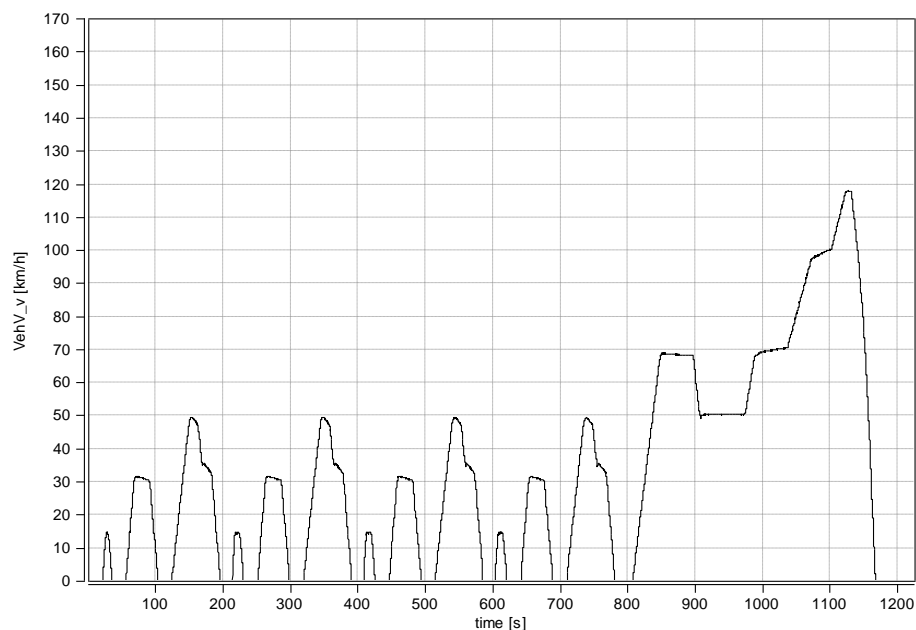


Abbildung 2.14: Geschwindigkeitsprofil NEDC

Seit 1. September 2014 müssen neu zugelassene Fahrzeuge die Emissionsgrenzwerte der Stufe EURO 6 einhalten (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Emissionsgrenzwerte EURO 6 für Diesel-PKW

CO	HC+NOx	NOx	PM
mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
500	170	80	4,5

Untersuchungen im Rahmen des von der Europäischen Union durchgeführten ARTEMIS-Projekts (Assessment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories), bei dem das reale Fahrverhalten von Privatpersonen bewertet wurde, zeigen, dass der NEDC den realen Fahrbetrieb nur unzureichend darstellt.

In Abbildung 2.15 ist der so ermittelte Fahrzyklus CADC (Common Artemis Driving Cycle), welcher weit höherlastiger und dynamischer als der NEDC ist, ersichtlich. Dieser ist in einen Stadt-, einen Überland- sowie einen Autobahnanteil gegliedert. [10]

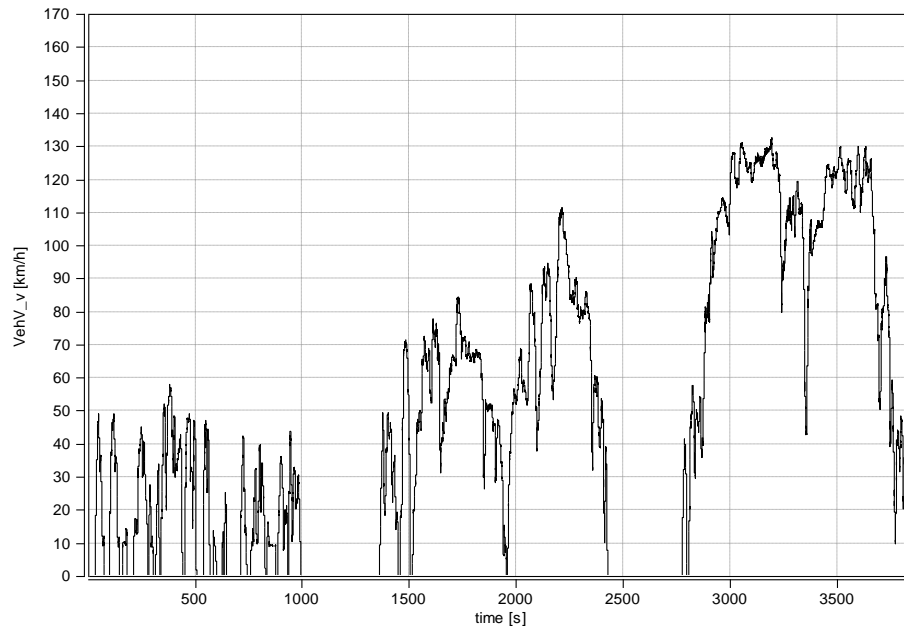


Abbildung 2.15: Geschwindigkeitsprofil Artemis

Durch diesen Umstand lässt sich auch der Unterschied zwischen den im NEDC erreichten Testverbräuchen und der im realen Fahrbetrieb verbrauchten Kraftstoffmenge erklären.

Trotz der stetigen Verschärfung der Emissionsgrenzwerte konnte im Hinblick auf die NO_x-Immissionen keine zufriedenstellende Verbesserung im städtischen Bereich erreicht werden. Die Ursache dafür kann wiederum in der Abweichung des vorgeschriebenen Testzyklus von der Realität gesehen werden. Aus diesem Grund wird mit Einführung der EURO 6c-Emissionsgesetzgebung 2017 auch das Emissionsverhalten im realen Fahrbetrieb bewertet werden.

Des Weiteren soll der bisher gültige NEDC-Testzyklus durch den realitätsnäheren WLTC-Zyklus (World Harmonized Light Duty Test Cycle) ersetzt werden (Abbildung 2.16).

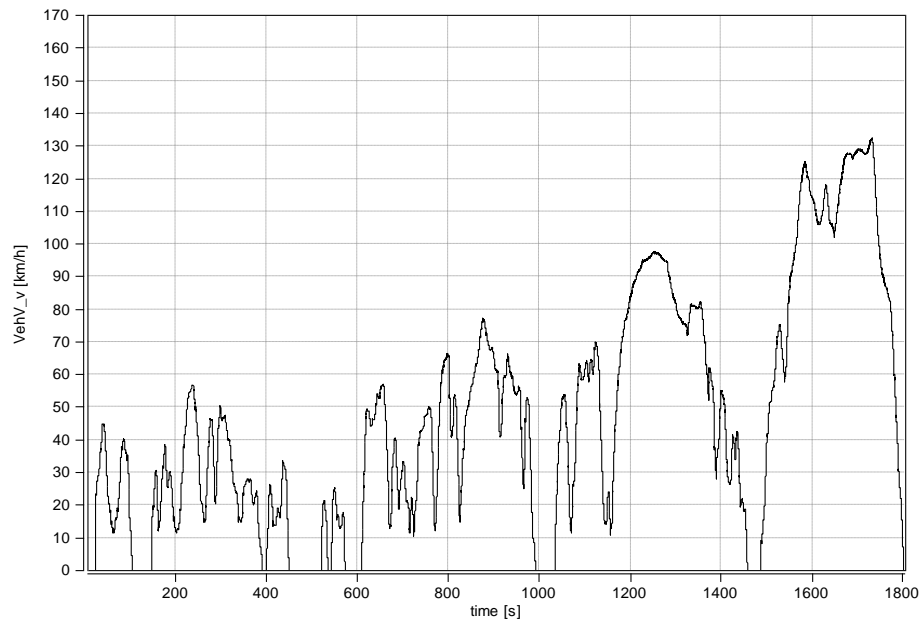


Abbildung 2.16: Geschwindigkeitsprofil WLTC

Um den Anforderungen der RDE-Gesetzgebung (Real Driving Emissions) gerecht zu werden, ist die Kombination aus innermotorischen Maßnahmen zur Stickoxidminderung (Abgasrückführung, neue Aufladekonzepte) und dem flächendeckendem Einsatz von NO_x-Abgasnachbehandlungssystemen (NO_x-Speicherkatalysator, Selektive-katalytische-Reduktion) notwendig. [9]

Die eingesetzten Abgasnachbehandlungssysteme müssen somit nicht mehr nur unter „Laborbedingungen“ im derzeit gültigen NEDC-Zyklus, sondern auch unter realen Fahrbedingungen mit optimalem Wirkungsgrad arbeiten. Dieser Umstand stellt neue Anforderungen an die Regelung bzw. Steuerung dieser Systeme und kann als Hauptgrund für die Durchführung der vorliegenden Arbeit gesehen werden.

2.5.2 USA

Die Einhaltung der in den USA gültigen Emissionsgrenzwerte nach dem Tier2-Standard wird im FTP-75-Zyklus (Federal Test Procedure) ermittelt. Dieser kann, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, in drei Phasen eingeteilt werden. Die ersten 505s werden als Kaltstartphase bezeichnet, auf diese folgt die Stabilisierungsphase. Nach dieser zweiten Phase wird der Motor für 600s abgestellt.

Die dritte Phase wird als Heißstartphase bezeichnet und entspricht dem Geschwindigkeitsverlauf der ersten Phase. Im Unterschied zur Europäischen Abgasgesetzgebung gelten in den USA die gleichen Emissionsgrenzwerten für Diesel- und Otto-PKW.

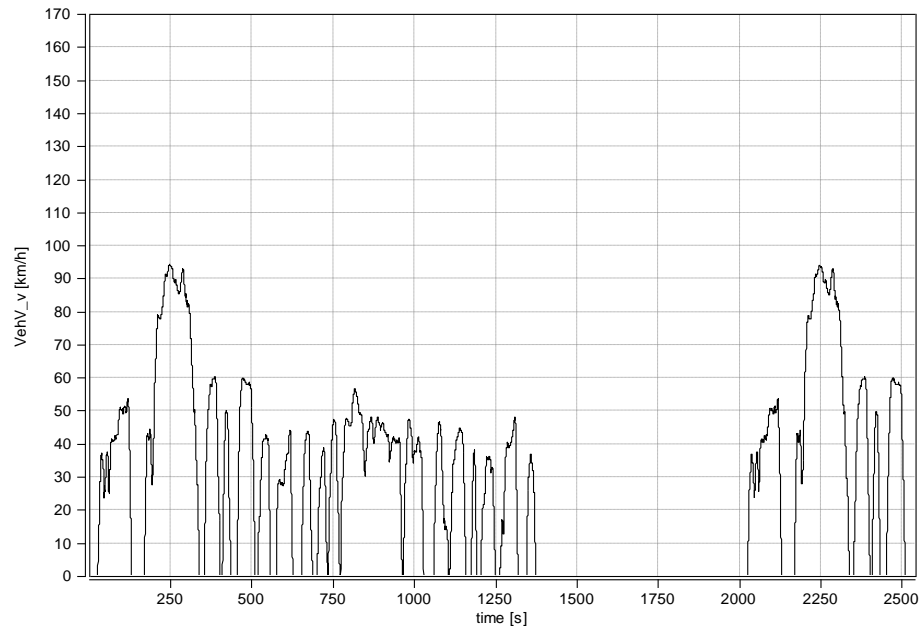


Abbildung 2.17: Geschwindigkeitsprofil FTP-75

Innerhalb des Tier2-Standards kann zwischen 8 Emissionsgrenzwertklassen Bin1 bis Bin8 unterschieden werden. Ein Fahrzeug der Klasse Bin1 wird auch als ZEV (Zero Emission Vehicle) bezeichnet. Darunter fallen z.B. elektrisch betriebene Fahrzeuge oder Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb ohne jeglichen Schadstoffausstoß. Fahrzeughersteller können ihre Fahrzeuge beliebig in eine dieser Klassen einstufen lassen, jedoch muss ein Flottendurchschnittswert von 0,07g/mi NOx eingehalten werden. [11]

In einigen Staaten der USA gelten die weit strengeren Emissionsgrenzwerte des CARB (Californian Air Resources Board). Der seit 2007 gültige Grenzwert wird als LEV2 (Low Emission Vehicle) bezeichnet und entspricht der Emissionsgrenzwertklasse Bin5.

In Tabelle 2-2 sind die LEV2-Grenzwerte angeführt, welche bis zu einem Betrieb über 120.000 Meilen eingehalten werden müssen:

Tabelle 2-2: Grenzwerte Tier2/Bin5 FUL (Full Useful Life)

NOx	NMOG	CO	PM	HCHO
g/mi	g/mi	g/mi	g/mi	g/mi
0,07	0,09	4,2	0,01	0,018

Der NOx-Grenzwert von 0,07g/mi entspricht 0,044g/km und liegt somit unter dem EURO6 Grenzwert von 0,08g/km.

2.6 Innermotorische Maßnahmen zur Emissionsminderung

Die bei der dieselmotorischen Verbrennung als am kritischsten anzusehenden Schadstoffkomponenten hinsichtlich des Rohemissionsniveaus sind die Stickoxid- und Partikelemissionen. In Abbildung 2.18 ist der prinzipielle Zusammenhang zwischen lokaler Flammentemperatur, lokalem Luftverhältnis und Schadstoffbildung dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass zum Erreichen einer emissionsgünstigen Verbrennung eine möglichst homogene Verbrennung bei niedrigen Temperaturen anzustreben ist. [6]

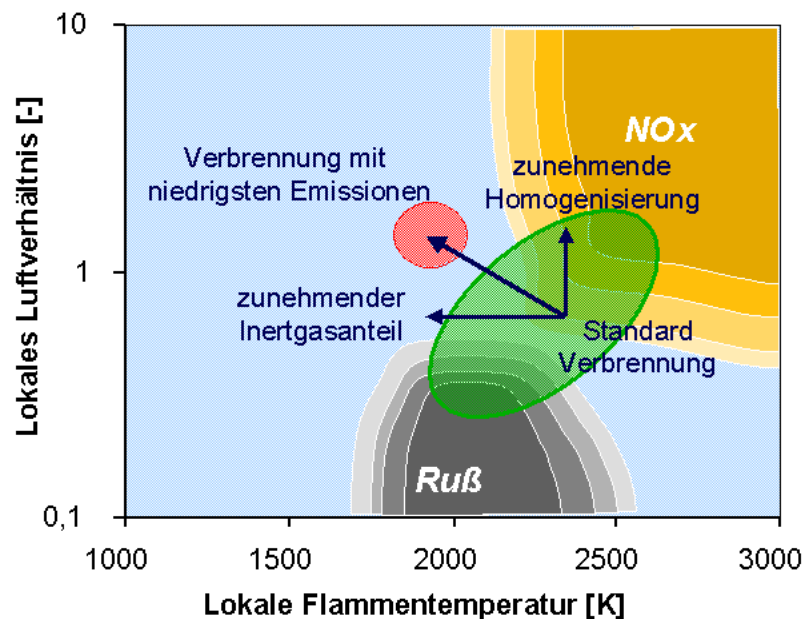


Abbildung 2.18: Schadstoffreduktion bei Verbrennungsmotoren [6]

Aus der Tatsache, dass Stickoxide größtenteils bei Luftüberschuss und hohen Temperaturen gebildet werden (siehe Kapitel 2.4.3.1), Rußemissionen jedoch gerade unter diesen Umständen minimiert werden können, ergibt sich der sogenannte NO_x-Partikel-Trade-off (Abbildung 2.19). Somit haben NO_x-senkende Maßnahmen meist einen Anstieg der Partikelemissionen zur Folge. [6]

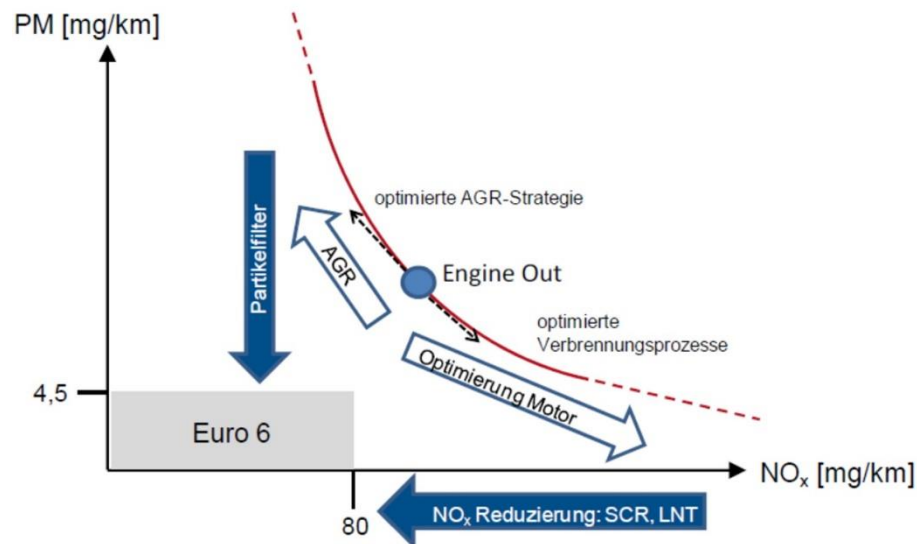


Abbildung 2.19: NO_x-Partikel-Trade-off [8]

Zu den wichtigsten innermotorischen Maßnahmen zur Senkung der Stickoxidemissionen zählt die Abgasrückführung (AGR). Hierbei wird der angesaugten Luftmasse Abgas hinzugefügt. Das kann einerseits durch eine dementsprechende Auslegung der Steuerzeiten erfolgen, sodass durch die Ventilüberschneidung Abgas am Beginn des Ansaugtakts in den Brennraum zurückgesaugt wird (interne AGR). Andererseits kann das Abgas auch vor der Turbine (Hochdruck-AGR) bzw. nach der Turbine des Turboladers (Niederdruck-AGR) entnommen und der Frischluft hinzugefügt werden. [8]

Die NO_x-senkende Wirkung der Abgasrückführung kann auf mehrere Effekte zurückgeführt werden. Den dominierenden Einfluss stellt hierbei der Verdünnungseffekt durch das rückgeführte Inertgas (H₂O und CO₂) dar. Diese inerten Ladungsanteile nehmen nicht an der Verbrennung teil, müssen aber miterwärmt werden, wodurch es zu einer Absenkung der Verbrennungstemperatur kommt. Einen weiteren temperatursenkenden Effekt stellt die durch das rückgeführte Abgas angehobene spezifische Wärmekapazität der Ladungsmasse dar. [6]

Durch die geringere Sauerstoffkonzentration im Brennraum wird außerdem die Bildung des thermischen NO vermindert (Kapitel 2.4.3.1). Prinzipiell kann gesagt werden, dass eine Absenkung der Sauerstoffkonzentration in der Ansaugluft von 1,3% zu einer Halbierung der NO_x-Emission führt. Dieser asymptotische Verlauf bedeutet aber auch, dass die Wirksamkeit der AGR mit sinkender NO_x-Emission abnimmt. [6]

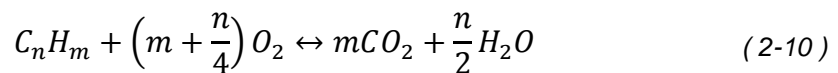
Die aufgrund des beschriebenen Trade-offs durch die AGR steigenden Partikelemissionen können durch Maßnahmen zur Erreichung einer möglichst homogenen Verbrennung gesenkt werden. Dazu gehören eine Erhöhung des Einspritzdrucks oder der Ladungsbewegung sowie eine Optimierung der Muldenform sowie des Einspritzverlaufs. Der Anstieg der Partikelemission kann weiters durch eine Erhöhung des Luftverhältnisses durch einen gesteigerten Ladedruck verhindert werden. Diese Maßnahme schließt jedoch eine weitere Steigerung der AGR-Rate ein, um die Sauerstoffkonzentration konstant zu halten. [6]

2.7 Abgasnachbehandlungssysteme

2.7.1 Dieseloxidationskatalysator (DOC)

Der Dieseloxidationskatalysator (DOC) besteht aus einer stranggepressten keramischen oder einer metallischen Trägerstruktur, auf der zur Vergrößerung der katalytischen Oberfläche der sogenannte Washcoat aufgebracht ist. Diese Trägermatrix besteht unter anderem aus Aluminiumoxid (Al₂O₃) und ist mit den katalytisch aktiven Edelmetallen Platin (Pt) und Palladium (Pd) beschichtet. Das Verhältnis der einzelnen Beladungskomponenten ist ausschlaggebend für Light-Off-Temperaturen der im Katalysator ablaufenden Reaktionen. Diese Temperaturen, bei der ein CO- bzw. HC-Umsatz von 50% erreicht wird, bewegen sich bei modernen DOC's im Bereich von 150°C bis 200°C. [4], [6]

Die Hauptaufgaben des DOC sind die Oxidation von Kohlenmonoxid und unverbrannten oder nur teilweise verbrannten Kohlenwasserstoffen zu Kohlendioxid und Wasserdampf:



Eine weitere Funktion des DOC ist die Oxidation von Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid:



Ein ausreichend hohes NO_2/NO_x -Verhältnis ist für die nachgeschalteten Abgasnachbehandlungssysteme von großer Wichtigkeit. NO_2 wird für die kontinuierliche Regeneration (CRT-Effekt) des Partikelfilters benötigt, aber auch für die Stickoxidreduktion in SCR-Systemen ist ein NO_2/NO_x -Verhältnis von 1:1 erstrebenswert. [4]

Nachteilig ist ein hoher NO_2 allerdings in Hinblick auf die Bildung von Lachgas (N_2O , siehe Kapitel 2.7.4.1).

2.7.2 Dieselpartikelfilter (DPF)

Dieselpartikelfilter können prinzipiell in offene und geschlossene Systeme unterschieden werden. Erstere wurden hauptsächlich als Nachrüstlösung für PKW ohne serienmäßigen DPF angeboten und sollen hier nicht weiter besprochen werden.

Geschlossene Systeme, sogenannte Wall-Flow Filter, sind aus einer keramischen Monolithstruktur aufgebaut und erreichen massenbezogene Abscheidegrade von über 99%. Zur Anwendung kommen in diesen Filtern hauptsächlich Siliziumcarbid, aber auch Materialien wie Cordierit oder Aluminiumtitanat.

Aufgrund der wechselseitig verschlossenen Kanäle dieser Filter strömt das Abgas durch das poröse Filtermaterial, wobei Rußpartikel und Ölasche abgeschieden werden (Abbildung 2.20). [4], [6], [8]

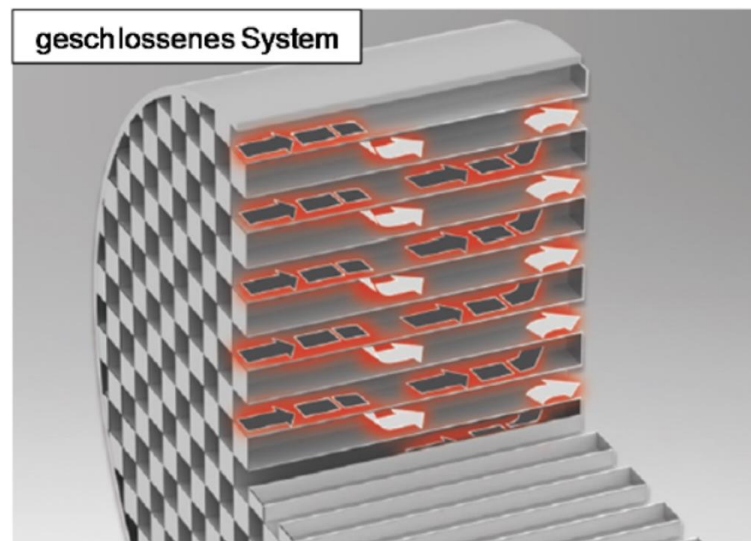


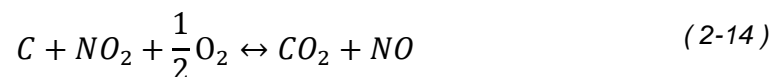
Abbildung 2.20: Struktur geschlossener Partikelfilter [8]

Bei Tiefenfiltern werden die Partikel durch Diffusion in das Innere der Filterwand transportiert und abgelagert. Mit zunehmender Beladung bildet sich ein poröser Filterkuchen aus abgeschiedenen Partikeln an der Filteroberfläche aus.

Dieser Filterkuchen wirkt selbst als effizienter Oberflächenfilter, wodurch der Abscheidegrad mit steigender Beladung zunimmt. Da es aufgrund des steigenden Abgasgedrucks mit zunehmender Beladung zur Verschlechterung des Wirkungsgrads des Motors kommt, muss der Partikelfilter in zeitlichen Abständen regeneriert werden. [4], [6], [8]

Bei der Regeneration von Partikelfiltern kann prinzipiell zwischen passiver und aktiver Regeneration unterschieden werden.

Die passive Regeneration erfolgt aufgrund des CRT-Effekts (Continuously Regenerating Trap) durch im Abgas vorhandenes NO_2 , welches in einem davor befindlichen DOC gebildet wird (siehe Kapitel 2.7.1) [8]:



Da nur in einem Temperaturbereich von 250-400°C ausreichend NO_2 zum Abbau des eingelagerten Rußes im DOC gebildet wird, kommen auch Partikelfilter mit katalytischer Beschichtung (Pt, Pd) zum Einsatz. Die NO_2 -Bildung im sogenannten CSF (Catalysed Soot Filter) wirkt sich auch positiv auf den CRT-Effekt aus, wird aber auch für den wirkungsgradoptimalen Betrieb eines danach angeordneten SCR-Katalysators benötigt. [8]

Die aktive Regeneration erfolgt bei Temperaturen zwischen 550°C und 650°C. Die notwendige Temperatur wird zu einem Teil durch eine innermotorische Anhebung der Abgastemperatur sowie durch die exotherme Reaktion von unverbrannten Kohlenwasserstoffen im DOC erreicht (siehe Kapitel 2.7.1).

Das notwendige HC-Niveau im Abgas bei der Partikelfilterregeneration wird durch eine späte Nacheinspritzung erreicht, wodurch der eingespritzte Kraftstoff unverbrannt in den Abgasstrang ausgeschoben wird. Der Rußabbrand erfolgt durch die Oxidation unter Anwesenheit von Sauerstoff [8]:



2.7.3 NO_x-Speicherkatalysator (NSC)

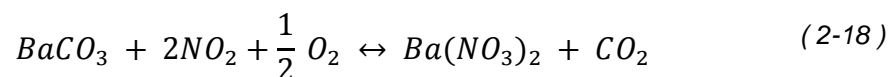
Der NO_x-Speicherkatalysator (NSC, NO_x Storage Catalyst) ähnelt im Aufbau dem Diesel-Oxidationskatalysator mit dem Unterschied, dass der NSC Beschichtungskomponenten zur NO_x-Speicherung enthält. Hierzu werden Erdalkalimetalle wie Barium verwendet. Da die NO_x-Speicherfähigkeit begrenzt ist, muss der NO_x-Speicherkatalysator in zeitlichen Abständen regeneriert werden. Diese Regeneration geschieht im Fettbetrieb durch Pulse bei $\lambda < 1$, was zu einem Kraftstoff-Mehrverbrauch führt. [8]

Der Betrieb des NSC kann somit in vier Phasen eingeteilt werden:

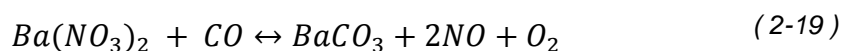
Da der NSC nur Stickstoffdioxid (NO₂) einlagern kann, erfolgt in der Bildungsphase im Magerbetrieb die Oxidation von NO zu NO₂ in Anwesenheit der Edelmetallkomponenten Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh):



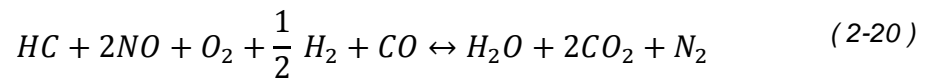
In der darauffolgenden Adsorptionsphase reagiert die NO_x-Speicherkomponente Bariumcarbonat (BaCO₃) mit NO₂ zu Bariumnitrat (Ba(NO₃)₂), was den eigentlichen NO_x-Speicherungsprozess darstellt:



Auch der Fettbetrieb kann in zwei Phasen unterteilt werden. In der ersten, sogenannten Regenerationsphase zerfällt das in der Adsorptionsphase gebildete Bariumnitrat durch die Reaktion mit CO und HC. Hier wird auch der im Katalysator gespeicherte Sauerstoff freigesetzt.



In der anschließenden Reduktionsphase wird das gebildete NO zu N₂ reduziert, was vor allem durch die Beschichtungskomponente Rhodium (Rh) gefördert wird. [8]



Ein unerwünschter Nebeneffekt ist die Einlagerung von im Kraftstoff enthaltenem Schwefel im NO_x-Speicherkatalysator. Der Schwefel wird im Katalysator als Sulfat eingelagert, was zu einer Verminderung der NO_x-Speicherfähigkeit führt. Der Vorgang der Schwefeleinlagerung geschieht in zwei Schritten [6]:



Zur Desulfatisierung wird auch hier der Motor in kurzen Pulsen mit unterstöchiometrischem Luftverhältnis betrieben, jedoch sind hierzu Temperaturen von größer 650°C notwendig. Diese bei hoher Temperatur ablaufenden Regenerationszyklen, welche meist in Kombination mit der Partikelfilterregeneration ablaufen, führen allerdings zu einer thermischen Alterung des Katalysators. [6]

Im optimalen Betriebsbereich des NSC bei Abgastemperaturen von 200-400°C können Konvertierungsraten von bis zu 90% erreicht werden. Bei Temperaturen unter 200°C erfolgt keine ausreichende Oxidation von NO zu NO₂. Bei höheren Temperaturen nimmt die thermodynamische Stabilität der zur NO₂-Speicherung gebildeten Nitrate ab. Weiters verschiebt sich das thermodynamische Gleichgewicht mit steigender Temperatur immer mehr in Richtung NO (Abbildung 2.8). [8]

2.7.4 *Selektive katalytische Reduktion (SCR)*

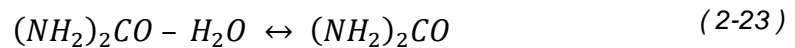
Die selektive katalytische Reduktion (SCR) wird schon seit den 70er Jahren bei stationären Feuerungsanlagen zur Entstickung des Abgases eingesetzt. In der mobilen Anwendung wurde dieses Verfahren zuerst bei schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt, im Hinblick auf immer strengere Emissionsgrenzwerte kommt es in den letzten Jahren jedoch auch vermehrt im PKW zum Einsatz. So erfolgte der Ersteinsatz in einem BMW X5 in der US-Ausführung bereits Ende 2008.

Die selektive katalytische Reduktion beruht darauf, dass Ammoniak (NH_3), welcher bei modernen SCR-Systemen im PKW zum Einsatz kommt, bevorzugt Stickoxide reduziert. Selektiv bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der in NO und NO_2 enthaltene Sauerstoff zur Reduktion herangezogen wird und nicht der im Dieselabgas in hoher Konzentration vorliegende molekulare Sauerstoff. Da Ammoniak aufgrund seiner toxischen Wirkung (stark reizend und lungenschädigend) nicht in reiner Form im Fahrzeug transportiert werden darf, wird NH_3 aus Harnstoff $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ im Fahrzeug erzeugt. Dieser wird als Harnstoff-Wasserlösung (HWL) mit 32,5 Massen-% Harnstoff (AdBlue) im Fahrzeug mitgeführt. Bei dieser Harnstoffkonzentration bildet das Gemisch ein Eutektikum, wodurch sich ein Minimum des Gefrierpunkts von -11°C ergibt und ein Entmischen der Komponenten bei Gefrieren verhindert wird. [4]

In der Vergangenheit wurden auch Systeme entwickelt, die in Salzkristallen gespeicherten Ammoniak zur Reduktion der Stickoxide einsetzen. Dieses Salz wird dabei in Kartuschen gespeichert und setzt das Reduktionsmittel bei Erwärmung frei. Aufgrund der geringen spezifischen Speichermenge sowie der höheren Betriebskosten kam es jedoch nicht zum Serieneinsatz dieser Systeme.

2.7.4.1 Reaktionsablauf

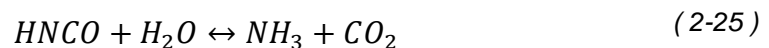
Die Bildung von NH_3 erfolgt in drei Schritten: Durch die Verdampfung der Harnstoff-Wasserlösung (HWL), welche in den Abgasstrom gesprüht wird, entsteht zunächst Harnstoff:



Durch die Thermolyse-Reaktion wird daraus NH_3 und HNCO (Isocyan Säure) gebildet:



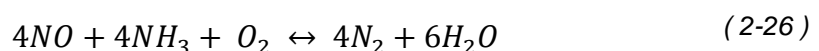
Die so entstandene Isocyan Säure wird durch die Hydrolyse mit Wasser zu NH_3 und CO_2 umgewandelt:



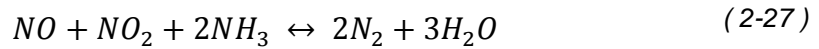
Damit es nicht zur Bildung von Ablagerungen (z.B. $(\text{HNCO})_3$) aus der Isocyan Säure kommt, müssen Flüssigkeitsansammlungen in kalten Bereichen des Abgasstrangs verhindert werden. Die Dosierung der Harnstoff-Wasserlösung erfolgt daher erst ab einer Temperatur am Mischer von ca. 180 – 200°C. [6], [8]

Nach der Aufbereitung des Harnstoffs zu Ammoniak erfolgt die Reduktion der Stickoxide im Katalysator. Diese kann prinzipiell auf drei verschiedenen Reaktionspfaden geschehen. Abhängig vom vorliegenden NO_2/NO_x -Verhältnis laufen bestimmte Reaktionen jedoch bevorzugt ab.

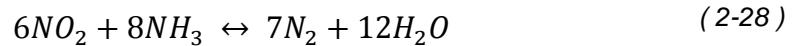
Die Standard-SCR-Reaktion erfolgt bevorzugt bei einem überwiegenden NO -Anteil:



Herrscht ein ausgeglichenes Verhältnis von NO_2 zu NO , im Idealfall 1:1, dann läuft hauptsächlich die sogenannte schnelle SCR-Reaktion ab:

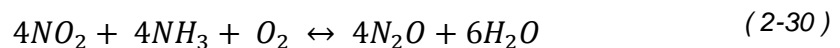
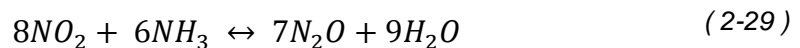


Überwiegt der NO_2 -Anteil, so läuft die langsame SCR-Reaktion bevorzugt ab:

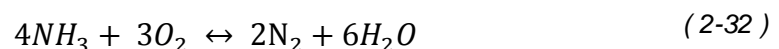
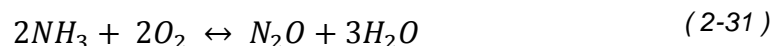


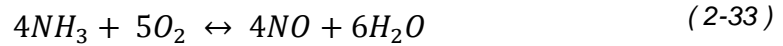
Um eine möglichst hohe Reaktionsgeschwindigkeit zu erzielen, sollte wie oben beschrieben ein Verhältnis von NO_2 zu NO angestrebt werden, welches möglichst nahe bei 1:1 liegt. Wie in Kapitel 2.7.1 erläutert, wird im DOC bzw. einem vorgeschalteten CSF NO zu NO_2 oxidiert, wodurch das NO_2/NO_x -Verhältnis beeinflusst werden kann. Für die Anordnung des SCR-Katalysators im Abgasstrang siehe Abbildung 2.24. [8]

Neben den Reaktionen der selektiven katalytischen Reduktion können im SCR-Katalysator jedoch auch weitere Nebenreaktionen ablaufen. Dazu zählt zum einen die Bildung von N_2O (Lachgas), welches ein um den Faktor 290 schädlicheres Treibhausgas als CO_2 ist [8]:



Bei hohen Abgastemperaturen spielt weiters die Oxidation des Reduktionsmittels NH_3 eine Rolle [8]:





Die Dosierung des Reduktionsmittels NH_3 erfolgt in Abhängigkeit des NO_x -Massenstroms vor dem SCR-Katalysator. Die benötigte NH_3 -Menge berechnet sich somit zu:

$$\dot{m}_{NH_3} = \alpha \cdot \dot{m}_{NO_x} \cdot f_{st} \quad (2-34)$$

mit dem Dosiermengenverhältnis

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{NH_3}}{\dot{m}_{NO_x}} \quad (2-35)$$

und dem stöchiometrischen Faktor, welcher sich je nach NO_2/NO_x -Verhältnis zwischen 0,37 (100% NO_2) und 0,57 (100% NO) bewegt:

$$f_{st} = \frac{M_{NH_3}}{M_{NO_x}} \quad (2-36)$$

$$M_{NH_3} = 17 \frac{kg}{kmol} \quad (2-37)$$

$$M_{NO} = 30 \frac{kg}{kmol} \quad (2-38)$$

$$M_{NO_2} = 46 \frac{kg}{kmol} \quad (2-39)$$

Ein Dosiermengenverhältnis von $\alpha = 1$ entspricht somit einer stöchiometrischen Dosierung.

2.7.4.2 Katalysatoreigenschaften

Grundsätzlich können SCR-Katalysatoren durch ihre katalytische Beschichtung in zwei Gruppen eingeteilt werden. Zum einen in Katalysatoren auf Vanadium-Basis, zum anderen in Katalysatoren auf Zeolith-Basis, genauer Eisen- oder Kupfer-Zeolith. Die einzelnen Typen unterscheiden sich in dem Temperaturbereich, in dem sie den maximalen Wirkungsgrad erreichen (siehe Abbildung 2.21), in der NH_3 -Speicherfähigkeit sowie in der Resistenz gegen die Vergiftung durch Schwefel. [8]

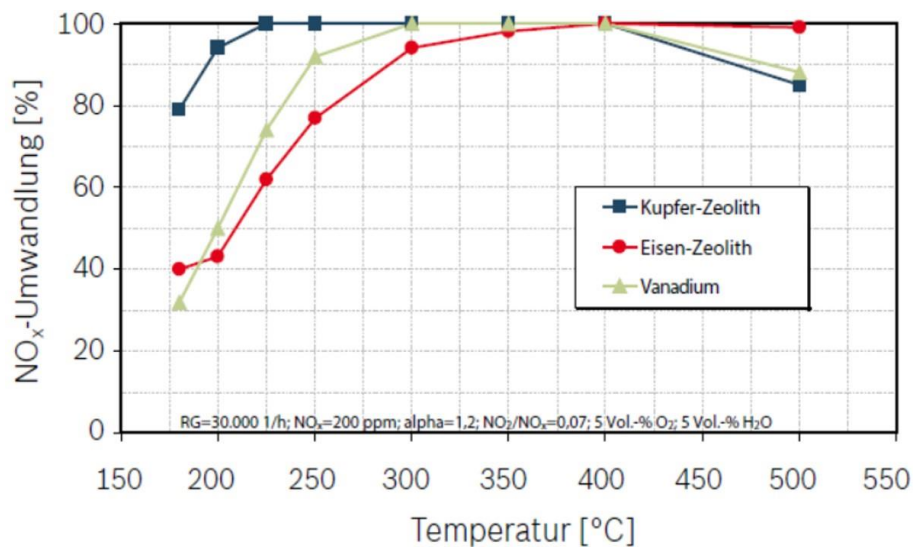


Abbildung 2.21: Temperaturbereich SCR-Technologien [12]

Vanadium-basierte SCR-Katalysatoren enthalten als katalytische Beschichtung Divanadiumpentoxid (V_2O_5). Der Vorteil dieser Katalysatoren ist die hohe Resistenz gegenüber im Kraftstoff enthaltenem Schwefel.

Als nachteilig erweist sich allerdings die äußerst geringe NH_3 -Speicherfähigkeit sowie die unzureichende thermische Stabilität, wodurch es zum Austrag des Vanadiums bei hohen Temperaturen kommt. [8]

Diese Katalysator-technologie kann daher nicht in Verbindung mit einer aktiven DPF-Regeneration eingesetzt werden. Vanadium-basierte Katalysatoren finden jedoch in Nutzfahrzeugen Anwendung, wo der CRT-Effekt zur Partikelfilterregeneration genutzt wird.

Weitaus stabiler bei hohen Temperaturen sind Katalysatoren auf Zeolith-Basis. Dabei handelt es sich um Alumosilikate, deren poröse Struktur aus AlO_4 - und SiO_4 -Tetraedern aufgebaut ist. Aufgrund ihrer Porosität im Vergleich zu Katalysatoren auf Vanadium-Basis besitzen sie eine größere spezifische Oberfläche. Somit können mit Cu-Zeolith-Katalysatoren bereits bei niedrigen Temperaturen gute Wirkungsgrade erzielt werden. Des Weiteren zeichnen sich diese Katalysatoren durch eine geringe Empfindlichkeit gegenüber HC-Emissionen aus, was speziell in der Kaltstartphase Vorteile mit sich bringt. Aufgrund dieser Eigenschaften werden diese Katalysatoren in der PKW-Anwendung vermehrt eingesetzt. SCR-Katalysatoren auf Fe-Zeolith-Basis eignen sich dagegen speziell für Hochtemperaturanwendungen (siehe Abbildung 2.21). [8]

In Abbildung 2.22 ist der Verlauf des Wirkungsgrads eines SCR-Katalysators über der Temperatur schematisch dargestellt:

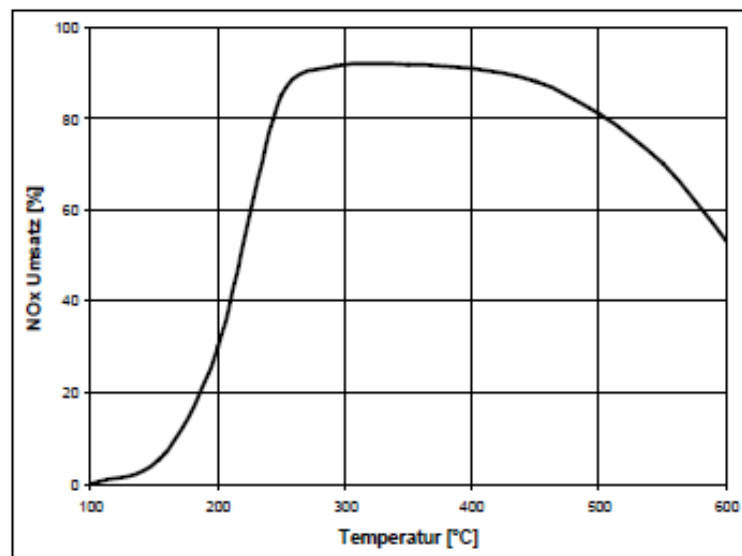


Abbildung 2.22: beispielhafte Wirkungsgradkennlinie SCR-Katalysator [12]

Vor allem Cu-Zeolithe zeichnen sich durch eine sehr gute NH_3 -Speicherfähigkeit aus. Die maximal im Katalysator speicherbare Menge an NH_3 nimmt jedoch mit steigender Temperatur stark ab.

Der Verlauf des Speichervermögens über der Temperatur ist schematisch in Abbildung 2.23 dargestellt:

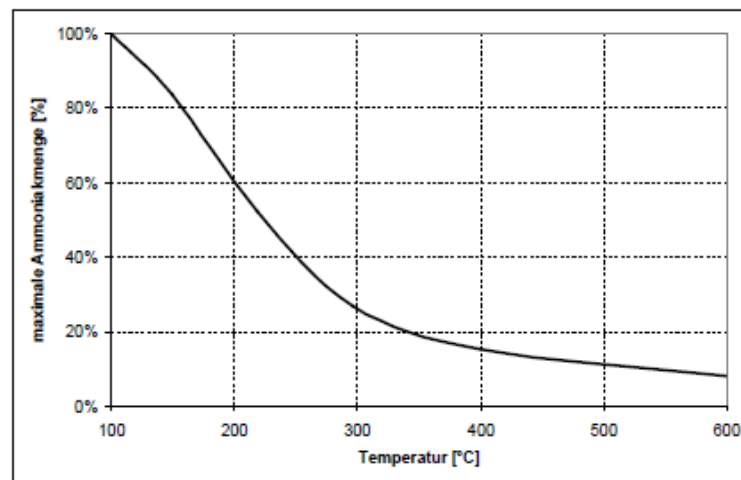


Abbildung 2.23: temperaturabhängiger maximaler NH₃-Füllstand [12]

Diese Speicherfähigkeit ist für den teilweise hoch-dynamischen Betrieb im PKW von großer Bedeutung und erfordert daher eine genau, modell-basierte Füllstandsrechnung.

In der von der Anhebung der HWL-Dosiermenge im Fall einer Beschleunigung bis zum Auftreffen des aufbereiteten NH₃ auf der Katalysatoroberfläche verstreichenden Zeit müssen die auftretenden Spitzen in der NO_x-Rohemission mit dem im Katalysator gespeicherten NH₃ umgesetzt werden. Der durch die DCU (Dosiersteuergerät, Dosing Control Unit) vorgegebene Soll-Füllstand muss jedoch so gewählt werden, dass auch bei einem starken Anstieg der mittleren Katalysatortemperatur kein NH₃-Schlupf durch das Absinken der NH₃-Speicherfähigkeit auftreten kann.

2.7.4.3 Aufbau SCR-System

In Abbildung 2.24 ist der schematische Aufbau eines Abgasnachbehandlungssystems mit SCR-Katalysator und notwendiger Sensorik wie es in der Serienanwendung zum Einsatz kommt, dargestellt:

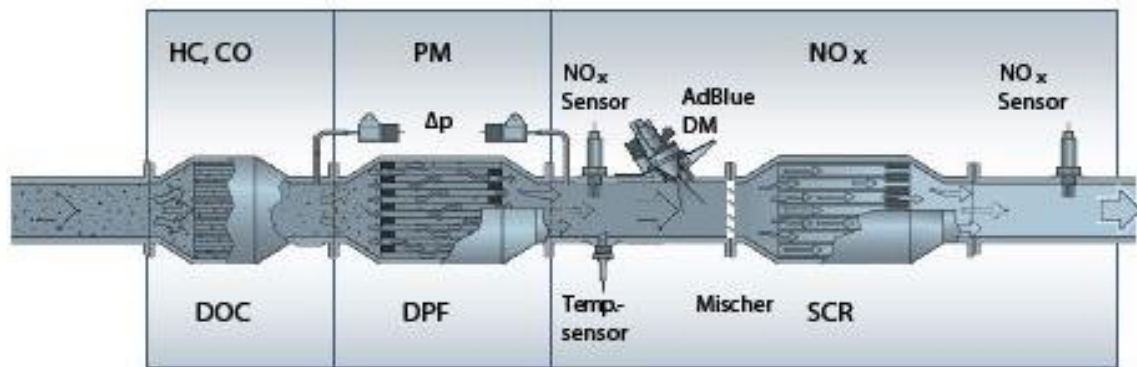


Abbildung 2.24: Aufbau Abgasnachbehandlungssystem mit SCR-Katalysator [12]

Die Dosierung der Harnstoff-Wasserlösung erfolgt durch das Dosiermodul nach dem Partikelfilter in das Abgasrohr. Vor dem SCR-Katalysator ist ein Mischer verbaut, auf welchem die auftreffenden HWL-Tröpfchen verdampfen und die in Kapitel 2.7.4.1 beschriebene Thermolyse-Reaktion stattfindet. Weiters kann so die Durchmischung des Reduktionsmittels mit dem Abgas gewährleistet werden. Wie in den vorangehenden Kapiteln erläutert, ist die mittlere Temperatur des Katalysators von großer Bedeutung für den Wirkungsgrad des Katalysators. Das Ausgangssignal des vor dem Katalysator verbauten Temperatursensors dient deshalb als Eingangsgröße für ein in der Motorsteuerung hinterlegtes Temperaturmodell des Katalysators.

Weiters sind NO_x-Sensoren vor und nach dem SCR-Katalysator verbaut. Ersterer erfasst die NO_x-Konzentration vor dem SCR-System und dient zur Berechnung der benötigten HWL-Dosiermenge. Der NO_x-Sensor hinter dem Katalysator wird zur Ermittlung des erzielten Katalysatorwirkungsgrades herangezogen.

Auf die Berechnung der HWL-Dosiermenge, welche sich aus einem Online-Anteil, einem Füllstandsanteil und einem Oxidationsanteil zusammensetzt, soll in Kapitel 3 näher eingegangen werden.

2.8 Abgasmesstechnik

In diesem Kapitel sollen die zur Messung der Schadstoffkomponenten NO_x und NH₃ und eingesetzten Sensoren erläutert werden.

2.8.1 NO_x-Sensor

In Abbildung 2.25 ist der schematische Aufbau eines NO_x-Sensors, wie er in modernen Diesel-PKW zum Einsatz kommt, dargestellt. Das Sensorelement besteht aus Zirkonoxid-Keramik (ZrO₂) und beinhaltet zwei Kammern, welche durch eine Diffusionsbarriere getrennt sind. In der ersten Kammer wird ein definierter Sauerstoffgehalt durch Anlegen eines Pumpstroms an der Pumpelektrode eingestellt. Der hierfür notwendige Strom ist proportional zum Luftverhältnis λ . In der zweiten Kammer des Sensorelements werden die im Abgas enthaltenen Stickoxide zu Luftstickstoff und Sauerstoff reduziert. Der dabei freiwerdende Sauerstoff wird mittels einer weiteren Pumpelektrode aus der Kammer gepumpt. Der benötigte Pumpstrom, um die Kammer frei von Sauerstoff zu halten, ist proportional zur Stickoxidkonzentration im Abgas und dient somit als Messsignal. [2]

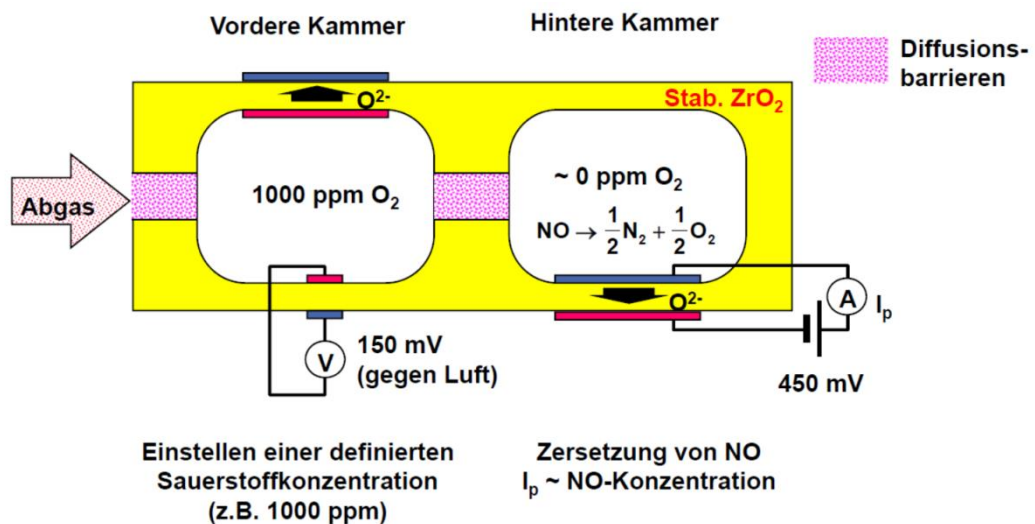


Abbildung 2.25: schematischer Aufbau NO_x-Sensor [21]

2.8.2 NH₃-Sensor

Der schematische Aufbau des eingesetzten NH₃-Sensors ist in Abbildung 2.26 dargestellt. Der Sensor besteht aus einer NH₃-Elektrode sowie einer Referenzelektrode. Der Festkörperelektrolyt besteht aus Zirkonoxid (ZrO₂) (gelb dargestellt).

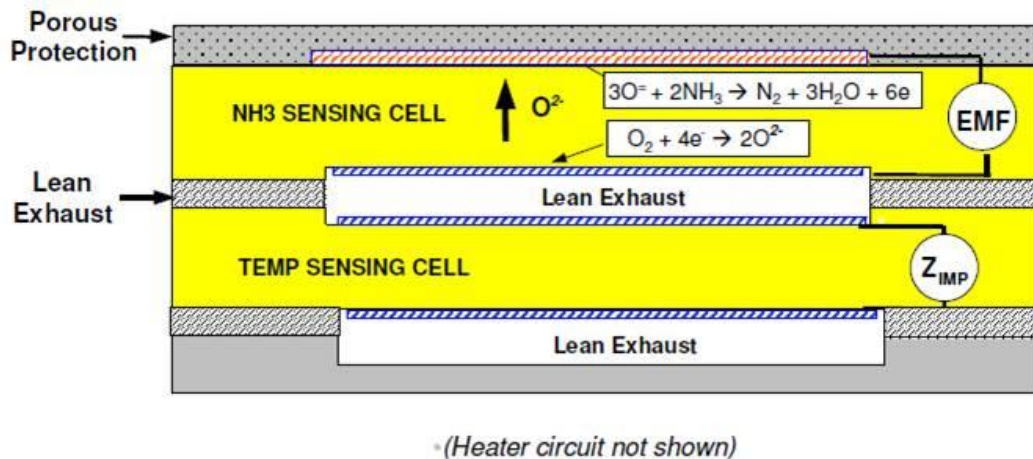
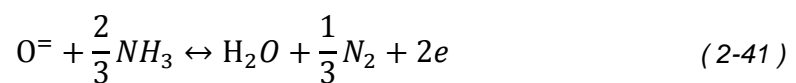


Abbildung 2.26: schematischer Aufbau NH₃-Sensor [20]

An der NH₃-Elektrode laufen folgende elektrochemische Reaktionen ab, wobei O⁼ das Oxid-Ion bezeichnet:



An der Referenzelektrode läuft nur Reaktion (2-40) ab, wodurch sich eine Potentialdifferenz zwischen Referenz- und NH₃-Elektrode einstellt. Die elektromotorische Kraft (EMF) ist proportional zur NH₃ Konzentration c_{NH_3} im Abgas: [20]

$$\text{EMF} \approx \frac{kT}{3e} \cdot \ln(c_{\text{NH}_3}) - \frac{kT}{4e} \cdot \ln(c_{\text{O}_2}) - \frac{kT}{2e} \cdot \ln(c_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2-42)$$

3. Erweiterte Aufgabenstellung

3.1 Systembeschreibung Füllstandsrechnung

Um einen wirkungsgradoptimalen Betrieb des SCR-Katalysators und vor allem um einen NH₃-Schlupf zu vermeiden, muss die Menge des eingespritzten Reduktionsmittels in Abhängigkeit des eingestellten Motorbetriebspunkts in der Motorsteuerung berechnet werden. Da nicht alle Einflussgrößen gemessen werden können, sei es aus Kostengründen oder auf Grund von messtechnisch nicht erfassbaren Größen, werden hierzu Modelle verwendet.

SCR-Katalysatoren lagern bei einer überstöchiometrischen Dosierung des Reduktionsmittels (Harnstoff-Wasserlösung - AdBlue) eine mit steigender Temperatur geringer werdende Menge an NH₃ in ihrem Inneren ein. Dieser Füllstand hat einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Katalysators, kann aber messtechnisch nicht erfasst werden. Die Berechnung des Katalysatorfüllstands erfolgt daher über die Massenbilanz am Katalysator. Der NH₃-Füllstand $m_{NH3_{Ld}}$ berechnet sich aus dem Integral über die eingespritzte Menge an NH₃ $dm_{NH3_{inj}}$ abzüglich der umgesetzten NH₃-Menge $dm_{NH3_{conv}}$, der oxidierten NH₃-Menge $dm_{NH3_{oxi}}$ sowie dem Anteil an NH₃-Schlupf hinter dem SCR-Katalysator $dm_{NH3_{slip}}$.

$$m_{NH3_{Ld}} = \int (dm_{NH3_{inj}} - dm_{NH3_{conv}} - dm_{NH3_{oxi}} - dm_{NH3_{slip}}) dt \quad (3-1)$$

Für die Berechnung der zu dosierenden Menge an Ammoniak ist der Schlupfanteil in der Bilanz vernachlässigbar, da ein solcher durch eine dementsprechende Bedatung des Modells unter allen Umständen zu vermeiden ist. Damit ergibt sich die benötigte NH₃-Menge aus einem Füllstandsanteil $dm_{NH3_{Ld}}$, um die Differenz zwischen Soll- und Ist-Füllstand auszugleichen, einem zur Umsetzung des momentanen NO_x-Massenstroms notwendigen Anteil $dm_{NH3_{conv}}$ sowie einem Oxidationsanteil $dm_{NH3_{oxi}}$, da mit steigender Temperatur ein Teil des eingespritzten NH₃ oxidiert.

$$dm_{NH3_{inj}} = dm_{NH3_{conv}} + dm_{NH3_{oxi}} + dm_{NH3_{Ld}} \quad (3-2)$$

Der Anteil zum Umsatz des momentanen NO_x-Massenstroms ergibt sich aus dem mit dem NO_x-Sensor vor SCR gemessenen NO_x-Massenstrom dm_{NOx} , dem berechneten, aktuellen Wirkungsgrad des Katalysators eta_{SCR} und einem stöchiometrischen Faktor f_{st} , welcher in Abhängigkeit des NO₂/NO_x-Verhältnisse die benötigte Menge an NH₃ angibt, die zum Umsatz von 1g NO_x nötig ist.

$$dm_{NH3_{conv}} = dm_{NOx} \cdot eta_{SCR} \cdot f_{st} \quad (3-3)$$

In Abbildung 3.1 ist der Vorgang der Berechnung der Dosiermenge schematisch dargestellt:

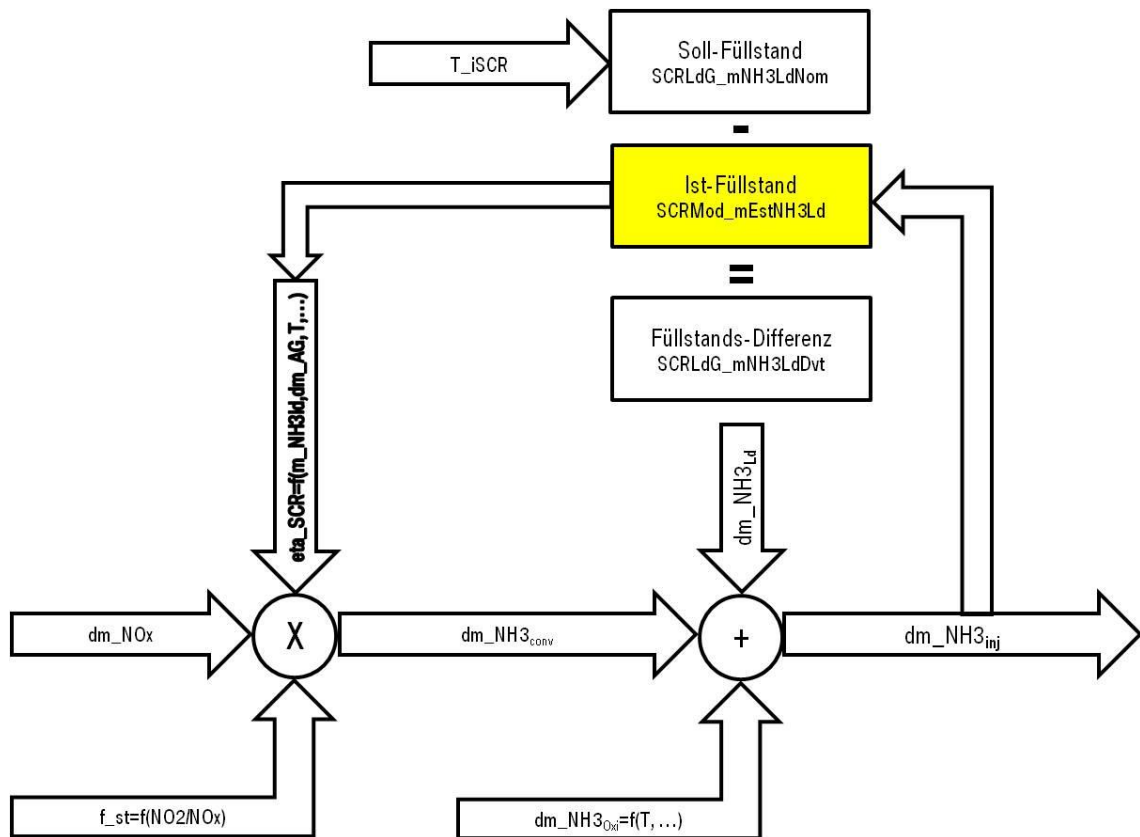


Abbildung 3.1: Berechnung Dosiermenge

Neben der mittleren Temperatur im SCR-Katalysator T_{SCR} spielen auch die Höhe des NH_3 -Füllstands $m_{NH_3_{Ld}}$, der Abgasmassenstrom dm_{AG} sowie die NO_x -Konzentration im Abgas c_{NO_x} eine entscheidende Rolle bei der Berechnung des Katalysatorwirkungsgrades η_{SCR} .

Diese Einflüsse werden in Kennfeldern, welche in Prüfstands- und Fahrzeugversuchen ermittelt wurden, im Berechnungsmodell des Katalysators hinterlegt und miteinander verrechnet (schematisch in Abbildung 3.2 dargestellt).

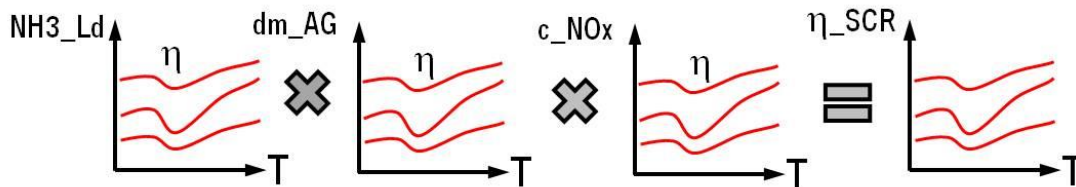


Abbildung 3.2: Wirkungsgradkennlinien SCR-System

In Abbildung 3.3 ist die Serien-Abgasanlage eines BMW F11 (5er Touring) in der US-Version dargestellt. Nach dem gemeinsamen Canning für NSC und DPF (1) ist der NO_x -Sensor (2) verbaut, welcher zur Bestimmung des NO_x -Massenstroms vor dem SCR-Katalysator (6) dient. Die Dosierung des Reduktionsmittels erfolgt durch das Dosiermodul (3) in das Vorrohr (4). Die mittlere Katalysatortemperatur wird über den Temperatursensor (5) ermittelt. Zur Bestimmung des NO_x -Massenstroms nach dem SCR-Katalysator und damit auch des SCR-Wirkungsgrades dient der NO_x -Sensor (7) nach dem SCR-Katalysator.

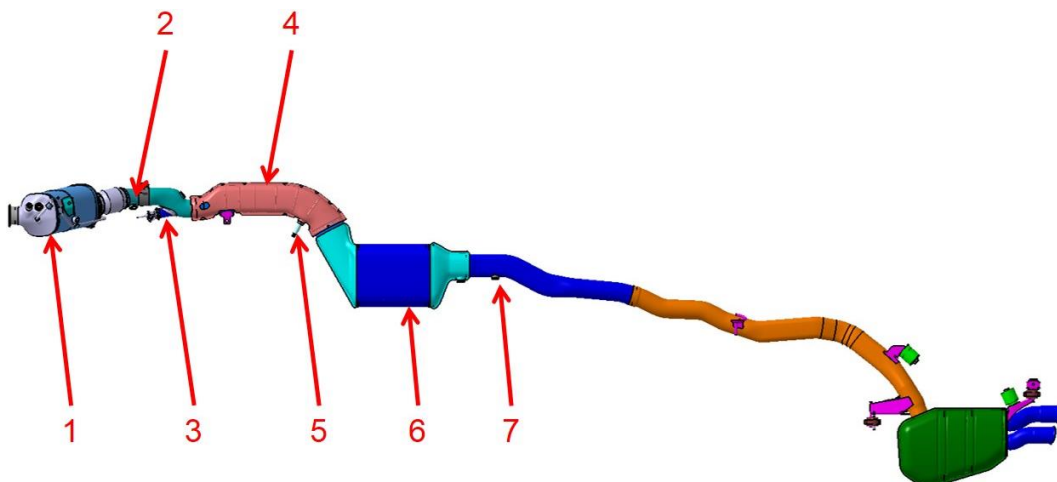


Abbildung 3.3: Serien-Abgasanlage BMW F11US

3.2 Problemstellung

Im Unterschied zum Stationärbetrieb muss im realen Fahrbetrieb immer mit einer Beschleunigung und damit mit einer schlagartigen Lasterhöhung gerechnet werden. Die mit einer Lasterhöhung einhergehende Temperaturerhöhung im Katalysator hat ein Absinken des NH_3 -Speichervermögens zur Folge. Da ein NH_3 -Schlupf unbedingt zu vermeiden ist, werden die Modelle für den Serieneinsatz eher konservativ bedatet, mit der Folge, dass der NH_3 -Soll-Füllstand $\text{SCR}_{\text{LdG_mNH}_3\text{LdNom}}$ bei hohen Temperaturen ($T_{\text{SCR}} > 350^\circ\text{C}$) auf ein relativ niedriges Niveau abgesenkt wird. Während des Betriebs über einen längeren Zeitraum kann es zu einer Abweichung zwischen dem im Modell berechneten Ist-Füllstand $\text{SCR}_{\text{Mod_mEstNH}_3\text{Ld}}$ und der tatsächlich im Katalysator gespeicherten Menge an NH_3 kommen. Der Grund dafür kann unter anderem in der Drift der Dosiermenge über die Laufzeit durch mechanischen Verschleiß, in der zu ungenauen Berechnung des Oxidationsanteils der dosierten HWL-Menge oder in der Abweichung des tatsächlichen Wirkungsgrads des SCR-Katalysators liegen. Diese Abweichungen sind gerade im Bereich über 350°C kritisch, da das Füllstandsniveau durch die Applikation hier bereits sehr niedrig ist.

In Abbildung 3.4 bis Abbildung 3.6 werden die Auswirkungen dieser Abweichungen dargestellt. In Abbildung 3.4 ist ersichtlich, dass der berechnete Füllstand dem applizierten Soll-Füllstand entspricht.

Der tatsächliche Füllstand im SCR-Katalysator liegt aber irgendwo innerhalb des rot markierten Bereichs darunter. Kommt es nun zu einer Temperaturerhöhung (der Betriebspunkt wandert somit weiter nach rechts, Abbildung 3.5), sinkt der Soll-Füllstand ab.

Der berechnete Füllstand ist somit zu hoch und muss abgesenkt werden, der Füllstandsanteil der Dosiermenge wird dadurch reduziert. Durch diese Absenkung (Abbildung 3.6) kann es dazu kommen, dass der reale Füllstand gegen Null geht. Das wiederum hat zur Folge, dass der NO_x -Umsatz einbricht und die Stickoxidemissionen somit steigen.

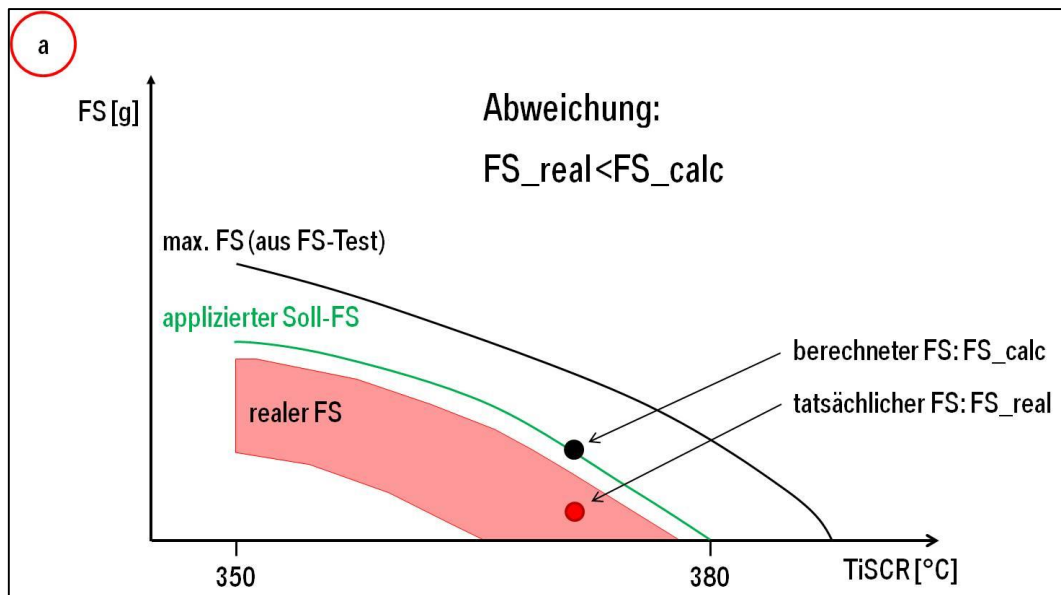


Abbildung 3.4: Differenz Modell-Realität SCR-Katalysator 1

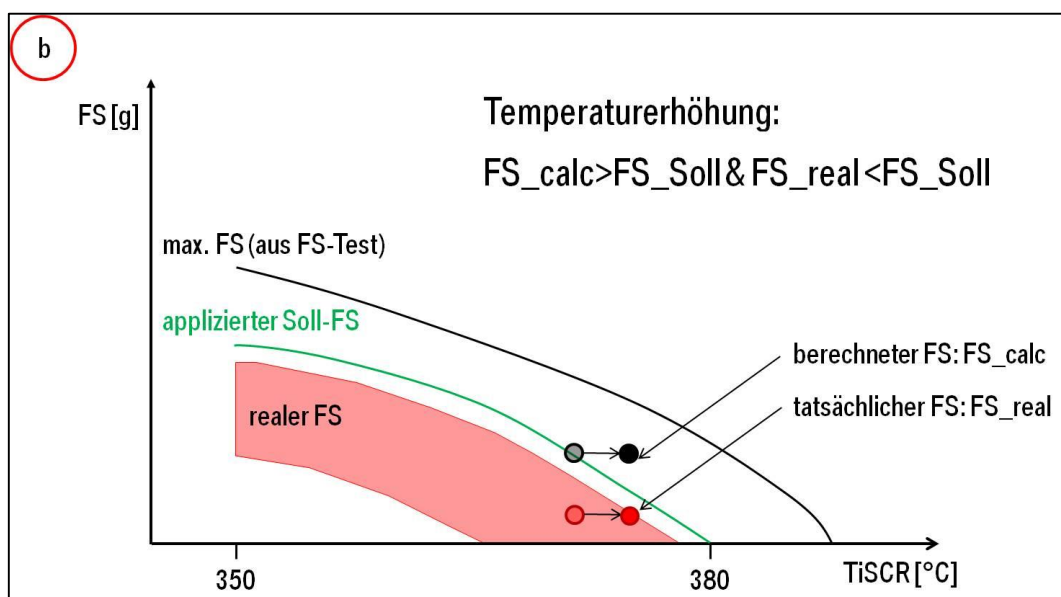


Abbildung 3.5: Differenz Modell-Realität SCR-Katalysator 2

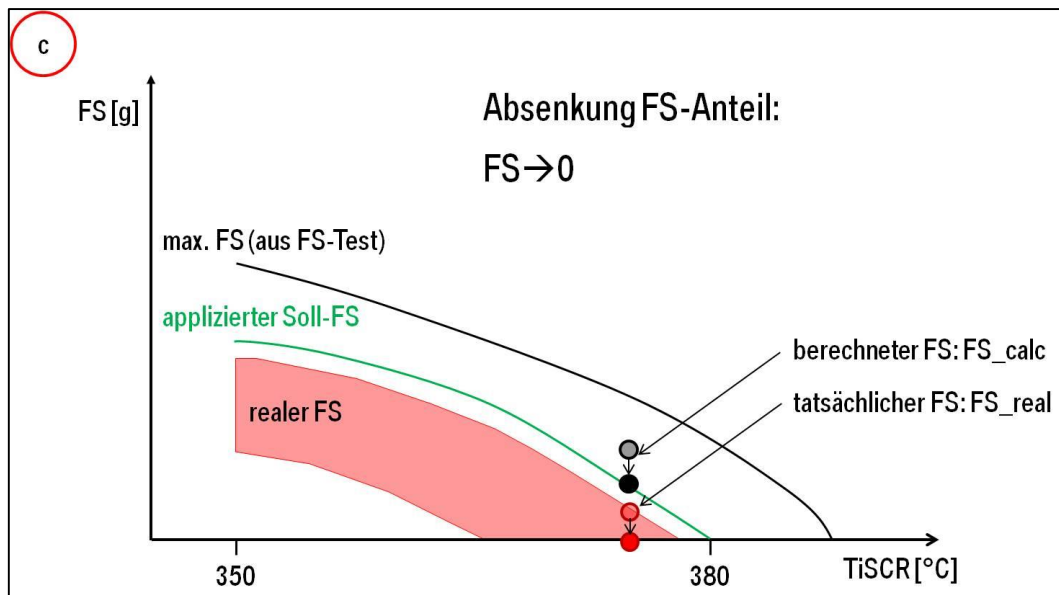


Abbildung 3.6: Differenz Modell-Realität SCR-Katalysator 3

Dieses Verhalten kann anhand des Beispiels eines BMW F25 (BMW X3) mit 4-Zylinder Dieselmotor und SCR-System im US-06-Zyklus gezeigt werden. Im Bereich zwischen Sekunde 2750 und 3000 (rot markierter Bereich in Abbildung 3.7) wird der Soll-Füllstand aufgrund der hohen Temperatur auf ca. 0,4g NH₃ abgesenkt. Die Dosiermenge dm_{NH_3} wird dementsprechend zurückgenommen und der berechnete Ist-Füllstand folgt der Soll-Füllstandslinie.

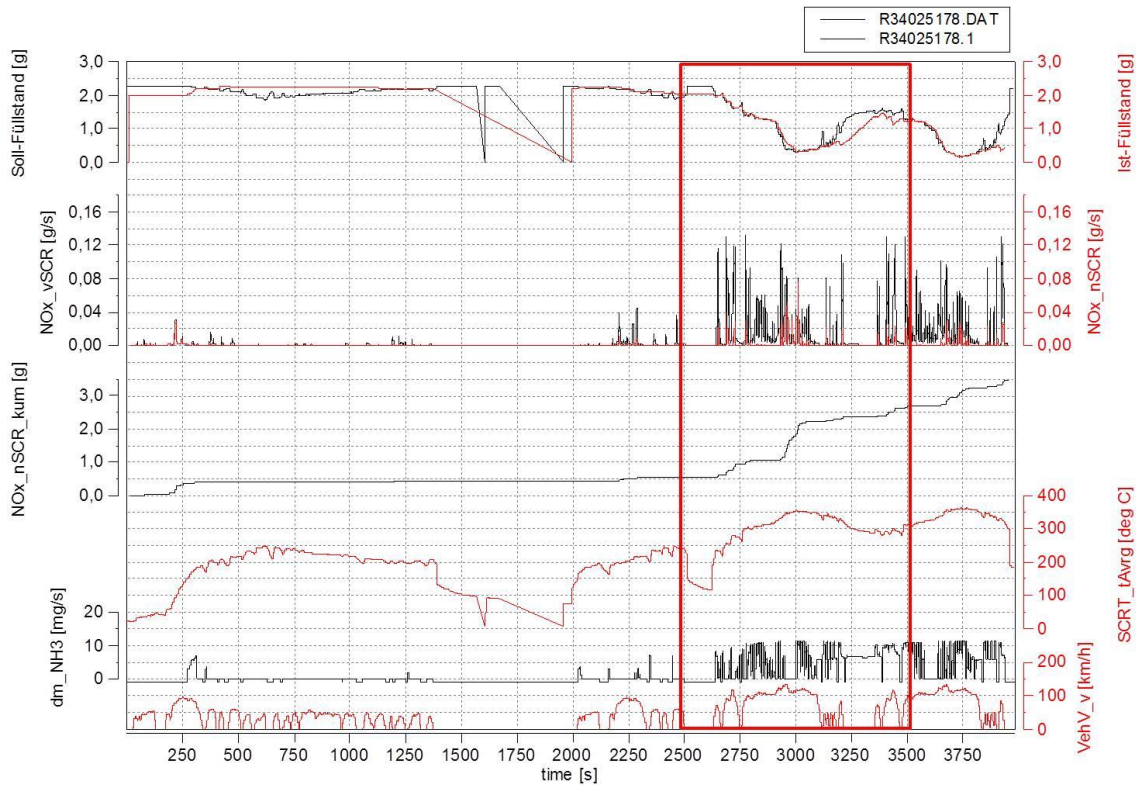


Abbildung 3.7: BMW F25 US-06 NOx-Durchbruch

Aus der Detailansicht in Abbildung 3.8 ist ersichtlich, dass im Bereich zwischen Sekunde 2900 und 3050 hohe NO_x-Emissionsspitzen nach dem SCR-Katalysator auftreten (NO_xnSCR). In diesem Bereich weisen die kumulierten NO_x-Emissionen (NO_xnSCR_kum) die größte Steigung auf, obwohl laut dem Katalysatormodell in der Motorsteuerung noch ca. 0,4g NH₃ im Katalysator gespeichert sind. Somit kann dieses Phänomen auf den Unterschied zwischen berechnetem und realem Füllstand und dem damit verbundenen Absinken des Füllstands auf 0 zurückgeführt werden (siehe Abbildung 3.6 und Abbildung 3.9).

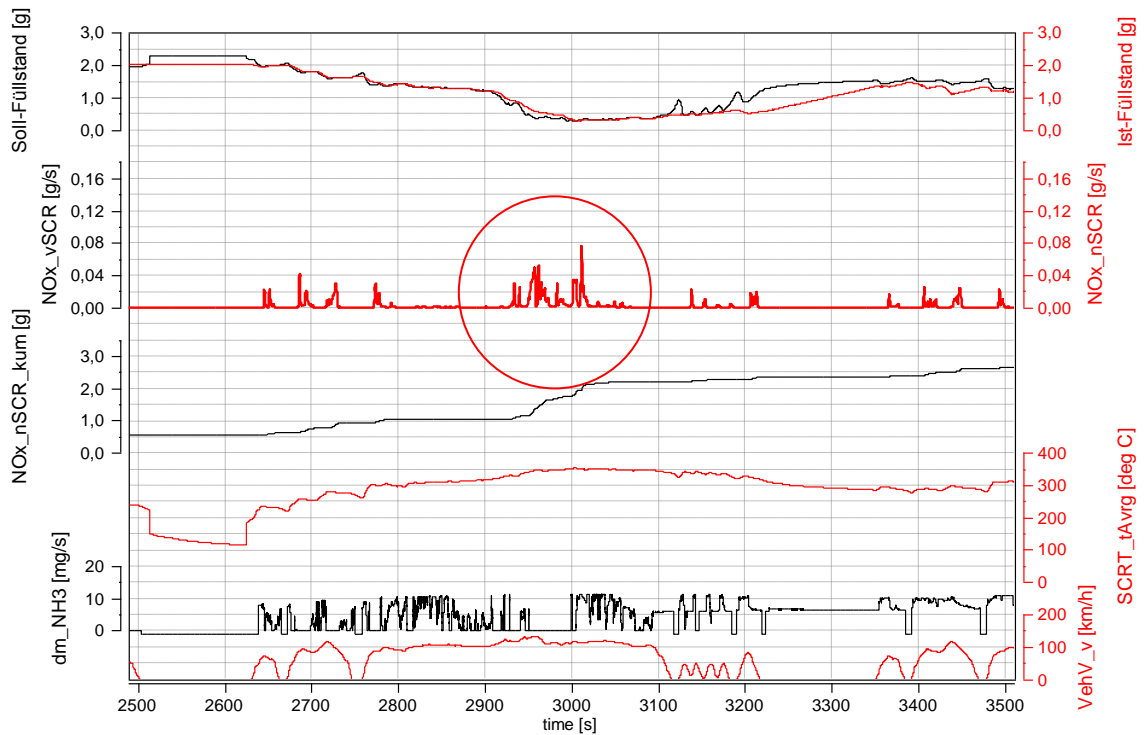


Abbildung 3.8: BMW F25 US-06 NOx-Durchbruch Detail1

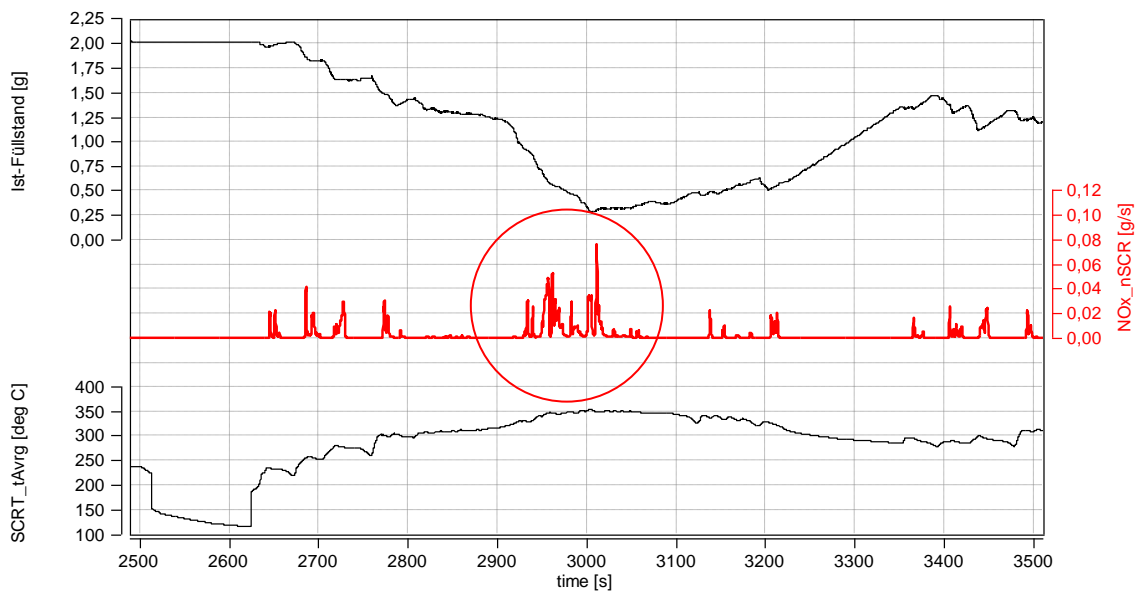


Abbildung 3.9: BMW F25 US-06 NOx-Durchbruch Detail2

Ziel dieser Arbeit ist es daher, das bestehende SCR-System in Bezug auf Hard- und Software dahingehend zu optimieren, dass in Temperaturbereichen oberhalb von 350°C mittlerer Katalysatortemperatur ein vollständiges Entleeren des Katalysators verhindert wird und somit Wirkungsgradsteigerungen hinsichtlich NOx-Umsatz erzielt werden können.

4. Systemkonzept Füllstandsregelung

4.1 Konzeptbeschreibung

Durch die Forderung, den SCR-Katalysator in Betriebsbereichen mit hohen Katalysatortemperaturen mit optimalem Wirkungsgrad zu betreiben, ergibt sich die Notwendigkeit, den NH₃-Füllstand so nah wie möglich an sein Maximum heranzuführen. Hierfür soll der Katalysator ab einer bestimmten Umschalttemperatur durch eine überstöchiometrische Dosierung des Reduktionsmittels bewusst über der Schlupfgrenze betrieben werden. Durch den Einsatz eines NH₃-Sensors kann die NH₃-Konzentration nach dem SCR-Katalysator gemessen werden, und so als Rückführgröße in einem geschlossenen Regelkreis dienen (Abbildung 4.1).

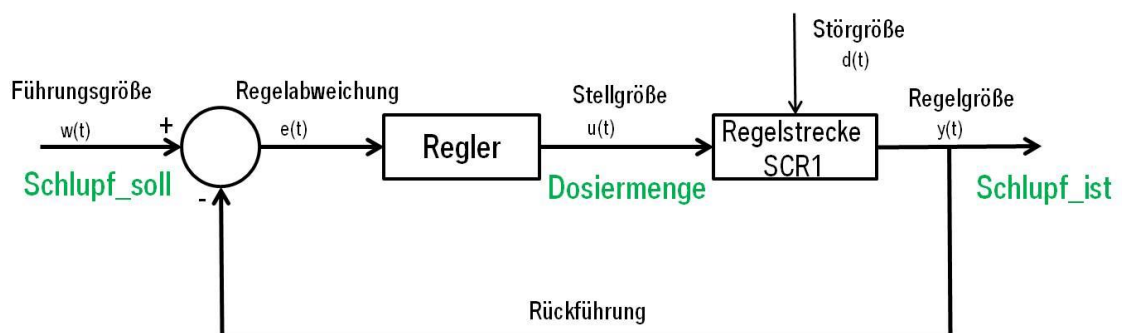


Abbildung 4.1: Regelkreis SCR-System

Voraussetzung für den Einsatz einer Regelung des NH₃-Schlupfs nach dem SCR-Katalysator ist ein ausreichend schnelles Ansprechen der Regelgröße (des gemessenen NH₃-Schlupfs) auf eine Änderung der Stellgröße (der NH₃-Dosiermenge). Die Systemeigenschaften der eingesetzten Versuchsabgasanlage (siehe Kapitel 4.2) wurden daher wie in den folgenden Kapiteln beschrieben am Motorprüfstand untersucht.

4.2 Hardware Abgasanlage

Der prinzipielle Aufbau der Versuchs-Abgasanlage ist in Abbildung 4.2 ersichtlich. Nach dem Oxidationskatalysator (DOC – Diesel Oxidation Catalyst) und dem Rußpartikelfilter (CSF – Catalyzed Soot Filter) erfolgt die Dosierung der Harnstoff-Wasser Lösung (HWL – AdBlue) durch das Dosiermodul in das Vorrohr. Um ausreichend Turbulenz für eine gute Durchmischung und Aufbereitung des Reduktionsmittels im Abgasstrom zu erzeugen, ist ein Mischer nach dem Dosiermodul verbaut. Konstruktiv bedingt kommt es zu einer Ungleichverteilung des auftreffenden NH_3 s am Eintrittsquerschnitt von SCR-Katalysator 1 (im Folgenden SCR 1 genannt). Daher tritt der NH_3 -Schlupf bei Erreichen des maximalen Füllstands von SCR 1 nicht von Beginn an gleichmäßig über den ganzen Austrittsquerschnitt auf. Um die Erfassung von einzelnen NH_3 -Strähnen im Abgasstrom durch die Messtechnik zu verhindern, ist im Zwischenrohr ein weiterer Mischer verbaut.

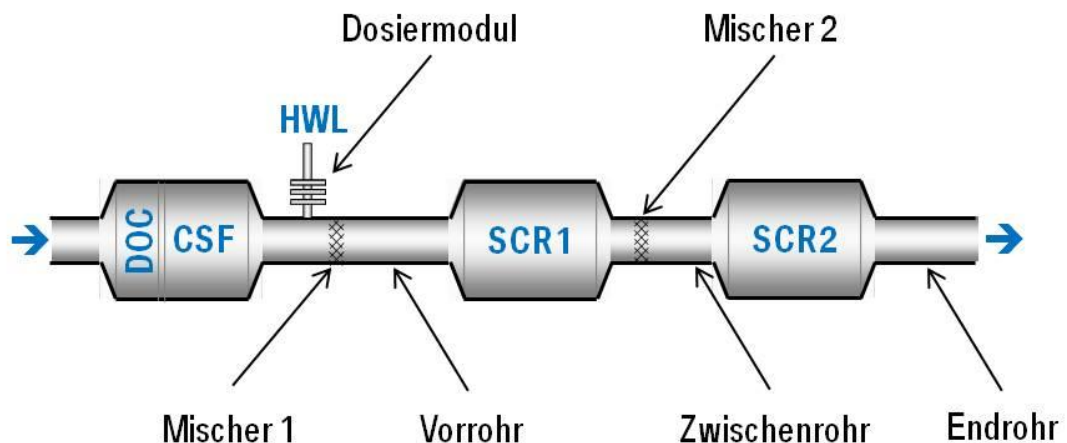


Abbildung 4.2: Schema Aufbau Versuchs-AGA HW

Da bei der im vorigen Kapitel erläuterten Betriebsstrategie erhöhte NH_3 -Konzentrationen (>10 ppm) nach SCR 1 auftreten, muss eine zusätzliche Komponente zur Umwandlung bzw. Speicherung der NH_3 -Emission vorgesehen werden. Die Wahl fiel auf eine Systemkonfiguration mit 2 SCR-Katalysatoren auf Cu-Zeolith Basis in Serie. Dadurch kann ein früher NO_x -light-off am ersten Katalysator sowie die sichere Einspeicherung des auftretenden NH_3 -Schlupfs in SCR2 gewährleistet werden (siehe Kapitel 2.7.4.2).

Hierbei wird nur der erste Katalysator aktiv betrieben, das heißt die Berechnung und Steuerung des Füllstands erfolgt nur für SCR 1.

4.3 Sensorik

Um den NH₃-Schlupf nach SCR 1 zu erfassen, wird im Zwischenrohr ein NH₃-Sensor verbaut (Abbildung 4.3). Dieser wird über die sogenannte „MicroAuto-Box“, ein Rapid-Prototyping Modul der Firma dSPACE, in die Motorsteuerung DDE (digitale Dieselelektronik) eingebunden (siehe Kapitel 4.4). Weiters wird im Zwischenrohr ein NO_x-Sensor verbaut, welcher zur Bestimmung des Wirkungsgrads von SCR 1 dient. Da an dieser Messposition Konzentrationen von NH₃ und NO_x auftreten, ist hier die Messwertverfälschung bei Schlupf durch die Querempfindlichkeit des NO_x-Sensors auf NH₃ zu beachten. Dieser Sensor wird zur Aufzeichnung des Messwerts in das Mess- und Applikationsprogramm INCA der Firma ETAS eingebunden.

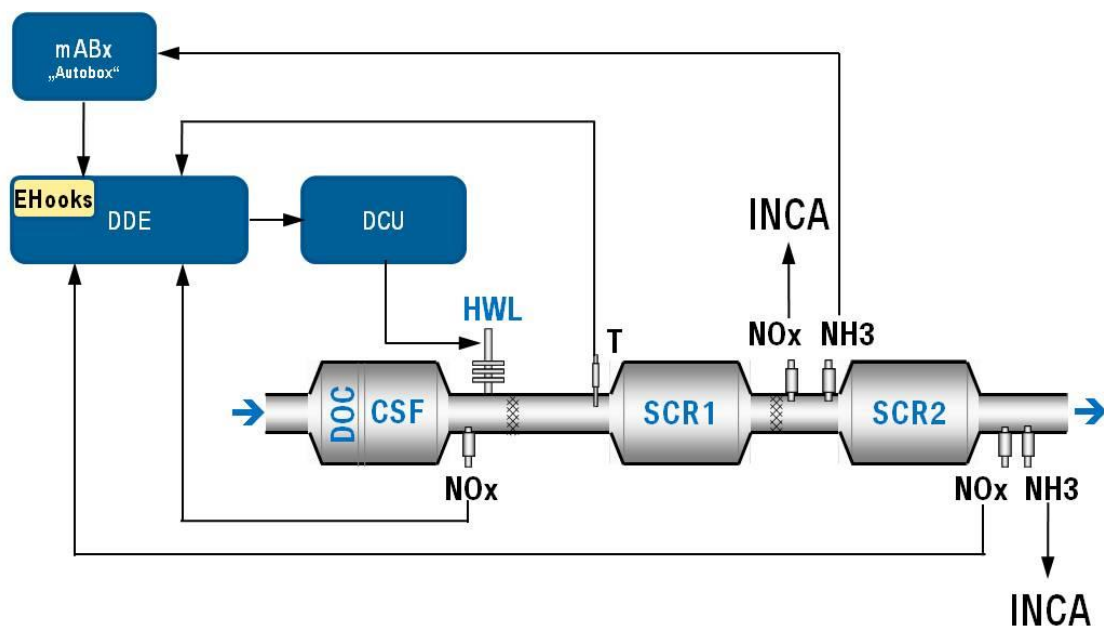


Abbildung 4.3: Schema Aufbau Versuchs-AGA Sensorik

Im bestehenden Modell des SCR-Katalysators in der Motorsteuerung dienen die NO_x-Sensorwerte nach CSF sowie nach dem SCR-System bereits als Eingangsrößen.

Erster liefert als Ausgangssignal die NO_x-Konzentration, welche dem Modell zur Berechnung des aktuellen NO_x-Massenstroms und somit der benötigten Dosiermenge dient (siehe Kapitel 3). Dies wird so übernommen, mit dem Unterschied, dass bei dem in der Serie eingesetzten System nur ein SCR-Katalysator verbaut ist. Der NO_x-Sensor nach dem SCR-System befindet sich somit hinter SCR 2 und erfasst die NO_x-Konzentration nach dem Gesamtsystem. Um etwaigen NH₃-Schlupf nach SCR 2 zu erkennen, kommt hier ein zweiter NH₃-Sensor zum Einsatz. Dieser wird wie der NO_x-Sensor im Zwischenrohr in INCA eingebunden.

Des Weiteren ist in Abbildung 4.3 ersichtlich, dass die Ansteuerung des Dosiermoduls über ein eigenes Steuergerät, DCU genannt (Dosing Control Unit), erfolgt, welche mit der Motorsteuerung verbunden ist.

4.4 MicroAutoBox

Zur Einbindung externer Sensorik in die Motorsteuerung, in diesem Fall des NH₃-Sensors im Zwischenrohr, wird die MicroAutoBox der Firma dSPACE verwendet (Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: MicroAutoBox [14]

Hierbei handelt es sich um ein Echtzeitsystem für Rapid Prototyping Anwendungen. Die MicroAutoBox verfügt in der Ausführung 1401 über 2 CAN-Schnittstellen und kann mittels Ethernet mit einem PC verbunden werden. Auf dem Modul können ähnlich einem Steuergerät autonom Programme laufen, die z.B. mit MATLAB Simulink erstellt wurden.

Über die Verbindung zum PC können die erstellten Programme auf das Modul heruntergeladen werden oder die Ein- und Ausgangssignale mit dem Programm dSPACE Control Desk aufgezeichnet und manipuliert werden. [15]

Im Falle der vorliegenden Arbeit wurde die MicroAutoBox mit dem NH₃-Sensor und dem Sensor-CAN des Steuergeräts über die beiden CAN-Schnittstellen verbunden. Die Aktivierung des Sensors sowie die Freigabe zum Aufheizen der Sensorzelle erfolgt manuell über dSPACE Control Desk. Der Messwert wird vom NH₃-Sensor auf die MicroAutoBox übertragen und von dort über den Sensor-CAN in die DDE eingelesen. Dabei wird das Signal auf die Adresse des Partikelsensors in der Motorsteuerung gesendet. Da dieser Sensoreingang in der Motorsteuerung vorgesehen ist, der Partikelsensor aber nicht verwendet wird, kann er als Eingang für den NH₃-Sensor verwendet werden.

4.5 Software – EHOOKS

Das Softwarewerkzeug EHOOKS dient dazu, einfach und schnell Änderungen in der Steuergerätesoftware durchzuführen, ohne dabei auf den Steuergerätehersteller angewiesen zu sein. Dabei kann eine Steuergerätegröße (z.B. die in der Motorsteuerung berechnete AdBlue-Dosiermenge) durch einen in einem neuen Modell berechneten Wert ersetzt werden (sogenanntes On-Target Bypassing). Dieses Modell kann mit Matlab Simulink erstellt werden und wird direkt auf dem Steuergerät ausgeführt. Dabei können sowohl bestehende Steuergerätegrößen als auch die Messgrößen, welche über die MicroAutoBox in die Motorsteuerung eingebunden wurden, im Modell verwendet werden. [16]

4.6 Versuchsprogramm Motorprüfstand

Das Versuchsprogramm wurde mit dem Ziel gewählt, einen möglichst umfassenden Überblick über das Verhalten des SCR-Katalysators im Hinblick auf das Regelungskonzept sowie der eingesetzten Sensorik zu erlangen. Dazu wurden die in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Untersuchungen am System im Neuzustand sowie nach einer 50-stündigen Alterung der Komponenten am Motorprüfstand durchgeführt.

4.6.1 Ermittlung des NH_3 -Speichervermögens

Wie bereits in Kapitel 2.7.4 erläutert, sinkt die Menge an NH_3 , die im SCR-Katalysator eingelagert werden kann, mit steigender Temperatur. Um den genauen Verlauf des maximalen Füllstands über der mittleren Katalysatortemperatur $T_{i\text{SCR}}$ zu ermitteln, wurde der Katalysator bei unterschiedlichen Temperaturen bis zum Schlupfen befüllt (entspricht 100% Füllstand). Die Befüllung erfolgte dabei mit einer 30-prozentigen Überdosierung des Reduktionsmittels, was einem Dosiermengenverhältnis von $\alpha = 1,3$ entspricht. Durch dieses relativ langsame Befüllen kann ein schlagartiges Übergehen des Katalysators und das damit verbundene Überschwingen der NH_3 -Konzentration nach dem Katalysator verhindert werden. Ein Überschwingen würde einen negativen Effekt auf die Genauigkeit des berechneten NH_3 -Füllstands haben. Beim Erreichen von einer NH_3 -Konzentration von 10ppm nach SCR1 wurde die HWL-Dosierung deaktiviert und ein Lastsprung durchgeführt. Über die Integration der nach dem Abschalten der Dosierung umgesetzten NO_x -Menge wurde der NH_3 -Füllstand im SCR-Katalysator bestimmt.

Zur Veranschaulichung ist der Entleervorgang nach dem Lastsprung in Abbildung 4.5 dargestellt:

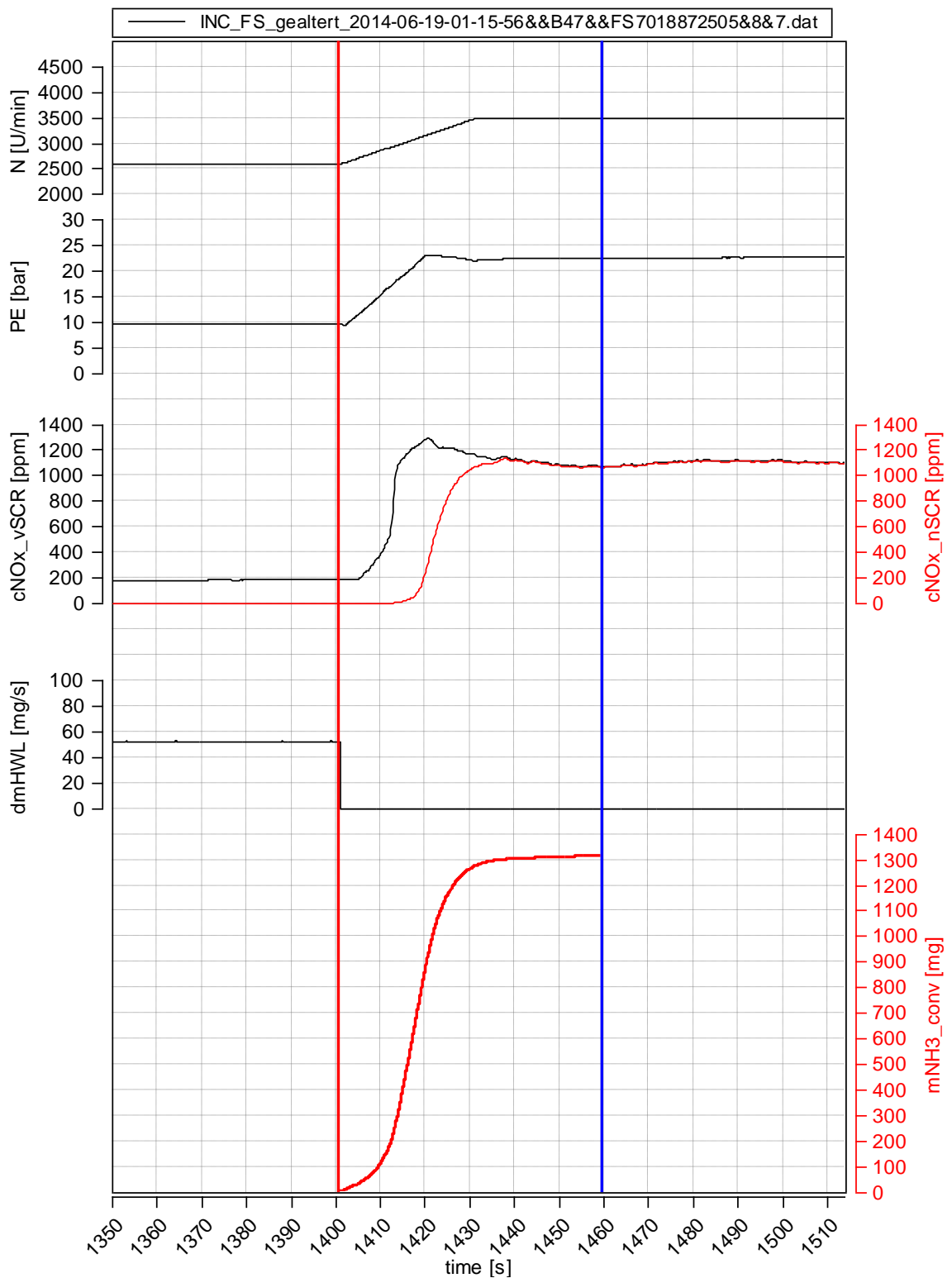


Abbildung 4.5: Entleervorgang Füllstandskennlinie

Die umgesetzte NH₃-Masse $m_{NH3_{conv}}$ kann mit dem Abgasmassenstrom dm_{AG} , der NO_x-Konzentration vor und nach dem SCR-Katalysator $cNOx_{vSCR}$ und $cNOx_{nSCR}$ sowie der Dichte des Diesellabgases und der Stickoxide ρ_{AG} und ρ_{NOx} und dem stöchiometrischen Faktor f_{st} folgendermaßen berechnet werden:

$$m_{NH3_{conv}} = \int (dm_{AG} \cdot (cNOx_{vSCR} - cNOx_{nSCR}) \cdot \frac{\rho_{NOx}}{\rho_{AG}} \cdot f_{st}) dt \quad (4-1)$$

Diese Messungen wurden in einem Temperaturbereich zwischen 200°C und 480°C bei (annähernd) konstantem Abgasmassenstrom durchgeführt (siehe Tabelle 4-1). Mittlere SCR-Katalysatortemperaturen von über 400°C werden nur bei relativ hochlastigen Betriebspunkten erreicht, wodurch hohe NO_x-Massenströme auftreten. Um trotz der durch das Dosiermodul begrenzten maximalen HWL-Dosiermenge eine konstante Überdosierung mit einem Dosiermengenverhältnis von $\alpha = 1,3$ bei allen Messpunkten zu erreichen, wurden die Messungen ab 400°C unter Verwendung der Motorbetriebsart Heißeinstellung durchgeführt. Dabei wird durch eine späte zweite Nacheinspritzung, welche z.B. zur Partikelfilterregeneration eingesetzt wird, eine Erhöhung der Abgastemperatur erzielt.

In Tabelle 4-1 sind die Einstellparameter der Betriebspunkte für die Ermittlung der Füllstandskennlinie angeführt. Bei den Betriebspunkten 10-17 wurde die Motorbetriebsart Heißeinstellung verwendet. Hier wurden die Einspritzmenge der zweiten Nacheinspritzung sowie der zeitliche Abstand der Nacheinspritzung von Haupteinspritzung in μs angegeben. Bei dem mit der Bezeichnung „LS“ versehenen Tabelleneintrag handelt es sich um den Betriebspunkt, der im Zuge des Lastsprungs angefahren wurde.

Tabelle 4-1: Betriebspunkte Füllstandstest

Betriebspunkt Nr.	Drehzahl	effektiver Mitteldruck	Einspritzmenge	Abgasmassenstrom	NOx-Konzentration (roh)	mittlere Katalysator-temperatur	zeitlicher Abstand Heißeinstellung	Einspritzmenge Heißeinstellung	HWL-Dosiermenge ($\alpha=1,3$)
	U/min	bar	mg/Hub	kg/h	ppm	°C	μ s	mg/Hub	mg/s
1	3520	2,3	10,8	210	140	200			36,7
2	3480	3,2	12,6	210	145	230			38,7
3	3520	3,8	14	220	155	250			39,2
4	3350	5,5	18,3	230	160	280			42,8
5	2900	7,5	24	230	190	310			49,7
6	2600	9,7	30,5	230	190	330			52,7
7	2500	10,6	33,6	230	190	350			54,7
8	2400	11,6	36,6	235	190	360			56,5
9	2300	12,8	40	240	200	370			59,7
10	2700	7	24	220	300	400	-3263	1,08	75,7
11	2650	7,8	26	225	330	410	-2780	1,5	86,7
12	2650	8,1	27	230	340	420	-3387	1,3	93,7
13	2650	8,5	28	235	370	430	-3593	1,5	101,7
14	2650	8,8	29	240	390	435	-3700	1,6	109
15	2600	9,1	30	240	400	445	-4307	2	115
16	2600	9,2	30	235	400	455	-4505	2,9	115
17	2600	9,2	30	235	400	475	-4903	3,6	108
LS	3500	23	69,3	625	1110				

4.6.2 Ermittlung des Übertragungsverhaltens

Um das Übertragungsverhalten des als Regelstrecke anzusehenden SCR-Katalysators zu bestimmen, wurde der SCR-Katalysator mit einem sprungförmigen Eingangssignal (HWL-Dosierung) beaufschlagt und dessen Sprungantwort aufgenommen. Dieser Versuch wurde bei voll befülltem SCR-Katalysator durchgeführt.

Dazu wurde der Katalysator mit leicht überstöchiometrischem Dosiermengenverhältnis ($\alpha = 1,1$) bis zum Erreichen eines eingeschwungenen NH_3 -Schlupfes von 10ppm befüllt. Anschließend wurde die Dosiermenge sprunghaft angehoben und die Zeit bis zum Erreichen eines eingeschwungenen Zustands (konstanter NH_3 -Schlupf nach SCR) ermittelt. Wie bei der als „Wendetangenten-Methode“ nach Ziegler und Nichols aus der Regelungstechnik bekannten experimentellen Methode zur Reglerdimensionierung wurden die Verzugs- sowie die Ausgleichzeit ermittelt (siehe Abbildung 4.6).

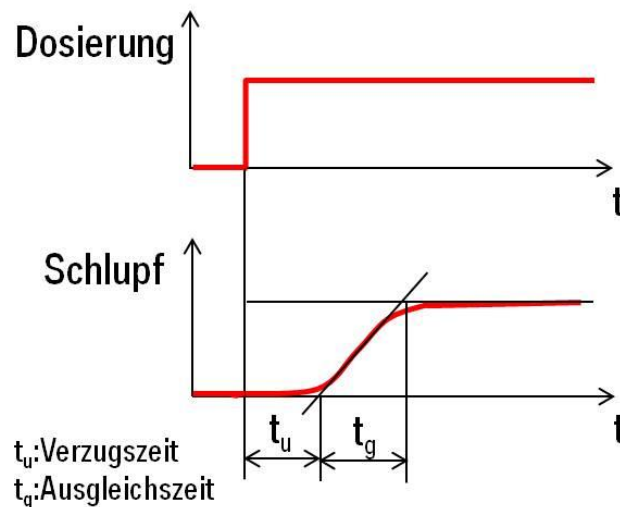


Abbildung 4.6: Ablauf Sprungantwort

Diese Sprungantworten wurden in einem für einen etwaigen Regelungsbetrieb in Frage kommenden Betriebsbereich durchgeführt. Dabei wurden sowohl die mittlere Katalysatortemperatur als auch der Abgasmassenstrom variiert und die Messungen bei einem Dosiermengenverhältnis von $\alpha = 1,5$, $\alpha = 2$ und $\alpha = 3$ durchgeführt. Mit dem gegebenen Temperaturbereich von größer 300°C und der Begrenzung durch den maximalen NO_x -Massenstrom, bei dem noch ein überstöchiometrischer Betrieb möglich ist (gegeben durch die maximale Dosiermenge des Dosiermoduls), ergeben sich folgende Betriebspunkte im Kennfeld des Versuchsmotors (Abbildung 4.7):

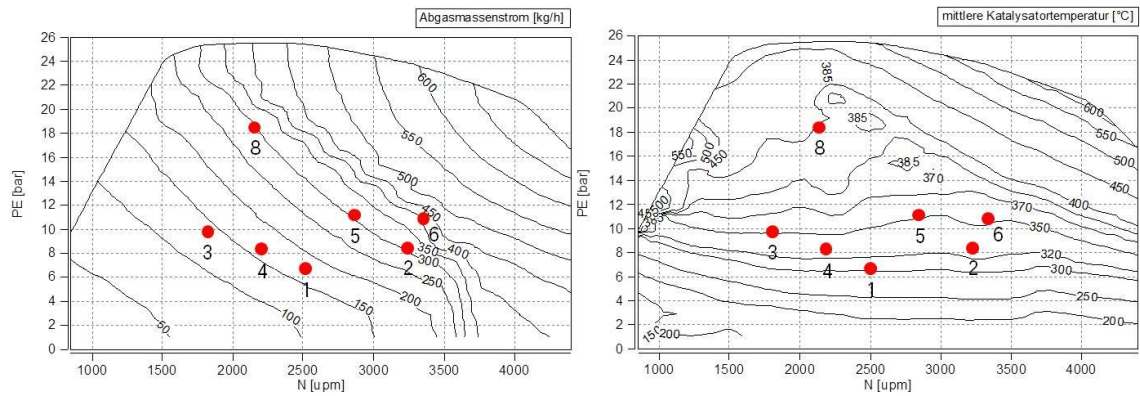


Abbildung 4.7: Kennfeld Betriebspunkte Sprungantworten

Neben den in Abbildung 4.7 dargestellten Betriebspunkten wurde weiters Punkt 7 vermessen, bei dem die Motorbetriebsart Heißeinstellung verwendet wurde, um die gewünschte Temperatur und Massenstrom bei moderaten NO_x-Emissionen zu erreichen (siehe Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Betriebspunkte Sprungantworten

Betriebspunkt Nr.	Drehzahl	effektiver Mitteldruck	Einspritzmenge	Abgasmassenstrom	NO _x -Konzentration (roh)	mittlere Katalysatortemperatur	zeitlicher Abstand Heißeinstellung	Einspritzmenge Heißeinstellung
	U/min	bar	mg/Hub	kg/h	ppm	°C	µs	mg/Hub
1	2540	6,3	21,2	170	145	320		
2	3250	8,2	26,4	300	270	320		
3	1800	9,8	30,6	140	170	350		
4	2130	9,3	29,9	170	155	350		
5	2850	11	34,2	300	280	350		
6	3350	10,1	31,4	370	450	350		
7	2000	8,1	26,2	170	390	400	-5925	1
8	2200	18,1	53,3	300	390	400		

4.6.3 Alterung des SCR-Katalysators

Um die Funktion von Abgasnachbehandlungssystemen auch bei hohen Fahrzeuglaufleistungen beurteilen zu können, werden die Katalysatoren am Motorprüfstand künstlich gealtert. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde der Motor über 50 Stunden in einem Betriebspunkt betrieben, in dem sich eine mittlere Temperatur des SCR-Katalysators von 600°C einstellt.

4.7 Versuchsaufbau Motorprüfstand

4.7.1 Versuchsmotor

Für die Versuche am Motorprüfstand sowie bei den darauf folgenden Untersuchungen im Fahrzeug wurde ein Motor der Baureihe B47D2000 verwendet (Abbildung 4.8).

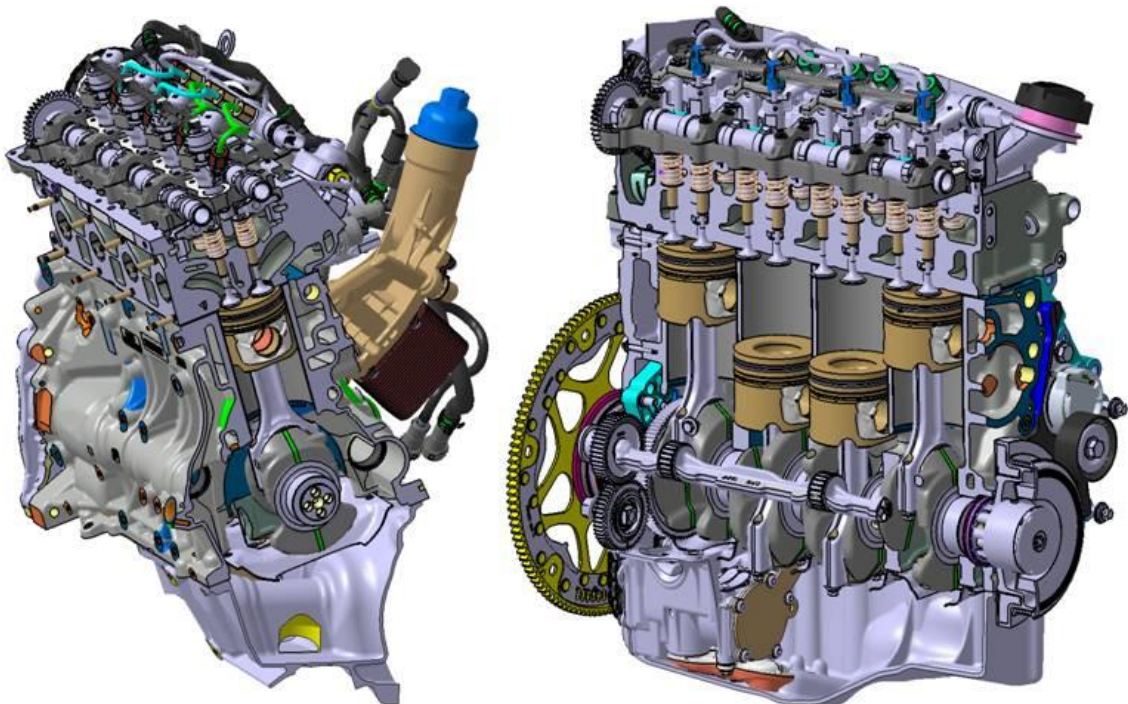


Abbildung 4.8: B47D2000 isometrische Ansicht

Hierbei handelt es sich um einen 4-Zylinder-Dieselmotor mit 4 Ventilen pro Zylinder. Der Antrieb der zwei oben liegenden Nockenwellen erfolgt über eine Steuerkette, die Ventilbetätigung erfolgt durch Rollenschlepphebel.

Das Kurbelgehäuse, das in einer closed-deck-Bauweise ausgeführt ist, sowie der Zylinderkopf bestehen aus Aluminium. Zum Ausgleich der Massenkräfte zweiter Ordnung verfügt der Motor über zwei höhenversetzte Ausgleichswellen, welche über verspannte Zahnräder angetrieben werden. Die Einspritzung erfolgt über ein Common-Rail-System mit Magnetventil-Injektoren und einem maximalen Systemdruck von 2000bar. Weiters verfügt der Motor über einen Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie und Wälzlagerung. Eine Besonderheit dieses Motors ist der eingesetzte Brennraumdrucksensor, welcher zur Regelung des Verbrennungsschwerpunktes dient. In Tabelle 4-3 sind die Motorhauptdaten angeführt [17]:

Tabelle 4-3: Motorhauptdaten B47D2000 [17]

Motorhauptdaten B47D2000		
Hubraum	[dm ³]	1,995
Zylinderzahl		4
Ventile pro Zylinder		4
Bohrung	[mm]	84
Hub	[mm]	90
Hub/Bohrung		1,071
Schubstangenverhältnis		0,326
Zylinderabstand	[mm]	91
Leistung	[kW]	140
bei n	[U/min]	4000
Drehmoment	[Nm]	400
bei n	[U/min]	1800
max. Zündruck pz	[bar]	185
Verdichtungsverhältnis		16,5
Zündfolge		1-3-4-2

4.7.2 Versuchs-Abgasanlage

Für den Prüfstands-aufbau der Abgasanlage wurde großer Wert auf Modularität gelegt, sodass Änderungen an der Abgasanlage bzw. der Austausch einzelner Bauteile ohne größeren Aufwand durchgeführt werden können. Dazu wurden die SCR-Katalysatoren SCR1 und SCR2 mit Flanschen mit dem Zwischenrohr und Vorrohr bzw. Endrohr verbunden. In Abbildung 4.9 ist der schematische Aufbau der Versuchs-Abgasanlage mit der Einbauposition der Abgasentnahmestellen für die Abgasmessanlage AMA (AMA1 und AMA2) sowie für das FTIR dargestellt. An den mit rot markierten Stellen kann der Versuchsaufbau getrennt werden.

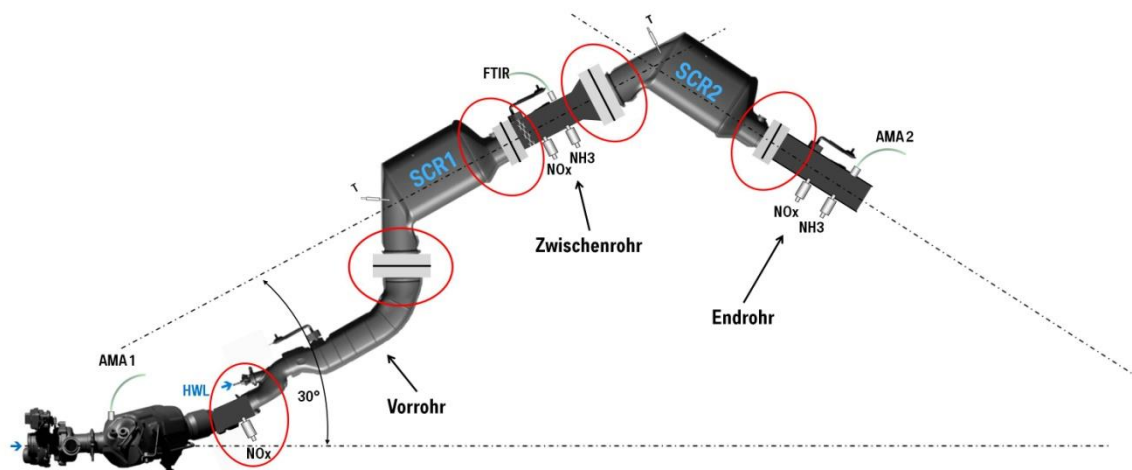


Abbildung 4.9: Schematischer Aufbau Versuchsabgasanlage

Für das Versuchsprogramm am Motorprüfstand (Ermittlung der Füllstands-Kennlinien und Sprungantworten) wurden zwei gleiche SCR-Katalysatoren auf Kupfer-Zeolith-Basis mit einem Volumen von $2,9\text{dm}^3$ ausgewählt.

Wie aus Tabelle 4-4 ersichtlich ist, ist der CSF in zwei Zonen mit unterschiedlicher Edelmetallbeladung unterteilt. Aufgrund seiner höheren spezifischen Wärmekapazität sowie der höheren Dichte reagiert der CSF träger auf Temperaturänderungen als die DOC-Scheibe. Daher ist die erste Zone des CSF (nach dem DOC) mit einer höheren Edelmetallbeladung versehen, da diese zum Teil die Aufgaben des DOC übernimmt, wenn die DOC-Scheibe durch eine Schubphase auskühlt. Für die zweite Zone dagegen ist eine weniger starke Beladung ausreichend, um die Umwandlung von C zu CO₂ während der Partikelfilterregeneration zu begünstigen.

Tabelle 4-4: Daten Versuchsabgasanlage

Benennung	Querschnittsfläche	Volumen	Material	Zelligkeit	Wandstärke	Pt	Pd
	mm ²	dm ³		cpsi	mil	g	g
DOC	18192	2,5	Cordierit	400	4	4,08	2,04
CSF (Zone1)	18192	2,5	Siliziumkarbid	300	12	0,952	0,476
CSF (Zone2)	18192	3,5	Siliziumkarbid	300	12	0,381	0,19
SCR (1&2) (Cu)	19042	2,9	Cordierit	400	4	0	0

In Abbildung 4.10 ist der Abgasturbolader (1) mit angebautem DOC (3) und CSF (4), welche sich in einem gemeinsamen Canning befinden, abgebildet. Die Entnahmestelle der AMA für die Rohemissionen (2) befindet sich vor der DOC-Scheibe. Der NO_x-Sensor zur Erfassung der NO_x-Emissionen vor dem SCR-System (5) ist vor dem SCR-Dosiermodul (Position 6, Abbildung 4.11) verbaut.

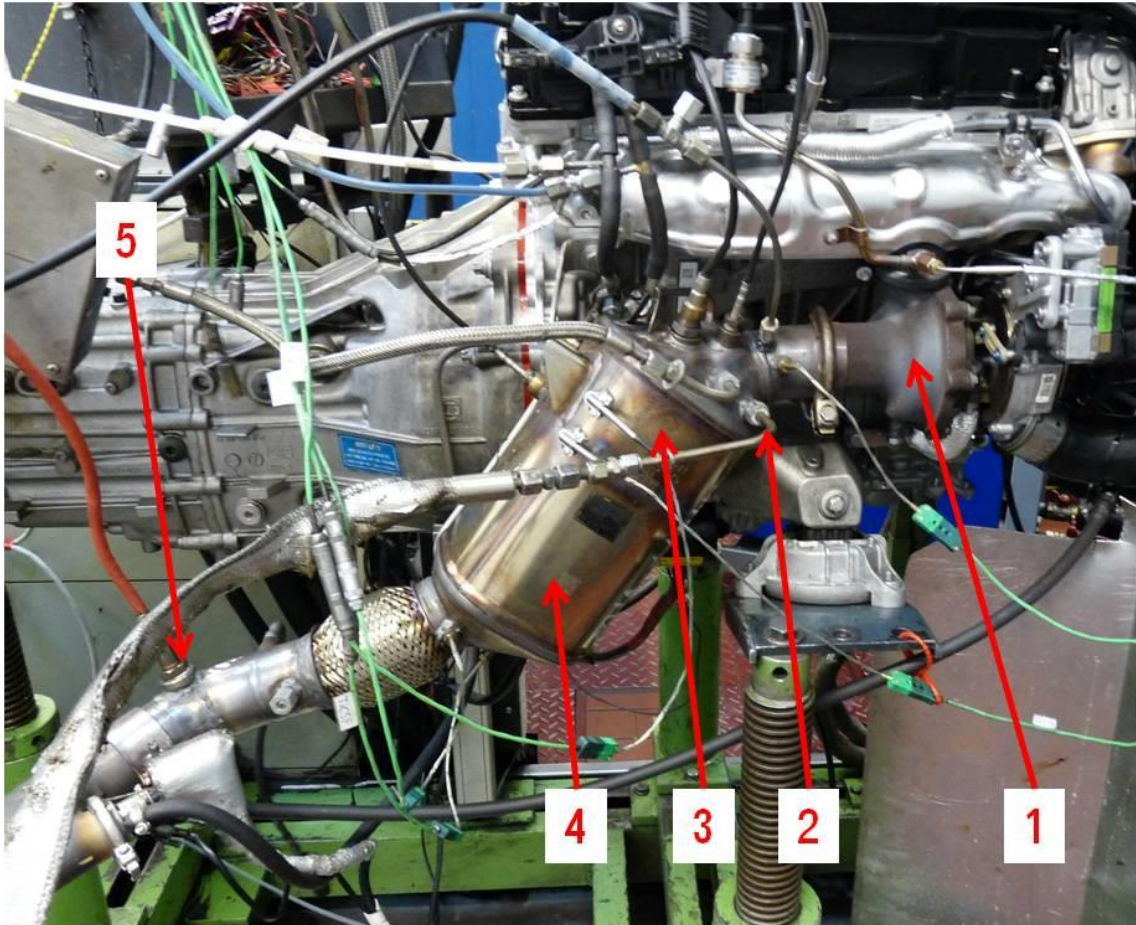


Abbildung 4.10: Versuchsabgasanlage Detail DOC

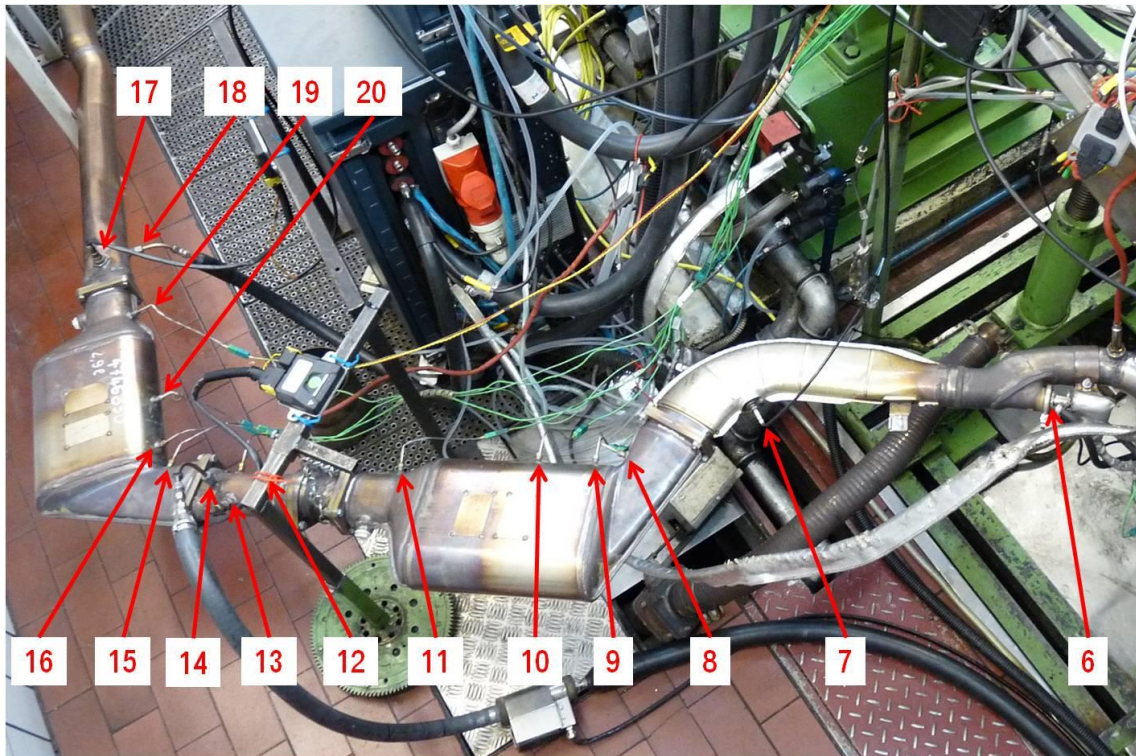


Abbildung 4.11: Versuchsabgasanlage gesamt

In Abbildung 4.11 ist die Einbauposition des SCR-Dosiermoduls (6) im Vorrohr ersichtlich. Neben einem Mischer ist im Vorrohr ein Temperatursensor (7) verbaut, welcher der Motorsteuerung in der Serienanwendung als Eingangswert für die Berechnung der mittleren SCR-Katalysatortemperatur dient. Der Abgasstrom tritt über einen sogenannten Fischer-Trichter in den SCR-Katalysator 1 ein. Hier wurden die Temperaturmessstellen TvSCR1, TiSCR1_1, TiSCR1_2 und TnSCR1 verbaut (Positionen 8-11). Im darauf folgenden Zwischenrohr, in dem der zweite Mischer verbaut ist, befinden sich die Messstellen für den zweiten NO_x-Sensor (12), einen NH₃-Sensor (13) sowie die Entnahmestelle für das FTIR (14). Im zweiten SCR-Katalysator wird die Temperatur an den Messstellen TvSCR2, TiSCR2_1, TiSCR2_2 und TnSCR2 gemessen (Positionen 15, 16, 19, 20). Im Endrohr nach SCR2 sind die zweite Entnahmestelle der Abgasmessanlage AMA (18) sowie der zweite NH₃-Sensor (17) angebracht.

4.8 Ergebnisse Motorprüfstandsbetrieb

4.8.1 NH_3 -Speichervermögen im Neuzustand

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Tests zur Ermittlung der Füllstandskennlinien exemplarisch in zwei Betriebspunkte bei unterschiedlicher Temperatur näher erläutert werden.

In Abbildung 4.12 ist der Entleervorgang des SCR-Katalysators nach der Befüllung bei 200°C dargestellt. Nach Erreichen der NH_3 -Schlupfchwelle von 10ppm wird die HWL-Dosierung deaktiviert (roter Cursor) und ein Lastsprung durchgeführt. Dadurch kommt es zu einem Anstieg der mittleren Katalysatortemperatur von 200°C auf ca. 550°C bis zum Ende der Entleerung, mit der Folge, dass die NH_3 -Speicherfähigkeit stark abnimmt. Aus diesem Grund kommt es zu einem Austrag eines Teils der gespeicherten NH_3 -Menge bevor es zu einer Reaktion mit den Stickoxiden kommt. Ab einer Temperatur von ungefähr 300°C steigt daher die NH_3 -Konzentration nach dem SCR-Katalysator steil an, bis sie ihr Maximum bei 250ppm erreicht. Die gesamte gespeicherte NH_3 -Masse $m_{\text{NH}_3_conv}$ ergibt sich somit aus dem kumulierten NH_3 -Schlupf $m_{\text{NH}_3_slip}$ sowie der aus dem NO_x -Umsatz berechneten NH_3 -Masse $m_{\text{NH}_3_conv}$ (siehe Kapitel 4.6.1). Dieser NH_3 -Austrag tritt in schwächer werdender Form bis zu einer Temperatur von ca. 250°C auf.

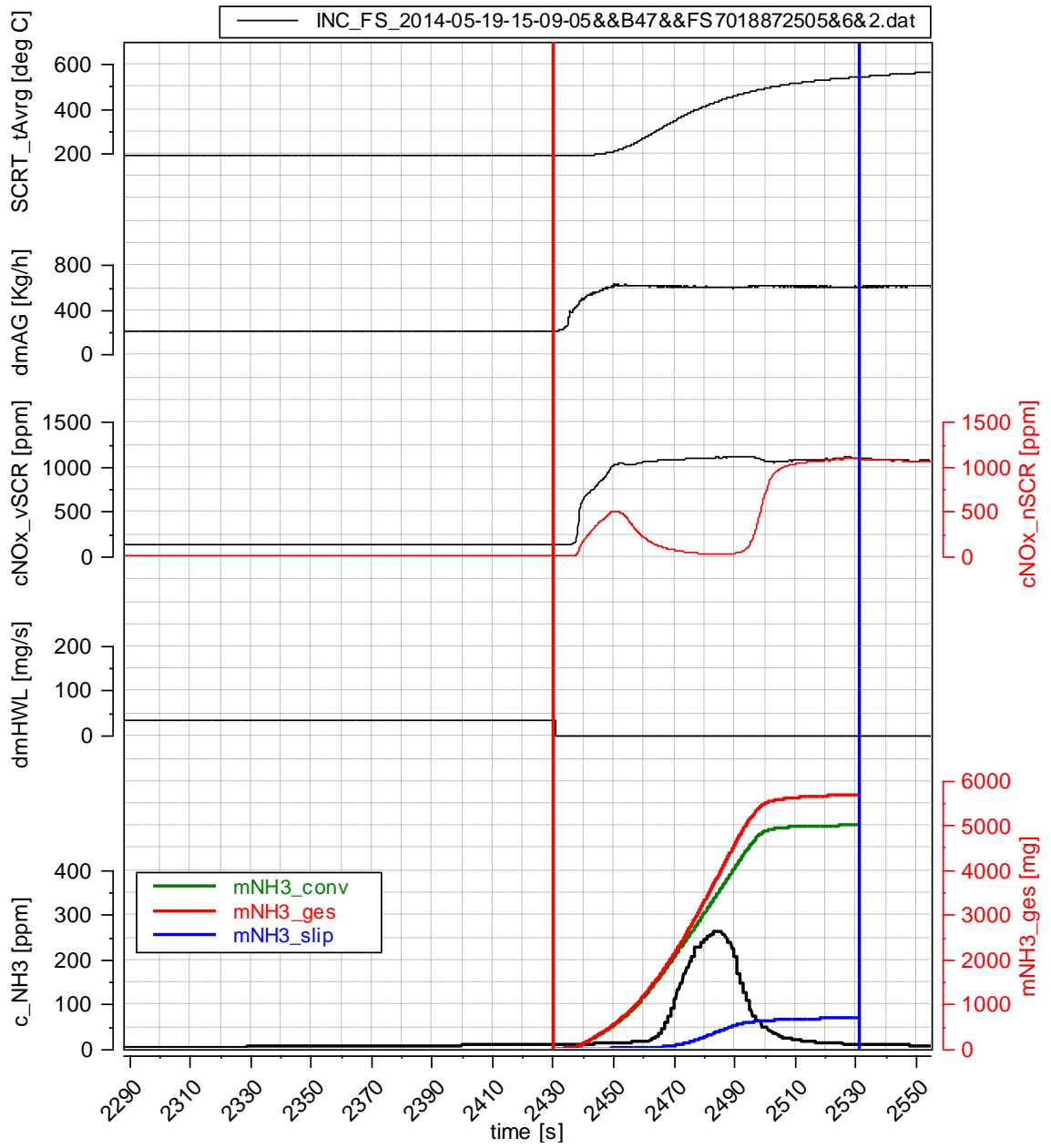


Abbildung 4.12:Entleervorgang Füllstandstest 200°C

Bei der Messung bei einer mittleren Katalysatortemperatur von 400°C (Abbildung 4.13:Entleervorgang Füllstandstest400°CAbbildung 4.13) tritt keine ausgeprägter Austrag von NH₃ auf. Hier wird die geringere eingelagerte NH₃-Menge durch die Umwandlung der Stickoxide aufgebraucht, bevor die Temperaturwelle den Katalysator erreicht.

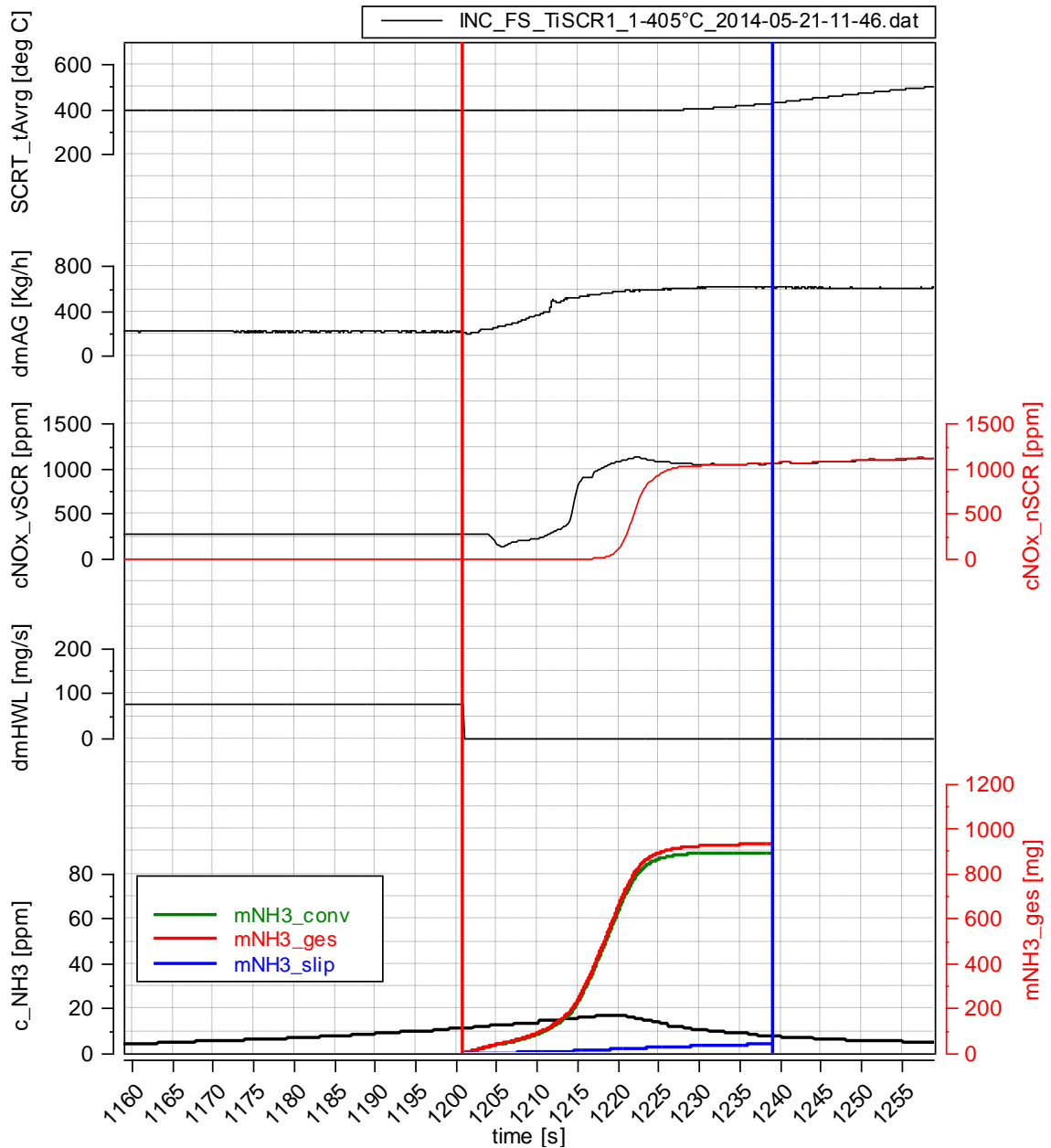


Abbildung 4.13:Entleervorgang Füllstandstest400°C

Mit den aus den Messungen in den 17 Betriebspunkten (siehe Tabelle 4-1) gewonnenen Daten und einem Katalysatorvolumen von $2,9\text{dm}^3$ ergibt sich ein asymptotisch gegen Null gehender Verlauf des maximalen spezifischen NH_3 -Füllstands des SCR-Katalysators über der mittleren Katalysatortemperatur (Abbildung 4.14):

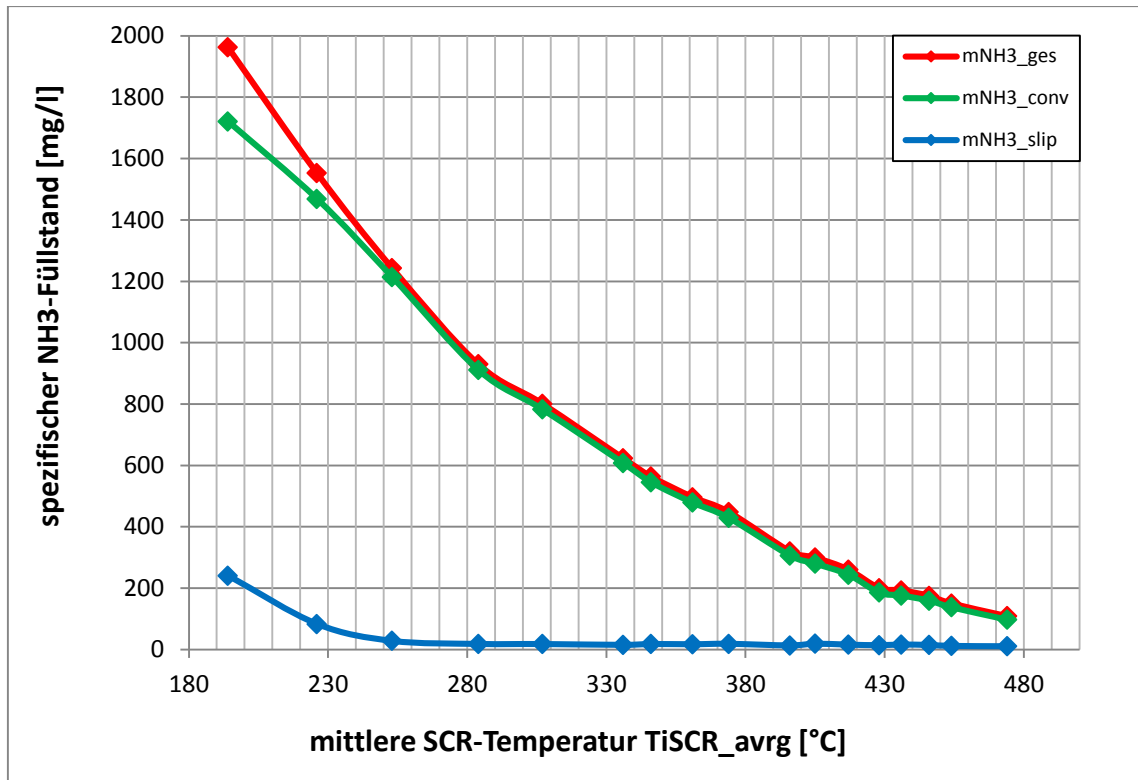


Abbildung 4.14: Füllstandskennlinie Neuzustand

4.8.2 NH_3 -Speichervermögen in gealtertem Zustand

Nach der Alterung des SCR-Katalysators bei einer mittleren Temperatur von 600°C für 50 Stunden konnte eine Abnahme der NH_3 -Speicherfähigkeit beobachtet werden (Abbildung 4.15). Dieses Verhalten kann hauptsächlich auf die durch die thermische Alterung hervorgerufenen Dealumination der Zeolith-Struktur zurückgeführt werden. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung des Si/Al-Verhältnisses, was zu einer Abnahme der Oberflächenazidität und somit zu einer Desaktivierung des Katalysators führt. Da die Dealumination auch eine Agglomeration des Kupfers bewirkt, kann dieser Vorgang als Hauptursache für das Absinken des Wirkungsgrads bzw. für das Absinken des NH_3 -Speichervermögens gesehen werden. [18]

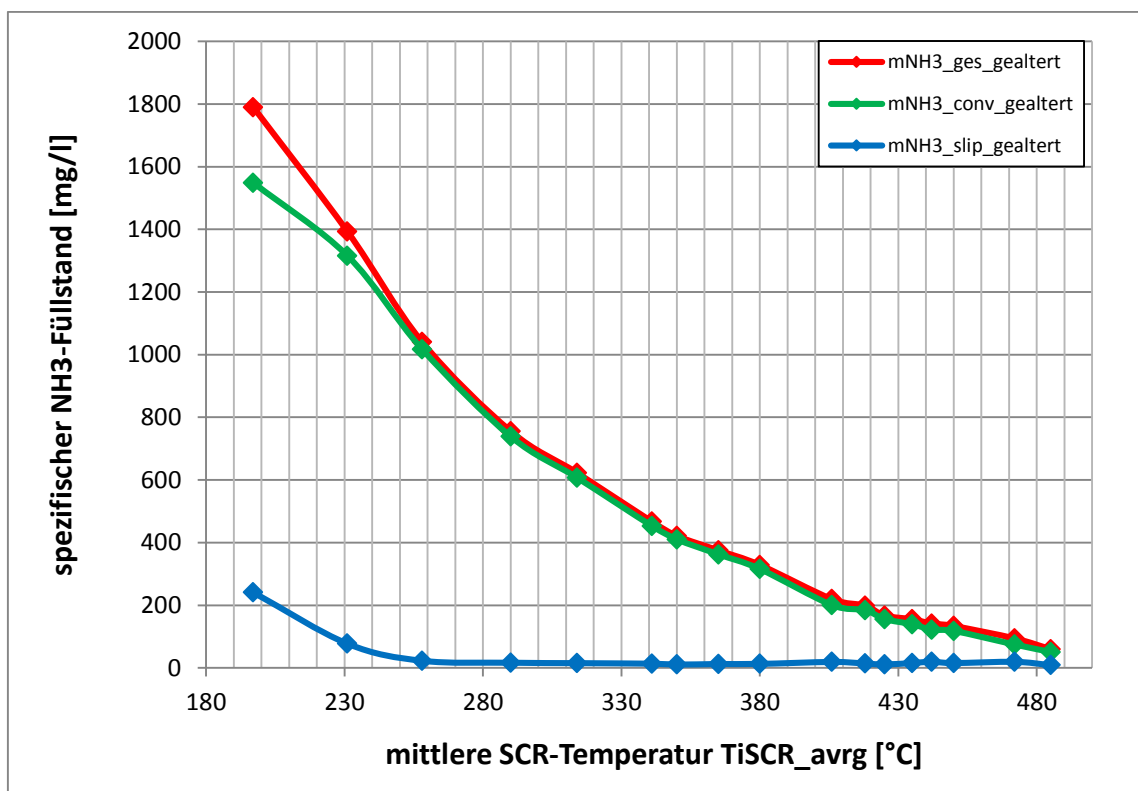


Abbildung 4.15: Füllstandskennlinie nach Alterung

In Abbildung 4.16 ist die Gegenüberstellung des maximalen spezifischen NH₃-Füllstands im Neuzustand sowie im gealterten Zustand dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Alterung ein Absinken des maximalen NH₃-Füllstands von bis zu 25 Prozent zur Folge hat.

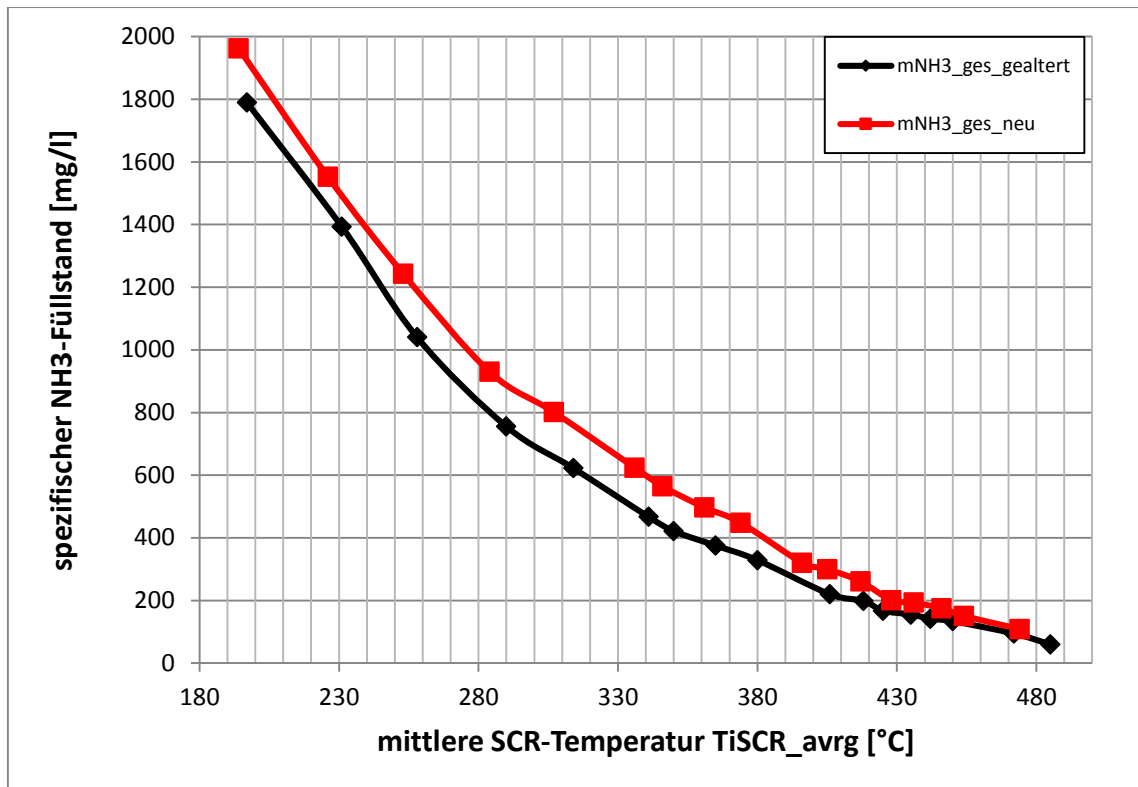


Abbildung 4.16: Füllstandskennlinie Vergleich

4.8.3 Übertragungsverhalten im Neuzustand

Die Auswertung der Tests zur Ermittlung der Sprungantwort soll am Beispiel des Betriebspunkts bei einer Temperatur von 350°C und einem Abgasmassenstrom von 300kg/h (Betriebspunkt 5 in Tabelle 4-2: Betriebspunkte SprungantwortenTabelle 4-2) erläutert werden (Abbildung 4.17).

Nachdem sich der NH₃-Schlupf nach SCR1 auf einem Niveau von 15ppm eingependelt hat, wird die Dosiermenge sprunghaft auf ein Dosiermengenverhältnis von $\alpha = 2$ angehoben. Der Schlupf nach SCR1 pendelt sich nach ca. 300 Sekunden bei einer Konzentration von 290ppm ein. Mit der Tangente im Wendepunkt der Anstiegskurve ergibt sich eine Verzugszeit t_u von 75 Sekunden sowie eine Ausgleichszeit von 155 Sekunden.

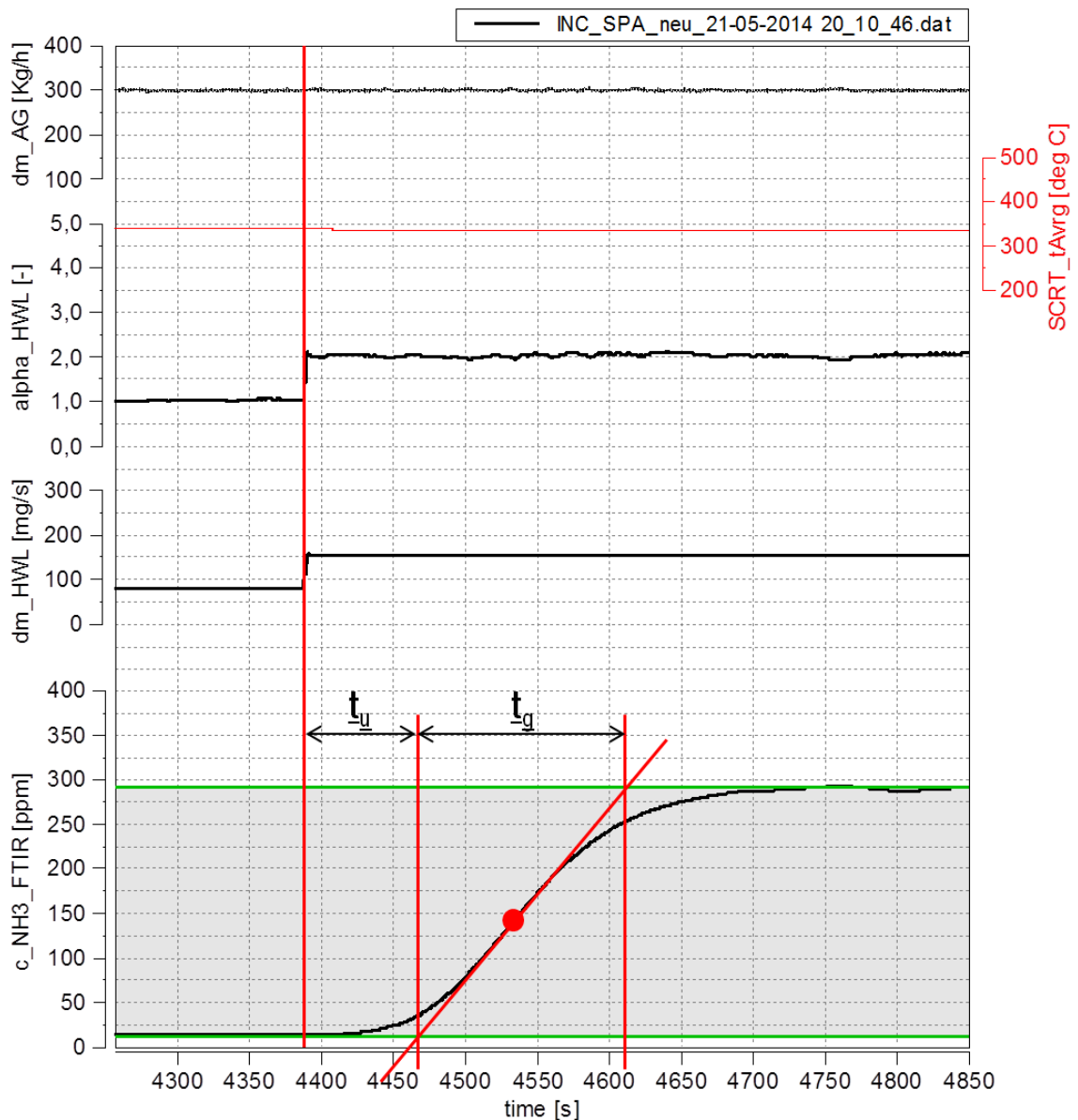


Abbildung 4.17: Auswertung Sprungantwort Neuzustand 350°C/300kg/h

Mit den Sprungantworten in Betriebspunkt 5 bei einem Dosiermengenverhältnis von $\alpha = 1,5$ und $\alpha = 3$ ergibt sich folgender Verlauf der Verzugszeit bzw. der Ausgleichszeit über dem Dosiermengenverhältnis (Abbildung 4.18):

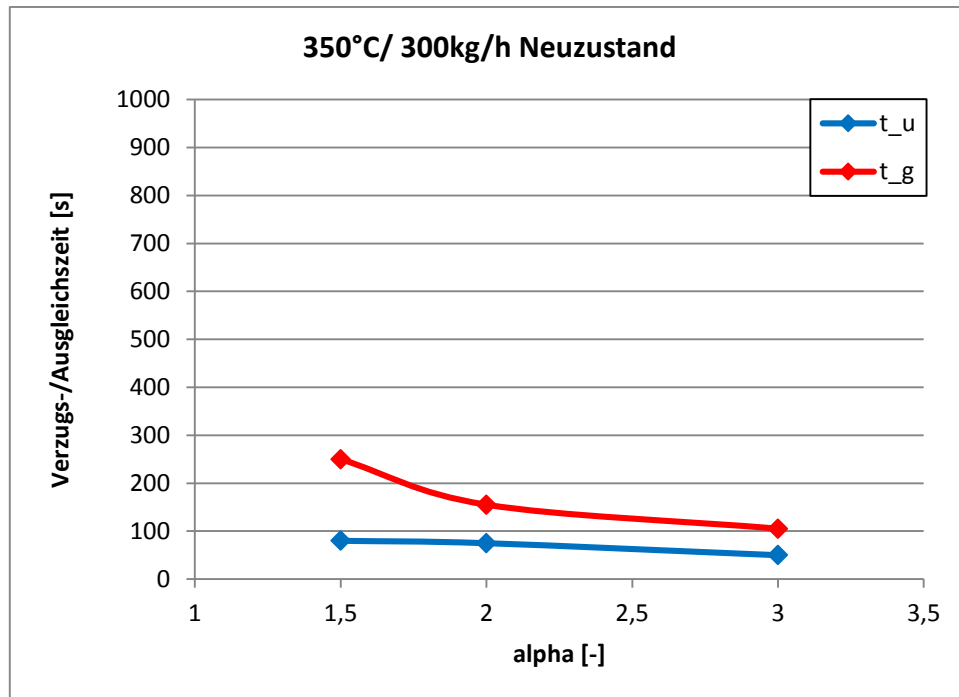


Abbildung 4.18: Verzugs-/Ausgleichszeit 350°C/300kg/h

Wie ersichtlich, hat die Dosiermenge einen relativ geringen Einfluss auf die Verzugszeit, im Gegensatz zur Ausgleichszeit, die mit steigendem Dosiermengenverhältnis stärker sinkt.

In Abbildung 4.19 sind die Ergebnisse der Sprungantworten bei Neuzustand des SCR-Katalysators dargestellt. Als Vergleichsgröße wurde die Summe aus Verzugs- und Ausgleichszeit gewählt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Ergebnisse in den Betriebspunkten 2 und 4 in Abbildung 4.19 verzichtet. Diese sind jedoch in Abbildung 4.20 bzw. Abbildung 4.21 dargestellt.

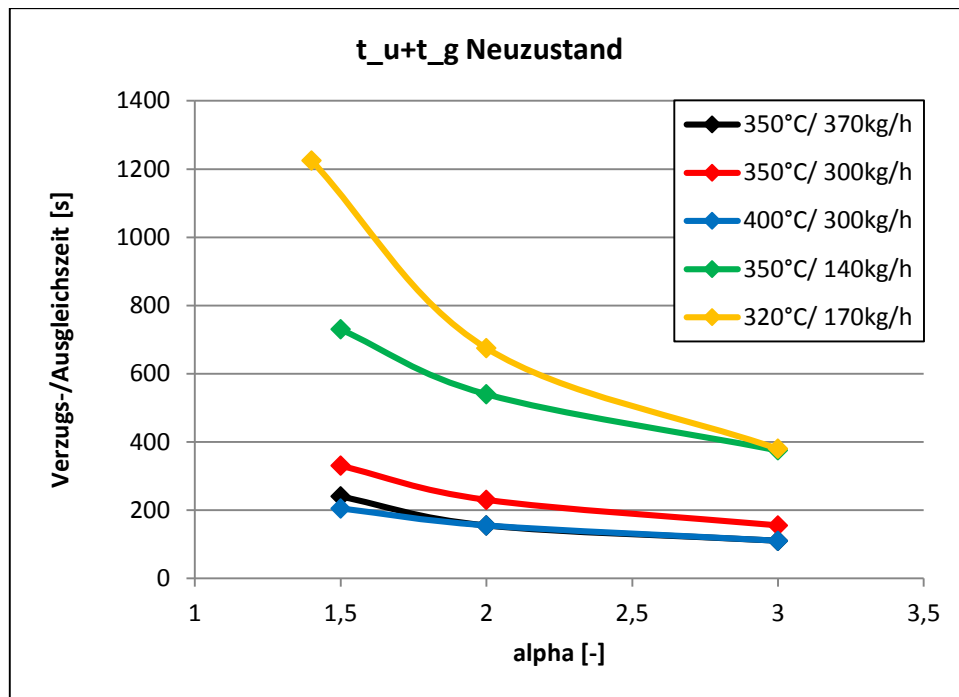


Abbildung 4.19: Ergebnis Sprungantworten Neuzustand

Aus Abbildung 4.19 sowie aus den Diagrammen zur Untersuchung des Temperatur- und Massenstromeinflusses in Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 kann der Einfluss der einzelnen Einstellparameter auf die Gesamtzeit abgeleitet werden.

Die Gesamtzeit verhält sich umgekehrt proportional zu den Einstellparametern, dementsprechend ist die Gesamtzeit umso kürzer, je größer das Dosiermenigenverhältnis, der Massenstrom sowie die Temperatur sind. Der Einfluss der Temperatur nimmt mit steigendem Massenstrom ab.

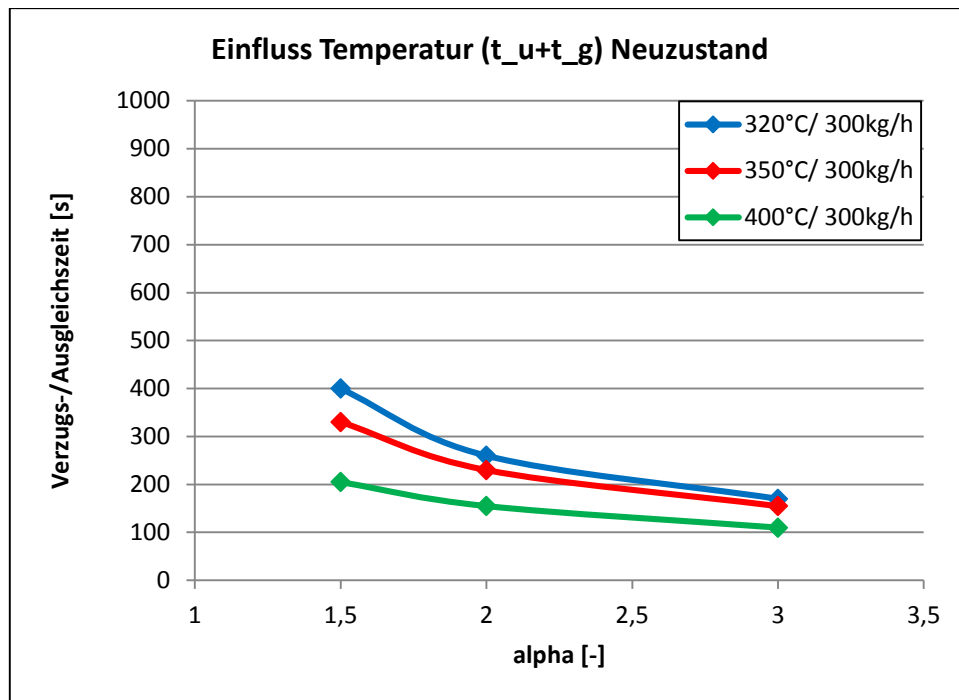


Abbildung 4.20: Einfluss Temperatur bei 300kg/h Sprungantworten Neuzustand

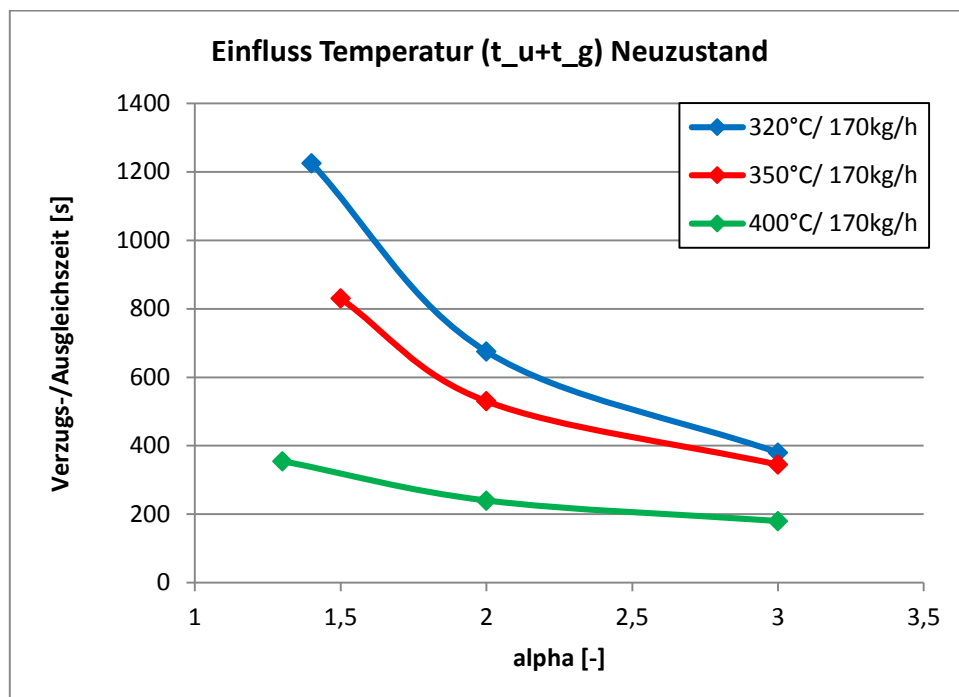


Abbildung 4.21: Einfluss Temperatur bei 170kg/h Sprungantworten Neuzustand

4.8.4 Übertragungsverhalten in gealtertem Zustand

In gealtertem Zustand kommt es durch die Abnahme der NH_3 -Speicherfähigkeit des SCR-Katalysators zu einer Verkürzung von Verzugs- und Ausgleichszeit. Die Ergebnisse der Untersuchungen in gealtertem Zustand sind in Abbildung 4.22 ersichtlich:

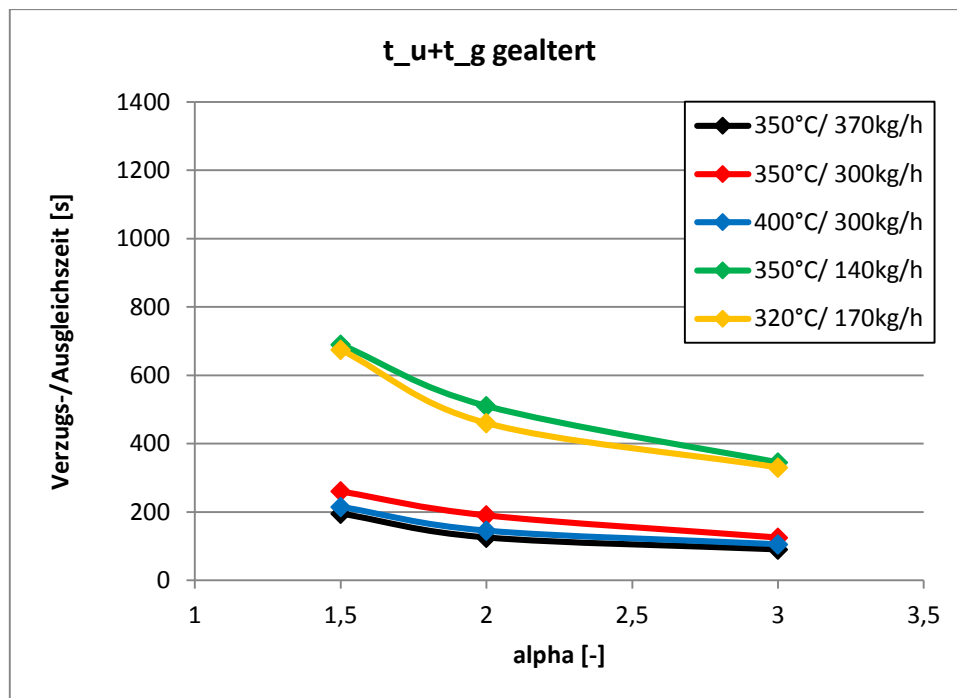


Abbildung 4.22: Ergebnis Sprungantworten gealtert

4.8.5 Korrelation NH_3 -Sensor – FTIR

Bei allen im Rahmen der Füllstands- und Sprungantworttests durchgeführten Messungen wurde die Korrelation zwischen dem eingesetzten NH_3 -Sensor und dem an derselben Position verbauten FTIR ausgewertet. Das Verhalten soll beispielhaft anhand einer Messung dargestellt werden.

Wie in Abbildung 4.23 ersichtlich, wurde in der vorliegenden Messung die NH_3 -Konzentration bei konstantem Motorbetriebspunkt variiert. Aufgrund der langen Messleitung des FTIR reagiert dieses träger auf eine Konzentrationsänderung als der NH_3 -Sensor, bei dem sich das Sensorelement beinahe direkt im Abgasstrom befindet.

Das qualitative Verhalten des Sensors entspricht weitestgehend dem des FTIR, der Ausgabewert des NH₃-Sensors ist jedoch immer ein Vielfaches des Ausgabewerts des FTIR. Das ist anhand des Verhältnisses dieser Werte im Faktor $fac_NH3/FTIR$ ersichtlich.

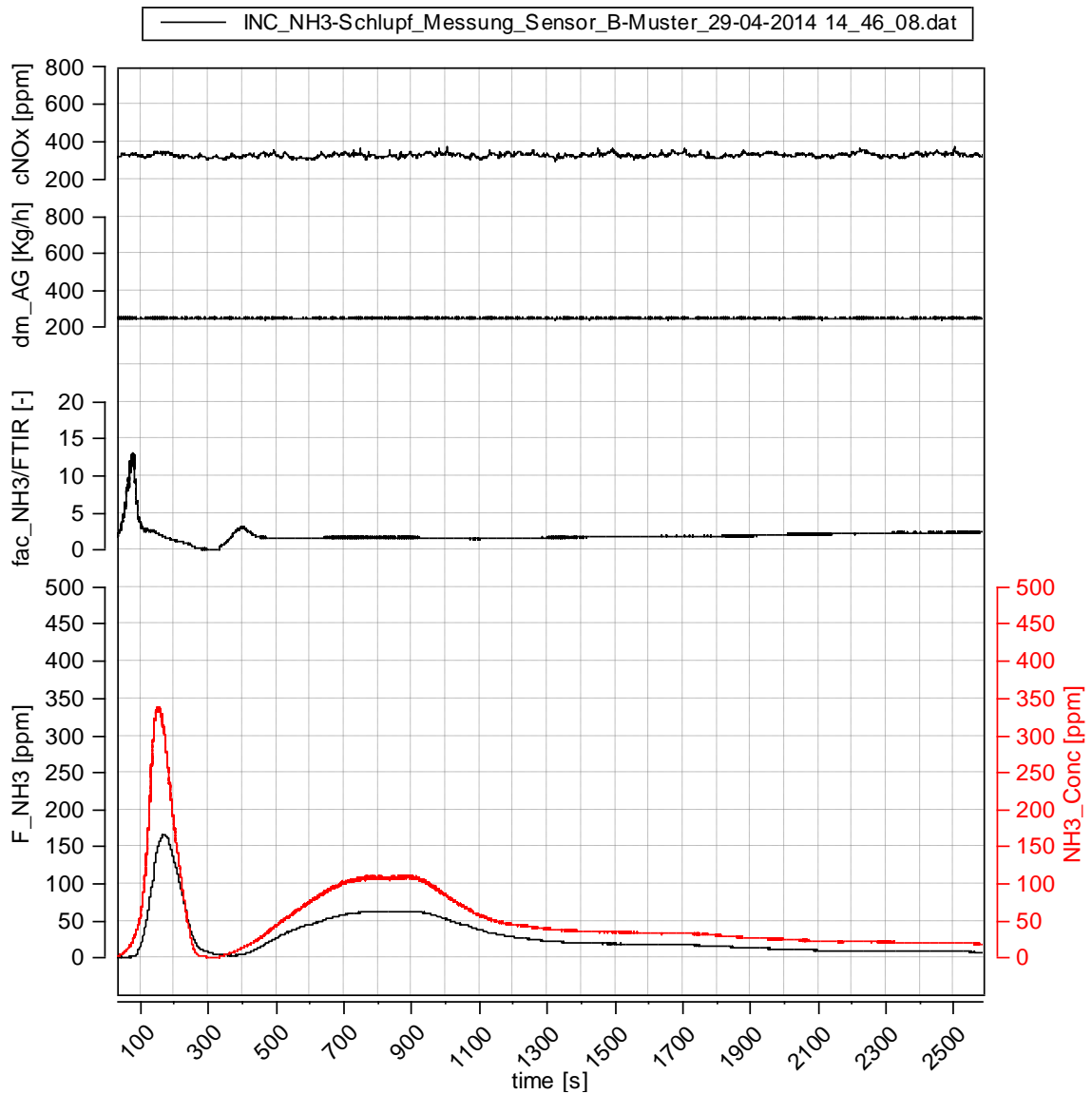


Abbildung 4.23: Korrelation NH₃-FTIR

Auch wenn die Maximalwerte des Sensors und des Messgeräts aufeinander ausgerichtet werden, kann kein konstanter Korrekturfaktor ermittelt werden (Abbildung 4.24). Auch hier bewegt sich dieser in einem breiten Streubereich.

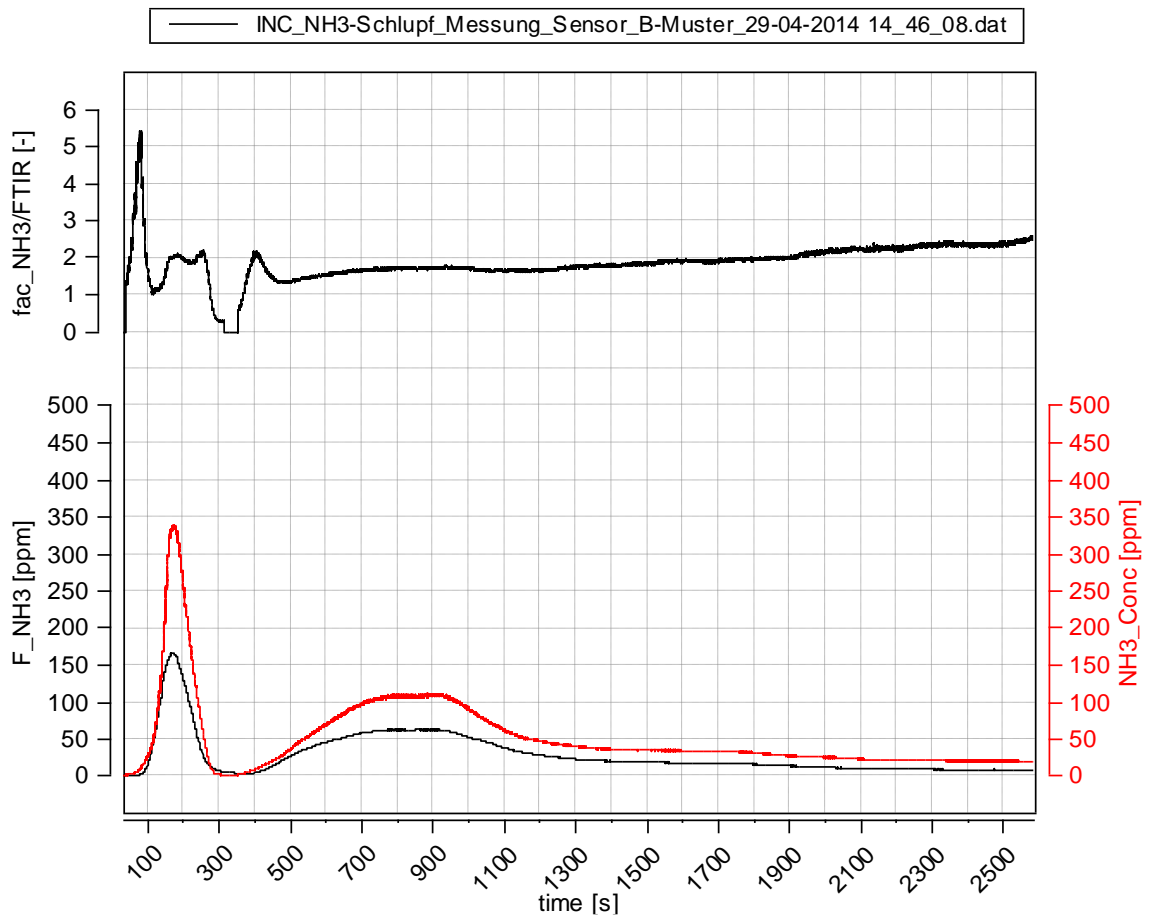


Abbildung 4.24: Korrelation NH_3 -FTIR bei ausgerichteten Maximalwerten

Dieses Verhalten konnte in allen untersuchten Betriebspunkten beobachtet werden. Auch eine durchgeführte Analyse zur Ermittlung des Einflusses von NH_3 -Konzentration, Abgasmassenstrom, NO_2/NO_x -Verhältnis und Luftverhältnis auf den Faktor $fac_{NH_3/FTIR}$ brachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Für den Serieneinsatz dieses Sensors besteht hier noch Verbesserungsbedarf, die genaue Ermittlung einer Korrekturfunktion bzw. eines Modells zur dynamischen Korrektur des Sensorwerts ist jedoch nicht Ziel der vorliegenden Arbeit.

4.9 Fazit Motorprüfstandsbetrieb

Aus den Ergebnissen der am Motorprüfstand durchgeführten Tests können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Im Neuzustand ist die aus den Sprungantwort-Versuchen ermittelte „Totzeit“ bis zum Erreichen einer eingeschwungenen NH_3 -Konzentration nach dem ersten SCR-Katalysator für die Implementierung eines Regelkonzepts zu groß. Auch bei hohen mittleren Katalysatortemperaturen und Abgasmassenströmen betrug die Gesamtzeit mehr als 110s. Gerade im dynamischen Betrieb des Motors in einem Fahrzeug kann so kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden.
- Auch in gealtertem Zustand konnte keine signifikante Verbesserung des Übertragungsverhaltens des Katalysators festgestellt werden. Die Gesamtzeit bis zum Einschwingen der NH_3 -Konzentration nach SCR1 beträgt hier im Bestpunkt der Untersuchungen noch immer 90s.
- Der eingesetzte NH_3 -Sensor zeigte qualitativ sehr gutes Verhalten, wodurch auftretender Schlupf sicher erkannt wird. Für eine Regelung der NH_3 -Konzentration nach SCR1 ist die schwankende Abweichung des NH_3 -Sensorwertes vom Wert des FTIR jedoch als kritisch anzusehen.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Fokus der weiteren Untersuchungen auf das in Kapitel 5 beschriebene Konzept zum Abgleich des Modells mit der Realität gelegt.

5. Systemkonzept Schlupferkennung

Eine weitere Strategie zum Erreichen eines möglichst hohen NO_x-Umsatzes neben der in Kapitel 4.1 beschriebenen Füllstandsregelung ist der Abgleich des Füllstandsmodells mit der Realität, um so ein „Verlernen“ des Modells über längere Laufzeit zu verhindern (siehe Kapitel 3). Da der aktuelle NH₃-Füllstand nicht messbar ist, kann ein Abgleich nur bei 0% (leerer SCR-Katalysator, die NO_x-Emission nach dem SCR-System entspricht der NO_x-Rohemission) bzw. bei 100% Füllstand (Überfüllen bis NH₃-Schlupf erkannt wird) erfolgen. Da ein Entleeren des Katalysators hohe NO_x-Emissionen zur Folge hätte und somit kontraproduktiv für die Erreichung der Emissionsziele wäre, ist nur der Abgleich durch ein gezieltes, kurzzeitiges Überschreiten der Schlupfgrenze sinnvoll. Der Ablauf des Modellabgleichs ist im folgenden Kapitel beschrieben. Für dieses Systemkonzept wird prinzipiell die gleiche Hard- und Software wie für das Regelkonzept verwendet (wie in den Kapiteln 4.2 bis 4.5 beschrieben).

5.1 Konzeptbeschreibung

Der Ablauf des Modellabgleichs mit dem tatsächlichen NH₃-Füllstand im SCR-Katalysator ist in Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.4 dargestellt. Die hier dargestellten Betriebspunkte beziehen sich auf die real im Katalysator eingelagerte NH₃-Menge, also den realen Ist-Füllstand.

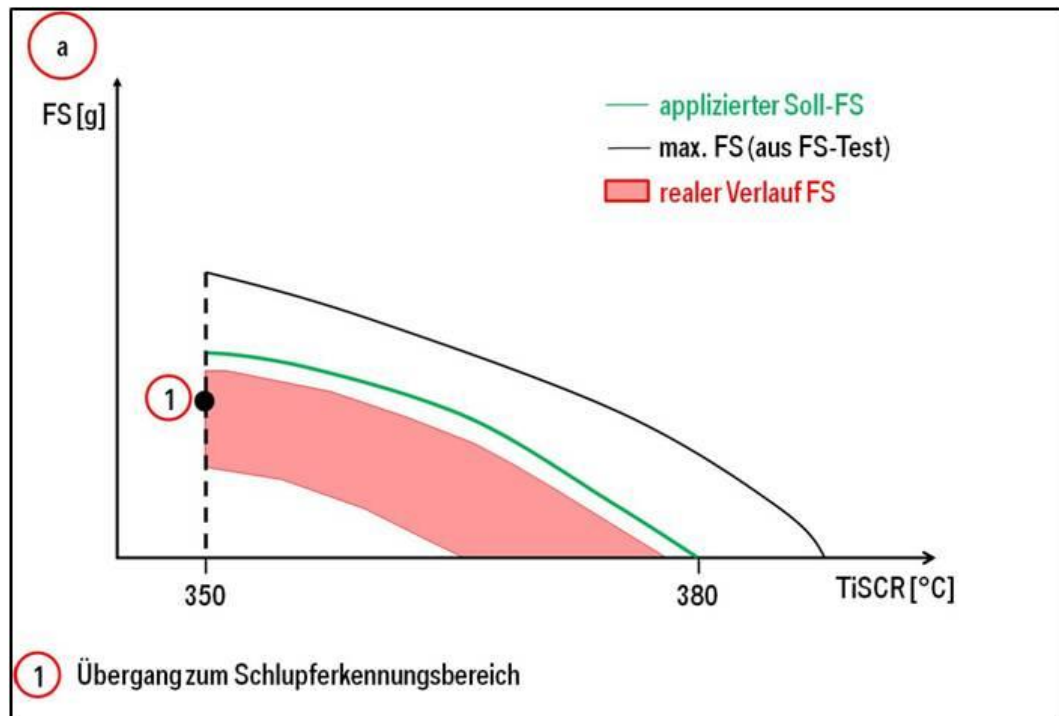


Abbildung 5.1: Konzept Schlupferkennung 1

Da bei Temperaturen unterhalb von $350^{\circ}C$ bereits sehr gute Wirkungsgrade mit dem bestehenden Modell erreicht werden, wurde der Übergang zum Einsatzbereich des Schlupferkennungskonzepts ebenda gewählt. In Abbildung 5.1 ist der Übergang zwischen den Betriebsmodi dargestellt (Betriebspunkt 1). Der reale Füllstand bewegt sich innerhalb des rot markierten Bereichs, er liegt somit unter dem applizierten Soll-Füllstand. Der vom Modell berechnete Ist-Füllstand liegt, wie in Abbildung 3.4 erläutert, auf dem Niveau des im Modell hinterlegten Soll-Füllstands (auf der grünen Linie in Abbildung 5.1). Weiters ist hier der Verlauf des Maximalfüllstands des SCR-Katalysators dargestellt, welcher in den Füllstandstests am Motorprüfstand ermittelt wurde.

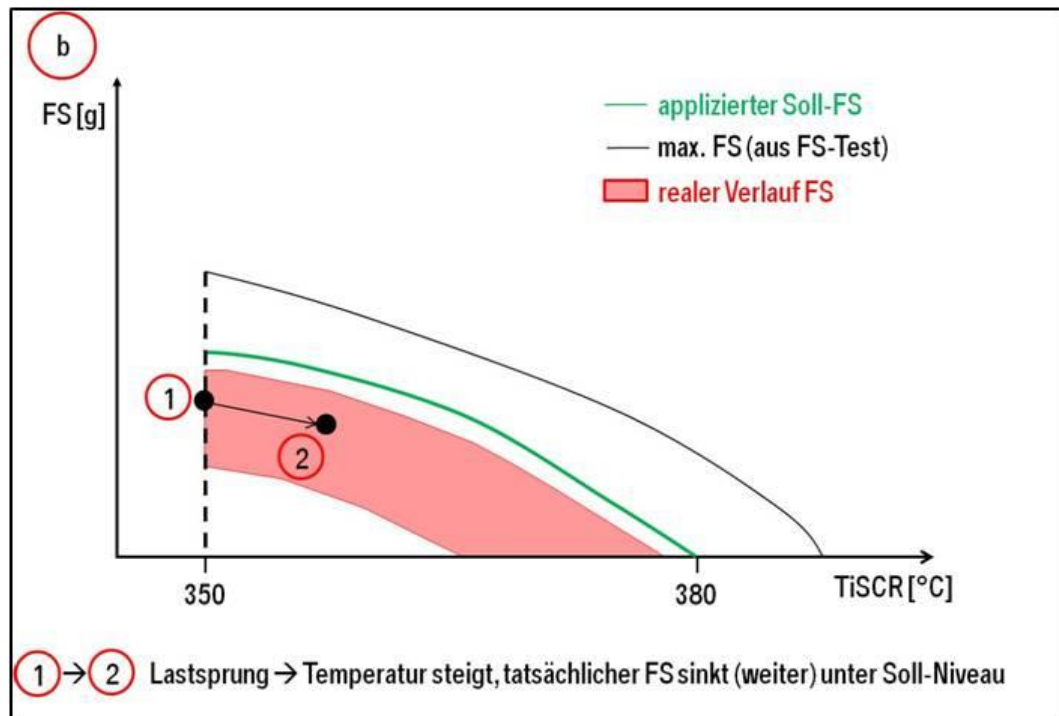


Abbildung 5.2: Konzept Schlupferkennung 2

Kommt es nun wie in Abbildung 5.2 zu einer Lasterhöhung, steigt die mittlere Katalysatortemperatur an und der NH_3 -Füllstand sinkt aufgrund des höheren NO_x -Massenstroms weiter ab (Betriebspunkt 2).

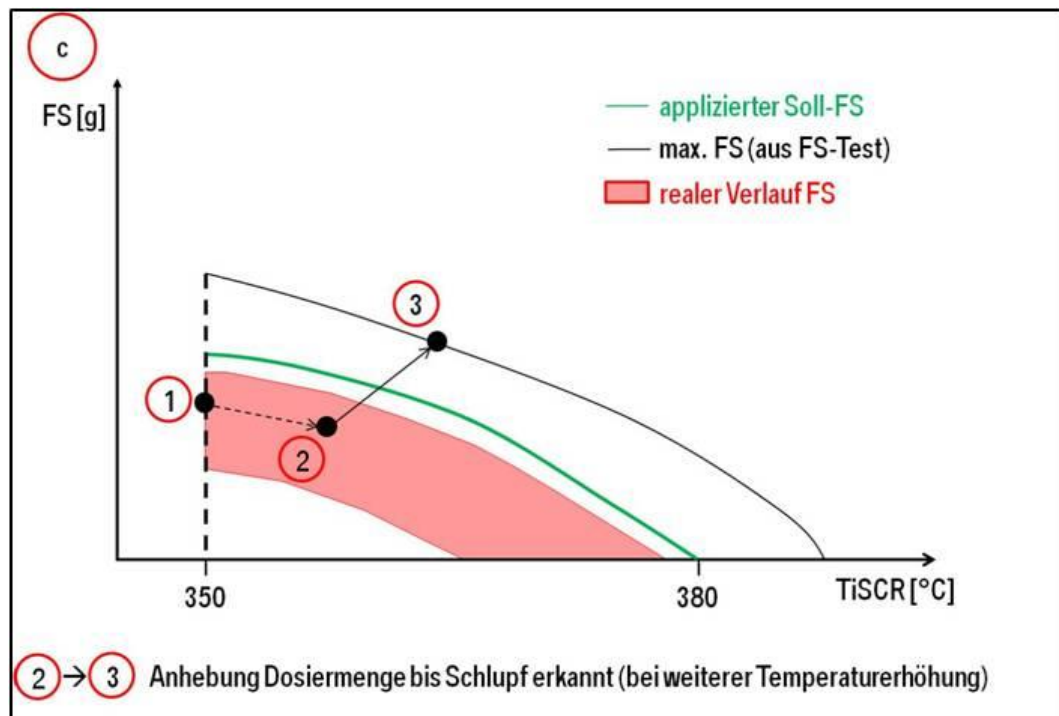


Abbildung 5.3: Konzept Schlupferkennung 3

Wird der Temperaturschwellwert von 350°C somit überschritten, wird die Dosiermenge sprunghaft so weit erhöht, dass der Maximalfüllstand des Katalysators innerhalb kurzer Zeit erreicht wird.

In Betriebspunkt 3 in Abbildung 5.3 ist der Katalysator zu 100% befüllt und es kommt bei weiterer Überdosierung zum Auftreten von NH₃-Schlupf. Dieser Schlupf wird von dem nach SCR1 im Zwischenrohr verbauten NH₃-Sensor erfasst. Wird ein vorgegebener NH₃-Schlupfswellwert überschritten, wird der im Modell berechnete NH₃-Füllstandswert mit dem Maximalfüllstand bei der aktuellen mittleren Temperatur des Katalysators überschrieben (Abbildung 5.4). Die Dosiermenge wird wieder auf das von der Motorsteuerung vorgegebene Niveau zurückgenommen und der Füllstandsregler regelt den NH₃-Füllstand wieder auf den applizierten Sollwert ein (Betriebspunkt 4).

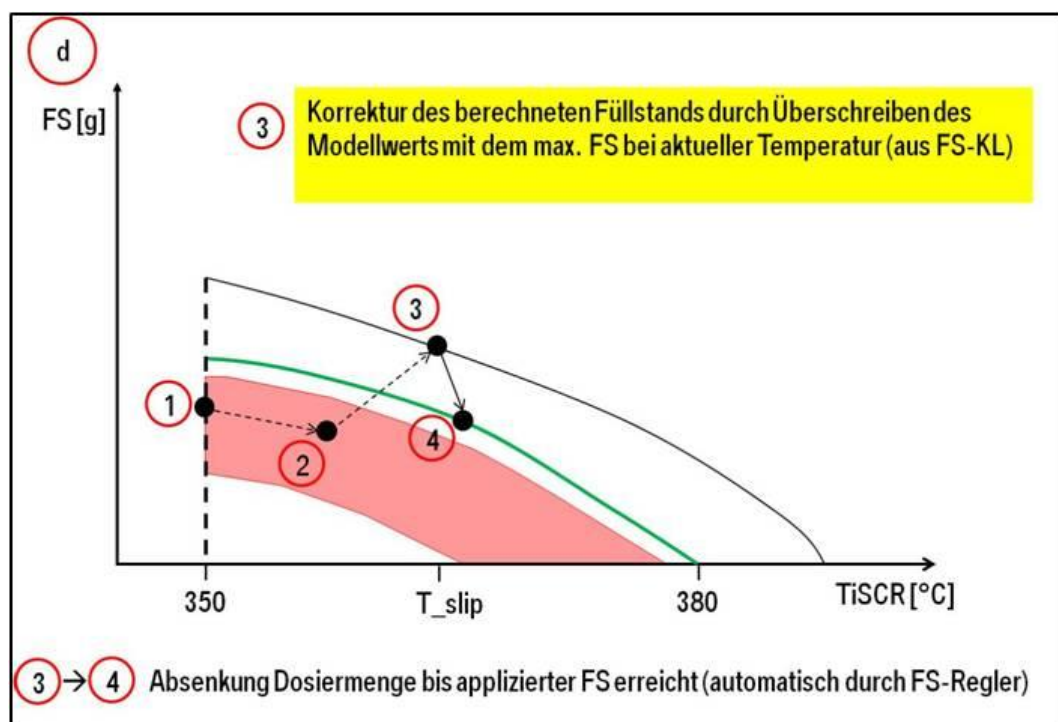


Abbildung 5.4: Konzept Schlupferkennung 4

Neben der Korrektur des Katalysatormodells kann durch dieses Konzept ein weiterer wirkungsgradsteigernder bzw. emissionsmindernder Effekt erzielt werden.

Sollte es im Schlupferkennungs-Modus in einem hochlastigen Betriebspunkt (starke Beschleunigung über längere Zeit) nicht zum Erreichen des Schlupf-schwellwerts am NH₃-Sensor kommen, kann zumindest ein Absinken des Katalysatorfüllstands auf 0 verhindert bzw. verzögert werden.

5.2 MATLAB Simulink-Modell

Das Modell, welches die im vorangehenden Kapitel beschriebene Funktionalität aufweisen sollte, wurde mit dem Programm MATLAB-Simulink erstellt. Dieses Modell wurde wie in Kapitel 4.5 beschrieben, über das Programm E-Hooks in die Motorsteuerung DDE eingebunden.

Als Eingangsgrößen aus der DDE dienen dem Modell die mittlere Katalysator-temperatur und der NH₃-Massenstrom, welcher zum Umsatz des aktuellen NO_x-Massenstroms und zum Ausgleich der oxidierenden NH₃-Menge notwendig ist. Diese Größen werden bereits im Modell des SCR-Katalysators in der Motorsteuerung berechnet. Weiters wird die am NH₃-Sensor nach SCR1 gemessene NH₃-Konzentration als Eingangsgröße verwendet.

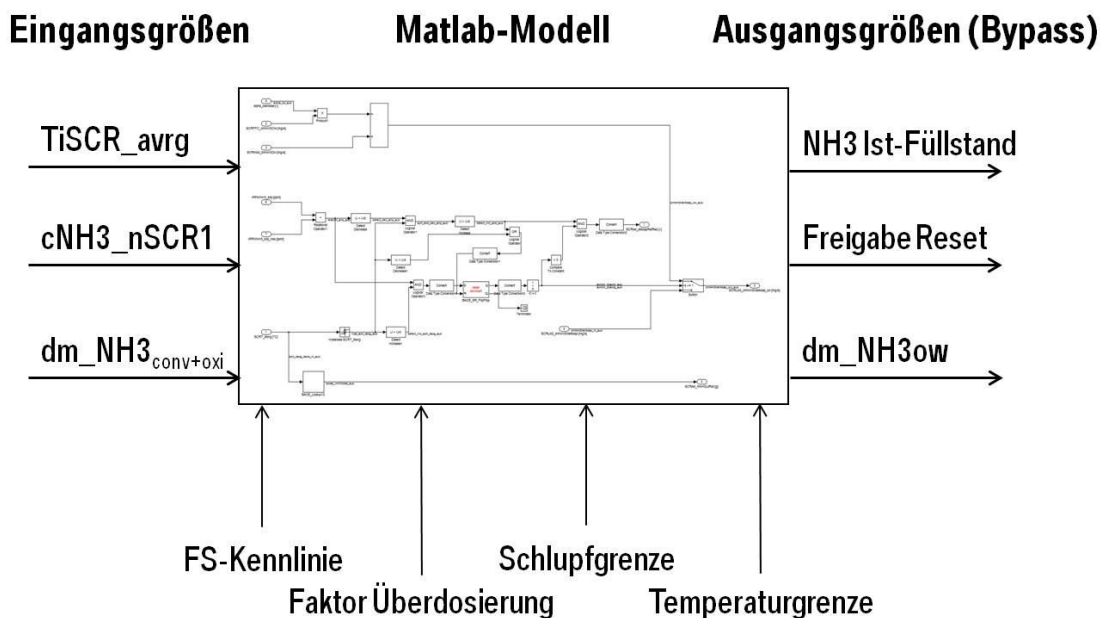


Abbildung 5.5: Schema Schlupferkennungsmodell

Im Modell als Konstanten hinterlegt sind die aus den Füllstandstests ermittelte Füllstandskennlinie, der Überdosierungsfaktor, die Schlupfgrenze, ab der die NH_3 -Konzentration am Sensor als Schlupf gewertet wird, sowie die Temperatur ab der die Schlupferkennungsfunktion aktiv wird.

Die Ausgangsgrößen des Modells sind der tatsächliche Ist-Füllstand des SCR-Katalysators beim Erreichen der Schlupfgrenze, sowie die neue Soll-Dosiermenge, mit welcher die von der Motorsteuerung berechnete Dosiermenge überschrieben wird. Weiters wird bei Erreichen der Schlupfgrenze ein Freigabe-Bit gesetzt, wodurch der von der DDE berechnete Ist-Füllstand des Katalysators mit dem korrigierten Füllstand aus dem Schlupferkennungsmodell überschrieben wird.

5.2.1 Funktionsbeschreibung Modell

Hier soll die Funktionsweise des Modells erläutert werden, welche im Ablaufplan in Abbildung 5.6 dargestellt ist. Der Aufbau aus den in MATLAB verwendeten Funktionsblöcken ist im Anhang ersichtlich.

Wie in Kapitel 5.1 erläutert, erfolgt die Überdosierung der Harnstoff-Wasserlösung ab einer Temperatur von 350°C . Damit es tatsächlich zu einer Überdosierung kommt, muss zusätzlich die Bedingung erfüllt sein, dass noch kein Schlupf nach SCR auftritt. Sollte dieser auftreten, könnte ein Fehler in der Dosiermengenermittlung vorliegen und eine Überdosierung muss verhindert werden.

Die Dosiermenge während des Überdosiervorgangs $dm_{\text{NH}_3_{ow}}$ berechnet sich aus dem in der DDE berechneten Anteil zum Umsatz des momentanen NO_x -Massenstroms $dm_{\text{NH}_3_{conv}}$, dem Überdosierungsfaktor α_{od} sowie dem Oxidationsanteil $dm_{\text{NH}_3_{oxi}}$ (zu den in der DDE berechneten Größen siehe auch Kapitel 3.1).

$$dm_{NH3_{conv}} = dm_{NOx} \cdot eta_{SCR} \cdot f_{st} \quad (5-1)$$

$$dm_{NH3_{ow}} = \alpha_{od} \cdot dm_{NH3_{conv}} + dm_{NH3_{oxi}} \quad (5-2)$$

Während des Überdosiervorgangs wird überprüft, ob die mittlere Katalysatortemperatur größer 330°C ist. Die hier eingebaute Hysterese-Funktion (Beginn Überdosierung bei 350°C, Stopp Überdosierung bei 330°C) verhindert ein Hin- und Herpendeln zwischen dem Überdosiermodus und der Standard-Dosierung.

Wird der maximale Füllstand des Katalysators erreicht und die vorgegebene Schlupfgrenze am NH₃-Sensor überschritten, wird die Dosiermenge wieder auf die DDE-Vorgabe zurückgenommen und ein Reset-Bit auf den Wert 1 gesetzt. Im Moment des Setzens dieses Bits wird der aktuelle Füllstandswert aus der DDE-Berechnung mit dem Maximalfüllstand bei der aktuellen mittleren Katalysatortemperatur überschrieben. Dieser Maximalfüllstand ist in einer Kennlinie in Abhängigkeit der Katalysatortemperatur im Modell hinterlegt. Nach erfolgter Füllstandskorrektur wird das Reset-Bit wieder auf den Wert 0 gesetzt und ist somit bereit für einen neuen Reset.

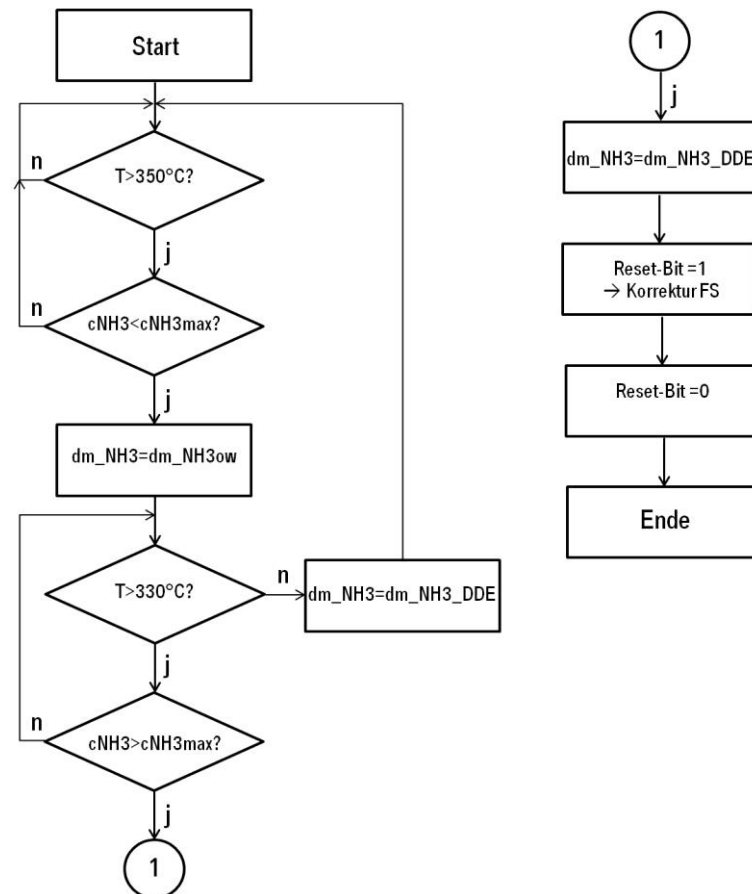


Abbildung 5.6: Ablaufplan Schlupferkennung

5.3 Funktionstest HIL-Prüfstand

5.3.1 Grundlagen HIL

Unter einer HIL-Simulation (Hardware in the Loop) versteht man das Testen eines realen Systems, in diesem Fall des Motorsteuergeräts mit der entsprechenden Software, in einer simulierten Umgebung. Das bedeutet, dass das Steuergerät über seine Ein- und Ausgänge mit einem HIL-Simulator verbunden ist. Hier erfolgt die Berechnung der Eingangssignale, die an das Motorsteuergerät übermittelt werden, auf Basis von mathematischen Modellen in Echtzeit. Durch die Simulation der Sensorsignale und die Rückführung der Aktorsignale des Steuergeräts als Eingangsgrößen für die Simulation entsteht ein geschlossener Regelkreis (Abbildung 5.7) [19].

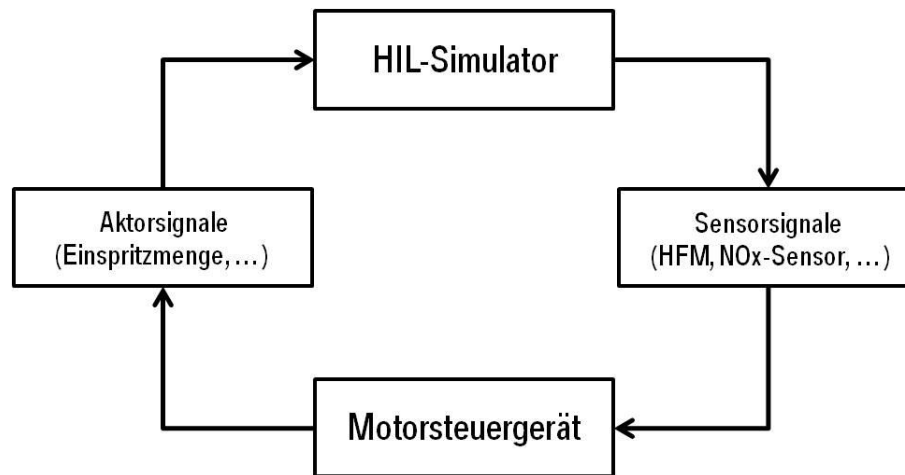


Abbildung 5.7: Regelkreis HIL-Simulation [19]

5.3.2 Ergebnisse HIL-Simulation

Vor der Inbetriebnahme der Versuchssoftware im Fahrzeug wurde die fehlerfreie Funktion am HIL-Prüfstand sichergestellt. Die durchgeführten Funktionstests werden anhand eines Prüflaufs erläutert.

Hierbei wurde durch Vorgabe einer entsprechend hohen Last eine mittlere Katalysatortemperatur SCRT_tAvrg von über 350°C eingestellt. Der Sensorwert des NH₃-Sensors wurde manuell vorgegeben.

Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, steigt die Dosiermenge dm_NH₃ bei Erreichen der Temperaturschwelle durch die Überdosierung stark an. Wird ein NH₃-Sensorwert größer als die eingestellte Schlupfgrenze erreicht (in diesem Fall 50ppm), wird das Reset-Bit auf 1 gesetzt, die Dosiermenge zurückgenommen und der Wert des Reset-Bits wieder auf 0 zurückgesetzt. In den Detail a und b in Abbildung 5.8 ist ersichtlich, wie der Ist-Füllstand im Moment des Setzens des Reset-Bits auf den Wert des Maximal-Füllstands springt. In Detail c erfolgt diese Korrektur nicht, da hier zwar die Schlupf-Bedingung erfüllt ist, die Temperaturschwelle von 350°C bzw. 330°C aber unterschritten wurde.

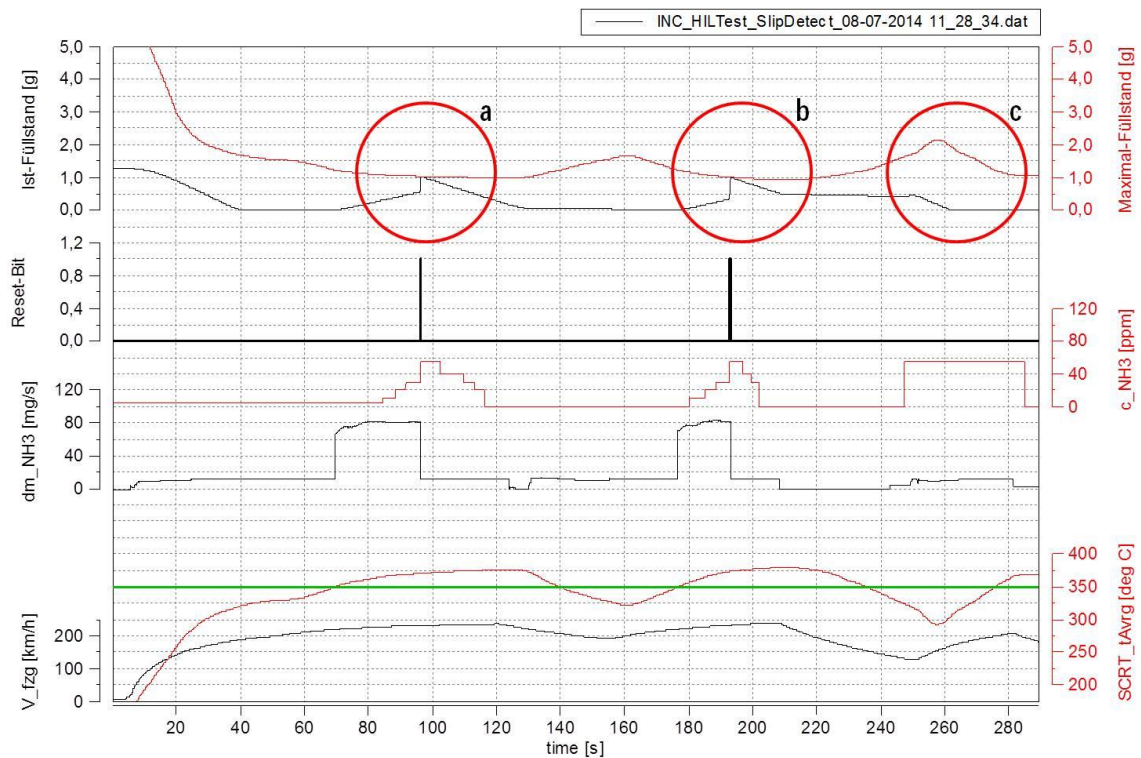


Abbildung 5.8: Funktionstest HIL

5.4 Versuchsaufbau Fahrzeug

Die Untersuchungen zur Bewertung des Konzepts Schlupferkennung im realen Fahrbetrieb wurden in einem Fahrzeug mit einem B47D2000 Motor (siehe Kapitel 4.7.1) durchgeführt. Da das in Kapitel 3.2 beschriebene Absinken des Katalysatorfüllstands vor allem bei schweren Fahrzeugen problematisch ist, wurde ein BMW F11 B47D2000 EU6 AWD (520xDrive) ausgewählt, welcher über einen Allradantrieb verfügt.

Dieses Fahrzeug verfügt zur Minderung der NO_x-Emissionen über einen NSC in Verbindung mit einem SCR-System am Unterboden (Daten Abgassystem siehe Tabelle 5-1). Alle Komponenten wurden in gealtertem Zustand (FUL Full usefull life) verbaut.

Tabelle 5-1: Daten Abgasanlage Versuchsfahrzeug

Benennung	Querschnittsfläche	Volumen	Material	Zelligkeit	Wandstärke	Pt	Pd	Rh
	mm ²	dm ³		cpsi	mil	g/cft	g/cft	g/cft
NSC	18192	2	Cordierit	400	4	90	8,5	4,5
CSF (Zone1)	18192	0,9	Siliziumkarbid	300	12	33	17	0
CSF (Zone2)	18192	1,8	Siliziumkarbid	300	12	36	4	0
SCR1 (Cu)	19042	2,9	Cordierit	400	4	0	0	0
SCR1 (Cu)	19042	1,9	Cordierit	400	4	0	0	0

Die bestehende Abgasanlage wurde dahingehend modifiziert, dass wie bei den Untersuchungen am Motorprüfstand zwei SCR-Katalysatoren in Serie verbaut wurden. Der Aufbau der Versuchsabgasanlage sowie die eingesetzte Sensorik entsprechen dem in Kapitel 4.2 und 4.3 vorgestellten Konzept. Im Versuchsfahrzeug wurde Wert darauf gelegt, ein Gesamtvolumen des SCR-Systems von 4,8l, wie es in der Serie zur Anwendung kommt, nicht zu überschreiten. Somit wurden Katalysatoren mit einem Volumen von 2,9l und 1,9l verbaut. In Abbildung 5.9 ist die Einbauposition der NH₃- und NO_x-Sensoren im Zwischenrohr bzw. nach SCR2 ersichtlich.

Der Temperatursensor TvSCR im Zwischenrohr dient dem Katalysatormodell in der DDE zur Modellierung der mittleren Katalysatortemperatur des ersten SCR-Katalysators. Weiters sind die verbauten Temperaturmessstellen in SCR1 und SCR2 zur Ermittlung des Temperaturverlaufs ersichtlich.

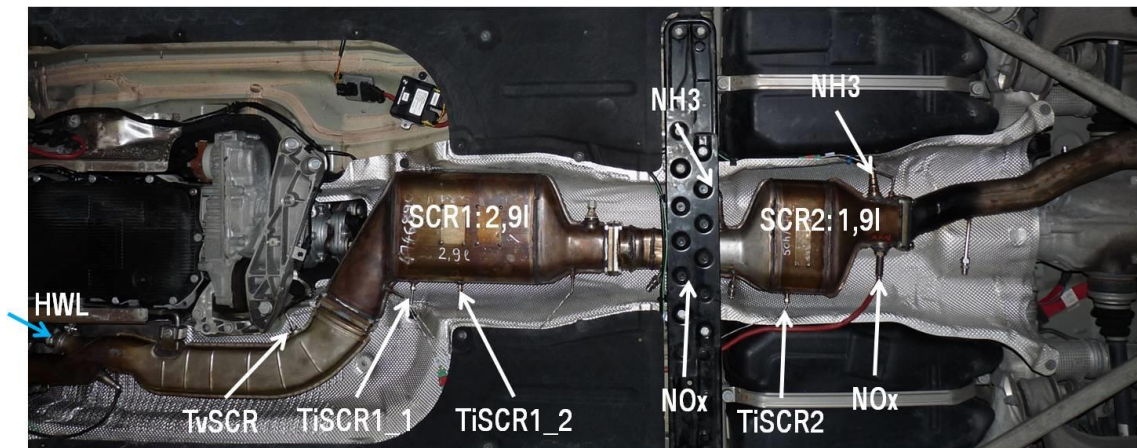


Abbildung 5.9: Fahrzeugeinbau

5.5 Versuchsprogramm Fahrzeug

5.5.1 Straßenversuche

Die Erprobung des Schlupferkennungskonzepts erfolgte auf der Autobahn A1. Die Versuche auf der Strecke zwischen der Autobahnauffahrt Oed und Sattledt können in vier Bereiche eingeteilt werden (Abbildung 5.10).

Am Beginn des Tests erfolgte die Entleerung der SCR-Katalysatoren, was durch das Abschalten der HWL-Dosierung über einen längeren Zeitraum erreicht wurde. Die Überprüfung der Entleerung erfolgte über die NO_x-Sensoren vor SCR1 bzw. nach SCR2. Wird an beiden Positionen die gleiche NO_x-Konzentration erfasst, kann von einem vollständig entleerten SCR-System ausgegangen werden.

Nach der abgeschlossenen Entleerung wurde der Katalysator wieder vollständig befüllt. Die vollständige Befüllung wurde durch Erreichen des Soll-Füllstands überprüft.

Im Anschluss an die Befüllung erfolgte ein gezieltes „Verlernen“ des Katalysatormodells. Die gezielte Unterdosierung des Reduktionsmittels wird durch die manuelle Vorgabe eines Dosiermengen-Adaptionsfaktors kleiner 1 erreicht.

Dieser Adaptionfaktor wird im Normalbetrieb in einer Funktion der Motorsteuerung berechnet, welche eine mögliche Über- bzw. Unterdosierung der Harnstoff-Wasserlösung erkennt und über diesen Adaptionfaktor ausgleicht.

Der eigentliche Test des Schlupferkennungskonzepts erfolgte auf dem Autobahnabschnitt zwischen St. Valentin und Oed. Aufgrund der Fahrbahnsteigung werden hier mittlere Katalysatortemperaturen von über 350°C erreicht. Nach der erfolgreichen Korrektur des Füllstandmodells wurde der Katalysator wieder entleert. Über die noch umgesetzte NO_x-Masse nach dem Abschalten der Dosierung konnte auf die tatsächlich im Katalysator befindliche NH₃-Masse nach der Korrektur geschlossen werden.

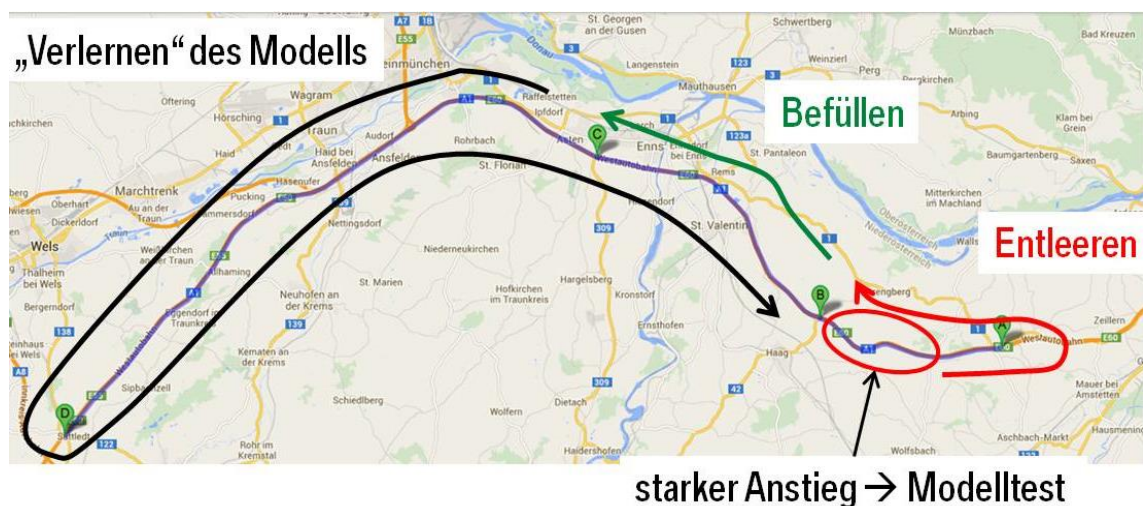


Abbildung 5.10: Ablauf Fahrzeugtests

5.5.2 Untersuchungen am Rollenprüfstand

Zur Ermittlung des Potentials des Schlupferkennungskonzepts hinsichtlich NO_x-Emissionsminderung wurden am Rollenprüfstand Tests mit und ohne aktive Schlupferkennungsfunktion durchgeführt. Ähnlich den Versuchen auf der Straße erfolgte auch hier zu Beginn die Entleerung sowie die definierte Befüllung des Katalysators in einem sogenannten Pre-Test (Abbildung 5.11). Die Entleerung erfolgte bei einer 10-minütigen Konstantfahrt bei 100km/h.

Anschließend wurde der Katalysator in zwei EUDC-Zyklen befüllt. Auch hier wurde durch die manuelle Vorgabe eines Dosiermengen-Adaptionsfaktors ein Verlernen des Füllstandmodells simuliert.

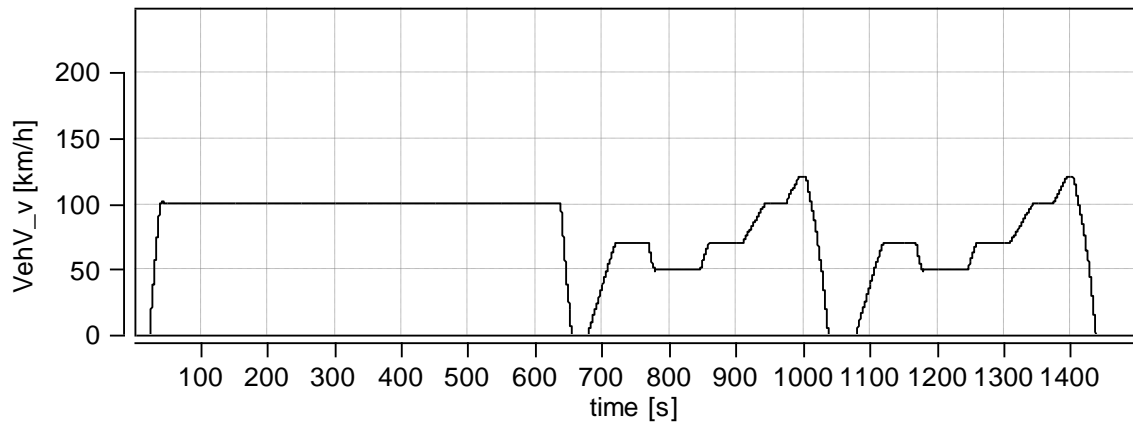


Abbildung 5.11: Geschwindigkeitsprofil Pre-Test

Der eigentliche Modelltest fand im Random Cycle Aggressive (RCA) statt. Dieser Test soll das Fahrverhalten eines sportlichen Fahrers unter realen Fahrbedingungen abbilden. In Abbildung 5.12 ist der Geschwindigkeitsverlauf dieses Tests dargestellt:

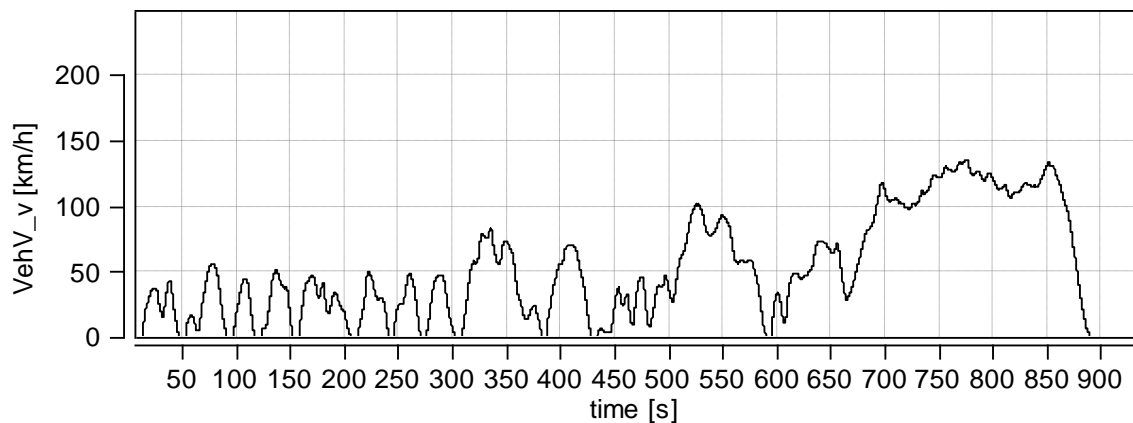


Abbildung 5.12: Geschwindigkeitsprofil RCA

Um sicherzustellen, dass die Temperaturschwelle von 350°C für den Modelltest erreicht wird, wurden die Tests auf dem Rollenprüfstand mit der Schwungmasse eines BMW F07 (BMW 5er GT) gefahren.

5.6 Ergebnisse Fahrzeugtests

5.6.1 Ergebnisse Straßenversuche

Die Ergebnisse der Fahrzeuguntersuchungen sollen anhand eines Testlaufs gezeigt werden.

5.6.1.1 Entleer- und Befüllvorgang

Der Befüll-, Entleer- und Verlern-Vorgang erfolgte bei einer Konstantfahrt bei 100km/h (siehe Abbildung 5.13). Am Beginn des Testlaufs wurde die NH_3 -Dosierung abgeschaltet ($\text{dm}_{\text{NH}_3}=0$). Nach Erreichen eines Ist-Füllstands von 0g bzw. nach dem Absinken des SCR-Wirkungsgrads Eta_{SCR} auf 0 begann die Befüllung des Katalysators. Diese wurde mit einem Adaptionfaktor fac_{adap} von 1 durchgeführt, bis der Soll-Füllstand erreicht wurde (Ist-Füllstand = Soll-Füllstand).

Anschließend wurde der Adaptionfaktor fac_{adap} auf 0,8 abgesenkt, um das „Verlernen“ des Modells zu simulieren.

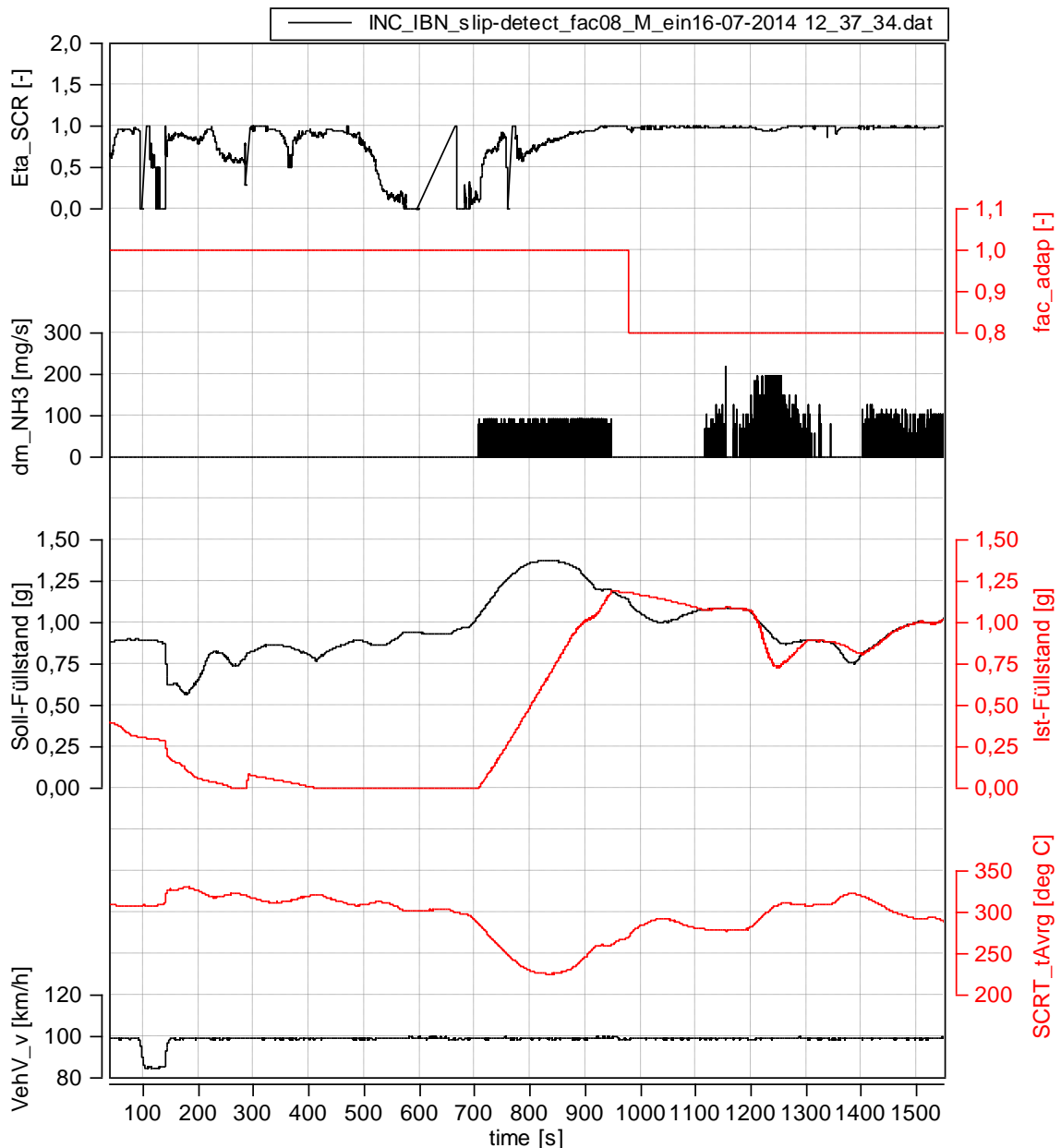


Abbildung 5.13: Fahrzeugtest Befüllen/Entleeren

5.6.1.2 Füllstandskorrektur

Wie in Abbildung 5.14 ersichtlich, kommt es durch die Steigung der Fahrbahn und der Erhöhung der Geschwindigkeit ab Sekunde 4000 zu einem starken Anstieg der mittleren Katalysatortemperatur. Beim Erreichen der Temperaturgrenze von 350°C (1) beginnt der Überdosiervorgang mit einem Überdosierungsfaktor von $\alpha_{od}=2$, ersichtlich an der Steigerung der Dosiermenge dm_{NH_3} . Dadurch steigt der berechnete Ist-Füllstand über das Niveau des Maximal-Füllstands an.

Wird die Schlupfschwelle von 50ppm nach SCR1 erreicht (2), erfolgt die Korrektur des Füllstands, und der Überdosiervorgang wird beendet. Der Ist-Füllstand wird auf den Maximalfüllstand des Katalysators zurückgesetzt.

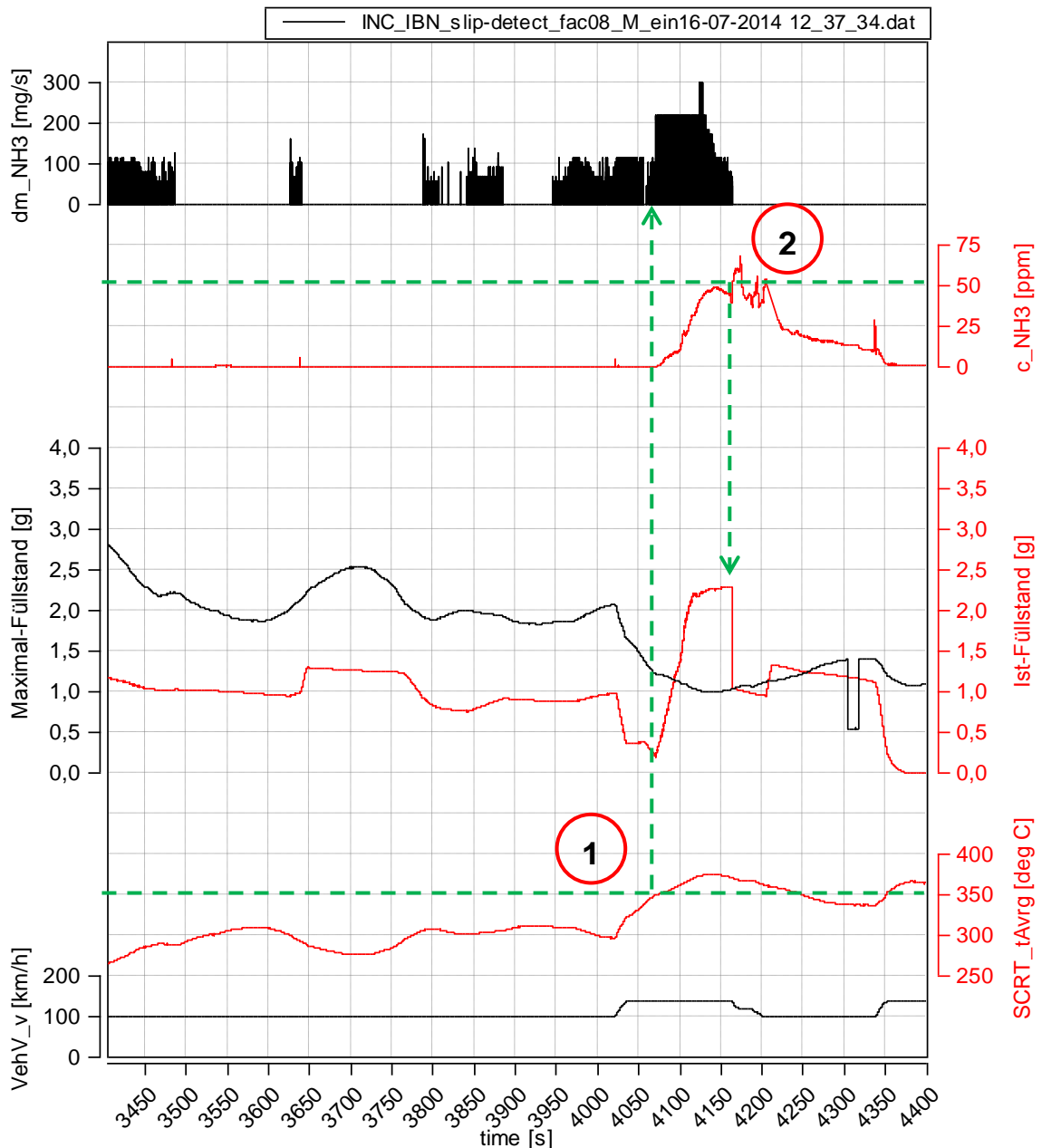


Abbildung 5.14: Fahrzeugtest Füllstandskorrektur

5.6.1.3 Entleervorgang nach Füllstandskorrektur

Nach der Korrektur des Füllstands wurde die tatsächlich im Katalysator enthaltene NH_3 -Menge ermittelt (Abbildung 5.15). Dazu wurden die HWL-Dosierung abgeschaltet und der Katalysator entleert ($c_{NOx_vSCR1}=c_{NOx_nSCR2}$).

Über die bis zur vollständigen Entleerung umgesetzte NOx-Masse konnte das NH₃-Äquivalent $m_{\text{NH}_3_conv_kum}$ ermittelt werden. Die in SCR2 enthaltene NH₃-Masse $m_{\text{NH}_3_SCR2}$ konnte durch die Massenbilanz am Katalysator berechnet werden, wobei der zu- und abfließende NH₃-Massenstrom über die NH₃-Konzentrationen vor bzw. nach SCR2 erfasst wurde.

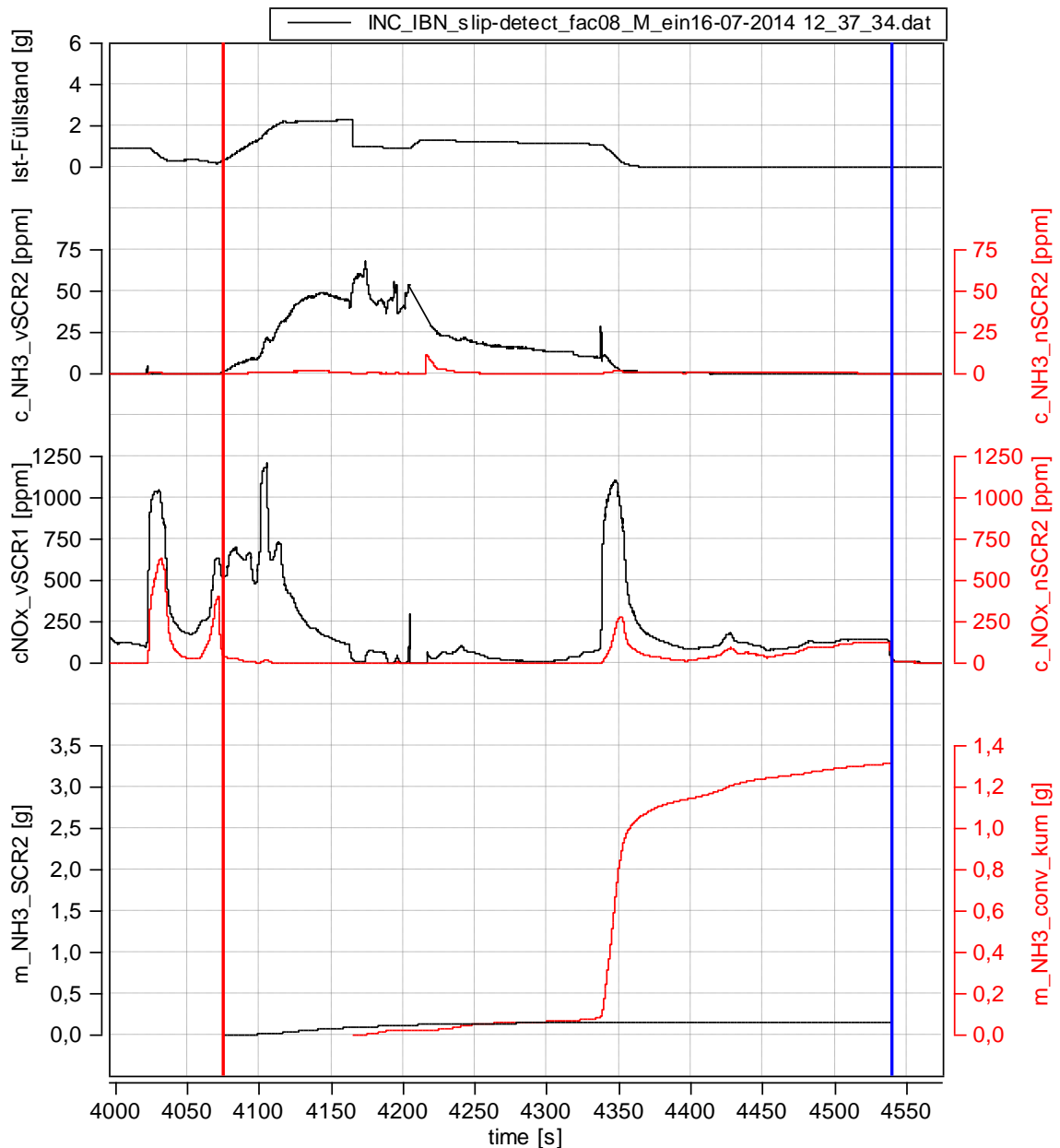


Abbildung 5.15: Berechnung gespeicherte NH₃-Massen

Somit ergeben sich aus der Berechnung folgende NH₃-Massen (Tabelle 5-2):

Tabelle 5-2: gespeicherte NH₃-Massen

Bezeichnung	g
Umgesetzte NH ₃ -Masse	1,314
NH ₃ -Masse in SCR2	0,156
NH ₃ -Masse in SCR1	1,158
NH ₃ -Korrekturwert	1,036
Delta m_NH3	0,122

Es zeigt sich, dass zwischen dem NH₃-Korrekturwert und der tatsächlich im Katalysator enthaltenen NH₃-Masse eine Differenz von nur 0,122g besteht, was eine deutliche Verbesserung zum Seriensystem bedeutet. Diese Ergebnisse wurden mit einer eingestellten Schlupfgrenze von 50ppm NH₃ und einem Überdosierungsfaktor von $\alpha_{od}=2$ erreicht.

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass während des Überdosiervorgangs ein ausreichend großer Überdosierungsfaktor $\alpha_{od} \geq 2$ gewählt werden muss. Somit kann sichergestellt werden, dass der auftretende Schlupf schnell durch eine vollständige Befüllung des Katalysators zustande kommt. Bei zu klein gewähltem Überdosierungsfaktor oder auch bei zu niedrig gewählter Schlupfschwelle kann die Schlupfgrenze bereits durch den Austrag von eingelagertem NH₃ durch den Temperaturanstieg im Katalysator erreicht werden. Da der Katalysator in diesem Fall nicht zu 100% befüllt ist, kommt es bei der Korrektur des Ist-Füllstands zu großen Abweichungen zwischen dem NH₃-Korrekturwert und der tatsächlich im Katalysator enthaltenen NH₃-Masse.

5.6.1.4 Temperaturverläufe Abgassystem

Wie in Abbildung 5.16 ersichtlich, gibt die berechnete mittlere Katalysatortemperatur SCRT_tAvg sehr gut den Temperaturverlauf des Mittelwerts aus den Temperaturen in SCR1 (T_iSCR1_1 und T_iSCR1_2, siehe Abbildung 5.9) wieder. Aufgrund der Einbausituation beträgt die Temperaturspreizung zwischen SCR1 und SCR2 im Mittel ungefähr 70°C.

Dadurch kann sichergestellt werden, dass stets eine ausreichende NH_3 -Speicherfähigkeit des zweiten SCR-Katalysators zur Aufnahme des NH_3 -Schlupfs während des Überdosiervorgangs gegeben ist.

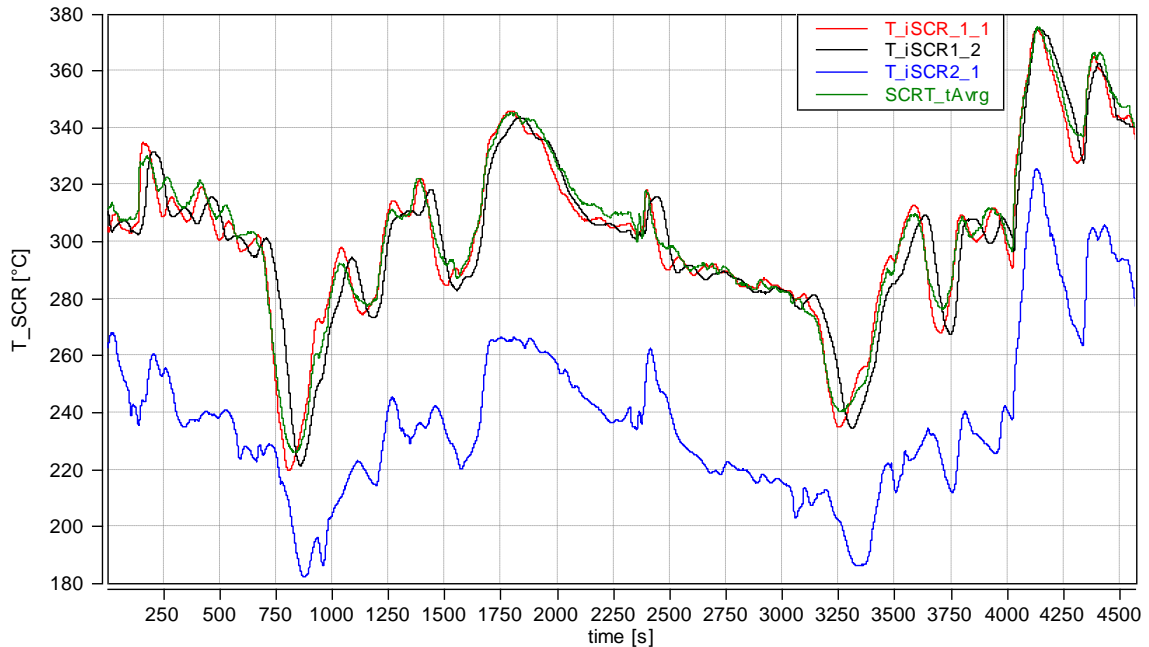


Abbildung 5.16: Temperaturverläufe Abgassystem

5.6.2 Ergebnisse Rollenprüfstand

5.6.2.1 Entleer- und Befüllvorgang

Wie in Abbildung 5.17 ersichtlich, wird der SCR-Katalysator während der ersten 10 Minuten des Pre-Tests vollständig entleert. Diese geschieht bei einer Konstantfahrt mit 100km/h im 4. Gang. Im hier verwendeten Datenstand ist die HWL-Dosierung bei Abgasmassenströmen über 350kg/h gesperrt. Dieser Schwellwert wird nur in der Entleerphase überschritten, wodurch die HWL-Dosierung somit nur in der Befüllphase aktiv ist. Die Befüllung wurde auch mit einem Adaptionfaktor fac_adap von 0,9 durchgeführt, um ein „Verlernen“ zu simulieren.

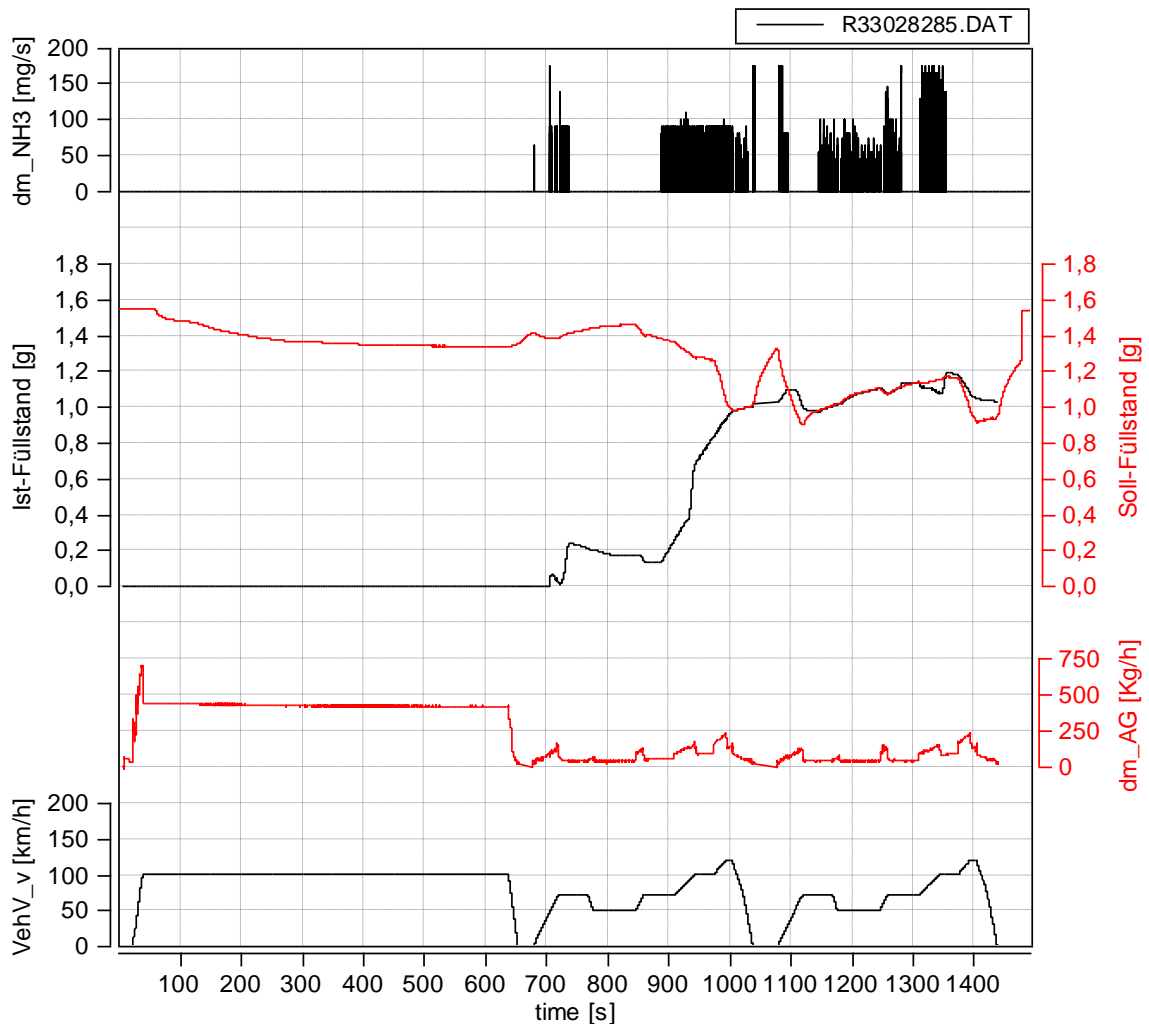


Abbildung 5.17: Rollentest Befüllen/Entleeren

5.6.2.2 Modelltest im Random Cycle Aggressive

Die Untersuchungen am Rollenprüfstand im RCA wurden mit den Adaptionfaktoren 0,9 und 1 bei ein- sowie ausgeschalteter Schlupferkennungsfunktionalität durchgeführt. Da der RCA direkt im Anschluss an den Pre-Test erfolgte, wurde auf eine gleichbleibende Starttemperatur bei allen Versuchen geachtet. Für die Untersuchungen am Rollenprüfstand wurden ein Überdosierungsfaktor von $\alpha_{od}=3$ und eine Schlupfschwelle von 35ppm NH_3 gewählt. In Abbildung 5.18 ist der Vergleich zwischen den kumulierten NO_x -Emissionen TP_NOX_COMM in den durchgeführten Tests dargestellt.

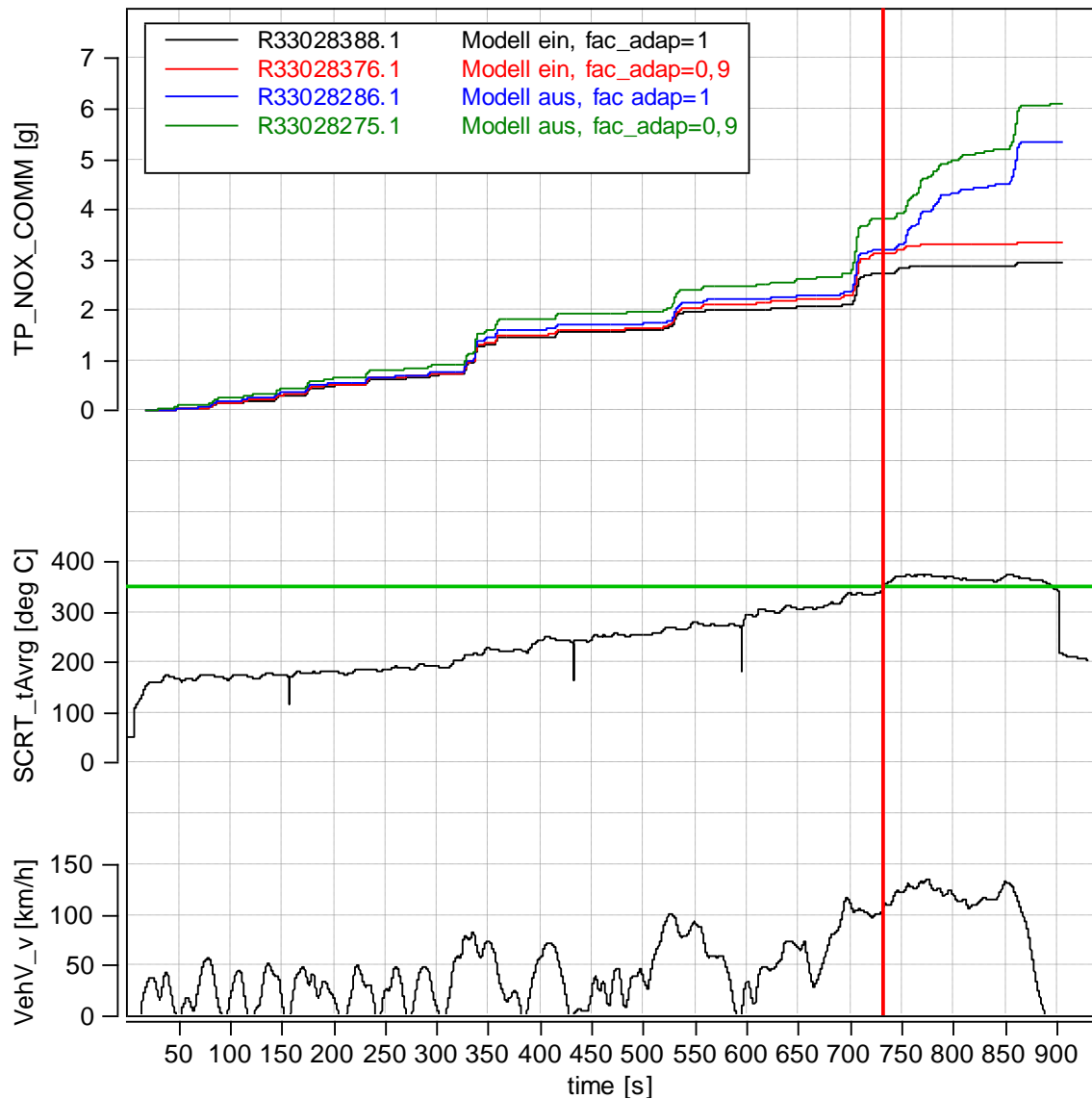


Abbildung 5.18: Rollentest RCA

Es ist ersichtlich, dass der NO_x-Ausstoß durch den Einsatz der Schlupferkennungsfunktion bei einem Adaptionfaktor von 0,9 von 6,089g auf 3,353g abgesenkt werden konnte. Bei einem Adaptionfaktor von 1 konnte eine Absenkung von 5,345g auf 2,965g erreicht werden, was bei einer Zykluslänge von 12,88km einer NO_x-Emission von 0,23g/km entspricht. Die Überdosierung zum Erreichen der Schlupfgrenze erfolgte, wie erläutert, ab einer mittleren Katalysatortemperatur von 350°C (roter Cursor). Aus Abbildung 5.18 ist ersichtlich, dass bei aktiver Schlupferkennung (und somit Überdosierung) ein nennenswerter Anstieg der NO_x-Emissionen verhindert werden kann.

Im Bereich unter 350°C Katalysatortemperatur sind Unterschiede im Anstieg der kumulierten NO_x-Emissionen ersichtlich, die auf den abgesenkten NH₃-Füllstand durch den Adaptionfaktor fac_adap sowie auf geringe Unterschiede in der AGR-Abschaltung zurückgeführt werden können.

5.7 Fazit Fahrzeugbetrieb

Aus den Versuchsergebnissen des Fahrzeugbetriebs können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Nach der erfolgreichen Erprobung am HIL-Prüfstand konnte auch im Fahrzeugbetrieb die Funktion des Konzepts Schlupferkennung bestätigt werden. Die Überdosierung erfolgte ab der eingestellten Temperaturschwelle, bis die Korrektur des Füllstands nach Erreichen der Schlupfgrenze erfolgte. Es bewährten sich ein Überdosierungsfaktor $\alpha_{od} \geq 2$, sowie eine Schlupfschwelle von 35-50ppm.
- Durch die Entleerung des Katalysators und die Ermittlung der Differenz zwischen dem NH₃-Korrekturwert und der tatsächlich im Katalysator enthaltenen NH₃-Masse konnten die Ergebnisse aus den Versuchen zur Ermittlung des NH₃-Speichervermögens plausibilisiert werden.
- Aufgrund der sich durch die Einbausituation ergebenden Temperaturdifferenz zwischen SCR1 und SCR2 kann gewährleistet werden, dass nach SCR1 auftretender NH₃-Schlupf in SCR2 gespeichert wird. Dieser Umstand birgt weiteres Potential für den aktiven Betrieb des zweiten Katalysators.
- Im Random Cycle Aggressive konnte eine signifikante Verbesserung hinsichtlich NO_x-Emissionen im Vergleich zum Betrieb ohne Schlupferkennungsfunktion erreicht werden. Durch den Einsatz dieser Funktion konnte das NO_x-Emissionsniveau bei verlerntem Modell nahezu halbiert werden.

- Erste Versuche, den NH_3 -Schlupf über den im Zwischenrohr verbauten NO_x -Sensor zu detektieren, brachten keine zufriedenstellenden Ergebnisse hervor. Hier sind weitere Untersuchungen zu diesem Thema notwendig.
- Die zur Regeneration des NSC eingesetzten Fettphasen zeigten eine beeinträchtigende Wirkung auf das Ausgangssignal des NH_3 -Sensors. Daher sollte die NSC-Regeneration in weiterer Folge während des Betriebs der Schlupferkennungsfunktion gesperrt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Konzepte zur Wirkungsgradsteigerung von modernen SCR-Systemen erarbeitet. Zur Beurteilung der Konzepte hinsichtlich Machbarkeit wurden Untersuchungen am Motorprüfstand, am HIL-Simulator, sowie mit einem Versuchsfahrzeug auf der Straße durchgeführt.

Zur Bewertung des Konzepts der Schlupfregelung wurde der Regelkreis bestehend aus Dosiermodul, SCR-Katalysator und NH_3 -Sensor hinsichtlich Übertragungsverhalten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine Regelung im herkömmlichen Sinn aus mehreren Gründen nicht realisierbar ist. Zum einen zeigte sich aus den Ergebnissen der Sprungantworten, dass sich ein eingeschwungener NH_3 -Schlupf nach dem SCR-Katalysator auch in gealtertem Zustand erst nach mehr als 90s (im Bestpunkt der Untersuchungen) einstellte. Zum anderen zeigte der eingesetzte NH_3 -Sensor gravierende Abweichungen zu dem am Motorprüfstand eingesetzten FTIR-Messgerät. Der Sensor gibt zwar qualitativ das Verhalten des Messgeräts wieder, jedoch konnte auch durch eine durchgeführte Einflussanalyse kein geeigneter Korrekturfaktor zur Kompensation der Abweichung ermittelt werden. Im Hinblick auf den hochdynamischen Betrieb im Fahrzeug kommt eine Schlupfregelung somit nicht in Frage. Für den weiteren Einsatz des NH_3 -Sensors, auch in anderen Anwendungen, sollten tiefgreifende Untersuchungen zur Ermittlung einer Korrekturfunktion durchgeführt werden.

Somit wurde ein zweites Systemkonzept entwickelt, mit dem das bislang verwendete Füllstandsmodell in der Motorsteuerung mit der Realität abgeglichen werden kann. Dieses Konzept nutzt den NH_3 -Sensor, um eine vollständige Befüllung des SCR-Katalysators zu erkennen. Mit diesem zweiten, Schlupferkennung genannten Konzept, welches als Modell in MATLAB Simulink erstellt und am HIL-Simulator getestet wurde, konnten in den durchgeführten Fahrzeugtests sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Funktion der Füllstandskorrektur wurde im Zuge der Erprobung auf der Autobahn bestätigt. Durch das gute qualitative Verhalten des NH_3 -Sensors konnte auftretender NH_3 -Schlupf sicher detektiert werden.

Weiters konnte der Vergleich zwischen dem Korrekturwert und der tatsächlich im Katalysator gespeicherten Menge an NH_3 hergestellt werden. Somit konnten auch die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Ermittlung des NH_3 -Speichervermögens bestätigt werden.

Die am Rollenprüfstand durchgeführten Untersuchungen im Random Cycle Aggressive zeigten, dass das Emissionsniveau durch den Einsatz der Schlupferkennungsfunktion nahezu halbiert werden konnte.

Die so gewonnen Erkenntnisse bilden eine gute Basis für die Weiterentwicklung des Systems. Neben der Bewertung des Schlupferkennungskonzepts in weiteren Rollentests hinsichtlich des Emissionsminderungspotentials soll auch die Funktionalität des eingesetzten Modells weiterentwickelt werden. Dazu gehört unter anderem die gezielte Entleerung des zweiten SCR-Katalysators, um ein Übergehen des Katalysators mit einer damit verbundenen NH_3 -Emission nach mehrmaliger Füllstandskorrektur zu verhindern. Auch der mögliche Einsatz eines ASC (Amonia Slip Catalyst) zur Oxidation des auftretenden NH_3 -Schlupfs könnte Ziel weiterer Untersuchungen sein. Somit könnte auch der in der Motorsteuerung applizierte Soll-Füllstand zur Erreichung höherer Wirkungsgrade angehoben werden.

Da ein Verlernen des Katalysatorfüllstands erst nach einer längeren Fahrtstrecke von Bedeutung ist, muss eine Korrektur erst nach längerem Betrieb des Fahrzeugs erfolgen. Somit macht es Sinn, eine Funktion zu implementieren, welche die Korrekturfunktion auf Basis der durch den Katalysator geströmten NO_x -Masse freischaltet.

Optimierungspotential hinsichtlich Systemkosten besteht möglicherweise in der Verwendung eines NO_x -Sensors zur Schlupferkennung. Hierzu sollen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um zu eruieren, ob eine sichere Unterscheidung zwischen NO_x und NH_3 auf Basis der NH_3 -Querempfindlichkeit des NO_x -Sensors möglich ist.

7. Literaturverzeichnis

- [1] BASSHUYSEN, R., SCHÄFER F. (Hrsg.), „Handbuch Verbrennungsmotor“, 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-1549-1
- [2] MERKER, G., SCHWARZ C., TEICHMANN, R. (Hrsg.), „Grundlagen Verbrennungsmotoren“, 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-1987-1
- [3] PISCHINGER, R., KLELL, M., SAMS, T., „Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine“, 3. Auflage, Springer Verlag, 2009, Wien, New York, ISBN: 978-3211-99276-0
- [4] Reif, K. (Hrsg.), „Dieselmotor-Management“, 5. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-1715-0
- [5] EICHLSEDER, H., „Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung“, Vorlesungsskript, TU Graz, 2012
- [6] HAUSBERGER, S., SAMS T., „Schadstoffbildung und Emissionsminderung bei KFZ“, Vorlesungsskript, TU Graz, 2010
- [7] MOLLENHAUER K., TSCHÖKE, H. (Hrsg.), „Handbuch Dieselmotoren“, 3. Auflage, Springer Verlag, 2007, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN: 978-3-540-72164-2
- [8] SCHMITT A., „Beitrag zur NOx Emissionsminderung für Niedrig-Emissions-Fahrzeugangwendungen mittels Selektiver-Katalytischer-Reduktion“, TU Darmstadt, Dissertation, 2013
- [9] BRÜNE, H.-J., BITTERMANN, A., FORTNER, T., „RDE – Die Herausforderung für den Dieselantrieb von morgen“, 8. Internationales Forum Abgas- und Partikel-Emissionen, Ludwigsburg 2014
- [10] HAUSBERGER, S., STURM, P., „Umweltauswirkungen des Verkehrs“, Vorlesungsskript, TU Graz, 2011

- [11] DELPHI, „World Emissions Standards – Passenger Cars and Light Duty Vehicles 2013/2014“, <https://delphi.com/pdf/emissions/Delphi-Passenger-Car-Light-Duty-Truck-Emissions-Brochure-2013-2014.pdf> [Datum des Zugriffs: 18.09.2014]
- [12] HAUSBERGER, S., SCHÜSSLER, M., „Schadstoffbildung und Emissionsminderung bei KFZ, Teil 3 SCR“, Vorlesungsskript, TU Graz, 2010
- [13] KEUPER, A., HUANG, J., BRESSLER, H., ALBRECHT, W., „Eine saubere Lösung – Abgasnachbehandlung“, Bosch Rexroth AG, bauma 2013
- [14] dSPACE MicroAutoBox – Product Information 2014, https://www.dspace.com/de/gmb/home/medien/papers/download_page.cfm?FileID=1000&view=pdf [Datum des Zugriffs: 10.07.2014]
- [15] Dspace Webseite, <http://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/micautob.cfm>, [Datum des Zugriffs: 18.09.2014]
- [16] Flyer E-Hooks V3, 2014, <http://www.etas.com/de/downloadcenter/15903-15905.php>, [Datum des Zugriffs: 18.09.2014]
- [17] ARDEY, N., STÜTZ, W., HIEMESCH, D., KAUFMANN, M., „Die neuen Drei- und Vierzylinder-Dieselmotoren von BMW“, In MTZ- Motortechnische Zeitschrift 07(2014), S. 46-53
- [18] LANZERATH, P., „Alterungsmechanismen von Abgaskatalysatoren für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren“, TU Darmstadt, Dissertation, 2011
- [19] KIESENHOFER, M., „Bewertung virtueller Fahrzyklen am HIL-Simulator als Ergänzung zum Rollenprüfstand, TU Graz, Diplomarbeit, 2014
- [20] WANG, D.Y., SHENG, Y., SHOST, M., YOO, J., CABUSH, D., RACINE, D., CLOUDT, R., WILLEMS, F., „Ammonia Sensor for Closed-Loop SCR Control“, SAE Technical Paper 2008-01-0919, 2008

- [21] MENESKLOU, W., „Systematische Produktentwicklung in der Sensorik“ ,
Vorlesungsunterlagen, Karlsruher Institut für Technologie, 2011

8. Anhang

8.1 MATLAB-Modell

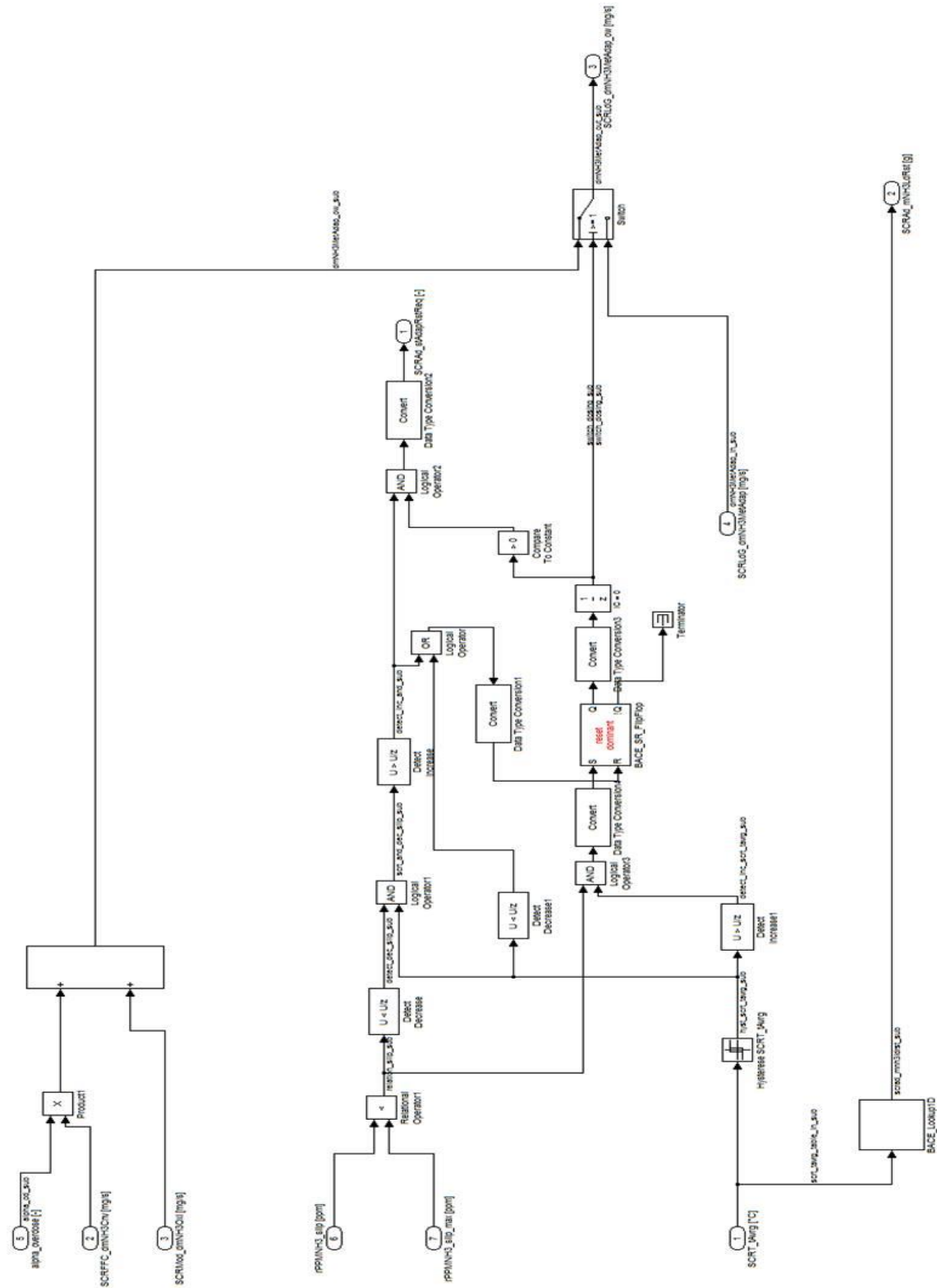


Abbildung 8.1: Modell Schlupferkennung