

***Diplomarbeit***

**AUFBAU EINES SCR-PRÜFSTANDES AM  
TRANSIENTENPRÜFSTAND DER TU-GRAZ**

**Stadlhofer Werner**  
Technische Universität Graz

Begutachter:  
Ao.Univ.Prof.Dr. Stefan Hausberger  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU-Graz

Betreuender Assistent  
Dipl.Ing. Michael Stefan Zallinger

Graz, im März 2007

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTTLICHE 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## 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)

## Vorwort

Die Diplomarbeit „Aufbau eines SCR-Prüfstandes am Transientenprüfstand der TU-Graz“ entstand im Zeitraum von März 2006 bis Oktober 2006 am Fachbereich Emissionen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU-Graz.

An erster Stelle möchte ich mich beim Institutsvorstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik Herrn o.Univ.-Prof.Dipl.Ing.Dr.techn. Helmut Eichlseder bedanken für das Ermöglichen dieser Diplomarbeit und die Zurverfügungstellung der Einrichtungen des Instituts.

Mein besonderer Dank gilt auch den Herren ao.Univ.-Prof.Dipl.Ing.Dr.techn. Stefan Hausberger und Univ.Ass.Dipl.Ing. Michael Stefan Zallinger für die hervorragende Betreuung der Diplomarbeit und die vielen hilfreichen Ratschläge und Hinweise während meiner Arbeit.

Weiters möchte ich mich bei der Firmen Roth Technik Austria und CERAM insbesondere den Herren Dipl. Ing. Armin Angele und Dr. Christian Eck von Roth Technik Austria sowie Frau Dr. Irene Begsteiger und Herrn Dr. Jürgen Züribig von CERAM für die Bereitstellung des Katalysatorsystems und die Unterstützung während meiner Diplomarbeit recht herzlich bedanken.

Ebenso gilt mein Dank auch der Firma BOSCH in Hallein, insbesondere Herrn Dipl.Ing. Jaroslav Hlousek und Herrn Dipl.Ing. (FH) Jens Leideck für die Zurverfügungstellung des Harnstoff-Dosiersystems und die wertvollen Hinweise für die Inbetriebnahme des Systems.

Für die Arbeiten zum Aufbau des Prüfstandes und des Katalysatorsystems möchte ich bei den Herren aus der Institutswerkstatt Gerald Nöhner, Michael Barth und Markus Krebs recht herzlich bedanken.

Ebenfalls bedanken möchte in diesem Zusammenhang bei den Herren Siegfried Gimpel und Philipp Leonhardt für den Aufbau des Ammoniakmeßsystems.

Es sei auch allen übrigen Institutsmitarbeitern für ihre freundliche Aufnahme und dafür dass Sie mir in allen Belangen meiner Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind herzlich gedankt.

Nicht zuletzt möchte ich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern für die Unterstützung während meiner Ausbildung, für die bewiesene Geduld, und dafür dass Sie mir das Studium meiner Wahl ermöglicht haben recht herzlich bedanken.

Graz, März 2007

Stadlhofer Werner

## Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit hatte das Ziel, auf dem Transientenprüfstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU-Graz einen Prüfstands-aufbau zu realisieren, der es ermöglicht SCR-Katalysatorsysteme an einem Nutzfahrzeugmotor unter stationären Bedingungen zu testen.

Im ersten Teil der Diplomarbeit wurde eine Literaturstudie durchgeführt bei der die verschiedenen Möglichkeiten der Harnstoffeindosierung bei SCR-Systemen recherchiert und bewertet wurden. Im zweiten Teil wurde am Prüfstand des Instituts ein 6-Zylinder Reihenmotor mit 6,7 Litern Hubraum aufgebaut und mit einem SCR-Katalysatorsystem und einer Harnstoffdosiereinrichtung in Betrieb genommen und dann vorerst im Stationärbetrieb vermessen.

Der verwendete Motor war mit einem mechanischen Einspritzsystem ausgerüstet und lag von seinen Stickoxidhmissionen etwas schlechter als der EURO 3-Grenzwert. Das Harnstoff-Dosiersystem war ein druckluftloses System das mit Ad-Blue, also einer 32,5%-igen Harnstoff-Wasserlösung arbeitete. Da der Motor über keinerlei Elektronik verfügte, wurde das Dosiersystem autark von der Prüfstandssteuerung über eine CAN-Busverbindung angesteuert und so die in das Abgassystem eindosierte Harnstoffmenge vorgegeben.

Untersucht wurde vor allem die Stickoxidreduktion in den Punkten des ESC-Zyklus bei verschiedenen Harnstoffeindosier-raten. Zusätzlich zur Standardabgasmessung wurde auch ein Ammoniakanalysator am Prüfstand eingesetzt, um den bei SCR-Systemen kritischen Ammoniakschlupf zu detektieren. Bei den Messungen im ESC-Zyklus konnte der Motor von seinen Stickoxidemissionen bei einer Harnstoffdosier-rate von  $\alpha=0,9$  auf EURO 5-Niveau gebracht werden.

Zusätzlich wurde noch das Katalysatorverhalten in ausgewählten Kennfeldpunkten bei unterschiedlichen Harnstoffdosierungen von Unter- bis zur Überdosierung untersucht. Gemessen wurden wiederum Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf. Ebenso wurde das Katalysatorverhalten bei unterschiedlichen Dosiersprüngen in Bezug auf Speicherverhalten und Ammoniakschlupf untersucht.

**INHALT**

1	Definitionen .....	8
2	Abkürzungen .....	8
3	Einleitung.....	9
4	Grundlagen des SCR-Verfahrens.....	9
4.1	Chemische Grundlagen des SCR-Verfahrens.....	10
4.2	Reduktionsmittelbereitstellung.....	11
4.2.1	Gasförmige Ammoniakbereitstellung .....	11
4.2.2	Ammoniakbereitstellung mit flüssigen Trägerstoffen.....	11
4.2.2.1	Harnstoff-Wasserlösung 32,5% .....	11
4.2.2.2	NH <sub>3</sub> -Wasserlösung 25% .....	13
4.2.2.3	Ammoniumformiat 40% .....	13
4.2.2.4	Denoxium -30.....	13
4.2.2.5	Methanamid .....	13
4.2.3	Ammoniakbereitstellung mit festen Trägerstoffen .....	14
4.2.3.1	Festharnstoff .....	14
4.2.3.2	Ammoniumcarbamat.....	14
4.2.3.3	Ammoniumcarbonat.....	14
4.2.3.4	Cyanursäure .....	15
5	SCR-Dosiersysteme .....	15
5.1	Reduktionsmitteldosierung bei flüssigen Reduktionsmitteln.....	15
5.1.1	Systeme mit Druckluftunterstützung.....	16
5.1.1.1	BOSCH Denoxtronic 1 .....	16
5.1.1.2	Hilite-SCR-System .....	18
5.1.1.3	Grundfos NoNOx-System .....	20
5.1.2	Systeme ohne Druckluftunterstützung .....	24
5.1.2.1	BOSCH Denoxtronic 2.....	24
5.2	Reduktionsmitteldosierung bei festen Reduktionsmitteln .....	26
5.2.1	Thermische Zersetzung von Festharnstoff im Abgasteilstrom.....	27
5.2.2	Thermische Zersetzung von Ammoniumcarbamat mittels indirekter Beheizung mit Motorkühlwasser (System HJS).....	29
5.2.3	Thermische Zersetzung von Ammoniumcarbamat mittels direkter Beheizung durch Wärmeträgeröl (System FEV).....	30
6	Mögliche Dosierstrategien bei stationärer Harnstoffeindosierung .....	32
6.1	Berechnung der Harnstoffeindosiermenge aufgrund des Stickoxidgehaltes im Motorabgas .....	32
6.2	Möglichkeiten der Harnstoffeindosierung mit alternativen Eingangsgrößen.....	34
7	Aufbau des SCR-Systems am Motorprüfstand.....	38

7.1	Komponenten des Prüfstandsbaus .....	38
7.1.1	Motor .....	39
7.1.2	SCR-Katalysator .....	39
7.1.3	SCR-Dosiersystem.....	41
7.1.4	Bremse.....	45
7.1.5	Standardmesstechnik am Prüfstand .....	45
7.1.6	Abgasmessung .....	46
7.1.6.1	Messung der limitierten Abgaskomponenten aus der Verbrennung .....	46
7.1.6.2	Ammoniakmessung .....	47
8	Messungen auf dem Motorprüfstand.....	50
8.1	Überblick über die Messungen auf dem Motorprüfstand .....	50
8.2	Basisvermessung der Schadstoffe am Motor ohne Harnstoffeindosierung	51
8.2.1	Ergebnisse der Basisvermessung.....	52
8.3	Vermessung des Motors bei unterschiedlichen Harnstoffeindosierungsraten mit $\alpha=0,6$ ; $\alpha=0,9$ und $\alpha=1,2$ .....	54
8.3.1	Ergebnisse der Messungen.....	56
8.3.1.1	Ergebnisse der Messungen für $\alpha=0,6$ .....	56
8.3.1.2	Ergebnisse der Messungen für $\alpha=0,9$ .....	57
8.3.1.3	Ergebnisse der Messungen bei $\alpha=1,2$ .....	59
8.3.1.4	Vergleich der Messungen für $\alpha=1,2$ bei verschiedenen Eindosierungszeiten ...	61
8.4	Untersuchung der Stickoxidreduktion und des Ammoniakschlupfes in 4 stationären Motorbetriebspunkten.....	62
8.4.1	Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 1 .....	63
8.4.2	Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 2 .....	66
8.4.3	Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 3 .....	67
8.4.4	Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 4 .....	68
8.5	Untersuchung der Stickoxidreduktion und des Ammoniakschlupfes in 4 stationären Betriebspunkten bei einer konstanten Abgastemperatur von 330°C ..	68
9	Zusammenfassung.....	70
10	Literatur.....	73

### **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Grundsätzliche Möglichkeiten der Ammoniakbereitstellung.....	11
Abbildung 2: Ausgeführte Dosiersysteme zur Eindosierung von Harnstoff-Wasserlösung (AdBlue) .....	15
Abbildung 3: Systemübersicht der BOSCH Denoxtronic 1 [1].....	16
Abbildung 4: Systemübersicht des Hilite-SCR-Systems [11].....	18

Abbildung 5: Grundfos NoNOx-System in der Ausführung „Slave Doser System“ [21] .....	20
Abbildung 6: Grundfos NoNOx-System in der Ausführung „Retrofit Doser System“ [21].....	22
Abbildung 7: Systemübersicht der BOSCH Denoxtronic 2 [23] .....	24
Abbildung 8: Dosiersysteme zur Eindosierung von festen Reduktionsmitteln (exemplarisch) .....	26
Abbildung 9: Schema eines Festharnstoffsystems mit Harnstoffzersetzung im Abgasnebenstrom [24].....	27
Abbildung 10: Aufbau und Anordnung der Systemkomponenten im Fahrzeug [9] .....	28
Abbildung 11: Schema des Systems der Ammoniumcarbamatzersetzung durch Kühlwasserbeheizung [9].....	29
Abbildung 12: Schema des Systems der thermischen Zersetzung von Ammoniumcarbamat mit direkter Beheizung [9] .....	30
Abbildung 13: Stickoxidemissionen von 13 Nutzfahrzeugmotoren in den einzelnen ESC- Punkten .....	34
Abbildung 14: Darstellung der Abhängigkeit Stickoxidemissionen in g/h von der Abgastemperatur .....	35
Abbildung 15: Vergleich berechnete und gemessene Emissionen in den ESC-Punkten für „Motor 1“ .....	36
Abbildung 16: Vergleich berechnete und gemessene Emissionen in den ESC-Punkten für „Motor 2“ .....	36
Abbildung 17: Vergleich der gemessenen und nach Beziehung für „Motor 1“ berechneten Stickoxidemissionen für „Motor 2“ .....	37
Abbildung 18: Schematische Übersicht über den Motorprüfstandsaufbau .....	38
Abbildung 19: SCR-Katalysatoranordnung auf dem Motorprüfstand.....	40
Abbildung 20: Dosiermodul; links: Darstellung mit Strahlkegel [19], rechts: Anordnung am Prüfstand .....	41
Abbildung 21: Anordnung des Dosiermoduls und des Verwirblers am Abgasrohr.....	41
Abbildung 22: Aufnahme des AdBlue-Einspritzstrahls .....	42
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Anordnung von Fördermodul, Dosiermodul und AdBlue-Vorratsbehälter [19] .....	42
Abbildung 24: Anordnung von Fördermodul, Dosiermodul und AdBlue-Vorratsbehälter auf dem Prüfstand .....	43
Abbildung 25: Messprinzip des Limas 11HW [20].....	48
Abbildung 26: Messeinheit zur Ammoniakmessung.....	49
Abbildung 27: Motorkennfeld mit der Darstellung der gemessenen Betriebspunkte.....	51
Abbildung 28: Stickoxidkennfeld des Motors .....	52
Abbildung 29: Abgastemperaturkennfeld des Motors .....	53
Abbildung 30: Stickoxidemissionen in den ESC-Punkten .....	54
Abbildung 31: Stickoxidemissionen bei $\alpha=0,6$ in den einzelnen ESC-Punkten.....	56
Abbildung 32: Stickoxidreduktionen für $\alpha=0,6$ in den einzelnen ESC-Punkten.....	57
Abbildung 33: Stickoxidemissionen bei $\alpha=0,9$ in den einzelnen ESC-Punkten.....	58
Abbildung 34: Stickoxidreduktionen für $\alpha=0,9$ in den einzelnen ESC-Punkten.....	59

Abbildung 35: Stickoxidemissionen bei $\alpha=1,2$ in den einzelnen ESC-Punkten.....	60
Abbildung 36: Stickoxidreduktionen für $\alpha=1,2$ in den einzelnen ESC-Punkten.....	60
Abbildung 37: Vergleich der Stickoxidreduktionen bei $\alpha=1,2$ und einer Haltedauer von 2min mit $\alpha=1,2$ und Abwarten des Stationärzustandes.....	61
Abbildung 38: Darstellung der ausgewählten Kennfeldpunkte für die stationären Untersuchungen .....	62
Abbildung 39: Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 1.....	63
Abbildung 40: Zeitverlauf der Stickoxid- und Ammoniakemissionen bei $\alpha=1,34$ .....	64
Abbildung 41: Zeitverlauf der Stickoxid- und Ammoniakemissionen bei $\alpha=1,6$ .....	65
Abbildung 42: Zeitverlauf der Stickoxid- und Ammoniakemissionen bei $\alpha=1,8$ .....	66
Abbildung 43: Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 2.....	66
Abbildung 44: Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 3.....	67
Abbildung 45: Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 4.....	68
Abbildung 46: Stickoxidreduktion bei $T_{\text{Abgas}}=330^{\circ}\text{C}$ für verschiedene Feedverhältnisse.....	69
Abbildung 47: Ammoniakkonzentrationen bei $T_{\text{Abgas}}=330^{\circ}\text{C}$ für verschiedene Feedverhältnisse .....	70

### **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Abmessungen und Motorkenngößen des verwendeten Motors.....	39
Tabelle 2: Technische Daten der Leistungsbremse .....	45
Tabelle 3: Sensoren der Standardmesstechnik am Prüfstand .....	45
Tabelle 4: Sensoren im Luftpfad des Motors .....	45
Tabelle 5: Sensoren im Abgasstrang des Motors .....	46
Tabelle 6: Übersicht über die am Prüfstand verwendeten Abgasmessverfahren .....	46
Tabelle 7: Messbereiche des Analysators Limas 11HW .....	48
Tabelle 8: Rohemissionen des Motors im ESC.....	52
Tabelle 9: Gesamtemissionen im ESC in g/kWh bei $\alpha=0,6$ .....	56
Tabelle 10: Gesamtemissionen im ESC in g/kWh bei $\alpha=0,9$ .....	58
Tabelle 11: Gesamtemissionen im ESC in g/kWh bei $\alpha=1,2$ .....	59
Tabelle 12: Untersuchte Motorbetriebspunkte und zugehörige Raumgeschwindigkeiten.....	69



## 1 Definitionen

AdBlue® .....	Handelsname für 32,5%-ige Harnstoff-Wasserlösung
Emissionen .....	Abgas-Emissionsmenge [g] von limitierten Komponenten (CO, HC, NO <sub>x</sub> , Partikel) und nicht limitierten Komponenten (CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , usw.)
CAN, CAN-Bus .....	Controller Area Network
NO <sub>x</sub> .....	Stickoxide (Summe aus NO und NO <sub>2</sub> )
Feedverhältnis $\alpha$ .....	Verhältnis von Anzahl Mole NH <sub>3</sub> zu Anzahl der Mole NO <sub>x</sub>
CO .....	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub> .....	Kohlendioxid
Diesel .....	Fahrzeuge mit Dieselmotor
EURO .....	Europäische Abgasvorschriften für Straßenfahrzeuge
HC .....	Kohlenwasserstoffe
HWL .....	Harnstoff-Wasserlösung
KFZ .....	Kraftfahrzeug
LKW .....	Lastkraftwagen
PM .....	Particulate Matter
SNF .....	Schweres Nutzfahrzeug

## 2 Abkürzungen

ARTEMIS .....	<u>A</u> ssessment and <u>R</u> eliability of <u>T</u> ransport <u>E</u> mission <u>M</u> odels and <u>I</u> nventory <u>S</u> ystems
CLD .....	Chemilumineszenz-Detektor
cp <sub>si</sub> .....	cells per square inch, Maßeinheit für die Zelldichte eines Katalysators
ESC .....	European Steady Cycle
FID .....	Flammen-Ionisationsdetektor
FTIR .....	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
MAF .....	Mass Air Flow Sensor
PUMA .....	<u>P</u> rüfstand <u>u</u> nd <u>M</u> esstechnik <u>A</u> utomatisierung (Prüfstandssteuerungs-Software der Firma AVL)
OBD .....	On Board Diagnose
ppm .....	parts per million, Maßeinheit der Konzentration
SCR .....	Selective Catalytic Reduction

### 3 Einleitung

Die zukünftigen sehr strengen Abgasnormen für Nutzfahrzeuge (EURO V bzw. US 2010) erfordern die Ausschöpfung aller Möglichkeiten zur Stickoxidminderung an den Motoren. Zur Erzielung niedriger Stickoxidemissionen sind sowohl innermotorische Maßnahmen als auch Maßnahmen der Abgasnachbehandlung möglich. Innermotorisch können die Stickoxide durch Maßnahmen wie Abgasrückführung oder einen späten Einspritzzeitpunkt vermindert werden. Diese Methoden gehen aber meist einher mit einem höheren Kraftstoffverbrauch und höheren Partikelemissionen. Man hat im Prinzip die Möglichkeit, einen Motor entweder in Richtung niedrigen Verbrauch und niedrige Partikelemissionen zu entwickeln und damit hohe Stickoxidrohmissionen in Kauf zu nehmen, oder umgekehrt. Gerade der Kraftstoffverbrauch ist aber im Nutzfahrzeugbereich eines der Hauptkaufargumente. Werden Abgasnachbehandlungskonzepte zur Stickoxidminderung eingesetzt, kann der Motor von seinem Verbrennungsablauf verbrauchsoptimal eingestellt werden, die höheren Stickoxidrohmissionen müssen dann über das Nachbehandlungskonzept abgebaut werden.

Möglichkeiten hierzu sind der DeNO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator oder die selektive katalytische Reduktion (SCR) an einem speziellen SCR-Katalysator mit einem zusätzlich in den Abgasstrang eingebrachten Reduktionsmittel.

Im Nutzfahrzeugbereich hat sich hierzu das SCR-Verfahren durchgesetzt, das für EURO IV- und EURO V-Fahrzeuge bereits im Serieneinsatz ist. Dem Argument des niedrigeren Kraftstoffverbrauchs steht hier der zusätzliche Aufwand des Mitführens eines Reduktionsmittels gegenüber.

Bei den in Serie befindlichen Systemen wird 32,5%-ige Harnstoff-Wasserlösung als Reduktionsmittel verwendet. Alternativ dazu gibt es auch Bestrebungen feste Reduktionsmittel in Fahrzeugen einzusetzen, vor allem auch in Hinblick auf einen möglichen PKW-Einsatz des SCR-Systems. Diese Systeme befinden sich aber vorwiegend noch im Prototypenstadium.

In der vorliegenden Arbeit sollte eine Prüfstandskonfiguration aus Motor, SCR-Katalysator, Harnstoffdosiersystem und passender Abgasanalytik geschaffen werden, die den Vergleich und die Bewertung von verschiedenen Katalysatoren erlaubt.

Dafür wurden im ersten Teil der Diplomarbeit sowohl die Grundlagen des SCR-Katalysator-Verfahrens, sowie auch verschiedene Reduktionsmittel und Dosiersysteme recherchiert. Diese Arbeit diente auch dem Zweck, Ideen für alternative, möglichst einfachere Dosiersysteme zu entwickeln.

In weiterer Folge wird dann der im Zuge der Diplomarbeit realisierte Prüfstandsaufbau des Motors und des SCR-Systems auf dem Motorprüfstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik beschrieben. Zuletzt werden die Messergebnisse der Basisvermessung des Motors sowie bei verschiedenen Reduktionsmitteldosieraten dargestellt und analysiert.

### 4 Grundlagen des SCR-Verfahrens

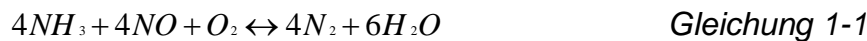
Das SCR-Verfahren wurde bereits Mitte der siebziger Jahre in Japan zur Entstickung von Kraftwerksabgasen in stationären Anlagen entwickelt und ist seit den achtziger Jahren eine ausgereifte Technologie auf diesem Gebiet. Seit Ende der achtziger Jahre gab es auch im mobilen Bereich eine intensive Forschungstätigkeit um das SCR-Verfahren auf dem Fahrzeugsektor (vor allem bei Nutzfahrzeugen) zu etablieren.

Die besonderen Herausforderungen dabei waren [2]:

- Realisierung des Instationärbetriebes im Fahrzeug
- Ammoniak- bzw. Reduktionsmittelbereitstellung im Fahrzeug (fest, flüssig, gasförmig)
- Erweiterung des Arbeitstemperaturbereiches des SCR-Verfahrens
- Erhöhung der volumenspezifischen Aktivität
- Applikation beim PKW

#### 4.1 Chemische Grundlagen des SCR-Verfahrens

Beim SCR-Verfahren wird gasförmiges Ammoniak als Reduktionsmittel verwendet, das meist aus Vorläufersubstanzen generiert wird. Im Abgassystem des Motors bzw. im SCR-Katalysator finden dann mit den Stickoxiden des Motorabgases folgende Reaktionen statt, wobei der Stickoxidumsatz stark temperaturabhängig ist:



Diese Reaktion wird als SCR-Standardreaktion bezeichnet und findet vorwiegend bei Temperaturen über 200°C statt.



Diese als sogenannte „schnelle“ SCR-Reaktion bezeichnete Reaktion findet auch bei Temperaturen unter 200°C statt und läuft ca. 4-10mal schneller ab als die Standard-SCR-Reaktion (*Gleichung 1-1*). Da die im Motorrohgas enthaltenen Stickoxide aber zu ca. 90% aus Stickstoffmonoxid (NO) bestehen, muss zum Ablauf der Reaktion in einem dem SCR-Katalysator vorgeschaltetem Oxidationskatalysator NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert werden. Dabei sollte das Verhältnis von NO zu NO<sub>2</sub> idealerweise 1:1 sein. Überschreitet der NO<sub>2</sub>-Anteil diesen Wert so kann es auch zu folgender Reaktion kommen:



Diese Reaktion führt allerdings zu einem höheren Reduktionsmittelverbrauch als bei den vorgenannten Reaktionen.

## 4.2 Reduktionsmittelbereitstellung

Die Abbildung 1 zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten der Bereitstellung des Reduktionsmittels Ammoniak.

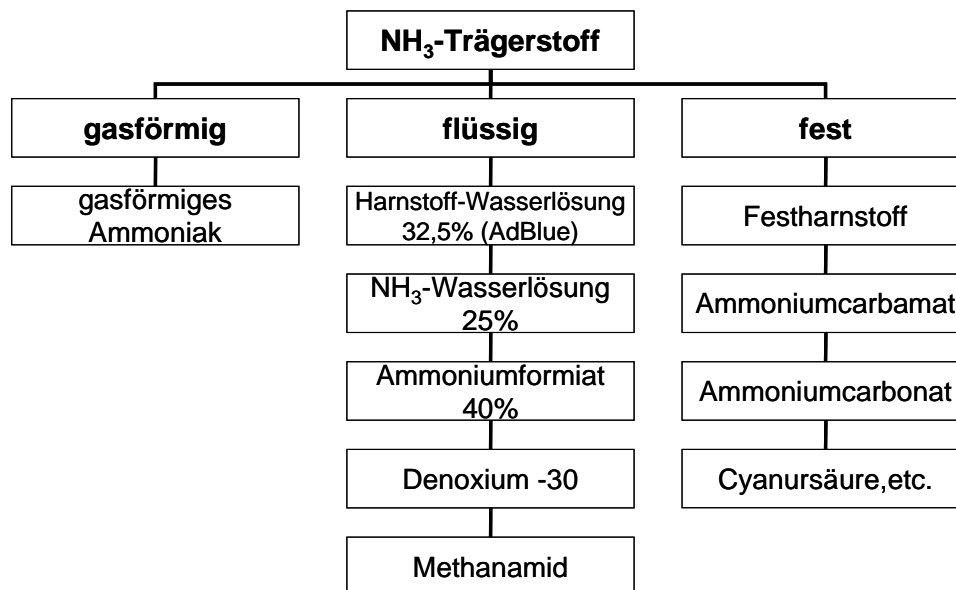


Abbildung 1: Grundsätzliche Möglichkeiten der Ammoniakbereitstellung

### 4.2.1 Gasförmige Ammoniakbereitstellung

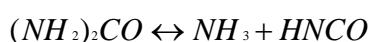
Die Verwendung von gasförmigem Ammoniak wäre grundsätzlich die einfachste Möglichkeit der Reduktionsmittelbereitstellung. Im Vergleich zur Reduktionsmittelbereitstellung mit flüssigen oder festen Stoffen würden Zwischenreaktionen entfallen und die Dosiereinrichtungen könnten wesentlich einfacher ausfallen. Versuche der Firma PUREM, ein System mit Druckgasflaschen zur Mitnahme von gasförmigem Ammoniak im Fahrzeug zu etablieren, wurden allerdings aufgrund der großen sicherheitstechnischen Probleme und mangelnder Akzeptanz nicht weitergeführt. [9]

### 4.2.2 Ammoniakbereitstellung mit flüssigen Trägerstoffen

#### 4.2.2.1 Harnstoff-Wasserlösung 32,5%

Die 32,5%-ige Harnstoff-Wasserlösung wird unter dem Handelsnamen AdBlue vertrieben und stellt derzeit die bevorzugte Lösung der Reduktionsmittelbereitstellung im Fahrzeug dar. Aufgrund der weitgehenden biologischen Unbedenklichkeit und des geringen sicherheitstechnischen Aufwandes, haben sich die europäischen Nutzfahrzeughersteller in Verbindung mit der Mineralölindustrie dazu entschlossen, dieses System in Serie zu bringen und ein Vertriebsnetz für AdBlue aufzubauen. AdBlue ist eine Lösung von 32,5 Gew.% Harnstoff ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) in Wasser und wird in einem eigenen Tank im Fahrzeug mitgeführt. Die Qualität der Harnstoff-Wasserlösung ist mittlerweile nach DIN 70070 genormt. Die Eindosierung in das Abgassystem des Fahrzeugs und Zerstäubung erfolgt in der Serie derzeit mit Hilfe von druckluftunterstützten oder druckluftlosen Dosiersystemen. Aus dem Harnstoff wird unter folgenden Schritten Ammoniak generiert:

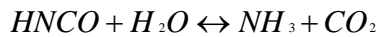
#### 1. Thermolyse



Gleichung 1-4

Nach der Verdampfung im heißen Motorabgas bildet sich im ersten Schritt aus dem Harnstoff Isocyanensäure (HNCO) und Ammoniak.

## 2. Hydrolyse



*Gleichung 1-5*

Im zweiten Schritt wird aus der Isocyanensäure in Verbindung mit Wasser Ammoniak und Kohlendioxid gebildet.

Diese Vorreaktionen zur NH<sub>3</sub>-Generierung stellen auch gleichzeitig ein Problem bei dieser Art der Ammoniakbereitstellung dar, da vor allem die Isocyanensäure polymerisierende Eigenschaften aufweist und unter bestimmten Betriebsbedingungen feste Zersetzungsprodukte wie z.B. die Cyanursäure ((HNCO)<sub>3</sub>) bildet.

Diese Nebenprodukte treten vor allem bei niedrigen Abgastemperaturen auf und führen zu Ablagerungen am Dosiersystem und an der Katalysatoroberfläche und somit zu Störungen der Betriebssicherheit des Systems. Um solche Effekte zu vermeiden muss das Reduktionsmittel möglichst fein und gleichmäßig verteilt in den Abgasstrom eingebracht werden, um optimale Verdampfungs- und Zersetzungsbedingungen zu erhalten.

Die eutektische Zusammensetzung der Harnstoff-Wasserlösung mit 32,5Gew.% Harnstoff verhindert einerseits eine Entmischung der beiden Phasen nach Einfrieren und Wiederauftauen. Der damit erreichte niedrigste Gefrierpunkt für die Lösung liegt aber immer noch bei einer relativ hohen Temperatur von -11°C.

Deshalb muss für den Fahrzeugbetrieb sowohl eine Beheizung des AdBlue-Tanks als auch der Zuführungsleitungen vorgesehen werden. Die Beheizung erfolgt bei den in Serie befindlichen Systemen meist elektrisch und wird vom Steuergerät des Dosiersystems mitangesteuert. [1],[3],[9]

#### 4.2.2.2 $\text{NH}_3$ -Wasserlösung 25%

Grundsätzlich gibt es auch die Möglichkeit Ammoniak direkt in Wasser zu lösen und diese Lösung in das Abgassystem einzudosieren. Dies wurde auch in der Vergangenheit bei Motorprüfstandsversuchen mit SCR-Systemen angewandt und hat den Vorteil, dass die Ammoniakgenerierung im Abgassystem ohne störende Nebenreaktionen erfolgt. Eine Ammoniak-Wasserlösung ist allerdings eine stark basische Flüssigkeit mit korrosiver und ätzender Wirkung und hat im Fahrzeug aus sicherheitstechnischen und Umweltschutzgründen Nachteile gegen über der weitgehend unbedenklichen Harnstoff-Wasserlösung. Deswegen wurde diese Art der Reduktionsmittelbereitstellung bis jetzt nicht im Fahrzeug realisiert. [5]

#### 4.2.2.3 Ammoniumformiat 40%

Ein wesentlicher Nachteil der derzeit in Serie eingesetzten Harnstoff-Wasserlösung ist ihr relativ hoher Gefrierpunkt von  $-11^\circ\text{C}$ . Um die Wintertauglichkeit bei diesem System im Fahrzeug sicherzustellen, müssen der AdBlue-Tank und die Dosier- und Fördereinrichtungen sowie die Leitungen extern beheizt werden. Diesen Nachteil würde eine Lösung von 40-Gew.% Ammoniumformiat ( $\text{NH}_5\text{CO}_2$ ) in Wasser umgehen, die einen Gefrierpunkt von  $-35^\circ\text{C}$  aufweist. Die Nachteile dieser Lösung sind allerdings, dass Ammoniumformiat unter bestimmten Bedingungen zu Ameisensäure dissoziieren kann, was wiederum zu Korrosionsproblemen führt, und der im Vergleich zu AdBlue niedrigere Gehalt an aktivem Ammoniak. [2]

#### 4.2.2.4 Denoxium -30

Um den Gehalt an aktivem Ammoniak anzuheben, kann man eine Mischung aus Harnstoff und Ammoniumformiat in Wasser lösen. Eine solche Mischung aus 26-Gew.% Ammoniumformiat und 20-Gew.% Harnstoff gelöst in Wasser stellt Denoxium-30 dar. Es hat einen Gefrierpunkt von  $-30^\circ\text{C}$  und könnte für den Winterbetrieb der Fahrzeuge eingesetzt werden, während im Sommer Adblue getankt würde, ähnlich wie es für Sommer- und Winterdiesel der Fall ist. Denoxium -30 ist allerdings für den Fahrzeugbetrieb noch nicht freigegeben. [2]

#### 4.2.2.5 Methanamid

Eine Lösung von 80Gew.% Methanamid ( $\text{CH}_3\text{NO}$ ) in Wasser hätte ebenfalls einen Gefrierpunkt von  $-28^\circ\text{C}$  und einem im Vergleich zu AdBlue 50% höheren Gehalt an aktivem Ammoniak. Die Lösung wäre bis  $100^\circ\text{C}$  langzeitstabil und biologisch abbaubar. Wegen der möglichen teratogenen (fruchtverändernden) Eigenschaften dieses Stoffes ist aber derzeit der Fahrzeugeinsatz noch ungeklärt. [2]

### 4.2.3 Ammoniakbereitstellung mit festen Trägerstoffen

Der folgende Abschnitt stellt nur eine kleine Auswahl an festen Trägerstoffen für die Ammoniakgenerierung vor. Mit den ersten beiden Substanzen sind bereits intensive Untersuchungen am Motorprüfstand und im Fahrzeug unternommen worden, die letzten beiden stehen hier exemplarisch für die Vielzahl von Substanzen, die vor allem im Labor auf ihre Eigenschaften als Reduktionsmittelträger untersucht worden sind. Näheres hierzu [4].

#### 4.2.3.1 Festharnstoff

Harnstoff ((NH)<sub>2</sub>CO) in fester Form kann grundsätzlich ebenfalls zur Ammoniakgenerierung verwendet werden. Die Reaktionen zur Bildung von Ammoniak entsprechen dabei jenen, die auch beim Harnstoff der Harnstoff-Wasserlösung auftreten (siehe *Gleichung 1-4* und *1-5*). Die Vorteile liegen in der uneingeschränkten Wintertauglichkeit (keine Einfrieren möglich), und dem höheren Gehalt an freisetzbarem aktiven Ammoniak pro kg Reduktionsmittel gegenüber der Harnstoff-Wasserlösung. Die Nachteile liegen wiederum in den Zwischenreaktionen die zur Ammoniakbildung notwendig sind. Es können sich ebenso wie beim System der Harnstoff-Wasserlösung feste Nebenprodukte bilden, die sich im Dosiersystem anlagern und dessen Funktion beeinträchtigen. Festharnstoff gilt jedoch wegen seiner sicherheits- und umwelttechnischen Unbedenklichkeit und des hohen Ammoniakgehalts als aussichtsreichste Alternative zur derzeit gebräuchlichen Harnstoff-Wasserlösung. Die Qualitätsanforderungen an Festharnstoff für den Fahrzeugeinsatz sind allerdings noch nicht festgelegt und genormt und es fehlt auch noch an einem Vertriebsnetz für Festharnstoff. [2],[6],[7],[8]

#### 4.2.3.2 Ammoniumcarbamat

Ammoniumcarbamat (NH<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>NH<sub>4</sub>) sublimiert unter Wärmezufuhr in einem Temperaturbereich von 60°- 140°C in Ammoniak und Kohlendioxid nach folgender Gleichung:



Die Vorteile dieses Systems liegen wie bei allen Feststoffsystemen in der Wintertauglichkeit und in der hohen Ammoniakspeicherdichte, die diese Systeme vor allem auch für den PKW-Bereich attraktiv machen. Außerdem erfolgt die Umsetzung des Ammoniumcarbamat in Ammoniak ohne Zwischenreaktionen und damit ohne störende Nebenprodukte die das Dosiersystem beeinträchtigen könnten. Die Nachteile bei der Verwendung von Ammoniumcarbamat als Ammoniakträger liegen vor allem in seiner starken Hygroskopität und der hohen chemischen Reaktivität. Ammoniumcarbamat ist deshalb nicht so unbedenklich in der Handhabung wie Festharnstoff. Bei den Dosiersystemen die auf der Basis von Ammoniumcarbamat realisiert wurden, wird daher das Reduktionsmittel meist in luftdicht verschlossenen Kartuschen im Fahrzeug mitgeführt. [9]

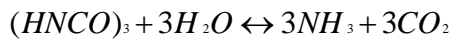
#### 4.2.3.3 Ammoniumcarbonat

Ammoniumcarbonat ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) sublimiert zu Kohlendioxid und Wasser nach folgender Gleichung:



#### 4.2.3.4 Cyanursäure

Die Cyanursäure  $((\text{HNCO})_3)$  reagiert mit Wasser zu Ammoniak und Kohlendioxid nach der Gleichung:



Gleichung 1-8

### 5 SCR-Dosiersysteme

Der Eindosierung des Reduktionsmittels in das Abgassystem des Motors kommt eine zentrale Bedeutung für die Funktion des SCR-Systems zu. Die Dosiersysteme bringen das Reduktionsmittel in das Abgassystem ein und sorgen für eine bedarfsgerechte Mengenzuteilung. Bei Überdosierung des Reduktionsmittels kann die hohe Ammoniakdosis nicht vollständig mit den Stickoxiden reagieren und es kommt zu Ammoniakschlupf. Eine Unterdosierung hingegen führt zu zu geringen Konvertierungsraten im Katalysator. Das Dosiersystem soll (meist in Verbindung mit der Motorsteuerung) für eine dem Motorbetriebszustand angepasste Dosierung des Reduktionsmittels sorgen. Das Reduktionsmittel soll weiters möglichst fein und über den Querschnitt des Abgasrohrs gleichverteilt eingebracht werden, um optimal reagieren zu können. Diese Aufgabe muss sowohl für flüssige als auch für feste Reduktionsmittel vom jeweiligen Dosiersystem erfüllt werden.

#### 5.1 Reduktionsmitteldosierung bei flüssigen Reduktionsmitteln

Die Systeme auf der Basis der 32,5%-igen Harnstoff-Wasserlösung sind derzeit die einzigen, die bisher von der Zulieferindustrie in Verbindung mit den Fahrzeugherstellern zur Serienreife geführt wurden. Die beiden oben angeführten druckluftunterstützten Dosiersysteme sind schon seit geraumer Zeit bei verschiedenen europäischen Nutzfahrzeugherstellern in EURO 4- und EURO 5-Fahrzeugen im Serieneinsatz. Auch das druckluftlose System der BOSCH Denoxtronic 2 wird in Kürze seinen Serieneinsatz erfahren. Die im folgenden Abschnitt näher beschriebenen Systeme haben daher alle Stufen einer Serienentwicklung bereits hinter sich und sind entsprechend ausgereift. Abbildung 2 zeigt einen Überblick über die Systeme.

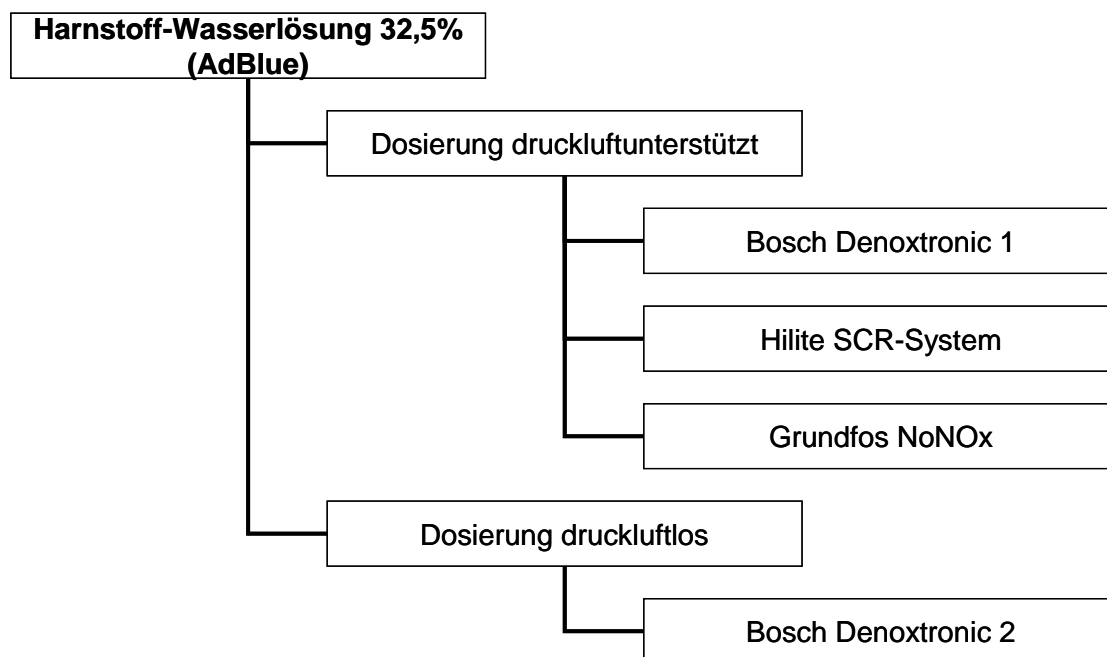


Abbildung 2: Ausgeführte Dosiersysteme zur Eindosierung von Harnstoff-Wasserlösung (AdBlue)



### 5.1.1 Systeme mit Druckluftunterstützung

#### 5.1.1.1 BOSCH Denoxtronic 1

Die Bosch Denoxtronic 1 ist ein druckluftunterstütztes Dosiersystem auf der Basis von AdBlue und bereits seit einigen Jahren im Serieneinsatz im Nutzfahrzeugbereich. Die Druckluft dient vornehmlich der Zerstäubung des Reduktionsmittels und wird aus der bei Nutzfahrzeugen üblichen Druckluftversorgung der Bremsanlage entnommen. Wie bei allen Systemen mit AdBlue, müssen die Versorgungsleitungen, der Tank und der Filter aufgrund des hohen Gefrierpunktes der Harnstoff-Wasserlösung beheizt werden. Abbildung 3 zeigt das Systemschema der Denoxtronic 1.

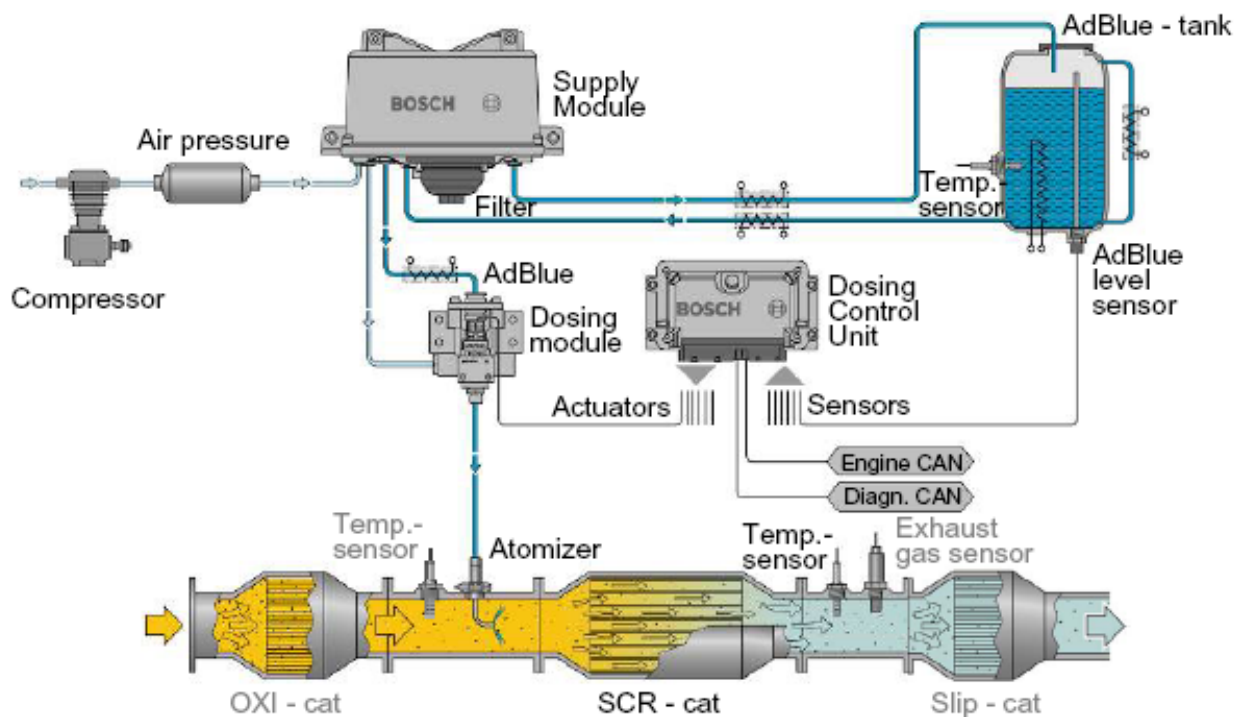


Abbildung 3: Systemübersicht der BOSCH Denoxtronic 1 [1]

Das Dosiersystem besteht aus folgenden Komponenten:

- **Fördermodul (Supply Module):** Das Fördermodul dient vorwiegend zur Förderung der Harnstoff-Wasserlösung aus dem Tank zum Dosiermodul. Die Harnstoff-Wasserlösung gelangt über eine elektrisch beheizte Leitung vom Tank zum Fördermodul, wird im dort eingebauten ebenfalls elektrisch beheizten Filter gefiltert und gelangt über eine im Fördermodul eingebaute Pumpe zum Dosiermodul. Die Druckluft zur Zerstäubung gelangt ebenfalls über das Fördermodul zum Dosiermodul. Im Fördermodul ist auch das Dosiersteuergerät eingebaut, das die Steuerungsfunktionen des Dosiersystems übernimmt. Das Fördermodul wird meist am Fahrzeugrahmen befestigt und ist damit von außen für Wartungsaufgaben zugänglich.
- **Dosiermodul (Dosing Module):** Das Dosiermodul dient zur Mengenzumessung und zur Vermischung der Harnstoff-Wasserlösung mit der Druckluft. Es wird vom Fördermodul mit Harnstoff unter konstantem Druck versorgt und dosiert ihn über

ein getaktetes Magnetventil mit Druckluft vermischt über das Zerstäuberrohr in das Abgassystem ein. Durch die Druckluftzerstäubung erhält man eine feine Verteilung und gute Durchmischung des Harnstoffs mit dem Motorabgas bei relativer einfacher Sprührohrgeometrie. Das Magnetventil wird vom Dosiersteuergerät pulsweitenmoduliert angesteuert und damit die eindosierte Menge über das Ansteuertastverhältnis festgelegt.

- **Sprührohr (Atomizer):** Das Sprührohr ragt in das Abgasrohr und zerstäubt und verteilt über eine Anzahl von Bohrungen die Harnstoff-Wasserlösung im Abgas. Die Anordnung dieser Eindosierstelle erfolgt meist relativ nahe dem Turboladerausstritt, um dem Harnstoff genügend Zeit zu geben, sich mit dem Abgas zu vermischen und die Vorreaktionen zur Bildung von Ammoniak ablaufen zu lassen.
- **Dosiersteuergerät (DCU):** Das Dosiersteuergerät übernimmt die Steuerungsfunktionen des Dosiersystems. Es ist über eine CAN-Busverbindung mit dem Motorsteuergerät verbunden und erhält von ihm die Informationen über Motordrehzahl, Einspritzmenge, Abgastemperatur nach dem Katalysator, die Betriebsstunden des Motors sowie optional das Signal eines NO<sub>x</sub>-Sensors. Aus diesen Informationen wird über eine interne Softwarestruktur die zu dosierende Harnstoffmenge bestimmt. Das Magnetventil des Dosiermoduls wird dann vom Dosiersteuergerät mit einem pulsweitenmodulierten Signal angesteuert, dessen Tastverhältnis von der gewünschten Eindosiermenge abhängt. Das Tastverhältnis ist dabei definiert als das Verhältnis der Einschaltdauer des Ventils zur gesamten Periodendauer des rechteckförmigen Ansteuersignals. Die Frequenz des Ansteuersignals bleibt konstant, die Einschaltdauer des Ventils wird variiert. Weiters ist das Dosiersteuergerät auch für die Temperaturüberwachung der Systemkomponenten sowie die Gewährleistung des Betriebes bei tiefen Temperaturen durch aktives Heizen der Zuleitungen, des Filters und des Tanks zuständig. Der Tankfüllstand wird über einen eigenen Füllstandssensor ebenfalls vom Dosiersteuergerät überwacht. Für Diagnosefunktionen ist noch ein Diagnose-CAN-Bus vorhanden. Das Dosiersteuergerät stellt ein autarkes Steuergerät mit einem eigenen Mikrocontroller dar, mit dem unter zu Hilfenahme von applizierbaren Kennfeldern und Kennlinien softwaremäßig eine eigene Dosierstrategie festgelegt werden kann. Die Eingangsgrößen für die Steuerung erhält das Dosiersteuergerät über die CAN-Busverbindung und die direkt ans Steuergerät angeschlossenen Sensoren. Die implementierten Kennlinien und Kennfelder können für jeden Motor- und Katalysatortyp am Prüfstand appliziert und im Steuergerät abgespeichert werden.

### 5.1.1.2 Hilite-SCR-System

Das Hilite-SCR-System ist ebenfalls ein druckluftunterstütztes Dosiersystem, verwendet das Reduktionsmittel AdBlue und basiert ursprünglich auf dem SINOx-System der Firma Siemens. Das System ist stärker gegliedert als das BOSCH-System und bietet damit etwas mehr Flexibilität in der Anordnung der Bauteile im Fahrzeug. In der Grundfunktion der Eindosierung und Zerstäubung der Harnstoff-Wasserlösung mit Druckluft bestehen hingegen nur geringe Unterschiede. Die verwendete Druckluft wird ebenfalls aus der Druckversorgungseinrichtung des Fahrzeugbremsystems entnommen. Die Versorgungsleitungen und der AdBlue-Tank werden im Winterbetrieb beheizt. Das Hilite-SCR-System wird bereits einige Jahre bei Nutzfahrzeugmotoren in Serie eingesetzt. Abbildung 4 zeigt das Schema des Dosiersystems.

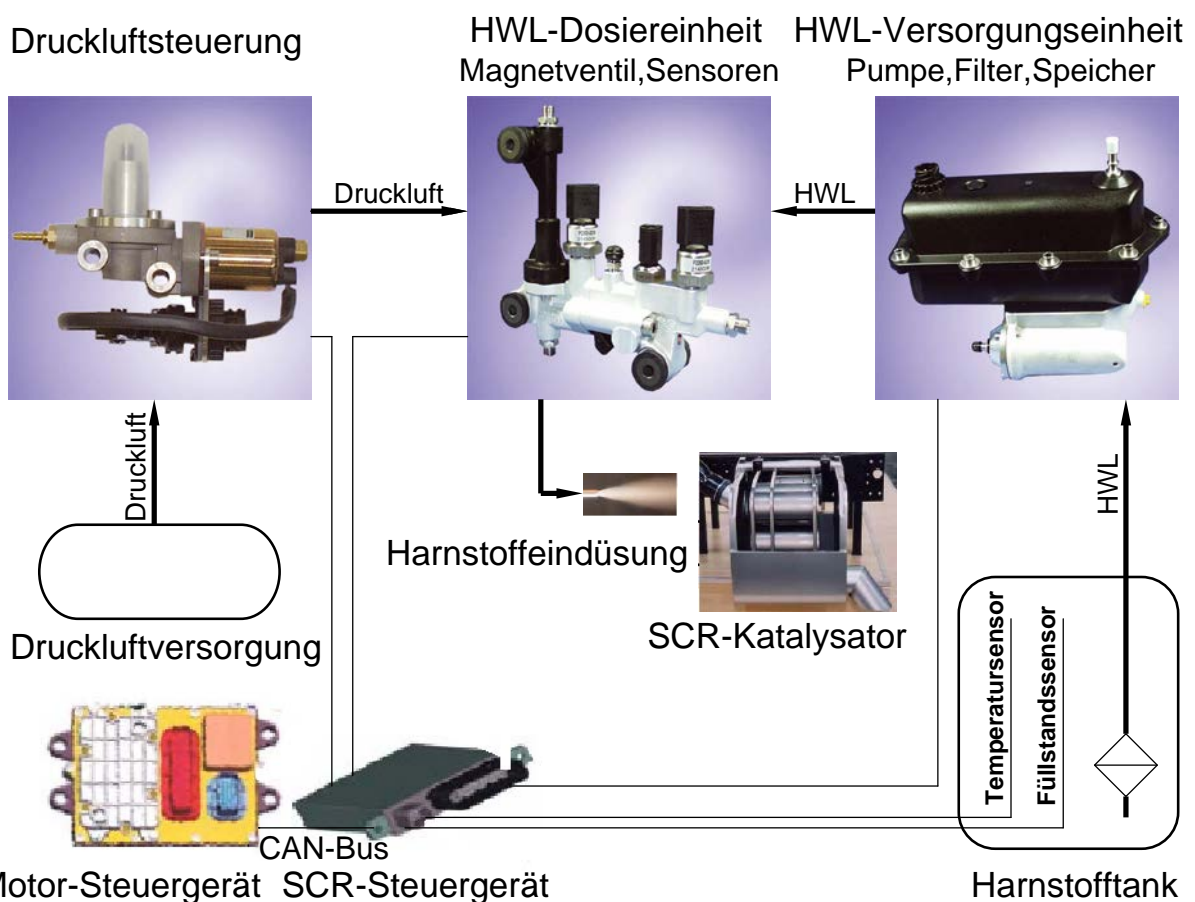


Abbildung 4: Systemübersicht des Hilite-SCR-Systems [11]

Gliederung des Systems:

- **Versorgungseinheit:** Die Grundfunktion der beheizbaren Versorgungseinheit ist es, die Harnstoff-Wasserlösung aus dem Tank anzusaugen und unter Druck an die Dosiereinheit weiterzugeben. Dazu befindet sich in der Versorgungseinheit eine elektrische Pumpe und ein Druckspeicher um Pulsationen und Förderzyklen der Pumpe auszugleichen. Die Versorgungseinheit ist als Rahmenanbauteil meist in Tanknähe positioniert, damit die Versorgungsleitung zur Einheit möglichst kurz ausfallen kann.

- **Dosiereinheit:** Die Dosiereinheit sorgt für die Mengenzumessung der Harnstoff-Wasserlösung und wird von der Versorgungseinheit über eine beheizte Leitung mit Harnstoff-Wasserlösung versorgt. In der Dosiereinheit wird über ein getaktetes Magnetventil Harnstoff-Wasserlösung in angepasster Menge in einen kontinuierlichen Druckluftstrom eingedüst. Die Druckluftversorgung der Dosiereinheit stellt dabei die externe Druckluftsteuerung her. Über eine kurze Leitung wird dann die Harnstoff-Luft-Mischung zu einem im Abgasstrang montiertem Dosierrohr gebracht, das für die Eindüsung und Zerstäubung in den Abgasstrom sorgt. Die Dosiereinheit ist als Motoranbauteil konzipiert und meist in Zylinderkopfnähe angebracht. Zur Überwachung von Harnstofftemperatur, Harnstoffdruck und Versorgungsluftdruck sind in der Dosiereinheit 3 Sensoren eingebaut, die ihre Signale an das SCR-Steuergerät schicken.
- **Druckluftsteuerung:** Die Druckluftsteuerung sorgt für Druckluft in der richtigen Menge und vom richtigen Druckniveau zur Versorgung der Dosiereinheit. Gespeist wird die Druckluftsteuerung vom Druckluftsystem des Fahrzeugs und kann über ein integriertes Magnetventil Druck und Fördermenge am Ausgang variieren. Die Druckluftsteuerung kann als eigene Einheit am Fahrzeugrahmen befestigt werden.
- **SCR-Steuergerät:** Das SCR-Steuergerät kann über einen CAN-Bus Informationen mit dem Motorsteuergerät austauschen, wertet Sensorsignale des SCR-Systems aus und steuert die Aktuatoren des Systems an. Die im System verbauten Sensoren sind dabei: Füllstands- und Temperatursensor im Tank, Harnstoffdruck- und -temperatursensor sowie Luftdrucksensor in der Dosiereinheit und Temperatursensoren vor und nach dem SCR-Katalysator. Die Aktuatoren im System sind das Magnetventil für die Harnstoffzumessung in der Dosiereinheit und das Magnetventil in der Druckluftsteuerung. Beim Hilite-SCR-System kann die Steuerung sowohl von einem externen herstellerspezifischen SCR-Steuergerät aus erfolgen oder optional auch in schon vorhandene Steuergeräte (z.B. Motorsteuergerät) integriert werden.

### 5.1.1.3 Grundfos NoNOx-System

Die Firma Grundfos bietet basierend auf einem Grundsystem verschiedene Ausbaustufen ihres Dosiersystems, von einem reinen Eindosiersystem (bei Grundfos „Slave Doser System“ genannt), das seine Dosierrate von einer externen Motorsteuerung erhält, bis zu einem vollwertigen „Stand alone System“, das die Dosierung vollständig autark in Abhängigkeit von externen Sensorsignalen vornimmt („Retrofit Doser System“) an.

Das Dosiersystem selbst ist druckluftbasiert, d.h. ebenso wie bei den beiden vorgenannten Systemen dient Druckluft aus dem Fahrzeugsystem zur Zerstäubung und Einbringung der Harnstoff-Wasserlösung in das Abgassystem.

Die Einstellung der Dosierrate und die Druckerzeugung übernimmt eine spezielle digital ansteuerbare Dosierpumpe von Grundfos. Diese Pumpenbauart ist im Prinzip ein Großserienprodukt und wurde bereits vorher in anderen Bereichen der Industrie als Dosierpumpe eingesetzt. Die Verstellung der Dosierrate geschieht dabei über Ansteuerung des Schrittmotors der die Membran antreibt. Die Anzahl der Umdrehungen dieses Motors pro Zeiteinheit kann vorgegeben werden und bestimmt daher die Anzahl der Membranhübe der Pumpe und damit die Dosiermenge. Mit diesem System lässt sich die Dosierrate feinfühlig von Null bis auf den vom SCR-System benötigten Höchstwert variieren.

#### Das Grundfos-System als abhängiges Dosiersystem („Slave Doser System“)

Abbildung 5 zeigt den Aufbau des Grundfos NoNOx-Systems in der Betriebsvariante eines reinen Harnstoffdosiersystems das über eine CAN-Bus-Botschaft die Anforderung einer bestimmten Harnstoffdosiermenge erhält und diese dann in das Abgassystem vor den SCR-Katalysator eindosiert.

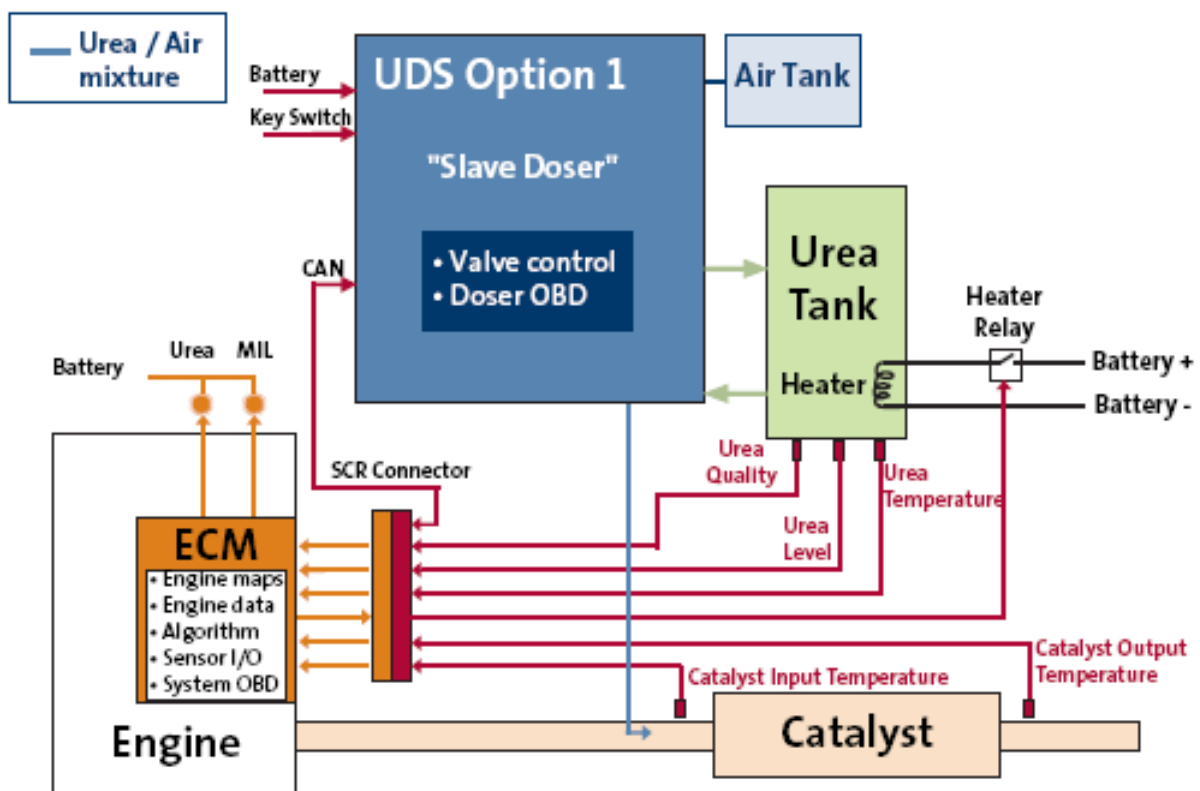


Abbildung 5: Grundfos NoNOx-System in der Ausführung „Slave Doser System“ [21]

Das System besteht in diesem Fall aus folgenden Komponenten:

- **Dosiereinheit (UDS Urea Dosing System):** In der Dosiereinheit befindet sich die Membrandosierpumpe die sowohl die Förderung als auch die Dosierung der Harnstoff-Wasserlösung übernimmt. Ebenso befinden sich in der Dosiereinheit Magnetventile zur Steuerung des Harnstoffstroms bei Motorstart, in der Eindosierungsphase, im Fehlerfall und beim Abstellen des Motors. Die Vermischung des Harnstoffs mit der Druckluft erfolgt ebenfalls in der Dosiereinheit nach der Dosierpumpe. Von dort wird dann die AdBlue-Luftmischung über eine möglichst kurze Leitung zur Zerstäuberdüse im Abgasstrang geführt. Die benötigte Druckluft wird aus dem Fahrzeugsystem entnommen und wird der Dosiereinheit gefiltert über eine Leitung zur Verfügung gestellt. Die in der Dosiereinheit eingebaute Elektronik übernimmt sowohl die Ansteuerung der Magnetventile als auch des Schrittmotors der Dosierpumpe und sorgt so für die richtige Dosierrate. Eine weitere Aufgabe der Elektronik liegt in der Überwachung der Komponenten sowohl für OBD-Zwecke als auch zur Fehleranzeige und -diagnose des Systems für Fahrer und Werkstättenpersonal.
- **Zerstäuberdüse:** Die Einbringung der Harnstoff-Wasserlösung in das Abgasrohr kann bei diesem System über eine relativ einfache Zerstäuberdüse mit mehreren integrierten Bohrungen zur Zerstäubung des Harnstoffs erfolgen. Wie bei allen druckluftunterstützten Systemen wird eine AdBlue-Wassermischung in den Abgasstrom eingebracht. Beim Abstellen des Systems wird über Ansteuerung eines Magnetventils in der Dosiereinheit nur mehr Druckluft zur Zerstäuberdüse geleitet und diese dadurch gekühlt. Die Düse ist außerdem keramisch wärmeisoliert im Abgasrohr eingebaut.
- **Sensoren, Steuerung des Systems und Anforderung der Dosiermenge:** Bei dieser Aufbauvariante des Grundfos NoNOx-Systems werden alle Sensorsignale zur Überwachung des Systems wie Temperatursensoren vor und nach dem Katalysator, Temperatursensor und Füllstandssensor im AdBlue-Tank usw., von einem externen Steuergerät (z.B. Motorsteuergerät) verarbeitet. Dieses Steuergerät verarbeitet auch alle Motorsteuergrößen die für die Stickoxidemission verantwortlich sein können und beinhaltet den Dosieralgorithmus für die Harnstoffdosierung. Die Anforderung einer Harnstoff-Dosiermenge erfolgt dann via CAN-Bus an das Steuergerät in der Dosiereinheit, das dann nur mehr diese Anforderung in ein Ansteuersignal für die Dosierpumpe umsetzt.

### **Das Grundfos-System als autarkes Dosiersystem („Retrofit Doser System“)**

Die zweite Grundvariante der Applikation des Grundfos-Dosiersystems an einen Motor ist die, in der die Dosiereinheit mit ihrem Steuergerät die alleinige Kontrolle über die Harnstoffdosiermenge hat. Zu diesem Zweck wertet dieses Steuergerät die Signale aller relevanten Sensoren die das Katalysatorsystem, das Harnstoffversorgungssystem und den Motorbetriebszustand überwachen aus, und ermittelt über die eigene interne Softwarestruktur und einen hinterlegten Dosieralgorithmus die einzudosierende Harnstoffmenge. Aus dieser Information wird dann vom Dosiersteuergerät ein Ansteuersignal für den Schrittmotor der Dosierpumpe kreiert. Ausgerüstet mit einem NO<sub>x</sub>-Sensor und einer Luftmassenmessung im Ansaugsystem kann diese Variante als Nachrüstlösung auch für Motoren, die über kein elektronisches Motormanagement verfügen, eingesetzt werden.

Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau dieser Grundvariante des Grundfos-NoNOx-Systems.

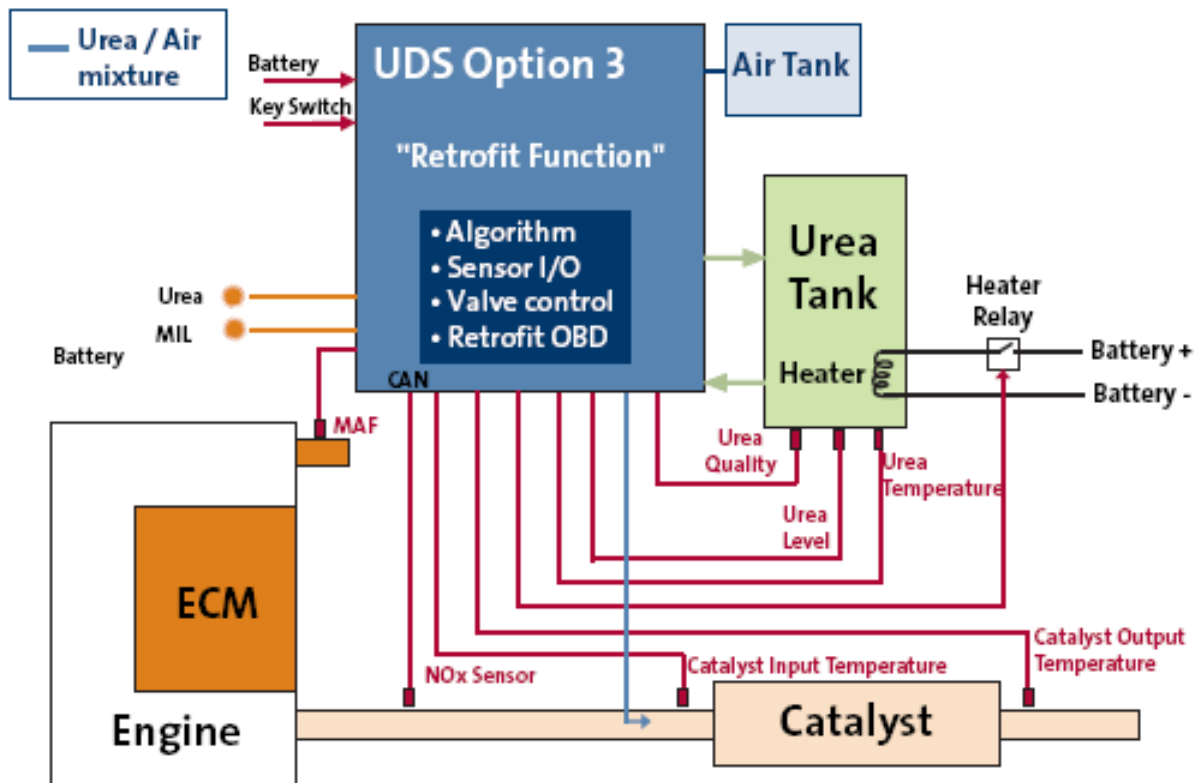


Abbildung 6: Grundfos NoNOx-System in der Ausführung „Retrofit Doser System“ [21]

Gliederung des Systems:

- Dosiereinheit (UDS Urea Dosing System):** Die Dosiereinheit hat in Bezug auf Dosierpumpe und Förderung und Vermischung des Harnstoffs mit Druckluft grundsätzlich den gleichen Aufbau wie das oben besprochene System. Der Unterschied liegt in der Funktionalität des internen Steuergeräts, das in diesem Fall den Dosieralgorithmus enthält, sämtliche Aufgaben der Berechnung der Harnstoffdosiermenge selbständig übernimmt und dann die Dosierpumpe entsprechend ansteuert. Dazu erhält das Steuergerät Informationen über Abgastemperaturen vor und nach Katalysator sowie die  $\text{NO}_x$ -Konzentration des Rohabgases über einen vor dem SCR-Katalysator eingebauten  $\text{NO}_x$ -Sensor. Weiters wird die angesaugte Luftmasse des Motors über einen in den Ansaugluftpfad des Motors integrierten Heißfilmluftmassenmesser (in Abbildung 6: MAF...Mass Air Flow Meter) ermittelt. Der  $\text{NO}_x$ -Sensor ist über eine CAN-Busverbindung mit dem Steuergerät verbunden, die übrigen Sensoren sind direkt mit dem Steuergerät in der Dosiereinheit verbunden. Das Steuergerät übernimmt nicht nur die Dosiersteuerung sondern überwacht auch sämtliche Funktionen des Systems und zeigt Fehler über eigene Diagnoselampe (MIL...Malfunction Indicator Lamp) am Armaturenbrett an. Ebenso gehören Überwachungsaufgaben der emissionsrelevanten Bauteile des SCR-Systems für die On-Board-Diagnose (OBD) zu den Aufgaben des Steuergeräts, sowie die Ansteuerung und Überwachung der Heizung für Ad-Blue-Tank und -Leitungen.

- **Zerstäuberdüse:** Die Ausführung der Zerstäuberdüse und die Art der Einbringung der Harnstoff-Wasserlösung in den Abgasstrom ist dieselbe wie in der „Slave Doser“-Variante
- **Sensoren, Steuerung des Systems:** Um ein autarkes Dosiersystem aufbauen zu können, benötigt man außer den Informationen die bereits in der Version „Slave Doser“ erforderlich waren, noch zusätzlich Signale von einem NO<sub>x</sub>-Sensor und einem Luftmassenmesser. Dadurch wird die NO<sub>x</sub>-Eingangskonzentration direkt erfasst und über den Abgasmassenstrom kann die Eindosiermenge errechnet werden. Der Abgasmassenstrom ist die Summe aus Luft- und Kraftstoffmassenstrom, und kann daher näherungsweise über eine Luftmassenmessung ermittelt werden. Zu diesem Zweck wird in das Ansaugsystem des Motors ein Heissfilm-luftmassenmesser eingebaut.

Vom Grundfos-System sind zwischen diesen soeben vorgestellten zwei Grundvarianten alle Kombinationen möglich (Applikation nur eines Teils oder aller Sensoren, Umwandlung der Sensorsignale in CAN-Botschaften die dann an einen externen SCR-Rechner gesendet werden, Verwendung eines NO<sub>x</sub>-Sensors oder eines Stickoxidkennfeldes, externe Steuerung der Heizung für AdBlue-Tank und -Leitungen von einem eigenen Steuergerät etc.).



## 5.1.2 Systeme ohne Druckluftunterstützung

### 5.1.2.1 BOSCH Denoxtronic 2

Die BOSCH Denoxtronic 2 ist ein druckluftloses Dosiersystem d.h. die Eindosierung der Harnstoff-Wasserlösung erfolgt ohne Druckluftunterstützung. Die Zerstäubung und Verteilung der Harnstoff-Wasserlösung geschieht allein über die Anzahl und die Anordnung der Bohrungen in einem Dosierventil, sowie über den vom Fördermodul aufbrachten Druck. Die Vorteile liegen in einer Verringerung der Anzahl der Bauteile, der kompakteren Bauweise sowie in der Unabhängigkeit von einer Druckluftversorgung. Somit wäre das System auch für PKW's geeignet, die ja im Allgemeinen keine eigene Druckluftversorgung zur Verfügung haben. Abbildung 7 zeigt eine Systemübersicht der BOSCH Denoxtronic 2.

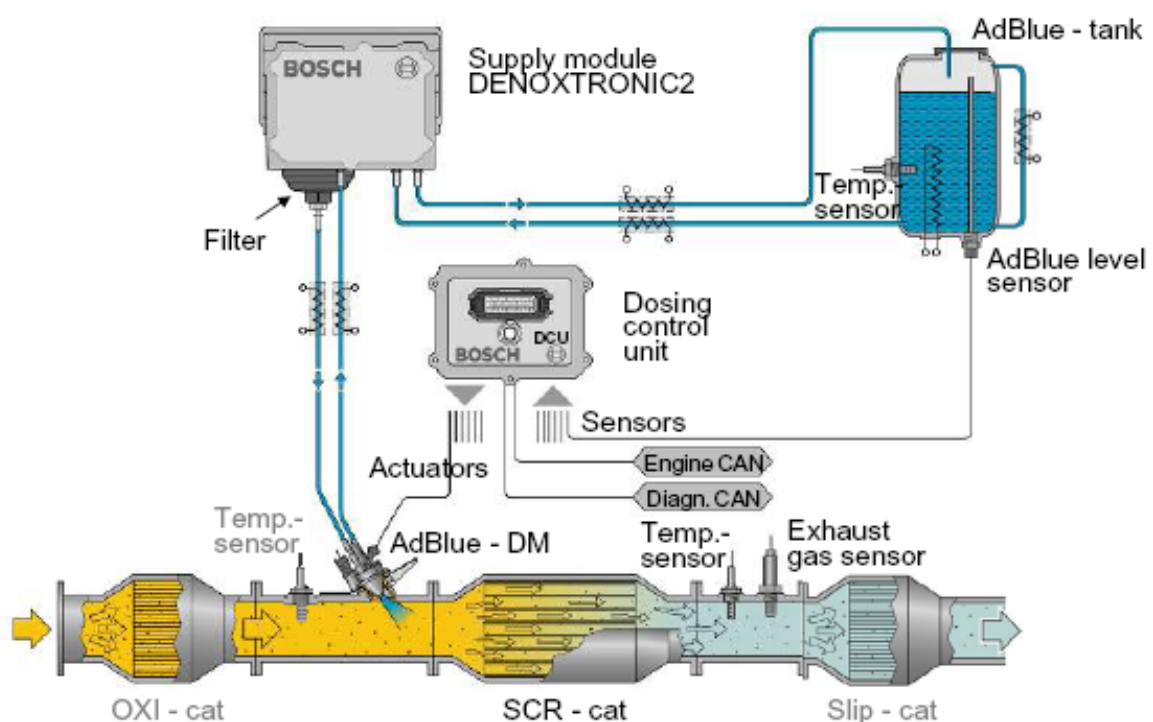


Abbildung 7: Systemübersicht der BOSCH Denoxtronic 2 [23]

Die Komponenten des Systems sind:

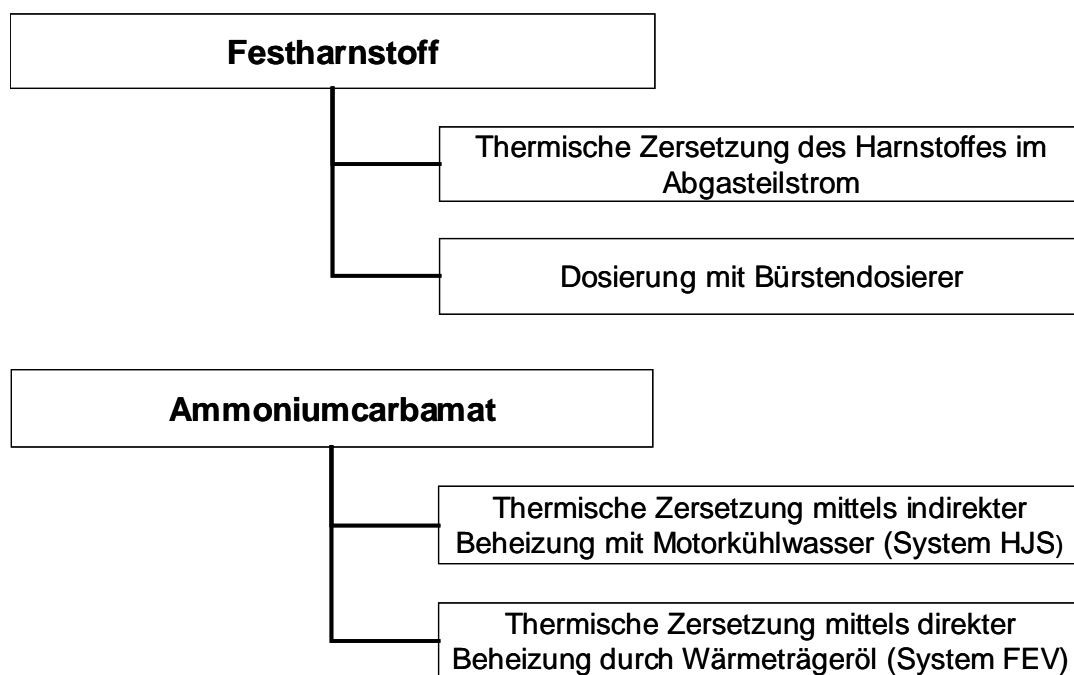
- **Fördermodul (Supply Module):** Die Aufgaben des Fördermoduls sind ebenso wie bei der BOSCH Denoxtronic 1 die Förderung der Harnstoff-Wasserlösung aus dem Tank und die Druckversorgung des Dosiermoduls mit gefilterter Harnstoff-Wasserlösung. Dazu enthält das Modul eine elektrische angetriebene Membranpumpe, einen beheizbaren Filter, ein 4/2-Wege-Magnetventil zur Steuerung des Reduktionsmittelflusses und ein Magnetventil zur Steuerung der Kühlung des Dosierventils. Weiters sind noch ein Druck- und ein Temperatursensor zur Messung von Harnstoffdruck und -temperatur im Fördermodul integriert. Das Dosiersteuergerät ist ebenso wie bei der BOSCH Denoxtronic 1 im Fördermodul eingebaut.
- **Dosiermodul (AdBlue-DM):** Das Dosiermodul wird bei der BOSCH Denoxtronic 2 über einen Flansch direkt an das Abgasrohr angebaut und ist deshalb einer sehr hohen Temperaturbelastung ausgesetzt. Die Dosierung und Verteilung der Harnstoff-Wasserlösung übernimmt ein Magnetventil, das direkt

im Dosiermodul angeordnet ist und zur Kühlung von AdBlue umspült wird. Im Vorderteil des Magnetventils der direkt in den Abgasstrom ragt, befinden sich mehrere Bohrungen über welche die Harnstoff-Wasserlösung im Abgasstrom zerstäubt und verteilt wird. Das Dosierventil wird vom Dosiersteuergerät mit einem pulsweitenmoduliertem Signal angesteuert, dessen Tastverhältnis die Eindosiermenge bestimmt. Die dem Dosiermodul zugeführte AdBlue-Menge ist wesentlich größer als die eindosierte Menge. Der Anteil an Adblue der nicht eindosiert wird, dient zur Aufrechterhaltung des Kühlkreislaufes für das Magnetventil und strömt über eine Rücklaufleitung wieder zum Fördermodul zurück. Die Steuerung dieses Kühlstromes übernimmt ein eigenes Magnetventil im Fördermodul.

- **Dosiersteuergerät (DCU):** Das Dosiersteuergerät steuert ebenso wie bei der Denoxtronic 1 alle Funktionen des Dosiersystems. Es kann über eine CAN-Busverbindung mit der Motorsteuerung kommunizieren und erhält dadurch die Informationen über den aktuellen Betriebszustand des Motors, wie Drehzahl, Einspritzmenge und Motortemperatur. Die im Dosiersystem verbauten Sensoren senden ihre Signale ebenfalls an das Dosiersteuergerät. Es sind dies: Harnstoffdruck und -temperatursensor im Fördermodul, Temperatur- und Füllstandssensor im AdBlue-Tank sowie Abgastemperatursensoren vor und/oder nach dem SCR-Katalysator. Optional kann auch noch das Signal eines im Abgasstrang angebrachten  $\text{NO}_x$ -Sensors verarbeitet werden. Aus diesen Informationen ermittelt das Dosiersteuergerät über eine interne Softwarestruktur die einzudosierende AdBlue-Menge und gibt über eine Leistungsendstufe ein pulsweitenmoduliertes Signal an das Magnetventil im Dosiermodul aus. Das variable Tastverhältnis dieses Signals bestimmt die in das Abgassystem eindosierte Menge an Harnstoff-Wasserlösung. Der  $\text{NO}_x$ -Sensor kann entweder zum Aufbau eines geschlossenen Regelkreises dienen und die Regelgröße, also die  $\text{NO}_x$ -Konzentration vor dem SCR-Katalysator erfassen, oder aber er dient zur Überwachung des Systems und ist hinter dem Katalysator angebracht. Bei der Denoxtronic 2 sind zwei Dosiervarianten möglich. Einerseits die vorgenannte, dass das Dosiersteuergerät die nötigen Informationen über CAN-Bus vom Motorsteuergerät erhält und die Dosierstrategie im Dosiersteuergerät hinterlegt ist, oder aber, dass eine kundenspezifische Dosierstrategie bereits im Motorsteuergerät bzw. einem anderen Steuergerät hinterlegt ist, und über den CAN-Bus nur mehr die Dosiermenge vom Dosiersteuergerät angefordert wird. In diesem Fall ist das Dosiersteuergerät nur mehr das ausführende Organ zur Ansteuerung des Dosiermagnetventils. In jedem Fall ist das Dosiersteuergerät auch für das aktive Heizen der Harnstoff führenden Bauteile zuständig und kann über integrierte Leistungsendstufen die Heizelemente ansteuern und diese überwachen.

## 5.2 Reduktionsmitteldosierung bei festen Reduktionsmitteln

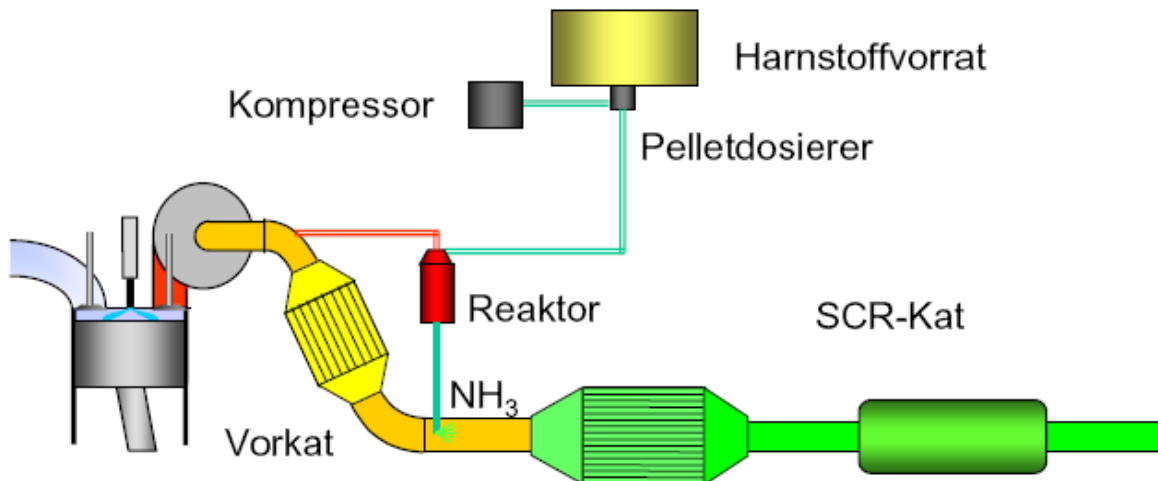
Die Motivation zur Verwendung von festen Reduktionsmitteln liegt im meist höheren Gehalt an freisetzbarem aktiven Ammoniak im Vergleich zu den flüssigen Reduktionsmitteln und in der relativen Problemlosigkeit im Handling bei tiefen Temperaturen. Die festen Reduktionsmittel können im Gegensatz zu den flüssigen Reduktionsmitteln (vor allem AdBlue) im Winter nicht einfrieren und man benötigt daher im Fahrzeug keine externe Heizung für die gefährdeten Komponenten des Dosiersystems. Beide Punkte sprechen dafür, dass sich bei einer Verwendung von festen Reduktionsmitteln relativ kompakte Dosiersysteme realisieren lassen, die vor allem auch für die engen Bauräume in den PKW's geeignet sind. Die Schwierigkeit liegt vor allem darin, das Reduktionsmittel in geeigneter Form in den Abgasstrom zu bringen, damit es dort Ammoniak bilden kann. Dabei eine gute Homogenisierung zu erreichen und die eventuellen Vorreaktionen möglichst vollständig noch vor dem Katalysator, ohne Anlagerung von Nebenprodukten ablaufen zu lassen, ist die große Herausforderung beim Aufbau solcher Dosiersysteme. Unter den vielfältigen Möglichkeiten, Dosiersysteme mit festen Reduktionsmitteln zu realisieren, werden nachstehend nur diejenigen näher behandelt, mit denen umfangreichere Motorprüfstand- und Fahrzeugtests durchgeführt wurden. Es sind dies vor allem Systeme auf der Basis von Festharnstoff und Ammoniumcarbamat. Abbildung 8 zeigt eine Übersicht über Dosiersysteme zur Eindosierung von festen Reduktionsmitteln.



**Abbildung 8:** Dosiersysteme zur Eindosierung von festen Reduktionsmitteln (exemplarisch)

### 5.2.1 Thermische Zersetzung von Festharnstoff im Abgasteilstrom

Das nachstehend beschriebene Dosiersystem wurde an der Technischen Universität Kaiserslautern im Rahmen des FVV-Projektes „Festharnstoff-SCR“ realisiert, und in Motorprüfstandsversuchen sowie bei Fahrzeugversuchen im PKW getestet. [9]



**Abbildung 9:** Schema eines Festharnstoffsystems mit Harnstoffzersetzung im Abgasnebenstrom [24]

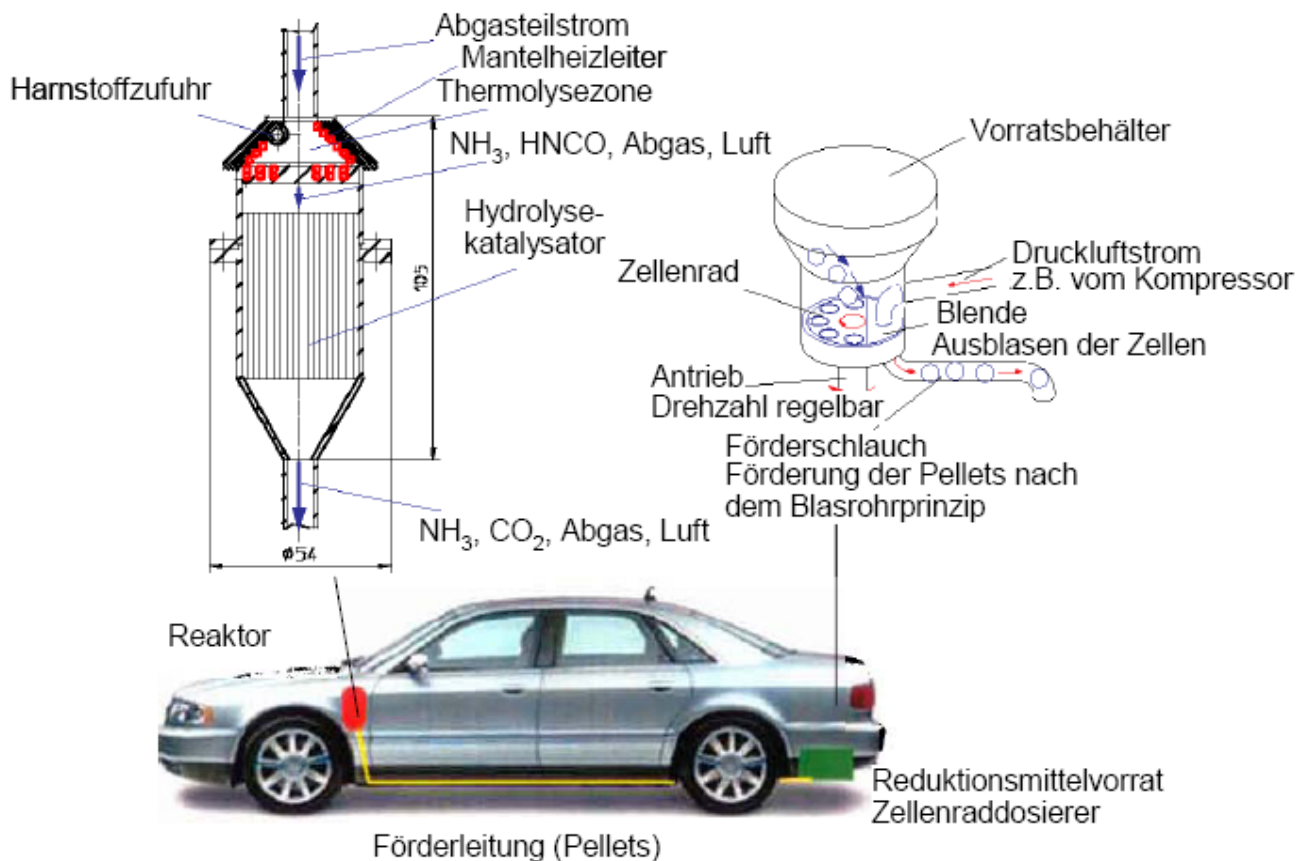
Der feste Harnstoff reagiert grundsätzlich ebenso in 2 Schritten zu Ammoniak und Kohlendioxid wie es auch der in Wasser gelöste Harnstoff der 32,5%-igen Harnstoff-Wasserlösung tut. Im ersten Schritt der Thermolyse (*Gleichung 1-4*) wird aus dem Harnstoff Isocyanensäure und Ammoniak gebildet, im zweiten Schritt der Hydrolyse (*Gleichung 1-5*) wird aus der Isocyanensäure Ammoniak und Kohlendioxid gebildet. Beim vorgestellten Dosiersystem laufen diese Reaktionen in einem Reaktor ab, der von einem Abgasteilstrom des Motors durchströmt wird. Das so generierte Ammoniak wird dann nach dem Austritt aus dem Reaktor vor dem SCR-Katalysator in das Abgassystem eingebracht.

Die Systemkomponenten sind im Detail:

- **Fördereinrichtung und Pelletdosierer:** Der Harnstoff liegt hier in Form von Pellets mit einem Durchmesser von ca. 2mm vor, die in einem eigenen Vorratsbehälter im Fahrzeug mitgeführt werden. Der Vorratsbehälter und die Fördereinrichtung können bei einem PKW beispielsweise in der Reserveradmulde untergebracht werden. Die Pellets werden in gewissen Zeitabständen durch eine Leitung, die auf dem Pellets-Durchmesser abgestimmt ist, zum Reaktor gefördert, d.h. die Förderung erfolgt diskontinuierlich. Die Zeitabstände hängen von der geforderten Dosiermenge ab. Dosierte wird über eine Zellenradschleuse deren Zellen nur jeweils ein Pellet aufnehmen können. Die Zelle aus der dosiert wird, wird mit Hilfe eines Förderluftstroms ausgeblasen, der von einer elektrisch angetriebenen Förderluftpumpe erzeugt wird.
- **Reaktor:** Der Harnstoff wird in einer beheizten Reaktorkammer unter Verwendung eines abgezweigten Abgasteilstroms durch Thermo- und Hydrolysereaktion in Ammoniak umgesetzt. Die Harnstoff-Pellets werden dem Reaktor zentral über den Förderluftstrom zugeführt. Der Reaktor wird über elektrische Heizelemente beheizt und die Temperatur über Thermolemente überwacht. Der Abgasteilstrom

liefert sowohl das für die Hydrolysereaktion notwendige Wasser als auch einen Teil der für die Thermolyse benötigten Wärme. Der Thermolysezone ist ein Hydrolysekatalysator nachgeschaltet, der sich ebenfalls im Reaktorgehäuse befindet und die Hydrolysereaktion beschleunigen soll. Der Abgasteilstrom entspricht in etwa 1% des Gesamtgasstroms und wird meist nach Turbolader entnommen.

Nachstehende Abbildung zeigt die Anordnung der Bauteile beim Fahrzeugeinbau:



**Abbildung 10:** Aufbau und Anordnung der Systemkomponenten im Fahrzeug [9]

**Vorteile des Systems:**

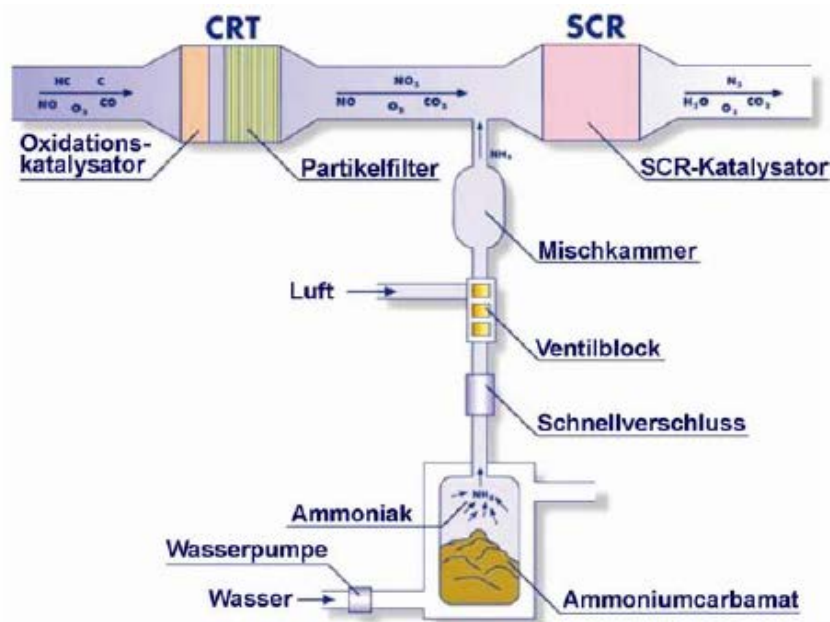
- Wintertauglichkeit des Systems ohne zusätzliche Maßnahmen (kein Einfrieren möglich)
- kompakter Aufbau; flexible Anordnung der Bauteile möglich, daher auch für PKW-Einsatz geeignet

**Nachteile des Systems:**

- Anlagerung fester Harnstoffnebenprodukte in Verbindung mit der Thermolysereaktion im Dosiersystem (vor allem im Hydrolysekatalysator) sind möglich

### 5.2.2 Thermische Zersetzung von Ammoniumcarbamat mittels indirekter Beheizung mit Motorkühlwasser (System HJS)

Ammoniumcarbamat sublimiert bei Temperaturen zwischen  $60^{\circ}$  und  $140^{\circ}\text{C}$  und bildet Ammoniak und Kohlendioxid (*Gleichung 1-6*). Das Grundprinzip des hier dargestellten Dosiersystems ist die indirekte Erwärmung des Ammoniumcarbamats über das Motorkühlwasser und die Eindosierung des entstehenden gasförmigen Ammoniaks in das Abgassystem vor dem SCR-Katalysator. Abbildung 11 zeigt ein Schema des Systems.



**Abbildung 11:** Schema des Systems der Ammoniumcarbamatzersetzung durch Kühlwasserbeheizung [9]

Der prinzipielle Aufbau des Dosiersystems ist folgender:

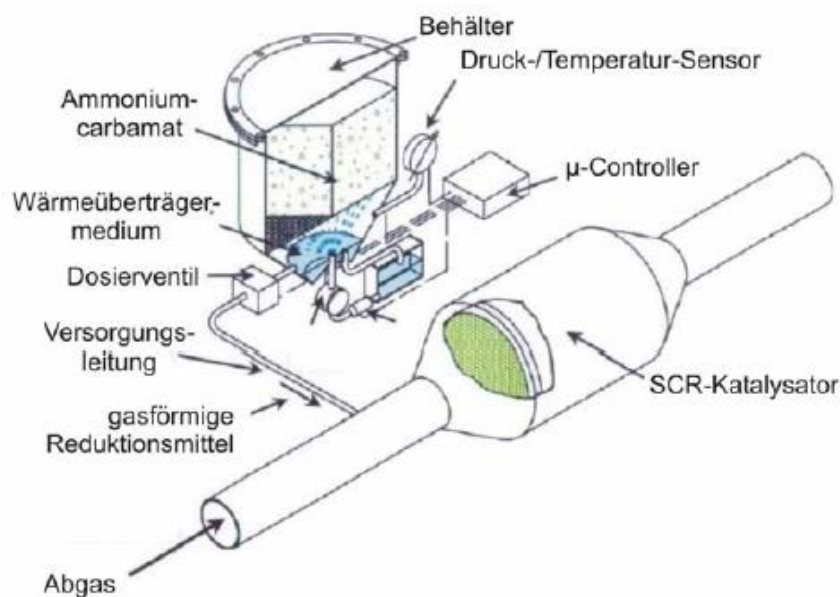
- **Ammoniumcarbamatbehälter und Wärmetauscher:** Ein mit pulverförmigen Ammoniumcarbamat gefüllter Behälter wird kontinuierlich von Motorkühlwasser umspült. Durch den Wärmeübergang auf das Ammoniumcarbamat sublimiert dieses, es bildet sich ein Kohlendioxid-Ammoniak-Gemisch und der Druck im Behälter steigt an. Durch den Druckanstieg kann das Gasgemisch über ein Dosierventil dem Behälter entnommen werden.
- **Ventilblock und Mischkammer:** Über den Ventilblock und die nachfolgende Mischkammer wird das Kohlendioxid-Ammoniak-Gemisch mit Luft oder einem Abgasteilstrom vermischt und anschließend vor dem SCR-Katalysator in das Abgassystem eingebracht. Die Verdünnung des Gasgemisches soll verhindern, dass sich das Gemisch an kalten Stellen hinter der eigentlichen Dosierstelle als Sublimat niederschlägt.



- Vorteile des Systems:**
- Wintertauglichkeit des Systems ohne zusätzliche Maßnahmen (kein Einfrieren möglich)
  - Eindosierung von gasförmigen Ammoniak in den Abgasstrom ohne Umweg über Zwischenprodukte
  - Nutzung der Motorabwärme für die Ammoniak-erzeugung
- Nachteile des Systems:**
- fehlende Dynamik des Systems, da die Sublimierung durch den Wärmeeintrag über das Motorkühlwasser sehr träge ist
  - für die Kaltstartphase ist ein zusätzlicher elektrisch beheizter Wasserkreislauf notwendig, da die Temperaturen des Kühlwassers in der Kaltstartphase zu gering für eine Sublimation des Ammoniumcarbamats sind

### 5.2.3 Thermische Zersetzung von Ammoniumcarbamat mittels direkter Beheizung durch Wärmeträgeröl (System FEV)

Im Unterschied zum vorher vorgestellten Dosiersystem mit indirekter Wärmeübertragung wird hier die Wärme direkt von einem Wärmeüberträgermedium an das Ammoniumcarbamat weitergegeben. Der flüssige Wärmeüberträger wird in einem geschlossenen Kreislauf erhitzt und gegen das pulverförmige Ammoniumcarbamat gesprüht, wodurch ein direkter Wärmeübergang stattfindet und es zur Sublimation des Ammoniumcarbamats kommt. Man vermeidet bei diesem System also den Wärmeübergang durch die Behälterwände und schon in die Gasphase übergegangenes Ammoniumcarbamat und will dadurch eine bessere Dynamik des Systems erzielen. Als Wärmeübertragungsmedium wird ein Öl verwendet. Das System wurde sowohl am Motorprüfstand als auch im Fahrzeugversuch getestet. Abbildung 12 zeigt den schematischen Aufbau des Systems. [9],[25]



**Abbildung 12:** Schema des Systems der thermischen Zersetzung von Ammoniumcarbamat mit direkter Beheizung [9]

Das System im Detail:

- **Ammoniumcarbamatbehälter und Sprüheinrichtung:** Das Ammoniumcarbamat befindet sich als Pressling innerhalb einer Kartusche und wird über eine Düse von unten mit dem Wärmeträger besprüht. Das Ammoniumcarbamat erwärmt sich dabei lokal und beginnt bei Überschreitung der Sublimationstemperatur zu sublimieren. Dabei entsteht ein Gasgemisch aus Kohlendioxid und Ammoniak und der Druck im Behälter unterhalb des Feststoffpresslings steigt an. Dieser Druck wird mit einem Drucksensor erfasst und über den Flüssigkeitskreislauf auf einen Schwellwert eingeregelt, um ein treibendes Druckgefälle zum Abgasstrang sicherzustellen. Weiters wird dann noch über einen speziellen Abscheider das Wärmeträgeröl vom Gasgemisch getrennt, damit es nicht in den Abgasstrang und somit in den SCR-Katalysator gelangen kann.
  - **Wärmeträgerkreislauf:** Der Wärmeträger wird elektrisch beheizt und von einer elektrisch angetriebenen Pumpe im Kreislauf geführt. Die Beheizung könnte auch aus einer Kombination aus elektrischer Heizung (für die Kaltstartphase) und zusätzlicher Beheizung mit Motorkühlwasser oder Abgaswärme bestehen. Im Flüssigkeitskreislauf befindet sich auch noch ein 2/2-Wegeventil, das den Wärmeträger entweder nur im Bypassstrom zur Erwärmung der Gasdosierleitung leiten kann, oder zusätzlich zur Sprühdüse im Dosierbehälter leitet. Wenn der Reduktionsmittelgasdruck im Dosierbehälter unter einen definierten Schwellwert sinkt, gibt dieses Ventil den Weg zur Sprühdüse wieder frei und es wird wieder Wärmeträgerfluid auf das Ammoniumcarbamat aufgebracht und weiteres Ammoniak durch Sublimation freigesetzt.
  - **Dosierventil:** Die Dosierung des Ammoniakstromes in den Abgasstrang erfolgt über ein elektrisch beheiztes proportionales Magnetventil, das vom Dosiersteuergerät angesteuert wird.
  - **Dosiersteuergerät:** Die Funktionen des Dosiersystems werden von einem eigenen Steuergerät kontrolliert, das die Ansteuerung des Dosierventils, des 2/2-Wegeumschaltventils, der Wärmeträgerpumpe und der Heizelemente übernimmt. Als Eingangsgrößen zur Steuerung dienen dabei der Gasbehälterdruck, der Abgasdruck, die Katalysatortemperatur und die  $\text{NO}_x$ -Rohemissionen, wobei diese entweder über einen  $\text{NO}_x$ -Sensor oder über ein im Steuergerät abgelegtes motorspezifisches Kennfeld gewonnen werden. Bei Anwendung eines  $\text{NO}_x$ -Sensors kann ein geschlossener Regelkreis aufgebaut werden. Bei Anwendung eines  $\text{NO}_x$ -Sensors ist als Information zur Bestimmung des  $\text{NO}_x$ -Massenstroms ist noch die angesaugte Luftmasse entweder über ein intern gespeichertes Luftmassenkennfeld oder ein Luftmassenmessersignal notwendig.
- Vorteile des Systems:**
- Wintertauglichkeit des Systems ohne zusätzliche Maßnahmen (kein Einfrieren des Reduktionsmittels möglich)
  - Eindosierung von gasförmigen Ammoniak in den Abgasstrom ohne Umweg über Zwischenprodukte
  - gegenüber dem System mit indirekter Beheizung verbessertes Druckaufbauverhalten und besseres dynamisches Ansprechverhalten
  - es besteht die Möglichkeit den Schwell- bzw. Dosierdruck zu regeln



- Nachteile des Systems:**
- indirekter Wärmefluss über das Wärmeträgerfluid, das elektrisch aufgeheizt werden muss
  - Abscheidung des Wärmeträgerfluids vom Gasgemisch notwendig

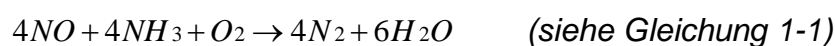
## 6 Mögliche Dosierstrategien bei stationärer Harnstoffeindosierung

Für einen optimalen Ablauf der SCR-Reaktion muss die eindosierte Harnstoffmenge der Abgaszusammensetzung angepasst werden, um einerseits Ammoniakverlust zu vermeiden und andererseits eine gute Stickoxidumsetzung zu erreichen. Als Eingangsgröße dazu dient die Stickoxidkonzentration im Abgas. Diese wird auf Motor- oder Rollenprüfständen über eine Abgasmessung meßtechnisch erfasst, im Fahrzeug ist sie meist als Kennfeld oder als Modell in einem Steuergerät hinterlegt bzw. könnte alternativ auch über einen Sensor gemessen werden. Im Folgenden wird auf die Ermittlung der Harnstoffdosiermenge aus der Stöchiometrie der SCR-Reaktion eingegangen bzw. die Möglichkeit der Bestimmung der Dosiermenge über alternative Eingangsgrößen diskutiert.

### 6.1 Berechnung der Harnstoffeindosiermenge aufgrund des Stickoxidgehaltes im Motorabgas

Als Grundgleichung für die Bestimmung der Harnstoffdosiermenge wird die Reaktionsgleichung der SCR-Standardreaktion herangezogen, da die Stickoxide im Dieselrohgas zum überwiegenden Teil aus Stickstoffmonoxid NO besteht, und bei SCR-Systemen ohne Vorschaltung eines Oxidationskatalysators hauptsächlich diese Reaktion im Katalysator stattfindet.

#### Reaktionsgleichung SCR-Standardreaktion



d.h. zur Reduktion von 1 mol NO wird 1 mol NH<sub>3</sub> benötigt

#### Reaktionsgleichung Ammoniakbereitstellung (Hydrolyse+Thermolyse)



d.h. aus 1 mol Harnstoff (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO entstehen 2 mol NH<sub>3</sub>

#### Molare Massen

Molare Masse Ammoniak:  $M_{\text{Ammoniak}} = 17 \text{ g/mol}$

Molare Masse Harnstoff:  $M_{\text{Harnstoff}} = 60 \text{ g/mol}$

d.h. aus 60g Harnstoff (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO entstehen 34g NH<sub>3</sub>.

→ damit wird zur Reduktion von 1 mol NO<sub>x</sub> 30g Harnstoff benötigt.

#### Definition Feedverhältnis $\alpha$

$$\alpha = \frac{[NH_3]}{[NO_x]} \dots \text{molares Verhältnis Ammoniak zu Stickoxid} \quad \text{Gleichung 1-9}$$

Bei  $\alpha=1$  liegt stöchiometrisches Verhältnis zwischen NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> vor, d.h. es kann theoretisch vollständige NO<sub>x</sub>-Umsetzung stattfinden.

**Berechnung des Molenstroms an NO<sub>x</sub> aus der Abgasanalyse**

$$NO_x [mol/h] = \frac{NO_x [ppm]}{10^6} \cdot \frac{\dot{m}_{Abgas}}{\rho_{Norm}} \cdot \frac{1}{22,4 \cdot 10^{-3}} \quad \text{Gleichung 1-10}$$

Die Konzentration an NO<sub>x</sub> [ppm] kann dabei z.B. über eine Abgasmessung am Prüfstand oder auch über einen NO<sub>x</sub>-Sensor ermittelt werden.

Der Abgasmassenstrom kann ebenfalls durch Messungen am Prüfstand ermittelt werden.

**Volumenstrom des Abgases bei Normzustand**

$$\frac{\dot{m}_{Abgas}}{\rho_{Norm}} = \dot{V}_{Norm} \quad \text{Gleichung 1-11}$$

$$\rho_{Norm} = \frac{p_{Norm}}{R_{Abgas} \cdot T_{Norm}} \quad \dots \text{Dichte Abgas im Normzustand} \quad \text{Gleichung 1-12}$$

(R<sub>Abgas</sub> ~ R<sub>luft</sub> = 287 J/kg·K beim Dieselmotor, da er immer mit Luftüberschuss betrieben wird)

(ρ<sub>Norm</sub> = 1,29 kg/m<sup>3</sup> bei 0°C und 1013mbar)

**Berechnung des Massenstroms an Harnstoff-Wasserlösung für α=1**

Benötigter Harnstoffmassenstrom für α=1:

$$(NH_2)_2CO [kg/h] = NO_x [mol/h] \cdot 30 \cdot 10^{-3} \quad \text{Gleichung 1-13}$$

Umrechnung auf die Harnstoff-Wasserlösung gemäß den 32,5-Gew% Harnstoff in der Harnstoff-Wasserlösung:

$$HWL [kg/h] = (NH_2)_2CO [kg/h] \cdot \frac{1}{0,325} \quad \text{Gleichung 1-14}$$

**Berechnung der Harnstoff-Eindosierung für ein beliebiges α**

$$HWL [kg/h] = \frac{NO_x [ppm]}{10^6} \cdot \frac{\dot{m}_{Abgas}}{\rho_{Norm}} \cdot \frac{1}{22,4 \cdot 10^{-3}} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{0,325} \cdot \alpha \quad \text{Gleichung 1-15}$$

Mit der obigen Beziehungen kann für ein beliebiges α entweder mit in einem Kennfeld abgelegten bekannten Stickoxidwerten (gemessen in Prüfstandsversuchen) oder mit über einen Sensor gemessenen Stickoxidwerten die benötigte Menge an Harnstoff-Wasserlösung für stationäre Eindosierung in das Abgassystem bestimmt werden. Der Abgasmassenstrom muss ebenfalls bekannt sein.

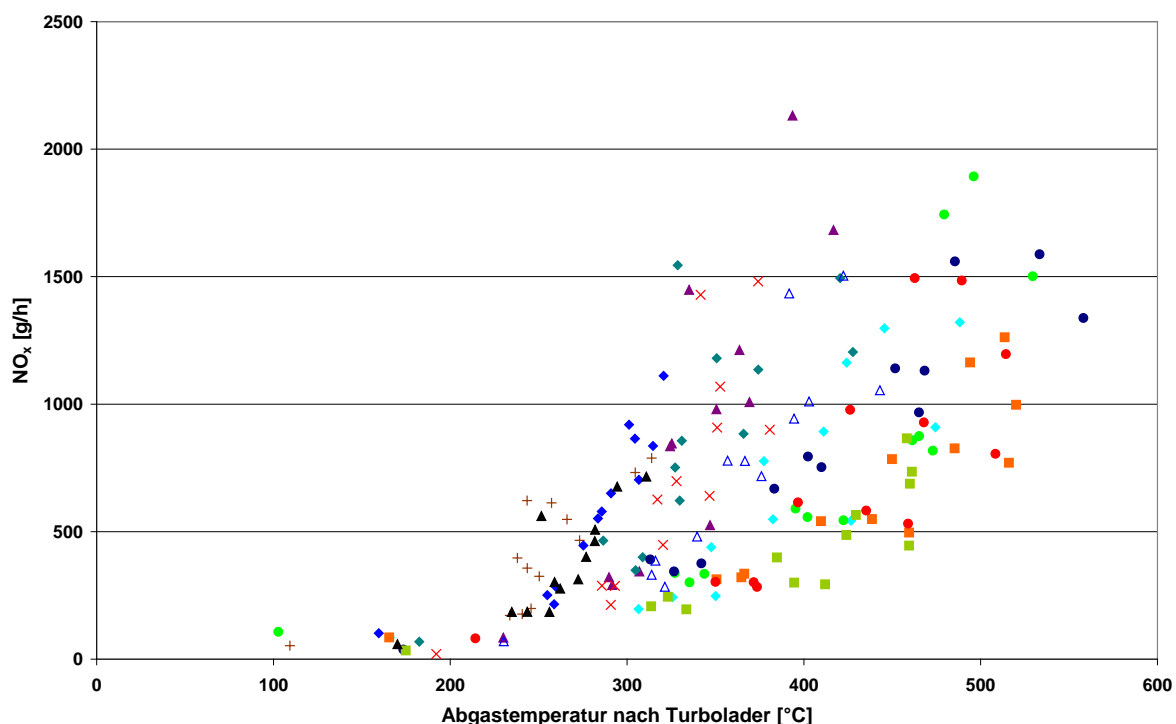
## 6.2 Möglichkeiten der Harnstoffeindosierung mit alternativen Eingangsgrößen

Eine der Motivationen für diese Diplomarbeit war es auch, abweichend von bereits existierenden Dosierstrategien (z.B. Ablegen eines Stickoxidkennfeldes im Dosiersteuergerät und Berechnung der Dosiermenge aus der  $\text{NO}_x$ -Konzentration) alternative und eventuell weniger aufwändige Dosierstrategien zu untersuchen. Dabei waren vor allem relativ einfach zu erfassende Eingangsgrößen gesucht, die in einem Zusammenhang zur Stickoxidemission eines Motors stehen, und in einem gewissen Rahmen zur Bestimmung der Eindosiermenge herangezogen werden können.

Die Stickoxidbildung ist stark temperaturabhängig. Daher lag es zunächst einmal nahe, einen Zusammenhang zwischen der Abgastemperatur und den Stickoxidemissionen näher zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden hier die Daten einer Reihe von Nutzfahrzeugmotoren ausgewertet die von der Typprüfung her dem EURO III-Emissionsstandard entsprechen.

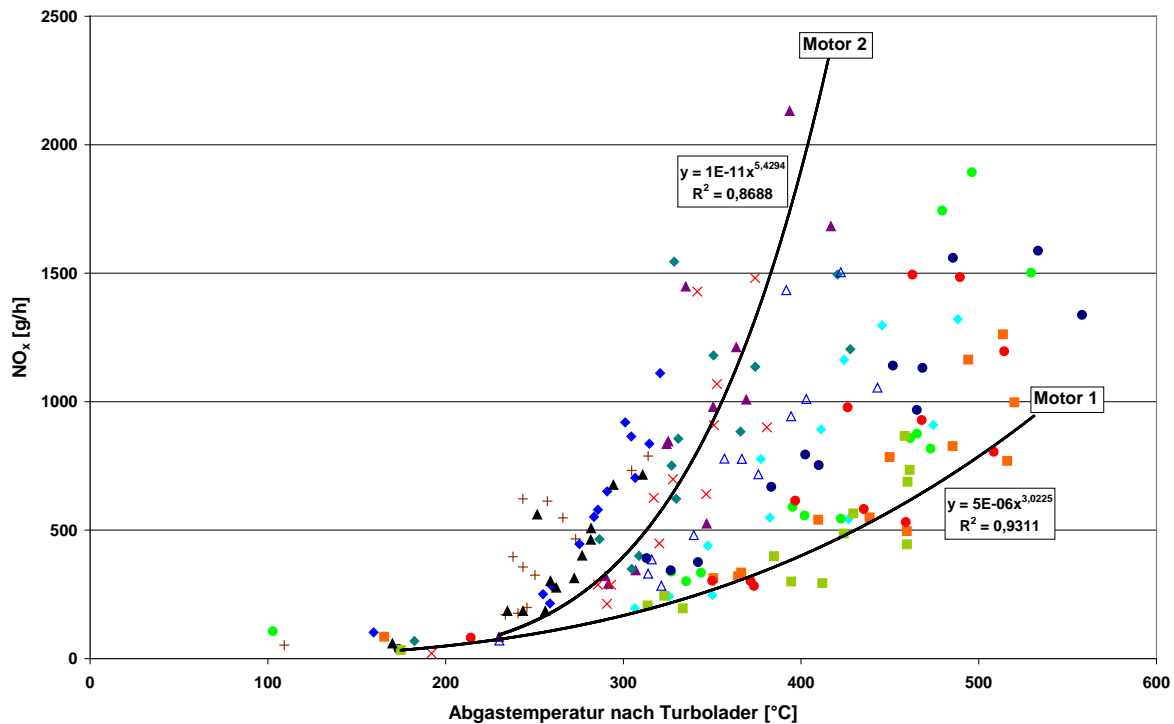
Die Messdaten stammen von Motoren die im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts (ARTEMIS-Projekt) [22] von verschiedenen Institutionen, unter anderem auch der TU-Graz vermessen wurden.

In Abbildung 13 ist die Abhängigkeit der gemessenen Stickoxidemissionen in g/h in den einzelnen ESC-Punkten über der Abgastemperatur nach dem Turbolader für 13 Nutzfahrzeugmotoren die alle die Abgasnorm EURO 3 erfüllen dargestellt.



**Abbildung 13:** Stickoxidemissionen von 13 Nutzfahrzeugmotoren in den einzelnen ESC-Punkten

Die Abhängigkeit der Stickoxidemissionen in den ESC-Punkten von der Abgastemperatur nach Turbolader lässt sich angenähert recht gut mit einem Potenzansatz wiedergeben, wie in Abbildung 14 exemplarisch für zwei das Feld begrenzende Motoren dargestellt. Dabei ergibt sich eine gute Korrelation bei den Emissionen in g/h während dieselbe Untersuchung für die Emissionen in ppm keine allgemeine Korrelation ergab.



**Abbildung 14:** Darstellung der Abhängigkeit Stickoxidemissionen in g/h von der Abgastemperatur

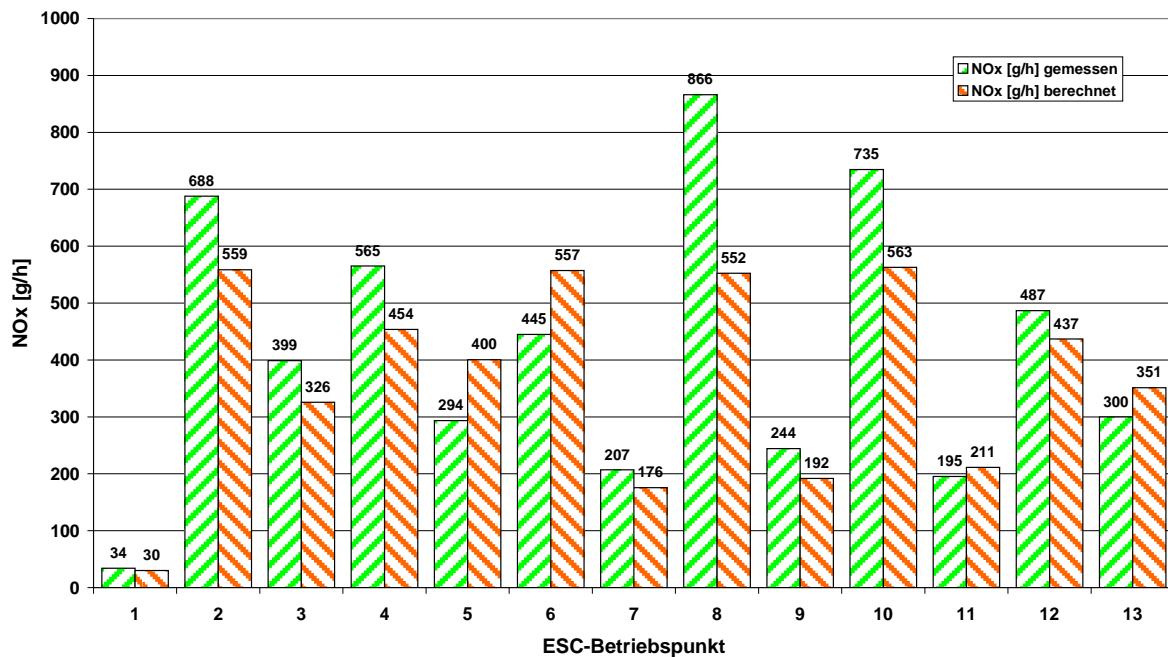
Ausgehend von einem Zusammenhang zwischen Stickoxidemission und Abgastemperatur nach Turbolader in den ESC-Punkten könnte man die eindosierte Harnstoffmenge von der gemessenen Abgastemperatur nach dem Turbolader abhängig machen.

Diese Temperatur lässt sich auch im Fahrzeug relativ einfach messen und in einem Steuergerät weiterverarbeiten. Auf diese Weise könnte auch ein Nachrüstsystem für bestehende Motoren realisiert werden, das zumindest für die Grundzumessung des Harnstoffs die Abgastemperatur als Eingangsgröße verwenden könnte, und damit relativ einfach aufgebaut sein kann.

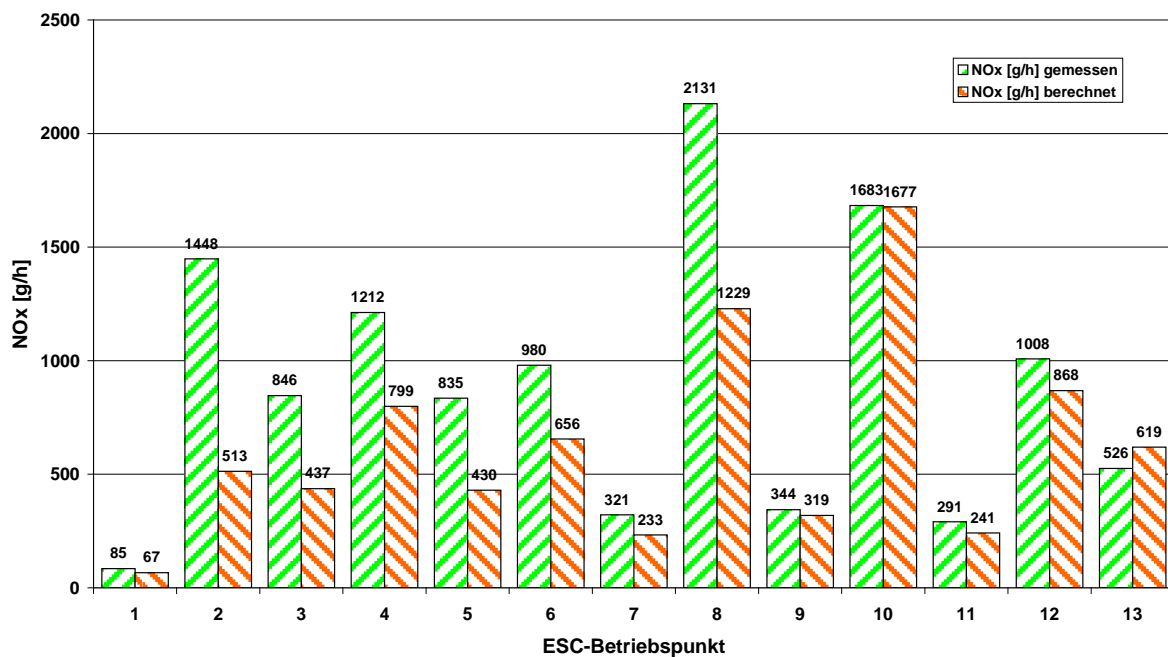
Für ein Nachrüstsystem wäre es günstig, wenn die Anpassung an beliebige Motoren, ohne Messungen am Motor und ohne eine aufwendige Kalibrierung des Systems machbar wäre. Wollte man dabei die Abgastemperatur als Eingangsgröße zur Harnstoffdosierung verwenden, müsste ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Stickoxidemission und Abgastemperatur nach dem Turbolader gefunden werden, der dann beispielsweise in einem Steuergerät implementiert werden könnte. Um die Harnstoffeindosierung über eine solche Beziehung zu realisieren, muss einerseits gewährleistet sein dass es zu keiner Überdosierung und damit zu Ammoniakschlupf kommt, und dass andererseits die Reduktion der Stickoxidwerte vor allem in den ESC-Punkten groß genug ist.

Da, wie Abbildung 14 zeigt, die Streuung der Stickoxidemissionen über der Abgastemperatur für Motoren die alle der gleichen Abgasnorm EURO 3 entsprechen, doch recht hoch ist, muss man, wenn man die Dosierstrategie nach der Abgastemperatur nach Turbolader auslegen will, und nicht jeden Motor gesondert vermessen und applizieren will, Kompromisse eingehen.

Abbildung 15 zeigt dabei den Vergleich berechnete mit gemessenen Stickoxidemissionen in den ESC-Punkten für „Motor 1“.



**Abbildung 15:** Vergleich berechnete und gemessene Emissionen in den ESC-Punkten für „Motor 1“<sup>1</sup>  
Abbildung 16 zeigt denselben Vergleich für „Motor 2“.



**Abbildung 16:** Vergleich berechnete und gemessene Emissionen in den ESC-Punkten für „Motor 2“

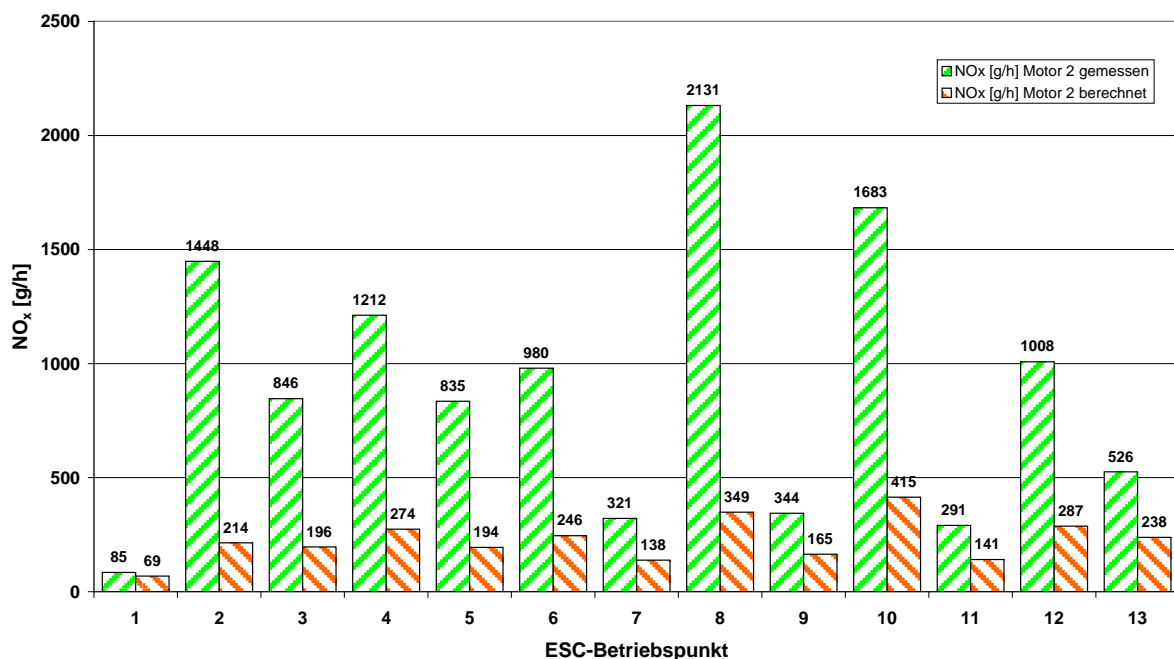
<sup>1</sup> Der Zusammenhang wird hier nur für die ESC-Punkte dargestellt, da im Allgemeinen nur diese für die Typprüfung von Bedeutung sind.

In beiden Fällen wurden die gemessenen Stickoxidemissionen mit den jeweils für „Motor 1“ und „Motor 2“ berechneten Emissionen nach den für beide Motoren ermittelten Potenzgleichungen verglichen. Trotz der guten Regressionskoeffizienten  $R^2$  für die Ansätze ergeben sich naturgemäß in den einzelnen Punkten einige Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Werten. Vor allem bei den höherlastigen Punkten liegen die berechneten Werte meist deutlich hinter den gemessenen zurück. Dies wäre im Fall einer Harnstoffeindosierung nach einer dieser Gleichungen zwar günstig in Hinblick auf den Ammoniakschlupf, würde aber gerade bei den hochlastigen Punkten im ESC zu geringeren Reduktionsraten führen.

Würde man unter Bezugnahme auf die vorliegenden Messwerte die Harnstoffdosier- rate so auslegen, dass möglichst kein Ammoniakschlupf auftritt, und für jeden Motor nach den Stickoxidemissionen für „Motor 1“ dosieren, so würde man für Motoren die am oberen Ende der Stickoxidemissionen, also in Abbildung 14 in der Nähe von „Motor 2“ liegen nur geringe Stickoxidreduktionen erreichen.

Dies illustriert auch Abbildung 17, wo die an „Motor 2“ gemessenen Stickoxidemissionen in g/h mit jenen verglichen werden, die sich ergeben würden, wenn man über die von „Motor 2“ gemessenen Abgastemperaturen in den einzelnen ESC-Punkten die Stickoxidemissionen nach der Beziehung von „Motor 1“ berechnet.

Man erhält in diesem Fall wesentlich zu niedrige Emissionen in allen ESC-Punkten und damit auch zu niedrige daraus berechnete Dosierraten.



**Abbildung 17:** Vergleich der gemessenen und nach Beziehung für „Motor 1“ berechneten Stickoxidemissionen für „Motor 2“

Um also Dosiersysteme im Stationärbetrieb an verschiedenste Motoren mit unterschiedlichen Zusammenhängen zwischen der Stickoxidemission und der Abgastemperatur nach dieser Methode anzupassen, muss entweder eine „mittlere“ Bestimmungsgleichung für die Berechnung der Stickoxidemissionen, die für die meisten Motoren den besten Kompromiss darstellt, gefunden werden, oder es wird jene Dosierrate für jeden Motor individuell eingestellt, die am besten dem Zusammenhang zwischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen und Abgastemperatur des jeweiligen Motors entspricht.

Eine individuelle Anpassung der stationären Harnstoffeindosierung an einzelne Motoren bzw. Fahrzeuge könnte bei Nachrüstlösungen relativ einfach am Rollenprüfstand parametrierbar werden.

## 7 Aufbau des SCR-Systems am Motorprüfstand

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde am transienten Motorprüfstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik ein SCR-System auf AdBlue-Basis bestehend aus Dosiersystem und SCR-Katalysator an einem Nutzfahrzeugmotor aufgebaut und getestet. Der Prüfstand des Instituts dient mit seiner 440 kW Bremsleistung hauptsächlich zur Vermessung von Nutzfahrzeugmotoren und kann auch transient betrieben werden. Die Messungen mit dem SCR-System sollten aber wie schon erwähnt, hauptsächlich stationär erfolgen. Die am Prüfstand integrierte Abgasmessung kann sowohl unverdünnt als auch verdünnt über ein CVS-System erfolgen.

### 7.1 Komponenten des Prüfstandsbaus

Abbildung 18 zeigt ein Schema der Komponenten des Prüfstands. Die einzelnen Komponenten werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

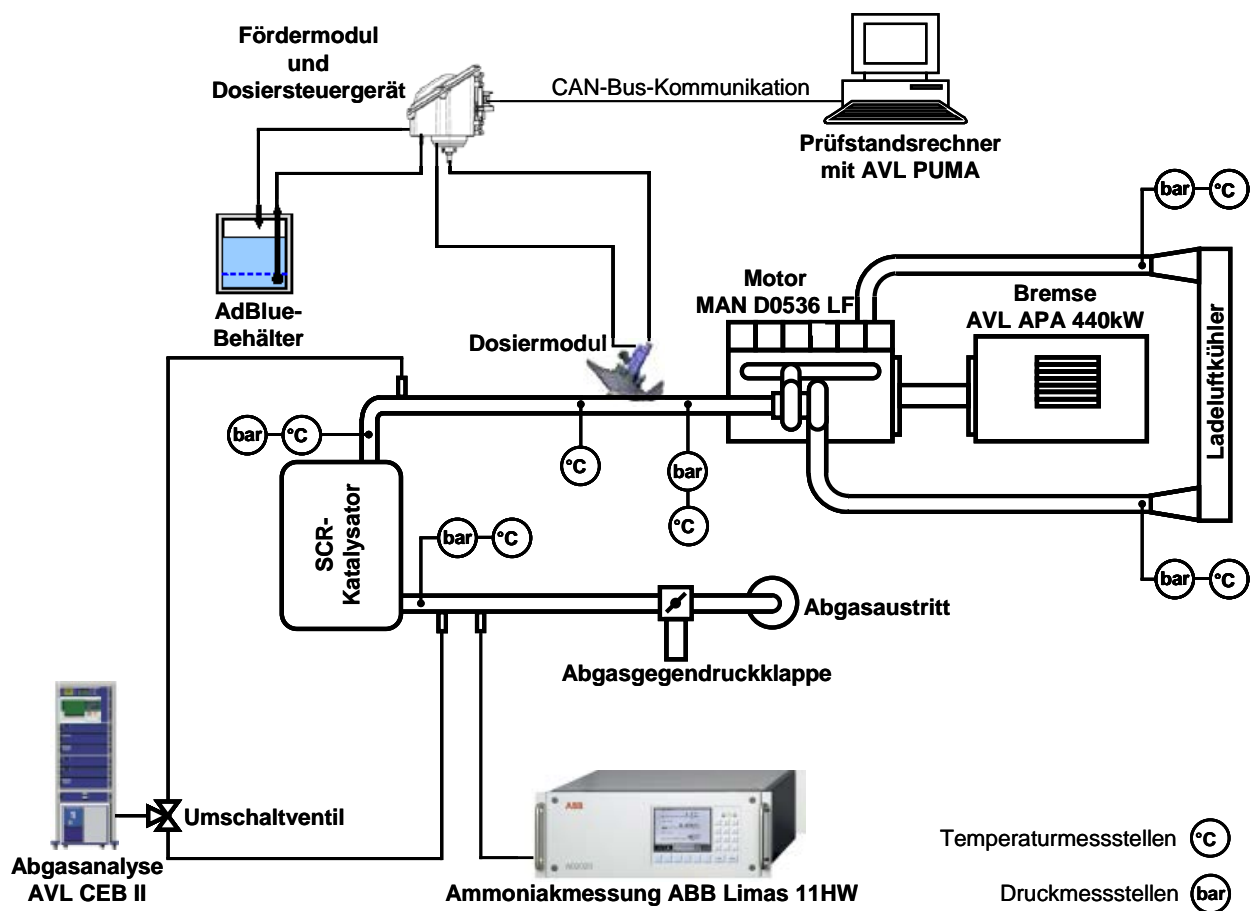


Abbildung 18: Schematische Übersicht über den Motorprüfstandsbaus

### 7.1.1 Motor

Beim Motor handelte es sich um einen direkt einspritzenden 6-Zylinder-Reihenmotor mit Abgasturboaufladung, der mit einer mechanisch gesteuerten Reiheneinspritzpumpe ausgerüstet war. Somit verfügte der Motor über keinerlei Motorelektronik und das SCR-Dosiersystem wurde autark von der Prüfstandssteuerung angesteuert, ohne Informationen über den Motorbetriebszustand von einem Motorsteuergerät zu erhalten. Der Motor selbst war kein Serienmotor sondern ein auf Basis eines EURO 2-Serienmotors vom Hersteller modifizierter Versuchsmotor. Die Änderungen betrafen dabei vor allem die mechanischen Bauteile wie Kolben, Zylinderblock und Kurbelwelle. So wurde der Hub verlängert und die Bohrung im Vergleich zur Basisversion verkleinert. Bezüglich der Abgaswerte des Motors lagen vor unserer Basisvermessung am Prüfstand noch keine Daten vor. Wie sich bei der Basisvermessung herausstellte, überschritten die Stickoxidwerte im ESC den EURO 3-Standard geringfügig, alle anderen Schadstoffwerte blieben darunter.

#### Technische Daten des Motors:

6-Zylinderreihenmotor mit Direkteinspritzung und Abgasturboaufladung	
Bohrung	105mm
Hub	130mm
Hubvolumen	6,754 dm <sup>3</sup>
Verdichtung	17,5
Zylinderkopf	2 Ventile pro Zylinder; Drall 1,65
Nennleistung	185 kW
Maximales Drehmoment	850 Nm
Einspritzsystem	Reiheneinspritzpumpe mit mechanischem Drehzahlregler

**Tabelle 1: Abmessungen und Motorkenngrößen des verwendeten Motors**

### 7.1.2 SCR-Katalysator

Der verwendete SCR-Katalysator besteht aus fünf in einem Edelstahlschalldämfergehäuse parallel angeordneten zylindrischen Katalysatormodulen. Die einzelnen Katalysatormodule haben einen Durchmesser von 5,66 Zoll (=143,8 mm), eine Länge von 230 mm und eine Zelldichte von 300 cpsi. Vom Aufbau her sind die Katalysatormodule Vollextrudate, das bedeutet, dass sie vollkommen homogen aus katalytisch aktivem Material bestehen, im Unterschied zu Trägerkatalysatoren, bei denen eine katalytisch aktive Schicht auf einem chemisch inaktiven Trägermaterial aufgebracht ist. Die katalytisch aktiven keramischen Module setzen sich aus ca. 80% TiO<sub>2</sub>, 8% WO<sub>3</sub> das mit bis zu 3% V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dotiert sein kann und ca. 10% Glasfaser zur Verstärkung der Struktur zusammen.

Eine spezifische Eigenschaft dieser Katalysatorbauart ist seine Fähigkeit zur Zwischenspeicherung von Ammoniak. Diese Ammoniakspeicherfähigkeit bewirkt eine gewisse Trägheit in Bezug auf die Auswirkungen von Reduktionsmittelüber- oder unterdosierungen auf den Ammoniak schlupf und die Stickoxidreduktion. Bei Überdosierung kann zuerst einmal eine gewisse Ammoniakmenge gespeichert werden, ohne dass Ammoniak schlupf auftritt. Bei Unterdosierung kann dieses gespeicherte Ammoniak wiederum freigesetzt werden und mit den Stickoxiden reagieren. Die Ammoniakspeicherfähigkeit weist eine starke Temperaturabhängigkeit auf und ist vor allem



im Transientbetrieb wie er bei Fahrzeugmotoren auftritt, eine wichtige zu beachtende Eigenschaft.

Die Katalysatormodule werden von der Firma CERAM in Frauenthal in einem Extrudierverfahren mit anschließender thermischer Nachbehandlung hergestellt. Auf den letzten 10 mm eines jeden Katalysatorkörpers wird eine Platinschicht aufgebracht, die als Sperrkatalysator zur Oxidation von eventuell durchbrechendem Ammoniak dient. Diese Schicht wird durch Eintauchen des Katalysatorkörpers in eine Platinlösung mit anschließender Trocknung und Reduktion der verwendeten Platinverbindung in elementares Platin hergestellt. Die Sperrkatalysatorschicht soll verhindern, dass bei Überdosierung des Reduktionsmittels bzw. im transienten Fahrbetrieb ein zu hoher Ammoniakslupf durch den Auspuff auftritt. Die fünf Katalysatormodule werden vom Abgas parallel durchströmt. Den Einbau der Module in das Schalldämpfergehäuse und die Fertigung des Schalldämpfers übernimmt die Firma Rot-Technik Austria in St. Aegyd am Neuwalde, Niederösterreich.

Der SCR-Katalysator der betrachteten Bauart wie er am Motorprüfstand eingesetzt wurde, entspricht dem Serienstandard, wie er von einem renommierten Nutzfahrzeughersteller für seine EURO 5-Fahrzeuge in Serie verbaut wird. Dort wird der Katalysator allerdings für Motoren der 12 Liter-Hubraumklasse eingesetzt, während am Motorprüfstand nur ein Motor mit 6,7 Liter Hubraum zur Verfügung stand. Dies hatte aufgrund des großen Speichervolumens in Relation zum Motorhubvolumen einen Einfluss auf das Ansprechverhalten und die zeitlichen Verläufe von Ammoniakslupf und Stickoxidemissionen. Am Motorprüfstand wurde der Katalysator in einer Entfernung von ca. 1,5m von der Reduktionsmitteldosierstelle angeordnet, um dem eingedüsten Harnstoff genügend Zeit für den Ablauf der Vorreaktionen zur Ammoniakbildung und dem Ammoniak zur Vermischung mit dem Abgas bis zum Katalysatoreintritt zu geben. Abbildung 19 zeigt die Anordnung des Katalysators am Motorprüfstand.

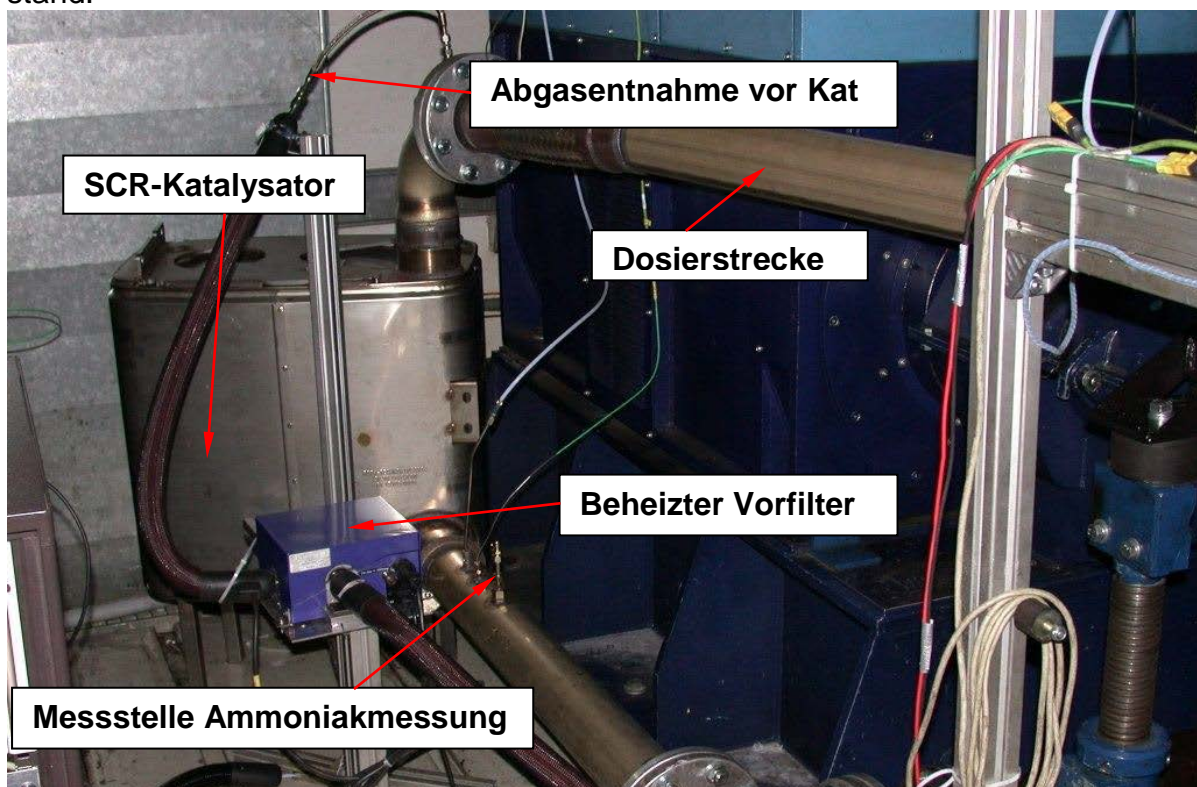
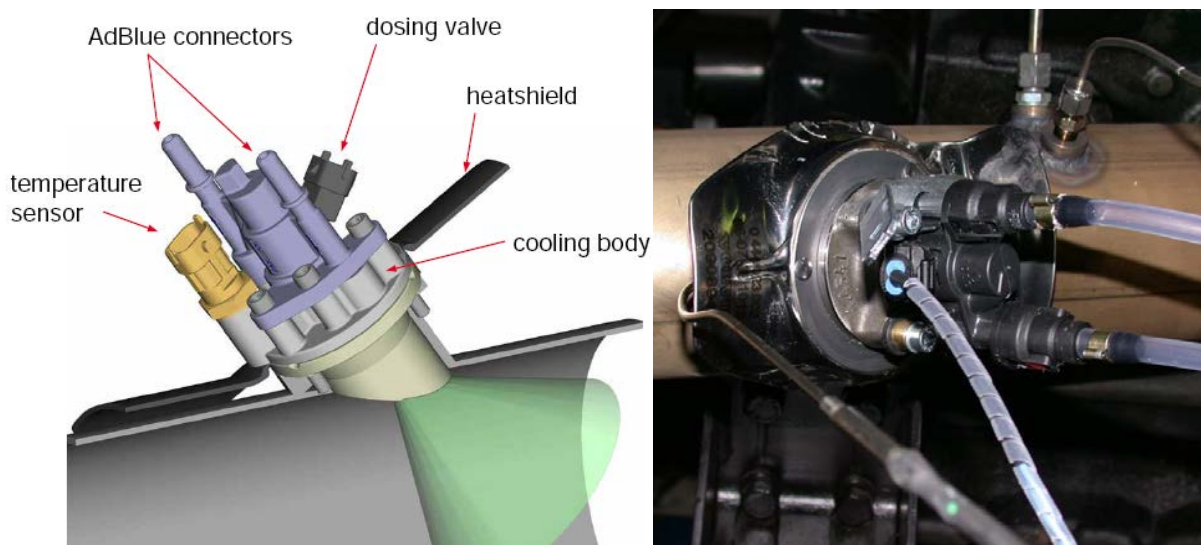


Abbildung 19: SCR-Katalysatoranordnung auf dem Motorprüfstand

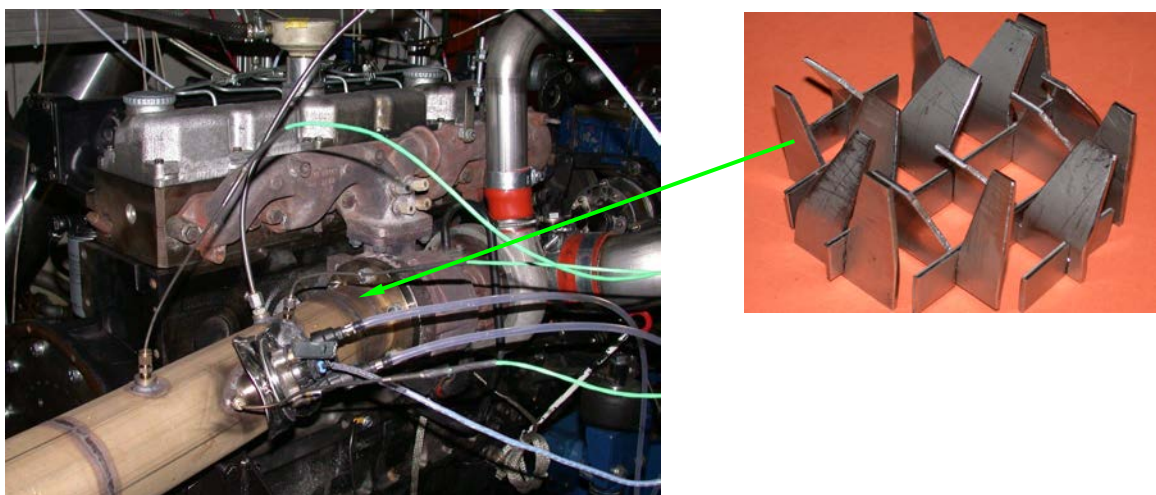
### 7.1.3 SCR-Dosiersystem

Als Dosiersystem wurde ein druckluftloses System nämlich die Denoxtronic 2 von BOSCH verwendet. Eine Gesamtübersicht über das System zeigt Abbildung 5 im Abschnitt 5.1.2.1., dort wird auch auf die prinzipielle Funktionsweise des Systems eingegangen. Dieses System verwendet ein im Dosiermodul angeordnetes getaktetes Magnetventil zur Eindüsung und Mengenzumessung der Harnstofflösung. Zur Anpassung des Systems an verschiedene Hubraumklassen von Motoren existieren zur Zeit 4 verschiedene Typen von Ventilen mit den maximalen Dosiermengen von 3,6,9 oder 12 kg/h Harnstofflösung. In unserem Fall wurde ein Ventil mit einer maximal möglichen Menge von 3 kg/h eingesetzt. Abbildung 13 zeigt die Anordnung des Dosiermoduls am Abgasrohr.

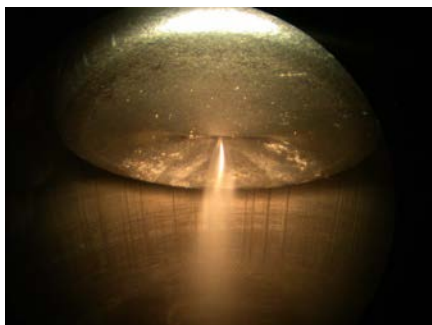


**Abbildung 20:** Dosiermodul; links: Darstellung mit Strahlkegel [19], rechts: Anordnung am Prüfstand

Das Dosiermodul wurde nach dem Turboladerausstritt in einer genau vom Hersteller definierten Winkelage am Abgasrohr angeordnet. Auf Empfehlung der Firma BOSCH wurde vor dem Dosiermodul ein Verwirbler in das Abgasrohr eingebaut, der für eine erhöhte Turbulenz des Abgases an der Eindosierstelle sorgt. Damit soll eine gute Vermischung der Harnstofflösung mit dem Abgas gewährleistet und Ablagerungen im Bereich der Dosierstelle vermieden werden.



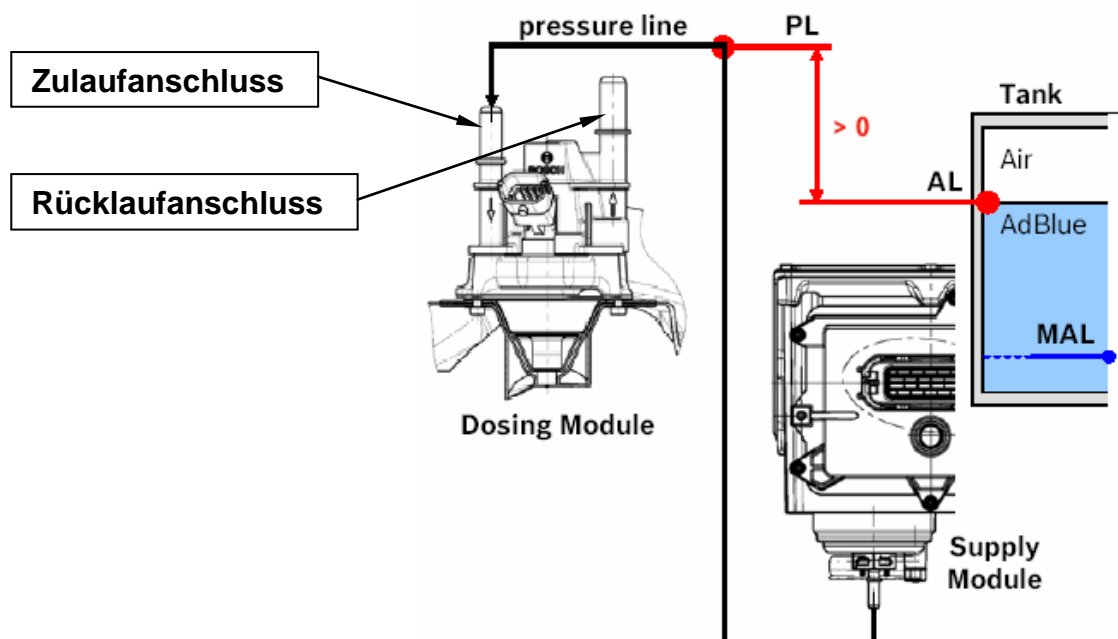
**Abbildung 21:** Anordnung des Dosiermoduls und des Verwirblers am Abgasrohr



Das Dosierventil spritzt die Harnstofflösung an der Eindosierstelle feinerstäubt in das Abgasrohr ein. Der Druck am Dosierventil kann über das Dosiersteuergerät appliziert werden und wird intern im Fördermodul durch eine eigenen Drucksensor überwacht. Für unsere Messungen war der Druck durch die Applikation des Dosiersteuergeräts auf konstante 5 bar eingestellt. Die nebenstehende Aufnahme zeigt den Einspritzstrahl im Inneren des Rohres.

**Abbildung 22:** Aufnahme des AdBlue-Einspritzstrahls

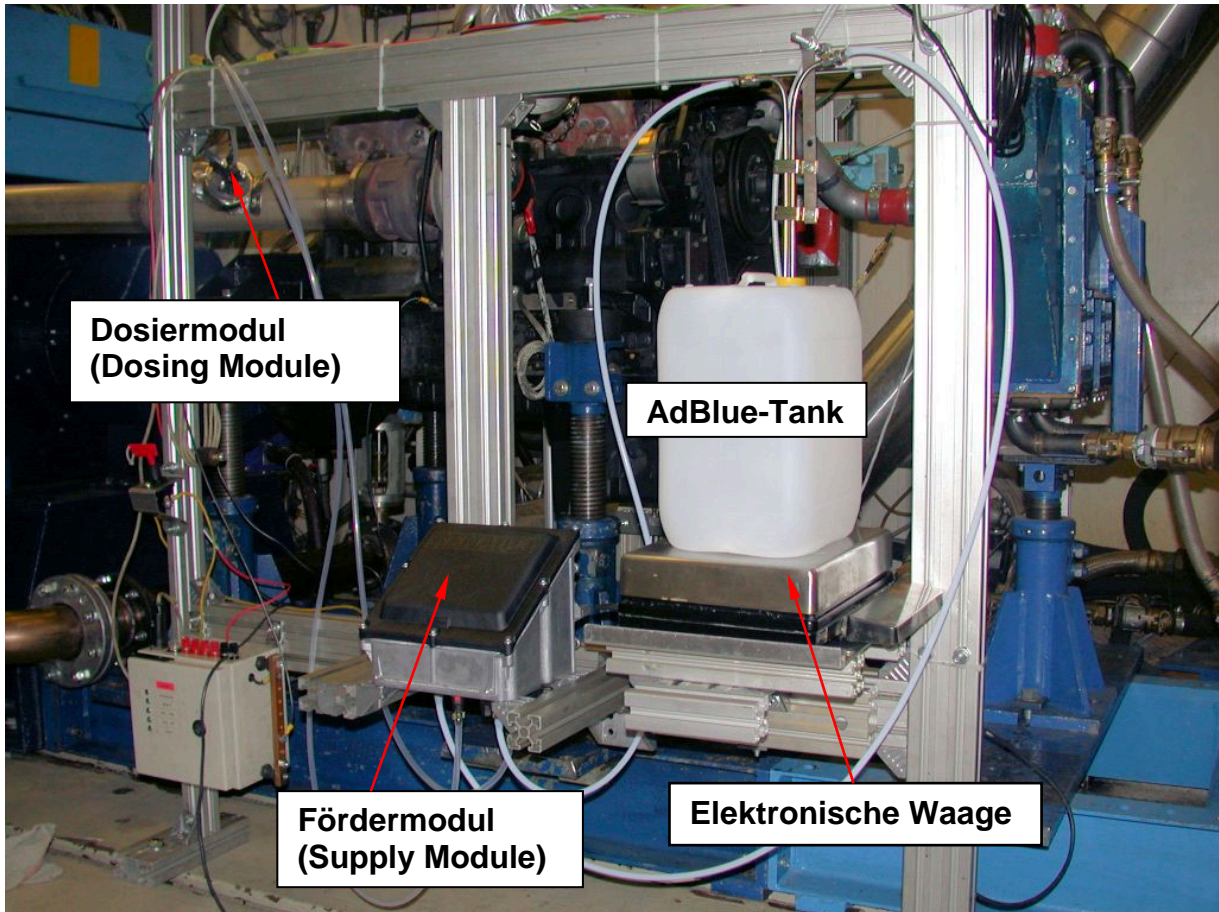
Das Dosiermodul wird vom Fördermodul mit der Harnstoff-Wasserlösung versorgt. Vom Fördermodul wird die Harnstofflösung über eine integrierte Membranpumpe aus dem Vorratsbehälter angesaugt, gefiltert, und über die Zulaufleitung dem Dosiermodul zugeführt. Das Magnetventil im Dosiermodul wird zur Kühlung ständig von der Harnstofflösung umspült. Von der zugeführten Menge an Harnstoff wird nur ein Teil in das Abgasrohr eingedüst, die überwiegende Menge dient zur Kühlung und wird als Rücklaufmenge über die Rückleitung zum Fördermodul zurückgeführt. Von dort geht sie über ein Magnetventil zur Kühlungssteuerung wieder in den Vorratsbehälter zurück. Ein Teil der Harnstoff-Wasserlösung wird somit im Kreislauf geführt und damit wieder rückgekühlt. Die maximale Temperatur der Harnstofflösung sollte dabei 70°C nicht überschreiten. Nach dem Abschalten des Systems (Ausschalten der Zündung) werden über die Umschaltung eines im Fördermodul eingebauten 4/2-Wegeventils das Dosiermodul und die Versorgungsleitungen leergesaugt und die Harnstofflösung wieder in den Vorratsbehälter zurückgeführt. Dies dient im Fahrzeug als Einfrierenschutz, hat aber am Prüfstand keinerlei Funktion. Als Harnstoffversorgungsleitungen wurden aus Gründen der chemischen Beständigkeit Teflonleitungen, als AdBlue-Behälter ein 10-Liter HDPE-Kanister verwendet. Das Material der Saug- und Rücklaufrohrleitung in den Behälter war aus Korrosionsgründen rostfreier Edelstahl.



**Abbildung 23:** Schematische Darstellung der Anordnung von Fördermodul, Dosiermodul und AdBlue-Vorratsbehälter [19]



Auf dem Prüfstand wurde das Fördermodul mit der Pumpe so angeordnet, dass sowohl die maximale Saughöhe als auch der maximale Zulaufdruck für die Pumpe nicht überschritten wird. Zur Kontrolle der eingedüsten Harnstoffmenge während der Messungen wurde zusätzlich der Inhalt des AdBlue-Behälters kontinuierlich mit einer genau anzeigenden Waage gewogen. Abbildung 24 zeigt die Anordnung der Bauteile auf dem Prüfstand.



**Abbildung 24:** Anordnung von Fördermodul, Dosiermodul und AdBlue-Vorratsbehälter auf dem Prüfstand

### **Dosiersteuergerät und elektrische Komponenten des Dosiersystems:**

Im Fördermodul ist das Dosiersteuergerät untergebracht, das sowohl die gesamte Steuerung der Förderung und Versorgung des Dosiermoduls mit Harnstofflösung als auch die Vorgabe der ins Abgassystem eindosierten Harnstoffmenge übernimmt. Das Steuergerät wird mit 24V Gleichspannung versorgt, und steuert seinerseits über integrierte Leistungsendstufen die Aktuatoren des Systems wie Dosierventil, Kühlungssteuerventil, 4/2-Wegeventil und den Elektromotor der Harnstoffförderpumpe an. Im Steuergerät ist ein Mikrocontroller mit dazugehörigem Speicher und einem AD-Wandler integriert, so dass über eine entsprechende Softwarestruktur unter Einbindung von extern applizierbaren Kennfeldern und Kennlinien eine Dosierstrategie realisiert werden kann. Entsprechende Eingangssignale würde das Steuergerät dazu von Sensoren sowohl innerhalb des Fördermoduls als auch extern vom Abgassystem bzw. über eine CAN-Busverbindung zum Motorsteuergerät erhalten. Die damit errechnete Dosiermenge wäre somit das Resultat einer Grunddosiermenge, etwa erhalten aus einem motorspezifischem Stickoxidkennfeld, und einer Reihe von Korrekturfaktoren, die sich über Erfassung des aktuellen Motor- bzw. Katalysatorzustands, ergeben würde.

Für die geplanten Grundsatzuntersuchungen am Prüfstand sollte aber die Vorgabe einer Harnstoffdosiermenge möglichst direkt und ohne Korrektur durch die Steuergerätesoftware an das Dosierventil weitergegeben werden. Weiters wurde am Prüfstand ein Motor mit rein mechanischer Dieseleinspritzanlage ohne Motorelektronik verwendet, und somit war keine Kommunikation mit einem Motorsteuergerät möglich bzw. nötig. Die CAN-Busverbindung des Dosiersteuergeräts wurde aus diesem Grund über eine Busleitung und eine im Prüfstandsrechner eingebaute CAN-Schnittstellenkarte mit der Prüfstandssteuerung verbunden.

Das Dosiersteuergerät wurde von BOSCH so appliziert, dass eine über den CAN-Bus vorgegebene Dosiermenge direkt als entsprechendes Tastverhältnis an das Dosierventil weitergegeben wird, ohne intern noch über Softwarefunktionen korrigiert zu werden. In weiterer Folge mussten auch noch die Schnittstellen der am Prüfstand nicht vorhandenen Sensorsignale wie zum Beispiel für die Katalysatortemperatur und den AdBlue-Pegel im Vorratsbehälter steuergeräteintern deaktiviert werden. Dies geschah ebenfalls durch Anpassung der Steuergeräteapplikation bei BOSCH. Der bei einer Fahrzeugapplikation des Systems vorhandene AdBlue-Tanktemperatursensor zur Heizungssteuerung wurde von uns am Prüfstand durch ein Potentiometer ersetzt, das dem Steuergerät einen fiktiven Wert von 27°C AdBlue-Temperatur vorgibt.

Die Datenübertragung zwischen Prüfstandsrechner und Dosiersteuergerät erfolgte mit 250 kBit/s, als Übertragungsprotokoll wurde CAN 2.0B („extended CAN“) verwendet. Die zur CAN-Kommunikation benötigten Botschaften mit ihren spezifischen Datenformaten wurden uns von BOSCH zur Verfügung gestellt. So werden z.B. über die CAN-Schnittstelle Werte, die sonst vom Motorsteuergerät oder von Sensoren kommen würden über das Prüfstandssteuerungssystem fix vorgegeben und zyklisch zum Dosiersteuergerät gesendet. Mit diesen Informationen konnte dann über die Parametrierung einer Konfigurationsdatei der Prüfstandssteuerungssoftware PUMA, die Schnittstelle so eingerichtet werden, dass über die Bedienoberfläche des Prüfstandsrechners die Harnstoffdosiermenge in kg/h direkt vorgegeben werden konnte.

### 7.1.4 Bremse

Als Leistungsbremse war eine Asynchronpendelmaschine APA 404/4,2 Px der Firma AVL am Motorprüfstand im Einsatz.

Daten der Bremse:

Asynchronpendelmaschine mit Kurzschlussläufer, geeignet für 4-Quadrantenbetrieb	
maximale Bremsleistung	440 kW
maximale Schleppleistung	400 kW
maximales Drehmoment	2800 Nm
maximale Drehzahl	4200 min <sup>-1</sup>
Drehmomentmessung	über Biegebalken
Prüfstandsregelung	AVL EMCON 300

**Tabelle 2:** Technische Daten der Leistungsbremse

Die Ansteuerung der Prüfstandsregelung und die Bedienung des Prüfstands erfolgt über die Steuersoftware PUMA 5 der Firma AVL.

### 7.1.5 Standardmesstechnik am Prüfstand

Neben der Erfassung des Motordrehmoments über die Pendelmaschine wurden noch folgende Messgrößen standardmäßig am Prüfstand erfasst:

Messgröße:	Sensortyp bzw. Messgerät:
Kraftstofftemperatur in Vor- und Rücklauf	Widerstandstemperaturfühler Pt 100
Kühlwassertemperatur in Vor- und Rücklauf	Widerstandstemperaturfühler Pt 100
Öltemperatur	Widerstandstemperaturfühler Pt 100
Öldruck	Piezoresistiver Drucksensor
Kraftstoffverbrauch	Kraftstoffwaage AVL 733S
Motordrehzahl	AVL CDM optischer Kurbelwinkelgeber

**Tabelle 3:** Sensoren der Standardmesstechnik am Prüfstand

Im Luftpfad und im Abgasstrang wurden folgende Messgrößen gemessen:

#### Luftpfad:

Messgröße:	Sensortyp:
Temperatur vor Turbolader	Widerstandstemperaturfühler Pt 100
Temperatur vor Ladeluftkühler	Widerstandstemperaturfühler Pt 100
Temperatur nach Ladeluftkühler	Widerstandstemperaturfühler Pt 100
Druck vor Ladeluftkühler	Piezoresistiver Drucksensor
Druck nach Ladeluftkühler	Piezoresistiver Drucksensor
Luftmassenstrom	Degussa Sensyflow 1400 kg/h
Luftfeuchtigkeit	Luftfeuchtigkeitssensor VAISALA

**Tabelle 4:** Sensoren im Luftpfad des Motors

**Abgasstrang:**

Messgröße:	Sensortyp:
Temperatur nach Turbolader	Thermoelement Typ K
Temperatur nach Eindosierstelle	Thermoelement Typ K
Temperatur vor SCR-Katalysator	Thermoelement Typ K
Temperatur nach SCR-Katalysator	Thermoelement Typ K
Druck nach Turbolader	Piezoresistiver Drucksensor
Druck vor SCR-Katalysator	Piezoresistiver Drucksensor
Druck nach SCR-Katalysator	Piezoresistiver Drucksensor

**Tabelle 5:** Sensoren im Abgasstrang des Motors

Eine Übersicht über die Temperatur- und Druckmessstellen im Luft- und Abgaspfad zeigt auch Abbildung 18.

Die Erfassung der Messsignale erfolgte über ein eigenes Messverstärkersystem der Firma AVL, die so genannten „Front End Module“ (FEM). Diese sind von der Konfiguration her auf die jeweiligen Sensortypen eingestellt, und es brauchen nur mehr die entsprechenden Sensoren mit standardisierten Kabeln angeschlossen und in der Steuersoftware PUMA parametrieren werden.

**7.1.6 Abgasmessung****7.1.6.1 Messung der limitierten Abgaskomponenten aus der Verbrennung**

Die Messung der limitierten Abgasbestandteile erfolgte mit dem Abgasmeßsystem CEB II der AVL. Die Motorabgase werden dabei unverdünnt über einen beheizten Vorfilter und eine beheizte Leitung dem Abgassystem entnommen und der Analyseeinheit zugeführt. Innerhalb der Analyseeinheit wird das entnommen Abgas dann auf die einzelnen Analysatoren aufgeteilt, die den jeweiligen Abgasbestandteil detektieren und dessen Konzentration im Abgas bestimmen. Das Meßsystem ist über eine Schnittstelle mit dem Prüfstandsrechner verbunden, so dass die einzelnen Abgaskonzentrationen zeitaufgelöst aufgezeichnet werden können. Ebenso können die Funktionen der CEB II vom Prüfstandsrechner aus fernbedient werden.

Beim Prüfstands Aufbau für das SCR-System wurde sowohl eine Abgasentnahmestelle vor als auch hinter dem SCR-Katalysator angeordnet. Dadurch konnte durch Umschalten eines Magnetventils in der CEB II sowohl das Motorrohgas als auch das Abgas nach Katalysatoraustritt vermessen werden. Die Umschaltung zwischen den Messstellen kann über die Bedienoberfläche der Prüfstandssteuerung erfolgen.

Gemessene Abgasbestandteile, verwendete Messverfahren und Analysatoren:

Sauerstoff O <sub>2</sub>	Paramagnetischer Detektor (PMD)
Kohlenmonoxid, Kohlendioxid CO, CO <sub>2</sub>	Nichtdispersiver IR-Absorptionsanalysator (NDIR)
Kohlenwasserstoffe HC	Flammen-Ionisationsdetektor (FID)
Stickoxide NO, NO <sub>2</sub>	Chemilumineszenz-Detektor (CLD)

**Tabelle 6:** Übersicht über die am Prüfstand verwendeten Abgasmessverfahren

### 7.1.6.2 Ammoniakmessung

Beim Betrieb von SCR-Katalysatorsystemen an Dieselmotoren kann es immer wieder vorkommen, dass es aufgrund der Betriebsbedingungen z.B., infolge einer Harnstoffüberdosierung, zu Ammoniakschlupf kommt. Deshalb ist es erforderlich die Ammoniakkonzentration im Abgas zu messen. Die Ammoniakmessung gehört bis dato jedoch nicht zu den Standardmeßmethoden in der Abgasanalyse am Motorprüfstand<sup>1</sup>.

Ein kompaktes System zur  $\text{NH}_3$ -Messung wurde in unserem Fall in einem UV-Photometer der Firma ABB gefunden, dem Limas 11HW [18]. Es wird von der Firma ABB eigens für die Abgasmessung auf Prüfständen für Verbrennungsmotoren mit SCR-Katalysatorsystemen angeboten. Der Zusatz „HW“ im Namen bedeutet dabei „hot/wet“ und bezeichnet die beheizte Entnahme von feuchtem Motorabgas. Der Analysator arbeitet in einem UV-Strahlungsbereich zwischen 205 und 650 nm Wellenlänge und erfasst gleichzeitig die drei Stickstoffkomponenten  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{NH}_3$ . Das Messprinzip des Geräts ist die UV-Resonanzabsorption (UV-RAS) für  $\text{NO}$ , die Abgasbestandteile  $\text{NO}_2$  und  $\text{NH}_3$  werden über Wellenlängenvergleich ermittelt.

Die UV-Strahlung wird in einer elektrodenlosen Entladungslampe erzeugt und durchläuft eine auf  $80^\circ\text{C}$  beheizte vom Messgas durchströmte Meßküvette. Die Konzentration der einzelnen Gaskomponenten wird durch Messung der Intensität der auf den Messdetektor auftreffenden Strahlung ermittelt. Zum Abgleich der Intensitätsschwankungen der Strahlungsquelle wird ein Teil der Strahlung der Quelle vor der Meßküvette über einen Strahlteiler einem Referenzdetektor zugeführt. Die Kalibrierung erfolgt über eine im Analysator eingebaute Kalibrierküvetten die mit dem jeweiligen Messgas oder einem Ersatzgas gefüllt sind, und beim Kalibriervorgang in den Strahlengang eingeschwenkt werden. Man benötigt daher für die Kalibrierung des Analysators keine Prüfgasflaschen mehr. Die Kalibrierung kann sowohl manuell ausgelöst werden, als auch automatisiert ablaufen.

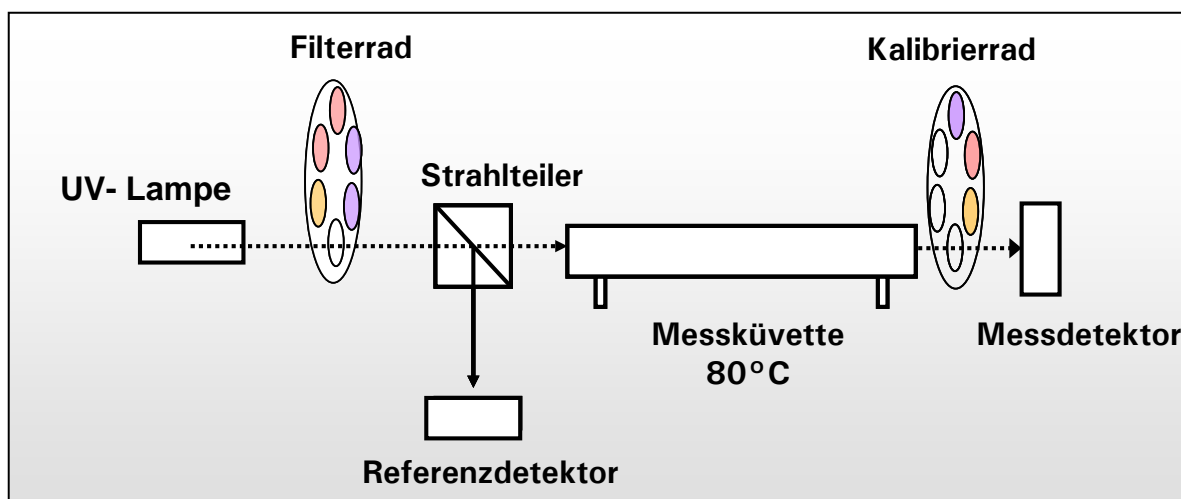
---

<sup>1</sup> Die bekannten Methoden der Ammoniakmessung sind vielfältig und reichen von nasschemischen Methoden über die Fourier-Transformations-Spektroskopie (FTIR) und Massenspektroskopie bis zur Laserdiodenspektroskopie. Diese Methoden ermöglichen aber z.B. keine zeitaufgelöste Messung wie im ersten Fall, oder sind aufwendig und teuer bzw. wartungsintensiv, wie in den letzteren Fällen. Die Methoden der Massenspektroskopie und der Fourier-Transformations-Spektroskopie ermöglichen zwar eine zeitaufgelöste Erfassung aller möglichen Abgasbestandteile neben dem Ammoniak, sind aber für Anwendungen wo es speziell auf die Ammoniakmessung ankommt, sehr teuer und aufwendig. Natürlich hat man bei diesen beiden Methoden die Möglichkeit Produkte von Nebenreaktionen die beim SCR-Prozeß auftreten, wie  $\text{HNCO}$  (Isocyanensäure) und  $\text{N}_2\text{O}$  (Lachgas) ebenso zu detektieren, und dadurch den Ablauf des Prozesses genauer zu untersuchen. Aber bei den handelsüblichen Geräten dieser Art ist die Auswertung der Ergebnisse meist sehr aufwendig. Erst in letzter Zeit hat die Firma AVL ein FTIR-System auf den Markt gebracht das eine einfache Bedienung und Auswertung verspricht.

Die Laserdiodenspektroskopie ist wiederum relativ aufwendig im Aufbau, man benötigt eine freie Absorptionsstrecke für den Laserstrahl von ungefähr einem Meter, die mit zwei  $90^\circ$ -Bögen zur Aufnahme der Messköpfe in den Abgasstrang integriert werden muss. Durch den räumlich sehr begrenzten Bau- raum ist ein solches System am Motorprüfstand nur schwer zu realisieren.



Die Abbildung 25 zeigt das Messprinzip des Limas 11HW:



**Abbildung 25:** Messprinzip des Limas 11HW [20]

Messbereiche des Analysators:

Messkomponente:	Messbereiche (umschaltbar):
Stickstoffmonoxid NO	0-100 ppm / 0-1000 ppm
Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub>	0-100 ppm / 0-500 ppm
Ammoniak NH <sub>3</sub>	0-100 ppm / 0-500 ppm

**Tabelle 7:** Messbereiche des Analysators Limas 11HW

Bei der Ammoniakmessung muss der Messgasaufbereitung eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet werden. Ammoniak ist besonders gut in Wasser löslich, deshalb darf während der gesamten Probenahme der Abgastaupunkt nicht unterschritten werden. Dies wird durch die Beheizung aller mit dem Abgas in Berührung kommenden Teile auf eine Temperatur von 150°-190°C sichergestellt. Die Probeentnahme erfolgt über eine Entnahmesonde und einen beheizten Vorfilter nach dem SCR-Katalysator, und führt über eine beheizte Leitung zu einer vor dem Analysator angeordneten Druckpumpe. Die ebenfalls beheizte Druckpumpe soll am Analysatoreingang einen konstanten Druck und Durchfluss auch bei variierenden Druckverhältnissen an der Probenentnahmestelle sicherstellen. Da diese Pumpe einen für den Analysator zu hohen Durchfluss aufweist, wird über einen Bypass ein Teil des Abgasstroms am Analysator vorbeigeleitet. Der Volumenstrom über diesen Bypass ist über ein Nadelventil einstellbar. Ammoniak ist aufgrund der geringen Größe seines Moleküls ein relativ rasch diffundierendes Gas, weshalb danach getrachtet werden sollte, möglichst kurze Gaswege zwischen der Entnahmestelle und dem Analysator zu haben, um Diffusionseffekte zu minimieren. In unserem Fall wurde dies dadurch erreicht, dass wir den Analysator nahe der Entnahmestelle im Prüfstandsraum aufgestellt und mit einer ca. zwei Meter langen Leitung zur Entnahmestelle versehen haben. Die Anordnung einer noch kürzeren Entnahmeleitung war aufgrund der räumlichen Verhältnisse am Motorprüfstand nicht möglich. Die Ammoniakmessung im Analysator ist querempfindlich gegenüber NO und NO<sub>2</sub> im Abgas. Da diese beiden Komponenten vom Analysator simultan mit dem NH<sub>3</sub> mitgemessen werden, erfolgt eine Querempfindlichkeitskorrektur des NH<sub>3</sub>-Rohwerts bereits intern im Analysator. Eine gewisse Querempfindlichkeit des NH<sub>3</sub>-Werts besteht auch gegenüber Wasser-

dampf. Der Einfluss der mittleren Wasserdampfkonzentration wird ebenfalls analysatorintern über einen abgespeicherten Festwert korrigiert.

Der Analysator wird zusammen mit einer Anzeige- und Bedieneinheit in einem 19-Zoll-Gehäuse ausgeliefert und wurde von uns als eine autarke Messeinheit zur Ammoniakmessung in einem eigenen Gehäuse zusammen mit der Druckpumpe, der Bypassregelung und der Heizungsregelung aufgebaut.

Die Erfassung der Messwerte erfolgte auf dem Prüfstand über einen Analogausgang des Analysators. Dabei wurde eine der Ammoniakkonzentration proportionale Spannung über einen Analogeingang vom Prüfstandssteuerungssystem PUMA erfasst und weiterverarbeitet. Auf eine Erfassung der NO und NO<sub>2</sub>-Werte über das System Limas 11HW wurde verzichtet, da diese bereits über den prüfstandseigenen Chemilumineszenz-Detektor der CEB II gemessen wurden. Eine weitere Möglichkeit der Datenerfassung mit dem Analysator Limas 11HW besteht über eine Einbindung in ein Netzwerk über eine eingebaute Ethernetschnittstelle.

Untenstehendes Bild zeigt den Aufbau des Meßsystems:

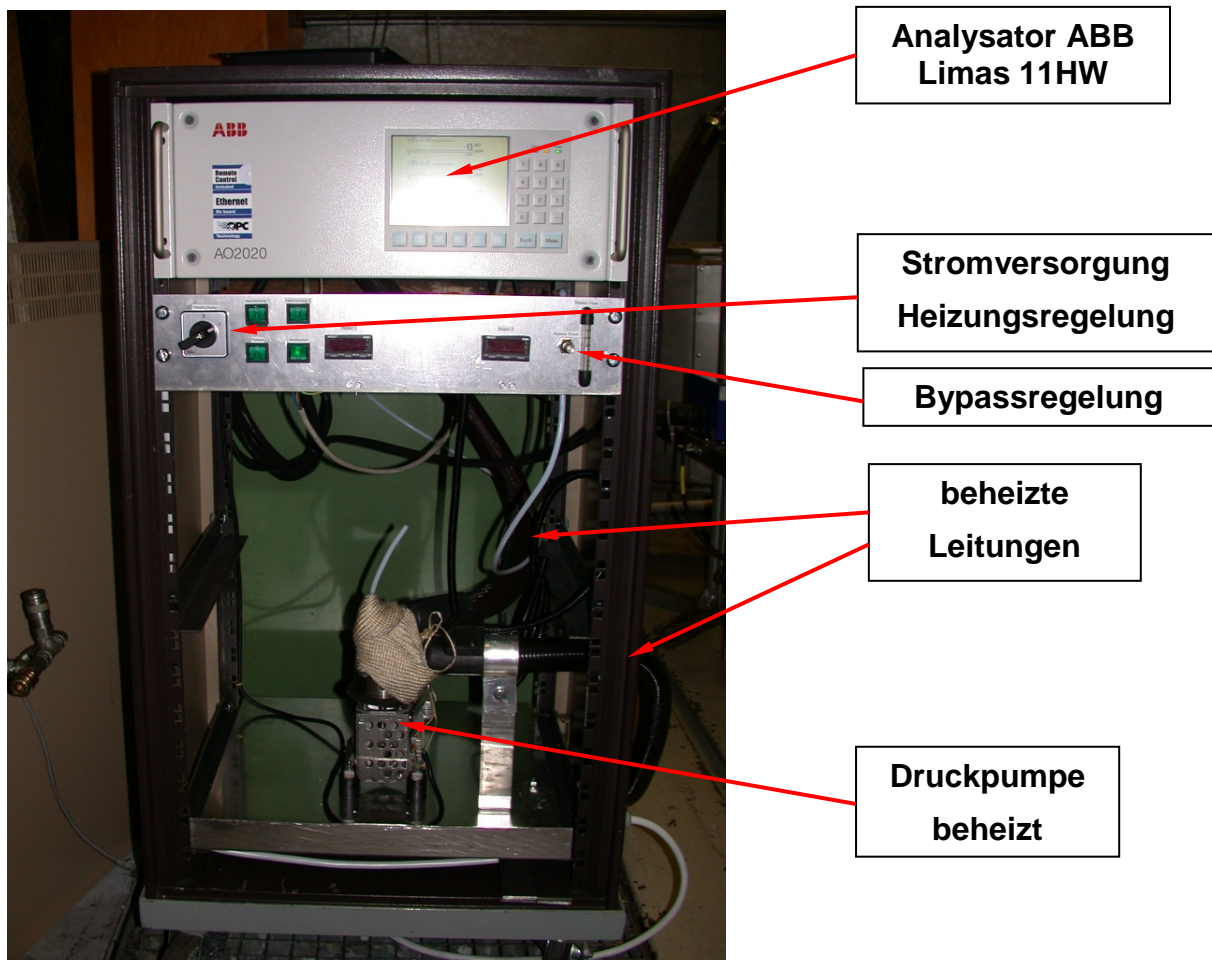


Abbildung 26: Messeinheit zur Ammoniakmessung

### **Probleme bei der Inbetriebnahme des Analysators:**

Nicht unerwähnt bleiben soll, dass es nach der Erstinbetriebnahme des Analysators am Motorprüfstand zu nicht unerheblichen Problemen bei der Ammoniakmessung gekommen ist. Im Zuge der ersten Probemessungen wurde mit und ohne Harnstoffeindosierung ein unplausibel hoher Ammoniakwert angezeigt. Anfängliche Mutmaßungen betrafen den Wasserdampfgehalt im Abgas und die damit verbundene Querempfindlichkeit oder eine Verschmutzung der Meßküvette. Eine Demontage und gründliche Säuberung der Meßküvette brachte jedoch keine Verbesserung. Der Wasserdampfgehalt im Dieselabgas ist wiederum so gering, dass es im Allgemeinen nicht zu einer negativen Beeinflussung des Ammoniak-Messwertes kommen sollte. Auch eine Rücksprache mit ABB brachte zunächst keine Lösung des Problems. Erst eine Vorkonditionierung des Analysators über einen Zeitraum von zwölf Stunden vor einer Messung führte zu plausiblen Ergebnissen. Eine Vergleichsmessung mit einem anderen System soll im April 2007 erfolgen.

## **8 Messungen auf dem Motorprüfstand**

### **8.1 Überblick über die Messungen auf dem Motorprüfstand**

#### **Allgemeines**

Ziel der Messungen mit dem SCR-System auf dem Motorprüfstand war es in erster Linie, Messdaten über das stationäre Betriebsverhalten des SCR-Katalysators zu erhalten und zu bewerten. Dazu wurde der Katalysator in verschiedenen Motorbetriebspunkten stationär betrieben und bei variierten Harnstoffeindosierungsraten die Stickoxidreduktion und der Ammoniakschlupf gemessen. Grundlage für die Wahl der stationären Motorbetriebspunkte stellte jeweils der ESC (European Steady-State Cycle) als der in Europa gesetzlich vorgeschriebene Typprüfzyklus für schwere Nutzfahrzeugmotoren dar. Zur Erweiterung des Motorkennfelds wurden noch zusätzliche Punkte vermessen, die aus dem so genannten ARTEMIS-Zyklus resultieren. [22] Ein weiteres Ziel war es auch, Erfahrungen über das zeitliche Konvertierungsverhalten und die Ammoniak-speicherfähigkeit des Katalysators im Hinblick auf einen zukünftigen Transientbetrieb des SCR-Systems zu gewinnen.

#### **Folgende Messungen wurden durchgeführt<sup>1</sup>:**

- Basisvermessung der Schadstoffe am Motor ohne Harnstoffeindosierung
- Vermessung des Motors bei unterschiedlichen Harnstoffdosierungsraten mit  $\alpha=0,6$ ;  $\alpha=0,9$  und  $\alpha=1,2$
- Untersuchung der Stickoxidreduktion und des Ammoniakschlupfes in 4 stationären Betriebspunkten mit variiertem Harnstoffeindosierung von  $\alpha=0,24$  bis  $\alpha=1,8$
- Vermessung des zeitlichen Verhaltens der Stickoxid- und Ammoniakemissionen in den 4 stationären Betriebspunkten
- Vermessung von vier zusätzlichen Motorbetriebspunkten bei Überdosierung mit  $\alpha=1,34$ ;  $\alpha=1,6$  und  $\alpha=1,8$  bei einer konstanten Abgastemperatur von 330°C

---

<sup>1</sup> Bei den Messungen wurde für den  $\alpha$ -Wert um rund 20% zuwenig berechnet, dies wurde in der Diplomarbeit durch Neuberechnung des Feedverhältnisses  $\alpha$  korrigiert.

## 8.2 Basisvermessung der Schadstoffe am Motor ohne Harnstoffeindosierung

Da die Abgaswerte des für die Messungen verwendeten Motors vorerst noch unbekannt waren, musste zuerst eine Basisvermessung der Rohabgase des Motors vorgenommen werden. Der Motor wurde dabei mit aufgebautem SCR-Katalysator betrieben und die Abgase nach dem Katalysator ohne Harnstoffeindosierung gemessen. Die Abgasmessung erfolgte im Wesentlichen nach dem ESC-Zyklus der auch für die gesetzliche Typprüfung solcher Motoren vorgesehen ist. Um eine Darstellung der Messwerte im gesamten Kennfeld zu erhalten, wurden die Messungen noch auf die sogenannten ARTEMIS-Punkte [22] ausgedehnt. In der Abbildung 27 wird der vermessene Kennfeldbereich dargestellt.

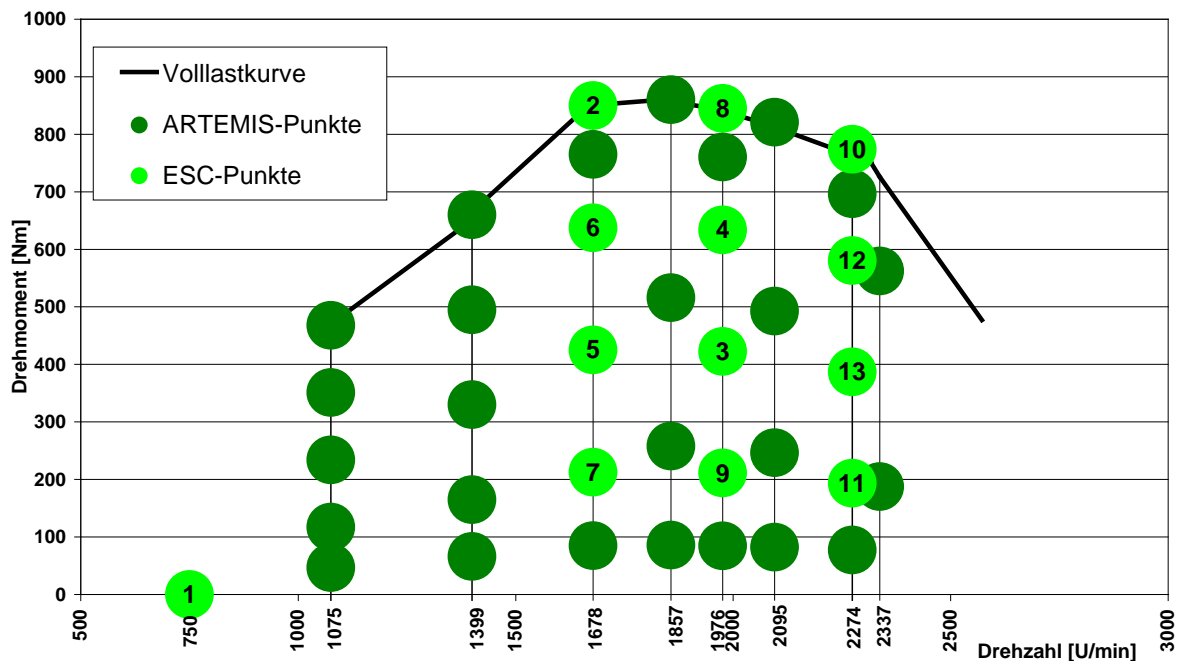


Abbildung 27: Motorkennfeld mit der Darstellung der gemessenen Betriebspunkte

### ESC:

Die ESC-Lastpunkte werden aus der Volllastkurve des Motors ermittelt. Der Test besteht aus einer Abfolge von 13 stationären Betriebspunkten in denen die gasförmigen Emissionen und die Partikelemissionen gemessen werden. Die gemessenen Emissionen in den einzelnen Punkten werden über Faktoren gewichtet, ebenso die Leistung. Das Testergebnis in g/kWh für den jeweiligen Schadstoff ergibt sich aus der Summe der gewichteten Emissionen dividiert durch die Summe der gewichteten Leistung. Die Abfolge der gemessenen Punkte entspricht der Darstellung in Abbildung 27. Die einzelnen Punkte werden verschieden lange gehalten, und zwar der Leerlaufpunkt 4 Minuten lang und alle anderen Punkte jeweils 2 Minuten lang. Die Vorkonditionierung des Motors für den Test erfolgt bei Volllast.

### ARTEMIS:

Die ARTEMIS-Lastpunkte [22] werden auf ähnliche Weise wie die ESC-Lastpunkte aus der Volllastkurve des Motors ermittelt. Sie erweitern den vom ESC abgedeckten Kennfeldbereich zu niedrigeren Drehzahlen und niedrigeren Lasten hin. Drei geschleppte Betriebspunkte, die ebenfalls Bestandteil des ARTEMIS-Zyklus sind, sind in Abbildung 27 nicht dargestellt und wurden auch von uns am Motorprüfstand aufgrund der niedrigen Abgastemperaturen nicht vermessen. Die Betriebspunkte des

Zyklus werden normalerweise ebenso in einer definierten Reihenfolge durchfahren wie beim ESC-Zyklus und auch eine definierte Zeit lang gehalten. In unserem Fall dienen die ARTEMIS-Punkte vor allem dazu, genügend Stützstellen für die Kennfelderstellung zu erhalten und im Kennfeld auch den Bereich kleiner Lasten und damit niedriger Abgastemperaturen abzudecken.

### 8.2.1 Ergebnisse der Basisvermessung

Bei der Basisvermessung im ESC zeigte sich, dass der Motor bei den Stickoxiden schlechter lag als die EURO 3-Norm, während die übrigen gasförmigen Abgasbestandteile unter den EURO 3-Grenzwerten lagen. Die Partikelemissionen lagen geringfügig über dem EURO 3-Standard.

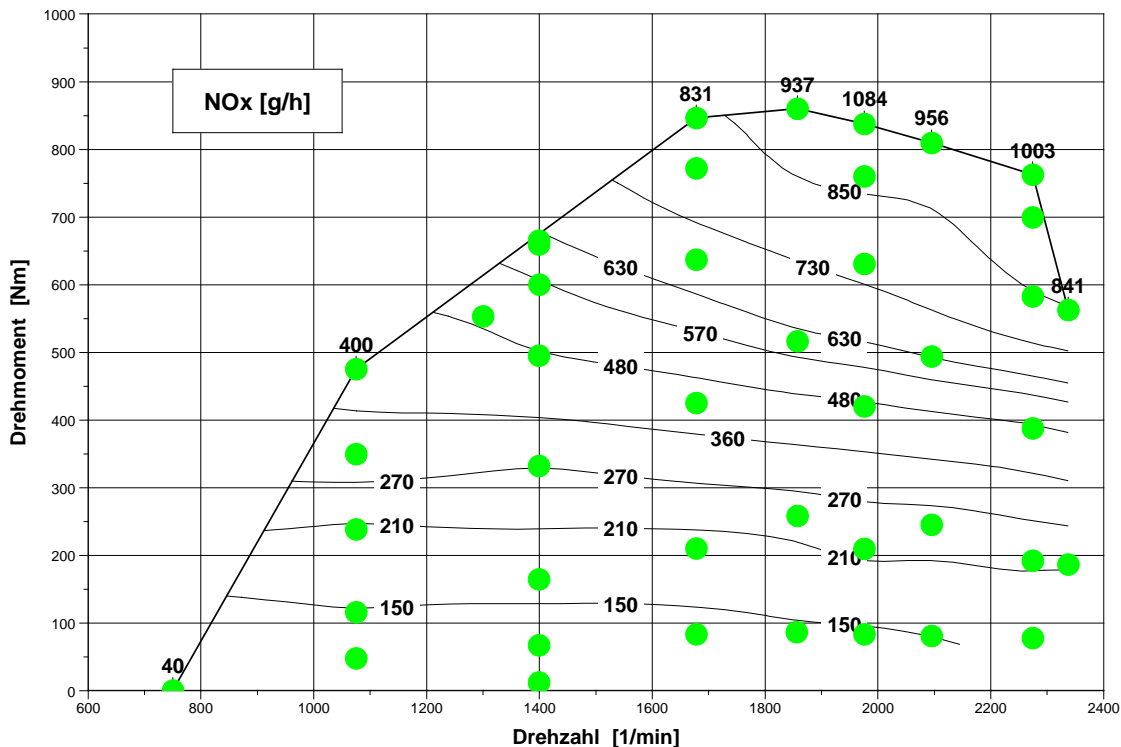
Tabelle 8 zeigt die Rohemissionen im ESC:

Kraftstoffverbrauch $b_e$	NO <sub>x</sub>	CO	HC	CO <sub>2</sub>	PM <sup>1</sup>
g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
204,143	5,758	0,393	0,086	669,385	0,118
<b>EURO 3-Grenzwerte</b>	5,0	2,1	0,66	-	0,1

**Tabelle 8:** Rohemissionen des Motors im ESC

Die Abgaswerte wurden dabei wie im Typprüfzyklus üblich, in einem auf dem Prüfstand automatisierten Messablauf gemessen, d.h. nach einer Vollastkonditionierung werden die Lastpunkte in der vorgegebenen Reihenfolge angefahren und 2 bzw. 4 Minuten (Leerlaufpunkt) gehalten, bei einer Messzeit von 30 Sekunden.

Einen Überblick über die Stickoxidwerte in g/h im Motorkennfeld gibt Abbildung 28



**Abbildung 28:** Stickoxidkennfeld des Motors

<sup>1</sup> Die Partikelemissionen wurden in weiterer Folge nicht mehr mitgemessen

Ein wichtiges Kriterium für die Anpassung eines SCR-Katalysatorsystems an einen Motor ist die Abgastemperatur. Bei Temperaturen unter etwa 200°C läuft die SCR-Standardreaktion, d.h. die Konvertierung von NO zu Stickstoff und Wasser (siehe Gleichung 1-1) nur mehr langsam oder gar nicht ab, außerdem steigt auch die Neigung des Harnstoffs und seiner Nebenprodukte bei tiefen Temperaturen Polymerisationsprodukte zu bilden und sich im Abgassystem anzulagern. Deshalb ist es bei niedrigen Abgastemperaturen oft nicht mehr sinnvoll Harnstoff einzudosieren. Eine Abschätzung in welchen Kennfeldbereichen eine Harnstoffeindosierung noch sinnvoll ist, ergibt sich aus dem Abgastemperaturkennfeld des Motors. Abbildung 29 zeigt ein solches Kennfeld für unseren am Prüfstand verwendeten Motor.

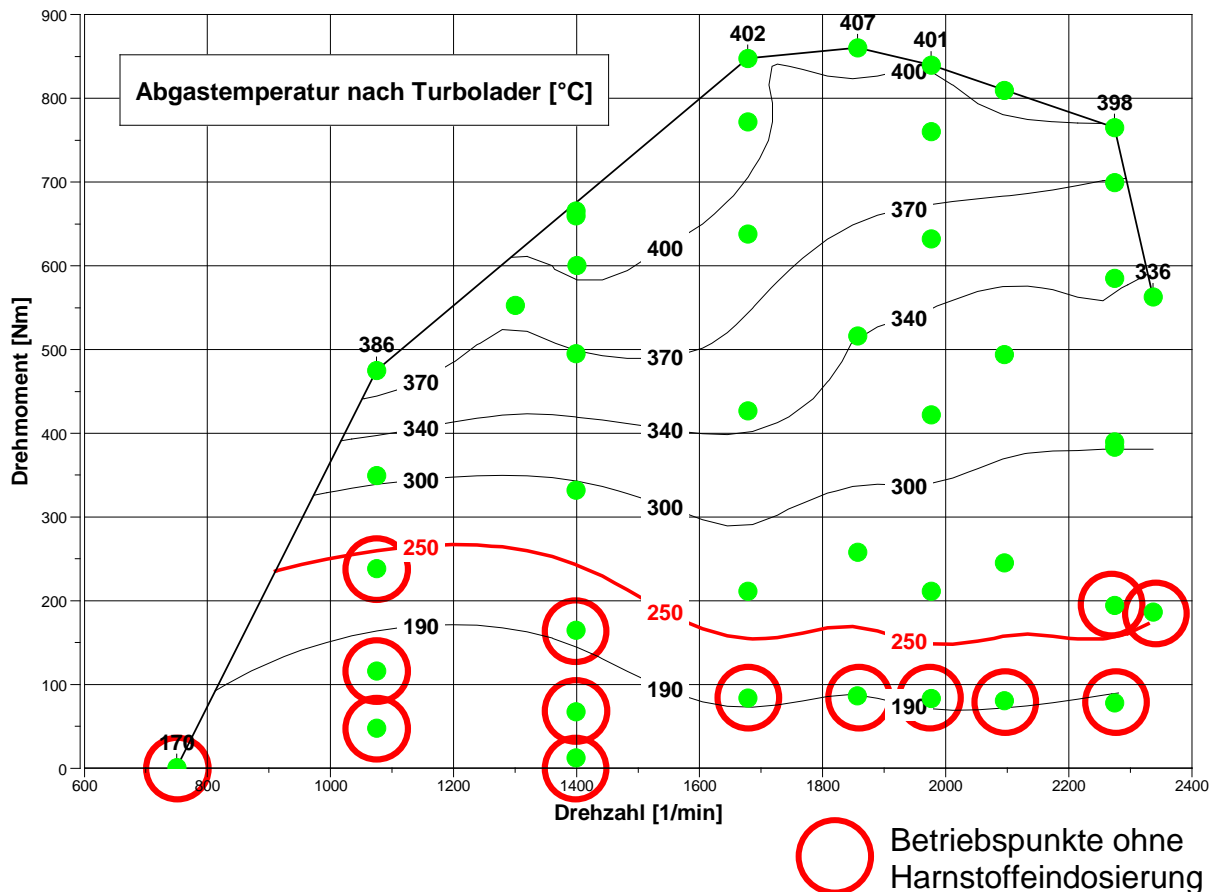
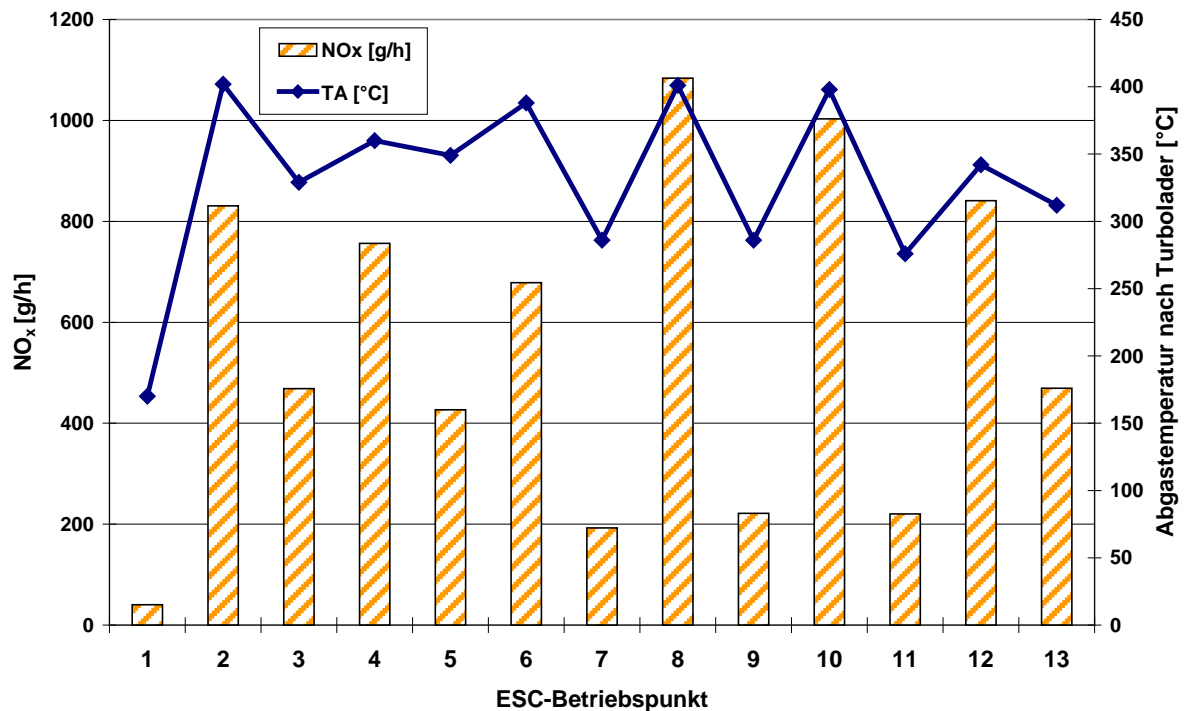


Abbildung 29: Abgastemperaturkennfeld des Motors

Das Bild zeigt die Abgastemperaturen nach Turbolader für die untersuchten Stationärpunkte im Motorkennfeld. In den Stationärpunkten die unterhalb der Abgastemperatur von 250°C lagen, bzw. in zwei Punkten die knapp oberhalb lagen, wurde kein Harnstoff eindosiert. Der Grund lag einerseits in der Vermeidung von eventuellen Ablagerungen im Abgassystem bei den tiefen Temperaturen, und andererseits im sehr verzögerten Ansprechverhalten des Katalysators. Einige dieser Betriebspunkte wurden zwar am Prüfstand untersucht, eine merkbare NO<sub>x</sub>-Konversion bei Harnstoffeindosierung ergab sich aber erst oft erst nach 10-20 Minuten Stationärbetrieb. Diese Resultate ergeben sich auch aus der Tatsache, dass der Motor am Prüfstand nur mit einem SCR-Katalysator ohne vorgeschalteten Oxidationskatalysator betrieben wurde, und damit die Bedingungen für eine „schnelle“ Reduktionsreaktion bei tiefen Temperaturen nicht gegeben waren. Die Abgastemperaturen in den ESC-Punkten lagen jedoch mit Ausnahme des Leerlaufpunkts immer so hoch, dass eine Eindosierung möglich war. Abbildung 30 zeigt die NO<sub>x</sub>-Rohemissionen in den einzelnen ESC-



Betriebspunkten mit der dazugehörigen Abgastemperatur gemessen direkt nach dem Turbolader. Die Stickoxidemissionen sind hier in g/h dargestellt.



**Abbildung 30:** Stickoxidemissionen in den ESC-Punkten

Wie man sieht, liegt die Abgastemperatur im Leerlaufpunkt (Punkt 1) bei ungefähr 170°C, das ist eine Temperatur, bei der auch der reibungslose Ablauf der Vorreaktionen zur Ammoniakbildung nicht mehr gewährleistet wäre, und deshalb wurde auf eine Harnstoffeindosierung in diesem Punkt verzichtet. Alle übrigen ESC-Punkte haben eine Abgastemperatur von über 250°C und wurden deshalb auch in weiterer Folge mit Harnstoffeindosierung vermessen.

### **8.3 Vermessung des Motors bei unterschiedlichen Harnstoffeindosierungs-raten mit $\alpha=0,6$ ; $\alpha=0,9$ und $\alpha=1,2$**

Nach der Basisvermessung der Rohemissionen des Motors wurde der SCR-Katalysator ausgedehnten Tests mit Harnstoffeindosierung unterzogen. Dabei sollte vor allem das stationäre Verhalten des Katalysators bei unterschiedlichen Harnstoffdosisierungsraten untersucht werden. Dazu wurden am Motorprüfstand manuell die einzelnen Kennfeldpunkte angefahren und nach dem Einschwingvorgang über die Prüfstandssteuerung eine gewisse Harnstoffmenge vorgegeben. Die jeweilige Harnstoffmenge errechnet sich dabei aus der Stickoxidrohmission des Motors im betreffenden Betriebspunkt. Nach dem Start der Eindosierung und dem Stationärwerden der Stickoxidemissionen wurden diese gemessen und der Reduktionsgrad der Emissionen gegenüber der Basisvermessung konnte ermittelt werden. Dies wurde im Prinzip für alle ESC- und ARTEMIS-Punkte durchgeführt, ich beschränke mich hier aber auf die Darstellung der ESC-Punkte. Neben der Bestimmung der Stickoxidreduktion wäre auch die Messung des Ammoniakchlupfs ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen gewesen. Leider war zum betreffenden Zeitpunkt als diese Messungen stattfanden, das Ammoniakmeßsystem, aus den im vorigen Kapitel genannten Gründen noch nicht einsatzfähig. Aus diesem Grund und der beschränkten Zeit-

spanne, die für die Messungen vorhanden war, wurden die Ammoniakwerte vorerst einmal nicht erfasst.

### **Diskussion der Meßmethode:**

Die Basisvermessung des Motors im ESC-Zyklus erfolgte über einen am Prüfstand automatisierten Ablauf bei dem der jeweilige Betriebspunkt solange gehalten wurde wie es den gesetzlichen Vorgaben entspricht. Bei der Vermessung mit Harnstoffeindosierung wurden die Messpunkte manuell eingestellt und solange gehalten bis sich ein stationärer Zustand bei der Stickoxidemission eingestellt hat. Aufgrund der großen Dimensionierung des Katalysators im Vergleich zum Hubvolumen des Motors und der Ammoniakspeicherfähigkeit des Katalysatorsystems ergeben sich dabei Haltezeiten der Betriebspunkte die oft wesentlich länger sind als jene beim gesetzlichen Zyklus. Andererseits ermöglicht das Abwarten des Stationärwerdens der Stickoxidemissionen eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Katalysatorsystems. Um etwaige Unterschiede in den Messwerten bei den beiden Meßmethoden zu verifizieren wurde der Meßzyklus mit Eindosierung  $\alpha=1,2$  mit einer Haltedauer von 2 Minuten je Betriebspunkt wie im gesetzlichen Zyklus noch einmal wiederholt. (siehe Kapitel 8.3.1.4)

### **Definition des Feedverhältnisses $\alpha$**

Das Feedverhältnis  $\alpha$  ist definiert als das Verhältnis der Anzahl der Mole an Ammoniak zur Anzahl der Mole an Stickoxiden, wobei bei den Stickoxiden konkret Stickstoffmonoxid gemeint ist, das ja beim Dieselabgas einen Anteil von meist mehr als 90% der Gesamtstickoxide ausmacht.

$$\alpha = \frac{[NH_3]}{[NO_x]} \quad (\text{siehe Gleichung 1-9})$$

Nach der Gleichung der Standard-SCR-Reaktion (siehe Gleichung 1-1) braucht man für ein Mol Stickstoffmonoxid ein Mol Ammoniak zur Umsetzung. Das heißt ein  $\alpha$  von eins entspricht dem stöchiometrischen Verhältnis von Ammoniak zu Stickstoffmonoxid. Ein  $\alpha$  größer als eins bedeutet Überdosierung, mit nicht vollständiger Umsetzung des Ammoniaks, ein  $\alpha$  kleiner als eins bedeutet Unterdosierung mit nicht vollständiger Umsetzung des Stickstoffmonoxids. Durch die Ammoniakspeicherfähigkeit des SCR-Katalysators und den  $NH_3$ -Sperrkatalysator ist allerdings ein  $\alpha$  größer als eins nicht gleichbedeutend mit dem sofortigen Auftreten von Ammoniak schlupf. In den ersten Augenblicken der Überdosierung kann das Ammoniak noch im Katalysator zwischengespeichert werden, und der Ammoniak schlupf tritt je nach aktuellem Speichervermögen erst nach einer gewissen Zeit auf.

### **Definition des Reduktionsgrades**

Der Reduktionsgrad eines SCR-Katalysators ist folgendermaßen definiert:

$$\text{Reduktionsgrad} = \frac{NO_{x \text{ vorKat}} - NO_{x \text{ nachKat}}}{NO_{x \text{ vorKat}}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 1-16}$$

Der Reduktionsgrad beschreibt somit die Effektivität der Stickoxidumwandlung eines SCR-Katalysators.



## Definition der Raumgeschwindigkeit

Die Raumgeschwindigkeit eines Katalysators ist definiert als der Abgasnormvolumenstrom durch den Katalysator dividiert durch das effektive Katalysatorvolumen. Der Kehrwert der Raumgeschwindigkeit entspricht somit einer Verweildauer des Abgases im Katalysator. Je länger die Verweildauer und je kleiner damit die Raumgeschwindigkeit desto länger hat das Abgas Kontakt mit der katalytisch aktiven Oberfläche und desto höher wird im Allgemeinen der Umsatz sein.

$$RG = \frac{\dot{V}_N}{V_{Kat}} \quad \text{Gleichung 1-17}$$

$\dot{V}_N$ ...Normvolumenstrom Abgas [ $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ ],  $V_{\text{Kat}}$ ...Katalysatorvolumen [ $\text{m}^3$ ]

### 8.3.1 Ergebnisse der Messungen

#### 8.3.1.1 Ergebnisse der Messungen für $\alpha=0,6$

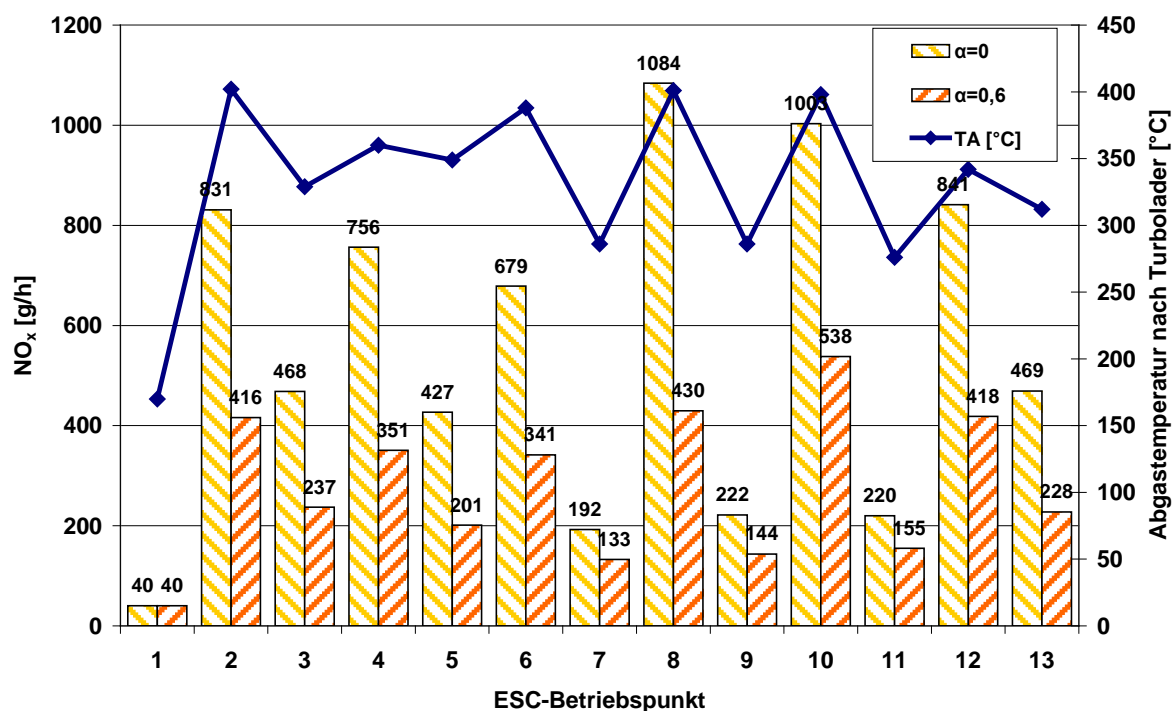
Ein Feedverhältnis von  $\alpha=0,6$  bedeutet nach *Gleichung 1-9*, dass ein molares Verhältnis von  $\text{NH}_3/\text{NO}_x=0,6$  vorliegen muss. Die einzudosierende Harnstoffmenge in kg/h kann dann individuell für alle Betriebspunkte aus den Rohemissionen errechnet, und dann über die Prüfstandssteuerung vorgegeben werden.

Tabelle 9 zeigt die Gesamtemissionen im ESC in g/kWh:

Kraftstoffverbrauch $b_e$	$\text{NO}_x$	CO	HC	$\text{CO}_2$
g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
<b>203,904</b>	<b>2,881</b>	<b>0,368</b>	<b>0,109</b>	<b>652,548</b>

**Tabelle 9:** Gesamtemissionen im ESC in g/kWh bei  $\alpha=0,6$

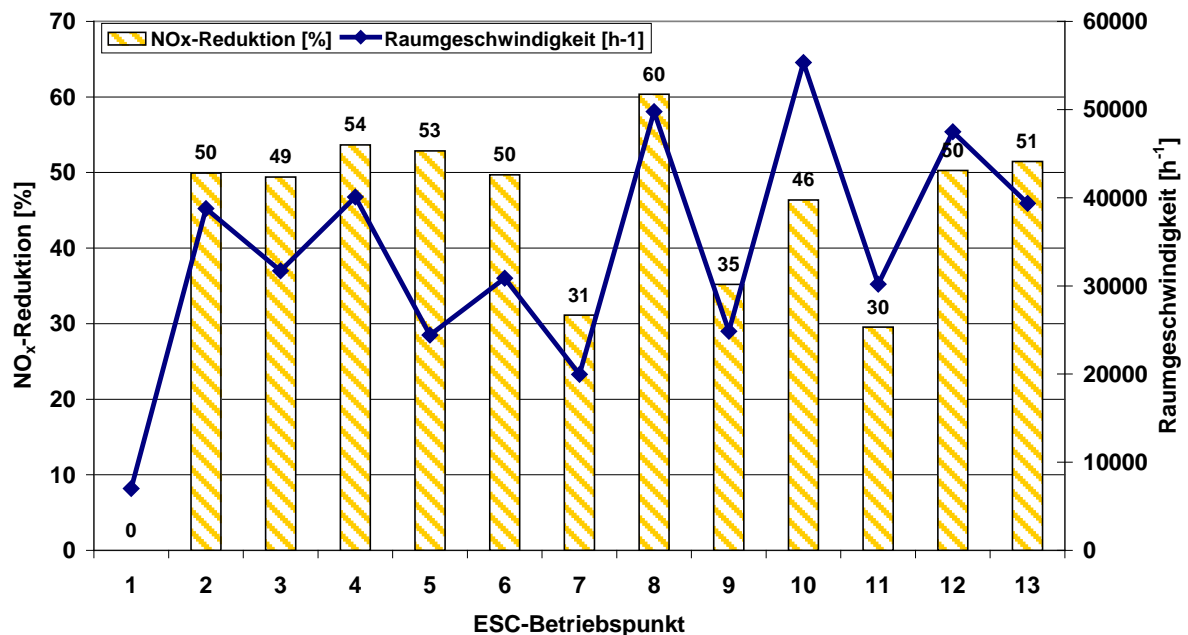
Einen Überblick über die Stickoxidemissionen in g/h in den einzelnen ESC-Punkten im Vergleich zur Basismessung gibt Abbildung 31.



**Abbildung 31:** Stickoxidemissionen bei  $\alpha=0,6$  in den einzelnen ESC-Punkten

Wie schon weiter oben angeführt, wurde wegen der tiefen Abgastemperaturen im Punkt 1 des ESC (Leerlaufpunkt) kein Harnstoff eindosiert, wodurch sich entsprechend auch keine Stickoxidreduktion in diesem Punkt ergab.

Abbildung 32 zeigt dann noch die NO<sub>x</sub>-Reduktion in % und die Raumgeschwindigkeit in den einzelnen ESC-Punkten bei  $\alpha=0,6$ .



**Abbildung 32:** Stickoxidreduktionen für  $\alpha=0,6$  in den einzelnen ESC-Punkten

In Punkt 8 ergibt sich eine Reduktionsrate von 60%, d.h. eine praktisch 100%-ige Umsetzung des Ammoniaks. In allen anderen Punkten ergaben sich niedrigere Reduktionsraten die auch mit den Abgastemperaturen korrelieren. In den Niedriglastpunkten mit geringer Abgastemperatur ergaben sich teilweise recht niedrige Reduktionsraten mit oft nur der Hälfte des theoretisch erwartbaren Wertes.

### 8.3.1.2 Ergebnisse der Messungen für $\alpha=0,9$

Entsprechend den Messungen bei  $\alpha=0,6$  wurde das System auch bei einem Feedverhältnis von  $\alpha=0,9$  d.h. bei einem molaren Verhältnis von  $\text{NH}_3/\text{NO}=0,9$  betrieben. Als Grundlage für die Berechnung der Harnstoffdosierungsrate dienten wieder die Emissionwerte der Basisvermessung. Die Ergebnisse im ESC werden im Folgenden dargestellt.

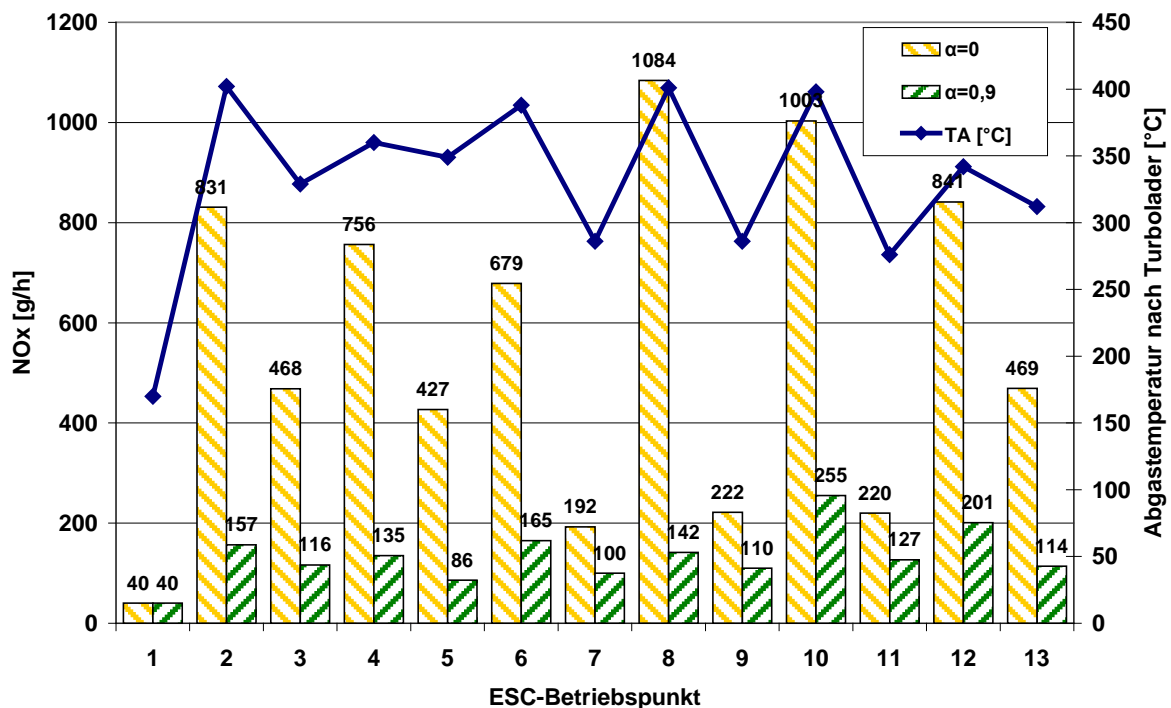
Tabelle 10 zeigt die Gesamtemissionen im ESC in g/kWh:

Kraftstoffverbrauch $b_e$	NO <sub>x</sub>	CO	HC	CO <sub>2</sub>
g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
<b>203,920</b>	<b>1,373</b>	<b>0,362</b>	<b>0,115</b>	<b>653,961</b>

**Tabelle 10:** Gesamtemissionen im ESC in g/kWh bei  $\alpha=0,9$

Die Darstellung der Gesamtemissionen im ESC zeigt, dass der getestete Motor bei einer konstanten Dosierung von  $\alpha=0,9$  in den ESC-Betriebspunkten die EURO 5-Grenzwerte von 2 g/kWh für die Stickoxidemissionen unterbietet.

Die Stickoxidemissionen in g/h in den einzelnen ESC-Punkten im Vergleich zur Basismessung und die dazugehörigen Abgastemperaturen zeigt Abbildung 33.



**Abbildung 33:** Stickoxidemissionen bei  $\alpha=0,9$  in den einzelnen ESC-Punkten

Die Messungen bei  $\alpha=0,9$  zeigen ebenfalls in einigen Punkten recht hohe Reduktionsraten, auch hier wiederum in den hochlastigen Punkten des ESC, wie dem Punkt 8, einem Volllastpunkt bei mittlerer Drehzahl des ESC. Abbildung 34 gibt einen Überblick über die Reduktionsraten aller gemessenen Betriebspunkte des ESC und über die dabei aufgetretenen jeweiligen Raumgeschwindigkeiten im SCR-Katalysator. In Punkt 1 des ESC wurde wiederum auf die Harnstoffeindüsung verzichtet und deshalb keine Emissionsreduktion erreicht.

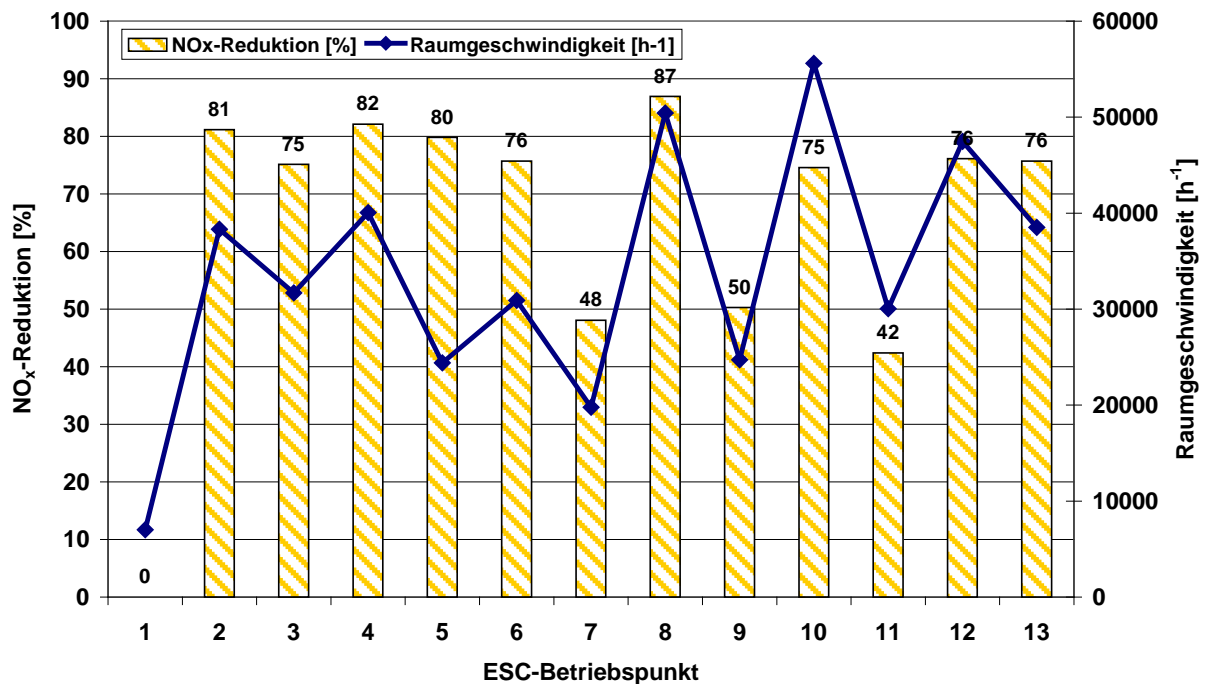


Abbildung 34: Stickoxidreduktionen für  $\alpha=0,9$  in den einzelnen ESC-Punkten

### 8.3.1.3 Ergebnisse der Messungen bei $\alpha=1,2$

Wird die ins Abgassystem eindosierte Menge an Harnstoff soweit gesteigert, dass zwischen dem daraus generierten Ammoniak und dem Stickstoffmonoxid ein molares Verhältnis von 1:1,2 entsteht, ergibt sich nach Gleichung 1-9 ein  $\alpha$  von 1,2. Bei dieser weiteren Steigerung der Harnstoffmenge würde es jedoch in jedem Fall zu Ammoniakabschlupf kommen. Die real von uns am Prüfstand erreichten Emissionswerte im ESC stellen sich wie folgt dar.

Tabelle 11 zeigt die Gesamtemissionen im ESC in g/kWh:

Kraftstoffverbrauch $b_e$	NO <sub>x</sub>	CO	HC	CO <sub>2</sub>
g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
<b>204,230</b>	<b>0,555</b>	<b>0,331</b>	<b>0,093</b>	<b>660,213</b>

Tabelle 11: Gesamtemissionen im ESC in g/kWh bei  $\alpha=1,2$

Im gesamten ESC-Zyklus ergibt sich so eine Stickoxidreduktion von etwa 90% im Vergleich zur Basismessung.

Die Aufteilung der Stickoxidemissionen auf die einzelnen ESC-Punkte und der Vergleich mit den Werten der Basisvermessung ist in Abbildung 35 dargestellt.

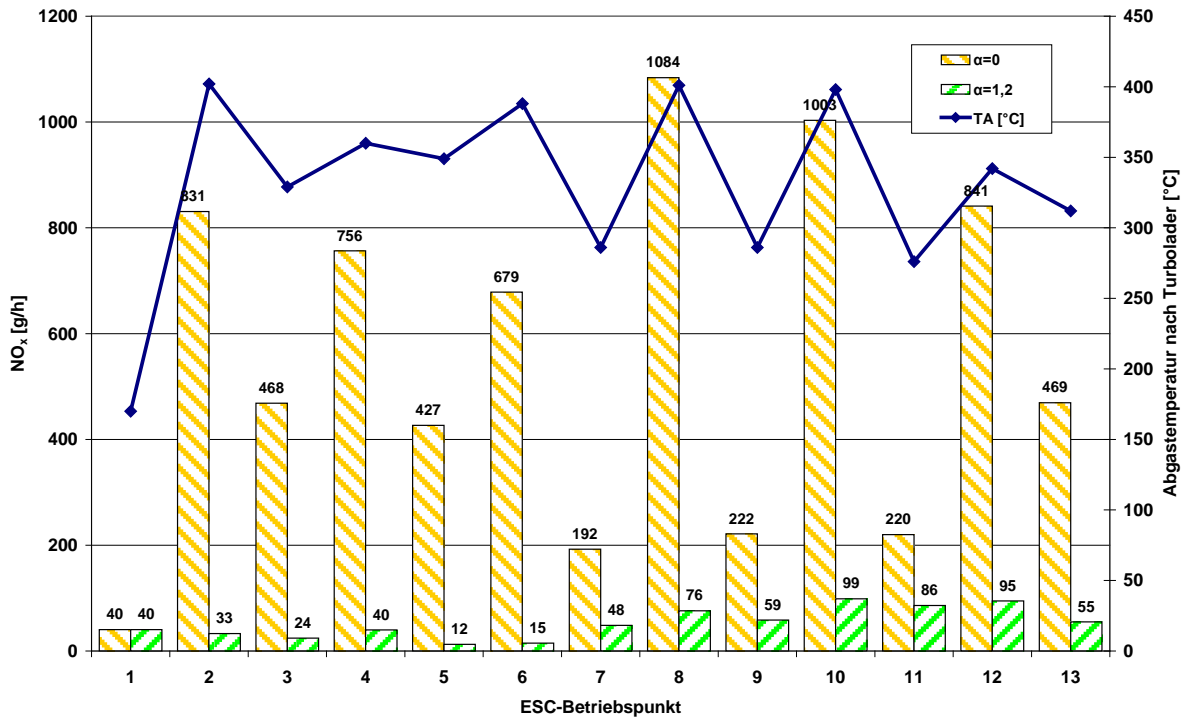


Abbildung 35: Stickoxidemissionen bei  $\alpha=1,2$  in den einzelnen ESC-Punkten

Die Reduktionsraten bei Eindosierung mit  $\alpha=1,2$  zeigt Abbildung 36.

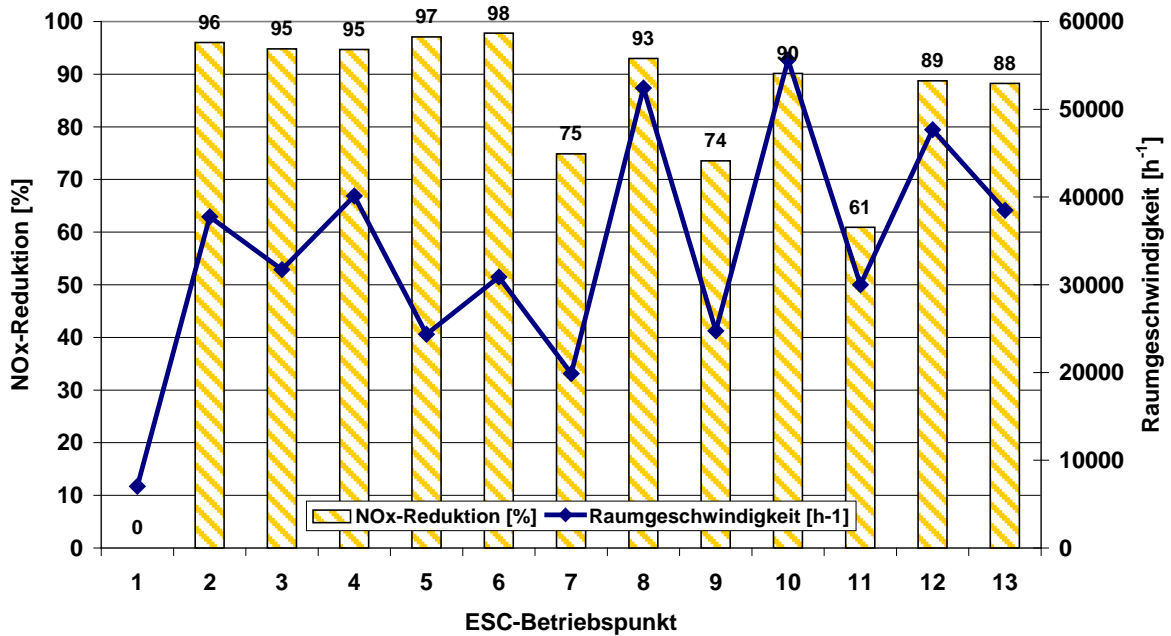
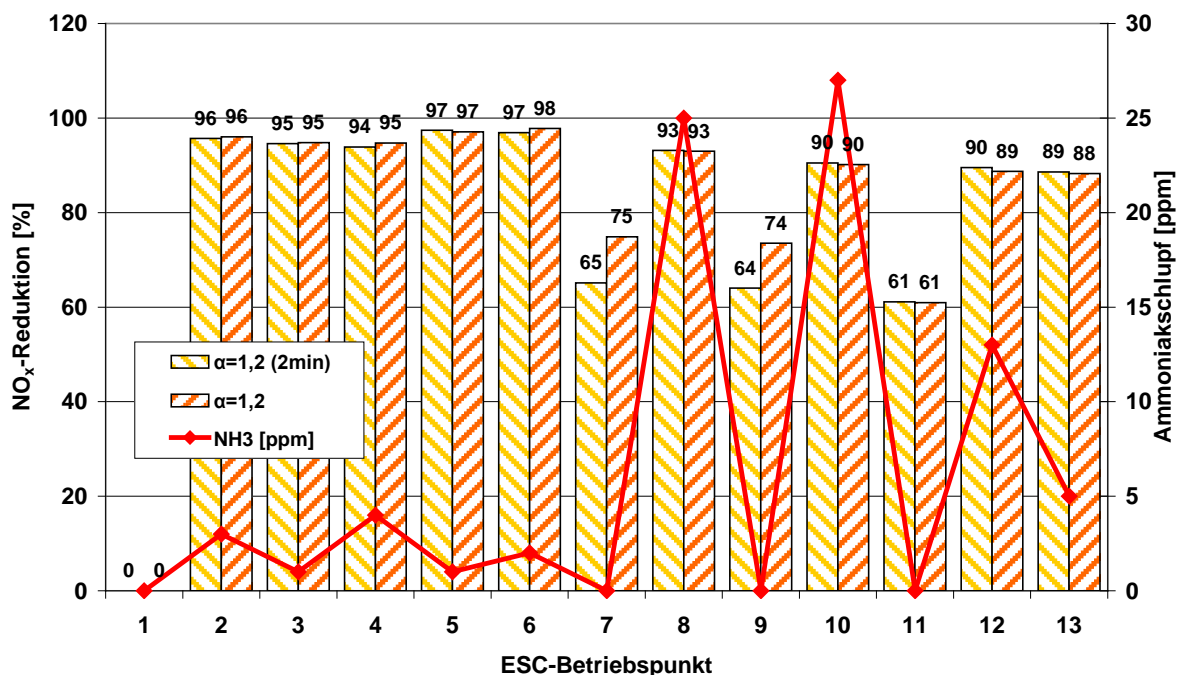


Abbildung 36: Stickoxidreduktionen für  $\alpha=1,2$  in den einzelnen ESC-Punkten

### 8.3.1.4 Vergleich der Messungen für $\alpha=1,2$ bei verschiedenen Eindosierungszeiten

Da wie schon erwähnt, bei den in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Messungen die Ammoniakmessung noch nicht zur Verfügung stand, konnte auch keine Aussage über den tatsächlichen Ammoniakverlust in den einzelnen Betriebspunkten und bei den verschiedenen Harnstoffdosierungsraten getroffen werden. Spätestens bei einem Feedverhältnis von  $\alpha=1$  kann Ammoniakverlust auftreten, da für die Umwandlung der Stickoxide nicht nur das Mengenverhältnis  $\text{NH}_3$  zu  $\text{NO}$  ausschlaggebend ist, sondern auch andere Faktoren wie Katalysatortemperatur und Raumgeschwindigkeit eine wichtige Rolle spielen. Es kann also auch ohne Vorliegen einer Überdosierung, d.h. bei Feedverhältnissen  $\alpha \leq 1$  nicht immer das gesamte Ammoniak reagieren und muss durch den vorliegenden Sperrkatalysator umgewandelt werden. Um letztendlich noch einen Überblick über die Ammoniakemissionen zu bekommen, wurden die ESC-Punkte mit  $\alpha=1,2$  ein zweites Mal, diesmal inklusive Ammoniakmessung vermessen. Bei dieser Messung wurde die Vorgehensweise dahingehend geändert, dass die einzelnen Betriebspunkte nicht mehr bis zum Stationärwerden der Emissionen gehalten wurden, sondern eine konstante Zeitdauer von 2 Minuten, um eher dem Messablauf beim gesetzlichen Zyklus zu entsprechen. Auf diese Weise konnten die beiden Meßmethoden in Bezug auf die Stickoxidreduktion miteinander verglichen werden. Den Vergleich und die Ammoniakemission in ppm für die Wiederholungsmessung mit  $\alpha=1,2$  zeigt Abbildung 37.



**Abbildung 37:** Vergleich der Stickoxidreduktionen bei  $\alpha=1,2$  und einer Haltedauer von 2min mit  $\alpha=1,2$  und Abwarten des Stationärzustandes

Bei den Stickoxidreduktionen (bezogen auf die Emissionen in g/h) ergaben sich außer in den Punkten 7 und 9 des ESC praktisch keine Unterschiede zwischen den beiden Messungen. Die Punkte 7 und 9 des ESC sind Punkte mit niedriger Motorlast und dementsprechend niedriger Abgastemperatur, wo sich der stationäre Zustand erst nach einer längeren Zeitspanne als 1,5 Minuten einstellt. Dadurch ergeben sich noch höhere Stickoxidwerte und geringere Reduktionsraten nach Ablauf der 1,5 Minuten, als nach dem Abwarten des Stationärzustandes. In den Punkten 8 und 10 zeigt

ten sich trotz der relativ hohen Reduktionsraten Ammoniakwerte, die in der Nähe des gesetzlich reglementierten Grenzwertes von 25ppm lagen [26]. Beide Punkte sind Vollastpunkte mit relativ hohen Abgastemperaturen zwischen 300° und 400°C. Bei diesen Temperaturen reichen Ammoniak-speicherfähigkeit und auch die Konvertierung durch den Sperrkatalysator offenbar nicht mehr aus, um den Ammoniak-schlupf bei  $\alpha=1,2$  wesentlich unter dem Grenzwert zu halten.

#### 8.4 Untersuchung der Stickoxidreduktion und des Ammoniak-schlupfes in 4 stationären Motorbetriebspunkten

Zusätzlich zu den Untersuchungen mit Feedverhältnissen von  $\alpha=0,6$  bis 1,2 in den ESC-Punkten wurden in ausgewählten Stationärpunkten auch Untersuchungen mit  $\alpha=0,24$  bis 1,7 durchgeführt. Damit konnte das stationäre Systemverhalten auch im Fall der Überdosierung beurteilt werden. Für diese Untersuchungen wurden sowohl die Stickoxidemissionen als auch der Ammoniak-schlupf beim jeweiligen Stationärbetriebspunkt aufgenommen und über dem Feedverhältnis  $\alpha$  dargestellt. Dabei wurde ebenso wie bei den Messungen mit  $\alpha=0,6$  bis 1,2 jeder Punkt zeitlich solange gehalten bis sich ein stationärer Zustand bei Stickoxid- und Ammoniakemissionen eingestellt hatte. Dies wurde für vier Motorbetriebspunkte, und zwar einen Volllast- und drei Teillastbetriebspunkte durchgeführt. Abbildung 38 zeigt die Auswahl der untersuchten Stationärpunkte im Motorkennfeld.

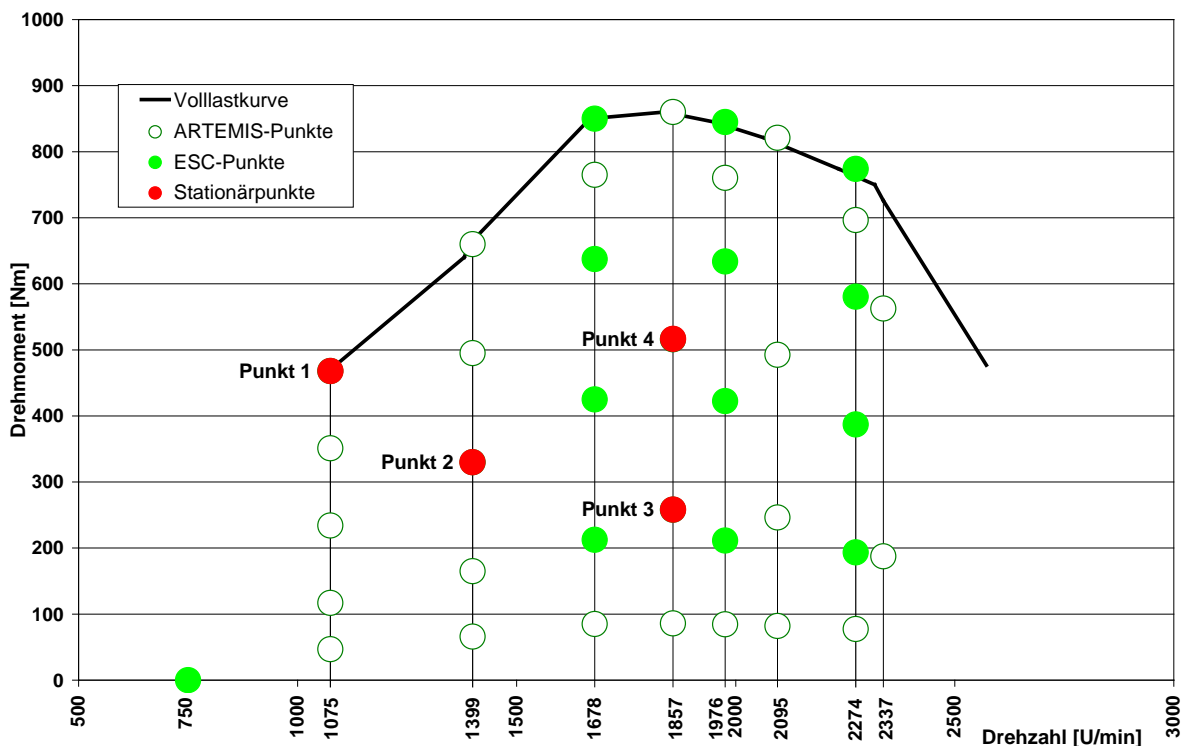
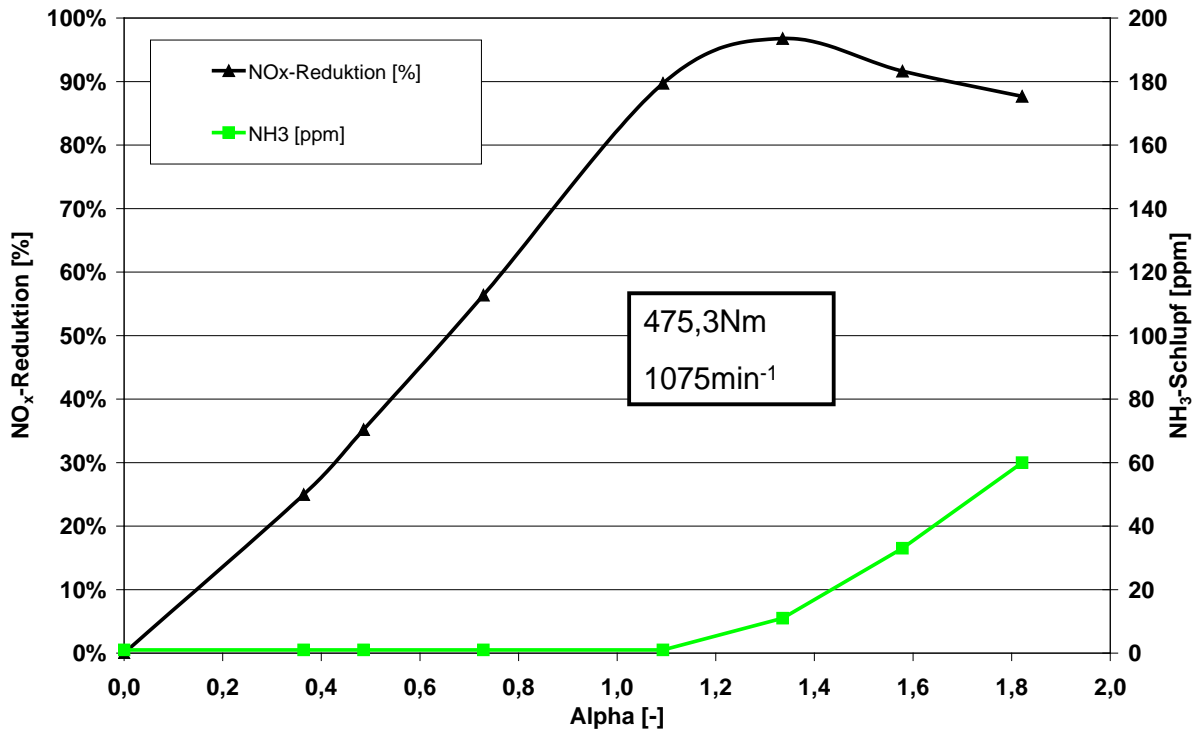


Abbildung 38: Darstellung der ausgewählten Kennfeldpunkte für die stationären Untersuchungen

### 8.4.1 Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 1

Punkt 1 stellt einen Volllastpunkt mit einer relativ niedrigen Drehzahl von  $1075 \text{ min}^{-1}$  dar. Den Verlauf der Stickoxidreduktion und des Ammoniakschlupfes über dem Feedverhältnis  $\alpha$  zeigt Abbildung 39.



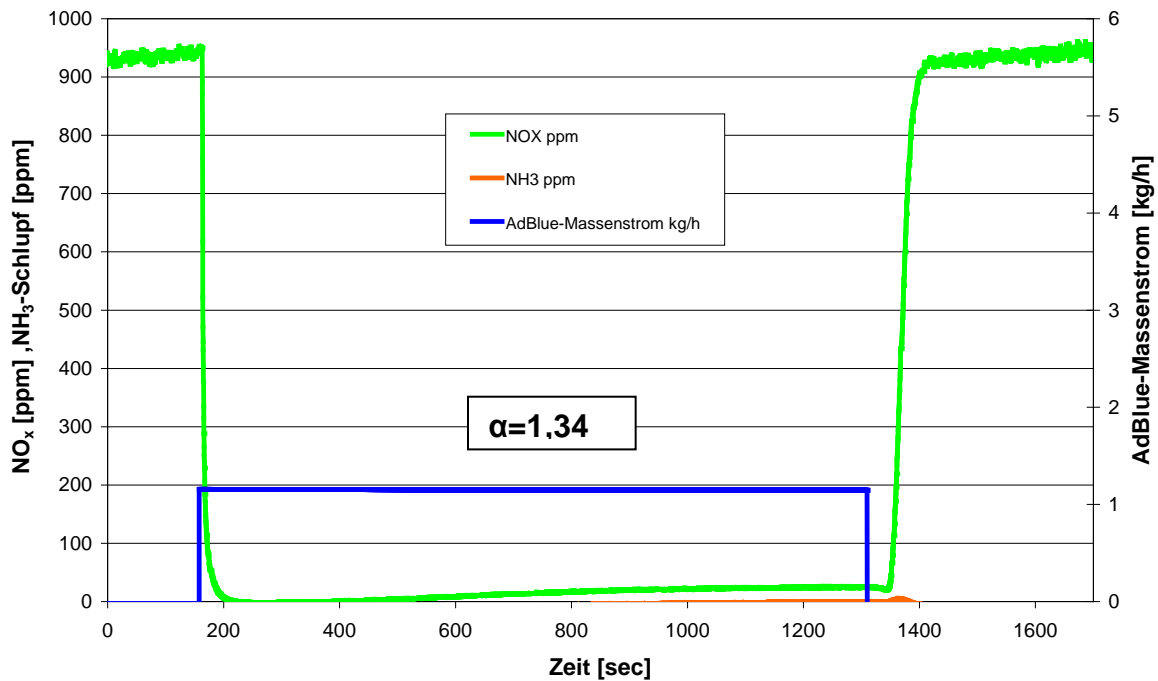
**Abbildung 39:** Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 1

Bis zu einem Feedverhältnis von etwa 1,34 steigt die Stickoxidreduktion naturgemäß mit steigender Harnstoffeindosierung an. Ab einem Alpha von 1,1 beginnt der Anstieg allerdings flacher zu werden, um bei einem Alpha von 1,34 das Maximum der Stickoxidreduktion mit 97% zu erreichen. Der daran anschließende Abfall in der Stickoxidreduktion könnte sich wiederum aus der Oxidation des vorhandenen Ammoniaks bzw. des Stickstoffs in Stickoxide im NH<sub>3</sub>-Sperrkatalysator erklären. Der Sperrkatalysator würde so einer höheren erreichbaren Reduktionsrate entgegenwirken. Da sich in unserem Fall der Sperrkatalysator als ein mit Platin beschichteter Bereich im hinteren Teil des jeweiligen SCR-Katalysator-Moduls darstellt, sind allerdings die Effekte des Sperrkats und des SCR-Katalysators nicht ohne weiteres klar zu trennen, da eine Messung von Stickoxiden und Ammoniak nur insgesamt am Katalysatorein- und austritt möglich ist. Die Stoffkonzentrationen am Eintritt in den Sperrkat sind hingegen einer Messung nicht zugänglich. Somit kann das Katalysatorverhalten immer nur als Summe aus Stickoxidreduktion und Ammoniakspeicherung im eigentlichen SCR-Katalysatorbereich und aus Ammoniak- bzw. Stickstoffoxidation im Sperrkatbereich beurteilt werden.

Der Ammoniakschlupf bleibt bei einem Alpha unter 1,1 praktisch unter der Nachweisgrenze des Messgeräts und steigt danach kontinuierlich an. Bei einer Überdosierung mit Alpha=1,34 liegt die Ammoniakkonzentration bei 11 ppm und damit noch unter dem heute gültigen Grenzwert von 25 ppm. Erst bei weiterer Überdosierung steigt die Konzentration bis auf 60 ppm bei Alpha=1,8 an.



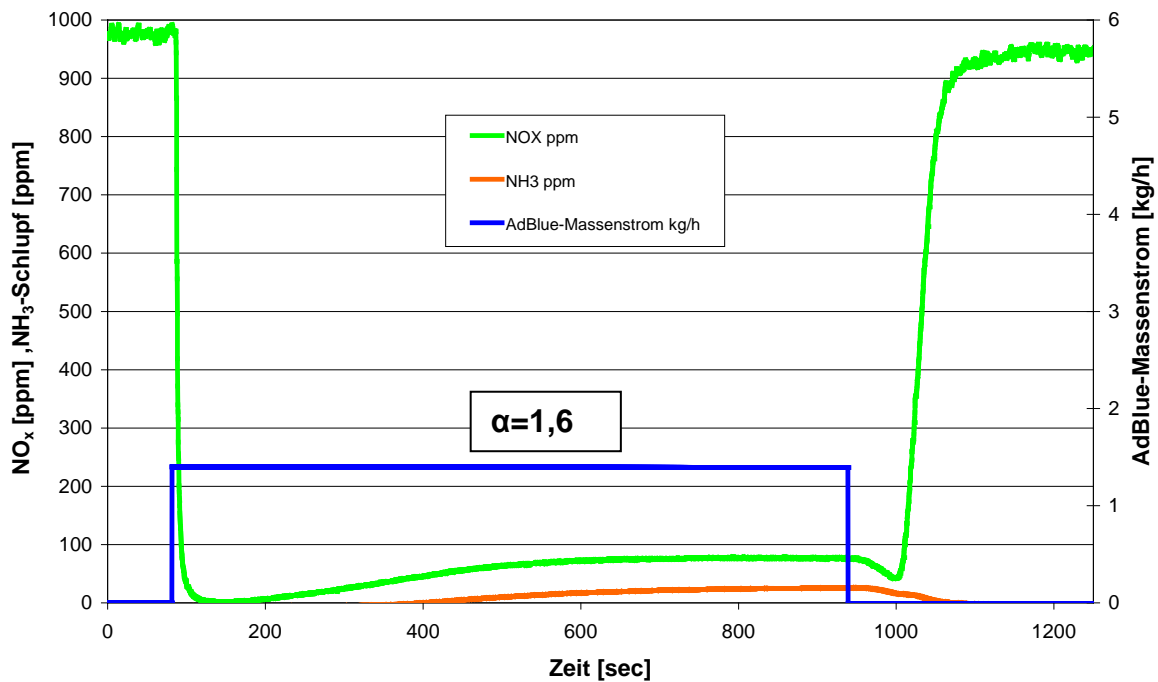
Im Folgenden werden noch die zeitlichen Verläufe von Stickoxidemission, Ammoniakchlupf und AdBlue-Massenstrom für den Stationärpunkt 1 bei Überdosierung, d.h. bei  $\alpha=1,34$ ;  $\alpha=1,6$  und  $\alpha=1,8$  dargestellt. Wie schon erwähnt, wurden bei den jeweiligen Messungen die Punkte solange gehalten, bis sich ab dem Zeitpunkt der Harnstoffeindosierung ein stationärer Betriebszustand bei den Emissionen eingestellt hat. Abbildung 35 zeigt die zeitlichen Verläufe der Emissionen in Punkt 1 ( $475,3 \text{ Nm}/1075 \text{ min}^{-1}$ ) bei einer leichten Überdosierung von  $\alpha=1,34$ .



**Abbildung 40:** Zeitverlauf der Stickoxid- und Ammoniakemissionen bei  $\alpha=1,34$

Wie man sieht, beträgt der Zeitintervall vom Eindosierungsbeginn bis zum Stationärwerden der Emissionen bei dieser Überdosierung trotz einer Temperatur am Katalysatoreingang von  $380^\circ\text{C}$  etwa 20 Minuten. Selbst dann steigt die Ammoniakkonzentration nach dem Katalysator nur auf einen Wert von 11 ppm an. Die Stickoxidkonzentration sinkt nach dem Start der Harnstoffeindosierung sehr rasch auf einen Tiefstwert ab, um sich dann wieder auf etwas höheren stabilen Wert einzupendeln. Die Reduktion gegenüber den Rohemissionen lag in diesem Fall bei 97%. Nach Abschalten der Harnstoffeindosierung steigen die Stickoxide nach einer Verzögerungszeit wieder auf ihren ursprünglichen Wert an. Es ist anzunehmen, dass während dieser Zeit gespeichertes Ammoniak freigesetzt wird und mit den Stickoxiden reagiert, so dass es nicht zu einem sofortigen Anstieg der Emissionen kommt.

Steigert man die Dosiermenge auf  $\alpha=1,6$  so beträgt die Zeitspanne bis zum Stationärwerden der Emissionen beim gleichen Betriebspunkt nur mehr etwa 14 Minuten. Sowohl der Ammoniakchlupf als auch die Stickoxidemissionen im Stationärzustand steigen gegenüber dem Fall der Eindosierung mit  $\alpha=1,34$  an. Abbildung 41 zeigt die Zeitabhängigkeiten bei  $\alpha=1,6$  auf.



**Abbildung 41:** Zeitverlauf der Stickoxid- und Ammoniakemissionen bei  $\alpha=1,6$

Die Ammoniakkonzentration im Stationärzustand beträgt in diesem Fall 33 ppm, liegt also bereits über dem Grenzwert von 25 ppm. Während der Anstieg der stationären Ammoniakemission bei einer höheren Harnstoffeindosierung als logisch erscheint, ist ein Anstieg in der Stickoxidemission im stationären Zustand gegenüber  $\alpha=1,34$  jedoch überraschend, und kann wohl nur im Zusammenhang mit Oxidationsreaktionen im Sperrkatalysator erklärt werden. Nach dem Abschalten der Harnstoffeindosierung zeigt sich wieder der vom Fall  $\alpha=1,34$  bekannte verzögerte Anstieg der Stickoxidkonzentration auf den Basiswert.

Im nächsten Schritt wurde die Harnstoffdosierung auf  $\alpha=1,8$  gesteigert, d.h. bei im Idealfall vollständiger Umwandlung des Harnstoffs in Ammoniak, stünde die 1,8-fache Menge an Ammoniak, im Vergleich zu jener Menge, die rein stöchiometrisch zur vollständigen Umwandlung des im Abgas vorhandenen Stickstoffmonoxids nötig wäre, zur Verfügung. Dies führt auch im stationären Zustand zu einer hohen Ammoniakkonzentration von 60 ppm gemessen nach dem  $\text{NH}_3$ -Sperrkat. Die Zeitspanne bis zum Erreichen des stationären Zustands hat sich gegenüber der Messung mit  $\alpha=1,6$  praktisch nicht verändert. Im stationären Zustand stellt sich eine Stickoxidkonzentration von 115 ppm nach Katalysator ein, die damit höher liegt als in den beiden vorangehend dargestellten Fällen mit  $\alpha=1,34$  und  $\alpha=1,6$ . Abbildung 42 zeigt die zeitlichen Abhängigkeiten der Konzentrationen nach SCR-Katalysator bei Harnstoffeindosierung mit  $\alpha=1,8$ .

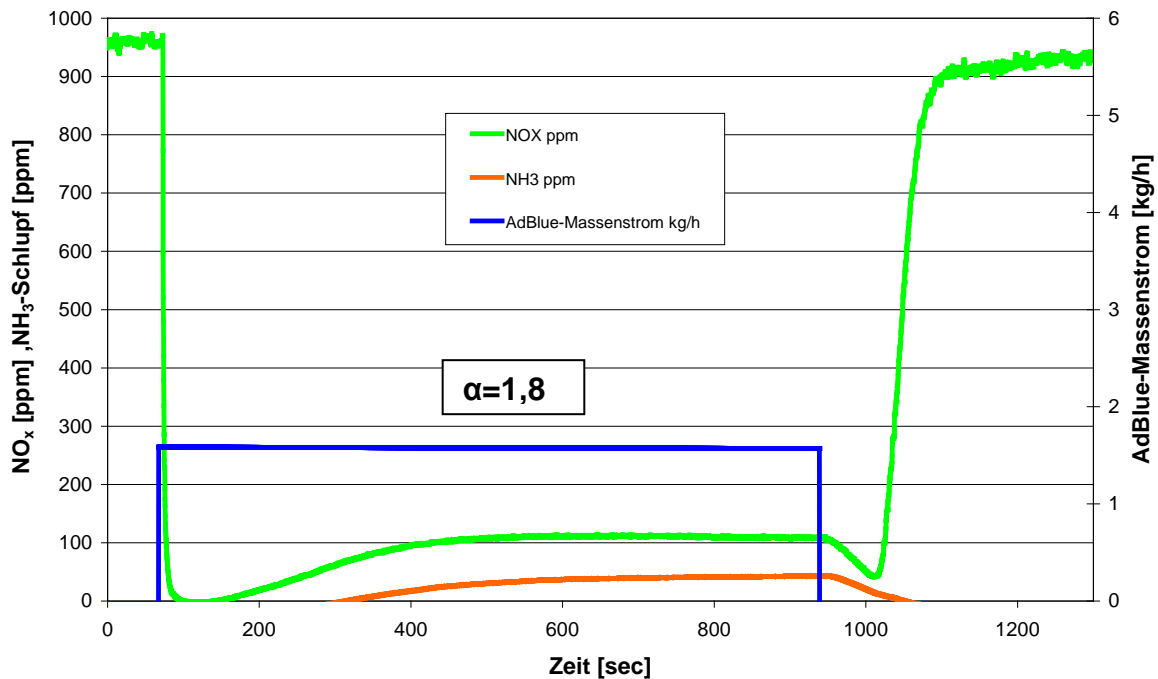


Abbildung 42: Zeitverlauf der Stickoxid- und Ammoniakemissionen bei  $\alpha = 1,8$

#### 8.4.2 Stickoxidreduktion und Ammoniakslupf im Punkt 2

Punkt 2 stellt einen Teillastpunkt bei  $1399 \text{ min}^{-1}$  dar. Die Abgastemperatur vor dem Katalysator betrug dabei etwa  $308^\circ\text{C}$ . Abbildung 38 zeigt den Verlauf der Stickoxidreduktion und des Ammoniakslupfes über dem Feedverhältnis  $\alpha$ , wobei  $\alpha$  wiederum stufenweise von 0,24 bis 1,8 variiert wurde.

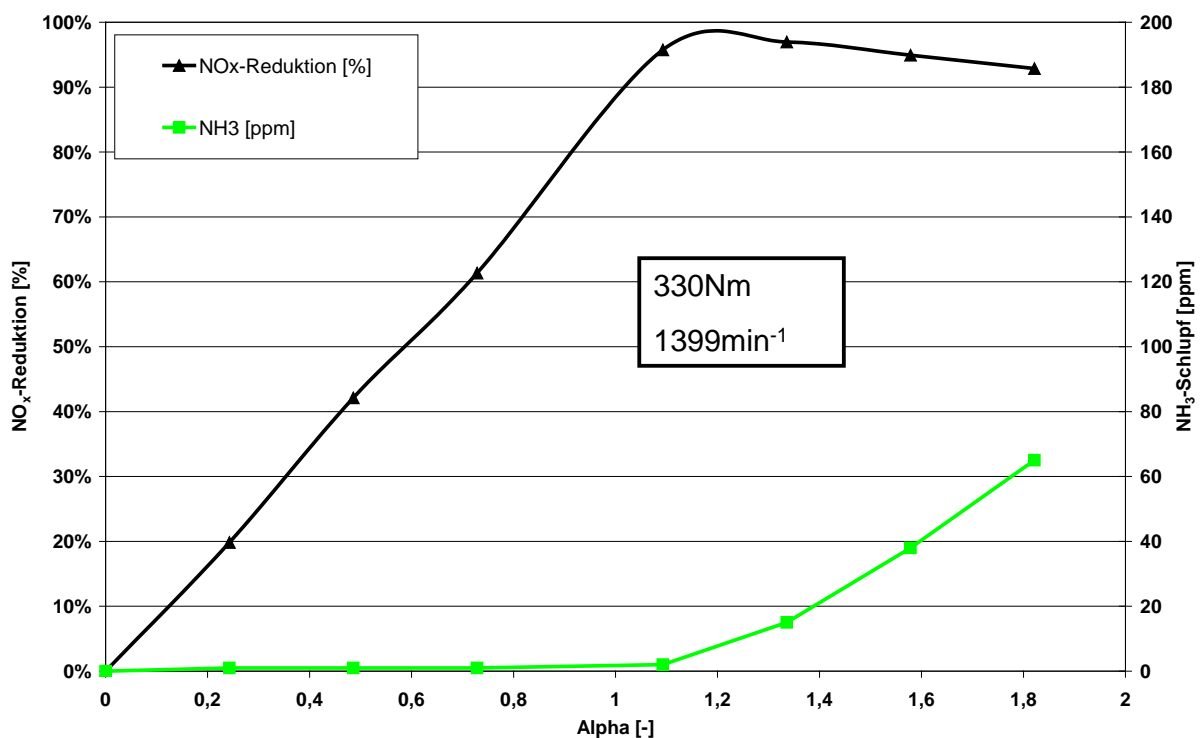


Abbildung 43: Stickoxidreduktion und Ammoniakslupf in Stationärpunkt 2

Der Kurvenverlauf unterscheidet sich nicht wesentlich von jenem für den Stationärpunkt 1. Die Stickoxidreduktion steigt im Bereich  $\alpha < 1$  bis zu einem Maximum bei etwa  $\alpha = 1,2$  stetig an. Bei einer Erhöhung des Feedverhältnisses über diesen Wert ergibt sich wieder ein Abfall im Stickoxidumsatz, der allerdings in diesem Motorbetriebspunkt weniger ausgeprägt ausfällt als im Betriebspunkt 1 bei Volllast. Der Ammoniakschlupf beginnt bei  $\alpha = 1$  anzusteigen, liegt für  $\alpha = 1,34$  bei 15ppm und steigt dann bis auf 65ppm bei  $\alpha = 1,8$  an.

### 8.4.3 Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 3

Der dritte untersuchte Betriebspunkt war ein Punkt im Bereich der unteren Teillast bei  $1857 \text{ min}^{-1}$ . Die Abgastemperatur vor dem Katalysator war in diesem Punkt entsprechend niedriger und betrug etwa  $265^\circ\text{C}$ . Abbildung 44 zeigt die aufgenommenen Kurven von Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf bei Variation der Harnstoffeindosierung von  $\alpha = 0,24$  bis  $\alpha = 1,8$ .

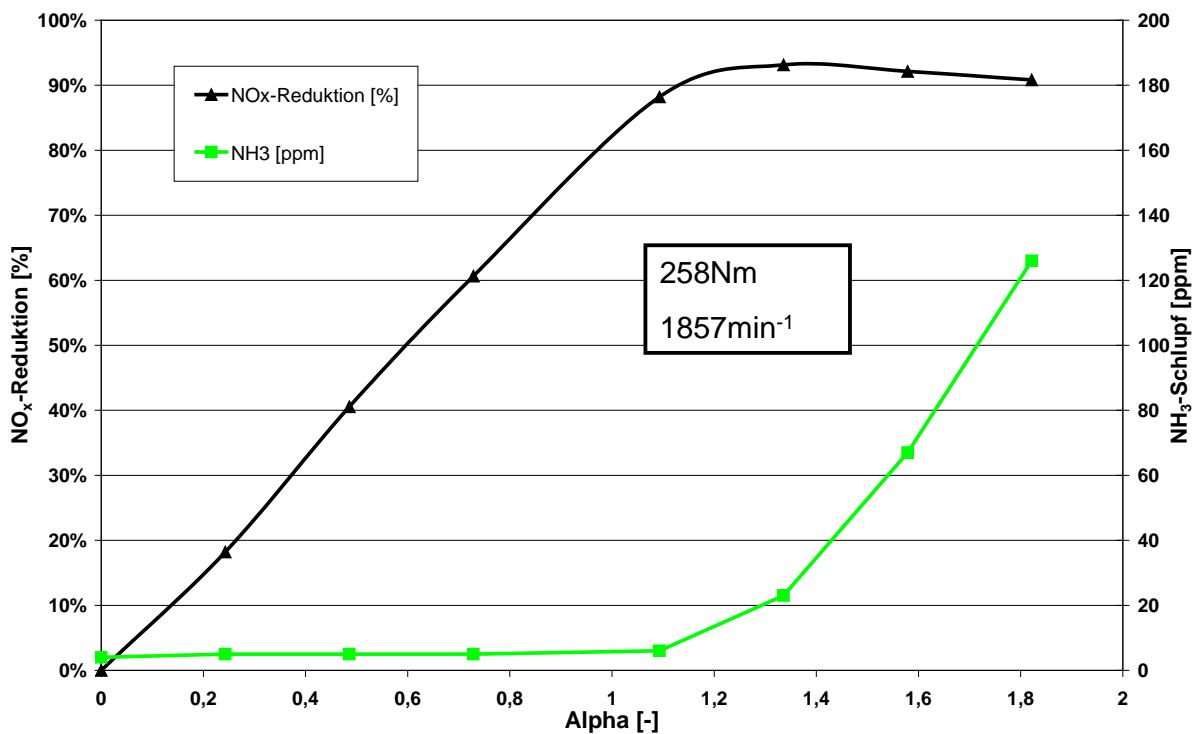


Abbildung 44: Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 3

Im Prinzip zeigt sich das gleiche Bild wie in den vorangegangenen Fällen. Das Maximum der Stickoxidumsatz liegt etwa bei  $\alpha = 1,34$  und liegt mit 93% etwas unter den Werten von Betriebspunkt 1 und 2. Nach dem Maximum in der Umsatzrate sinkt die Stickoxidreduktion nur leicht ab und erreicht bei  $\alpha = 1,8$  einen Wert von 91%. Die Ammoniakkonzentration nach dem SCR-Katalysator fängt ebenfalls wieder bei  $\alpha = 1,1$  merklich zu steigen an. Bei  $\alpha = 1,34$  liegt man mit 23ppm Ammoniak bereits auf dem Niveau des gesetzlichen Grenzwerts von 25ppm. Auffällig ist der daran anschließende rasche Anstieg der Ammoniakkonzentration bei höheren Dosieraten. Bei  $\alpha = 1,8$  ergibt sich bereits ein Ammoniakschlupf von 126ppm. Offensichtlich haben die geringeren Abgastemperaturen in diesem Betriebspunkt bereits einen Einfluss auf die Umsatzraten in SCR- und Ammoniaksperkkatalysator.

#### 8.4.4 Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf im Punkt 4

Der vierte vermessene Punkt entspricht einem Betriebspunkt bei oberer Teillast und einer Drehzahl von  $1857 \text{ min}^{-1}$ . Die Abgastemperatur vor dem SCR-Katalysator betrug  $380^\circ\text{C}$ . Abbildung 45 zeigt wieder den Zusammenhang zwischen Stickoxidreduktion, Ammoniakschlupf und dem Feedverhältnis  $\alpha$  bei stufenweiser Erhöhung der Harnstoffzufuhr.

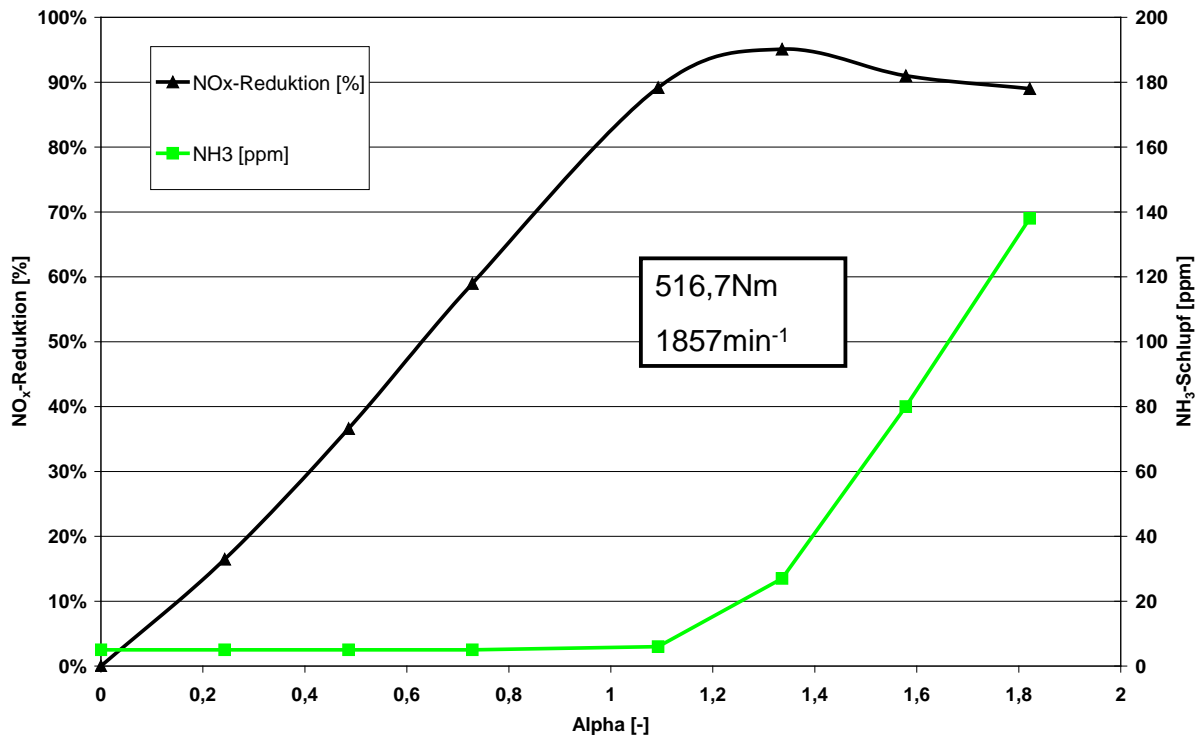


Abbildung 45: Stickoxidreduktion und Ammoniakschlupf in Stationärpunkt 4

Das Maximum der Stickoxidreduktion ergibt sich auch hier wieder bei  $\alpha=1,34$  mit 95%. Bei weiterer Erhöhung der Harnstoffzufuhr sinkt dann die Stickoxidreduktion auf 89% bei  $\alpha=1,8$  ab. Wie schon in den drei vorangegangenen Beispielen beginnt auch hier die Ammoniakkonzentration erst bei  $\alpha=1$  signifikant zu steigen. Bei höherer Harnstoffdosierung kommt es allerdings zu einem raschen Anstieg des Ammoniakschlupfes. Bei  $\alpha=1,34$  erreicht der Ammoniakschlupf bereits einen Wert von 27ppm und steigt dann auf 138ppm bei  $\alpha=1,8$  an.

#### 8.5 Untersuchung der Stickoxidreduktion und des Ammoniakschlupfes in 4 stationären Betriebspunkten bei einer konstanten Abgastemperatur von $330^\circ\text{C}$

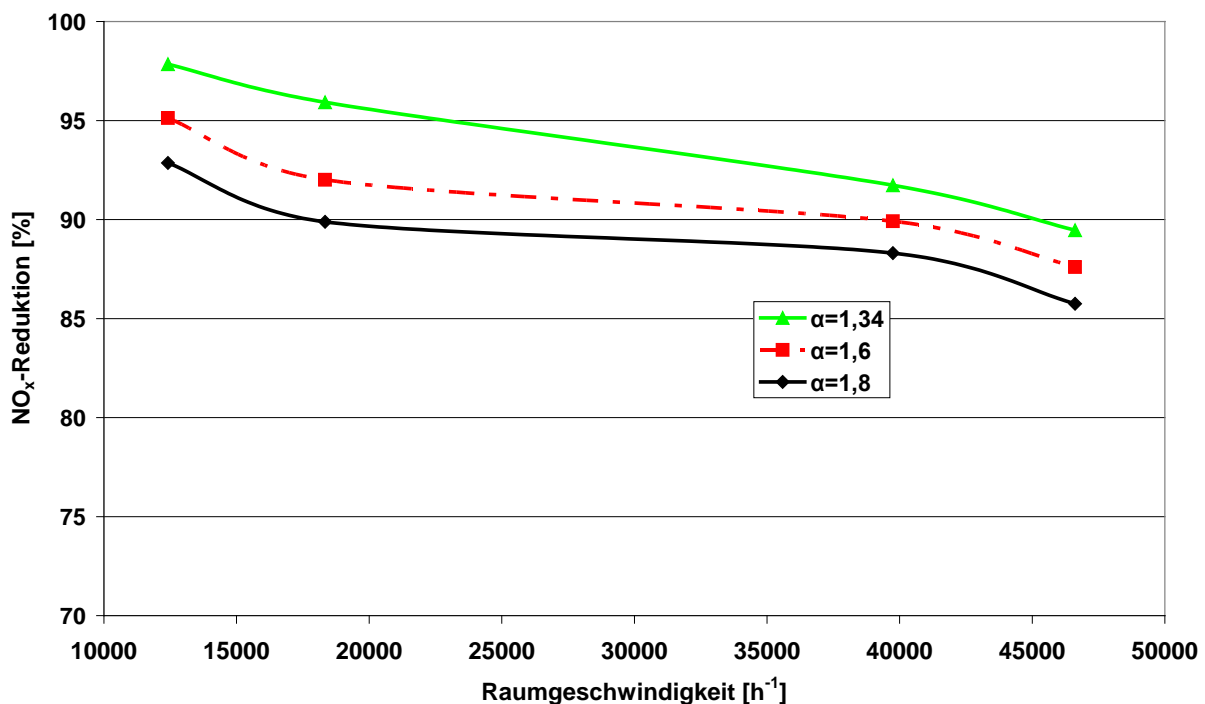
Zum Abschluss wurden noch die Stickoxidreduktion und der Ammoniakschlupf in Abhängigkeit von den verschiedenen im Katalysator auftretenden Raumgeschwindigkeiten bei Harnstoffüberdosierung untersucht. Um für diese Messungen den Einfluss der Abgastemperatur auf den Stickoxidumsatz auszuschalten, wurden 4 Motorbetriebspunkte ausgewählt, die jeweils eine gleiche Abgastemperatur von  $330^\circ\text{C}$  aber unterschiedliche Abgasvolumenströme und damit unterschiedliche Raumgeschwindigkeiten im Katalysator aufwiesen. Für diese Betriebspunkte wurde zuerst eine Basisvermessung der Stickoxidemissionen ohne Harnstoffeindosierung vorgenommen, und zwar wie schon bei allen Messungen vorher, mit angebautem SCR-Katalysator und

einer Messgasentnahme nach dem Katalysator. Danach wurden die Punkte mit drei verschiedenen Feedverhältnissen von  $\alpha=1,34$ ;  $\alpha=1,6$  und  $\alpha=1,8$  nochmals vermessen und die Stickoxidreduktion und der Ammoniakschlupf in den einzelnen Betriebspunkten festgestellt. Bei den Messungen wurde wieder der jeweilige Betriebspunkt so lange gehalten bis sich bei den Emissionen ein stationärer Zustand eingestellt hatte. Dabei musste darauf geachtet werden die Abgastemperatur von  $330^{\circ}\text{C}$  wieder möglichst genau einzuhalten. Die Wahl der Betriebspunkte mit den zugehörigen Raumgeschwindigkeiten ist in folgender Tabelle dargestellt.

Drehmoment	Drehzahl	Raumgeschwindigkeit
390 Nm	$1075 \text{ min}^{-1}$	$12411 \text{ h}^{-1}$
401 Nm	$1400 \text{ min}^{-1}$	$18336 \text{ h}^{-1}$
535 Nm	$2095 \text{ min}^{-1}$	$39750 \text{ h}^{-1}$
555 Nm	$2274 \text{ min}^{-1}$	$46615 \text{ h}^{-1}$

**Tabelle 12:** Untersuchte Motorbetriebspunkte und zugehörige Raumgeschwindigkeiten

Die Abbildung 46 zeigt die Stickoxidreduktion für die verschiedenen Dosieraten  $\alpha=1,34$ ;  $\alpha=1,6$  und  $\alpha=1,8$  über der Raumgeschwindigkeit bei einer Abgastemperatur von  $330^{\circ}\text{C}$ .

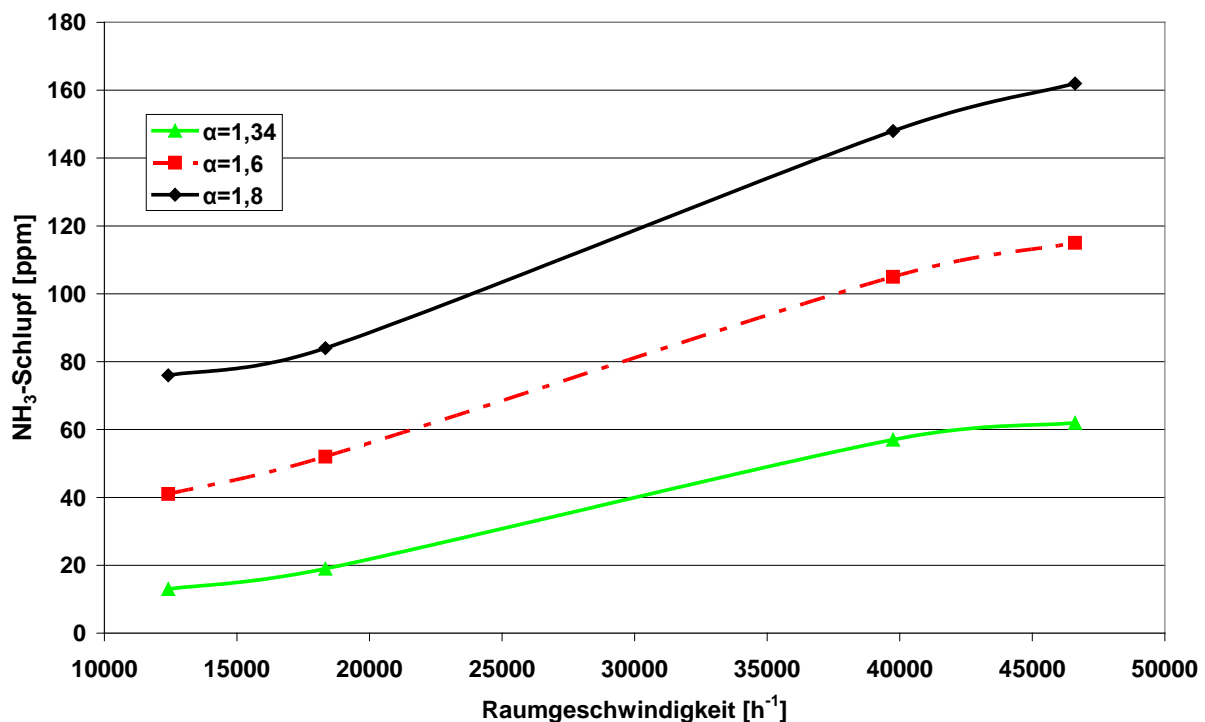


**Abbildung 46:** Stickoxidreduktion bei  $T_{\text{Abgas}}=330^{\circ}\text{C}$  für verschiedene Feedverhältnisse

Der Stickoxidumsatz in den einzelnen Betriebspunkten nimmt hier auch bei Überdosierung mit steigender Raumgeschwindigkeit d.h. geringerer Verweildauer des Abgases im Katalysator ab. Nach unserer Messung treten bei einer bestimmten Raumgeschwindigkeit bei Überdosierung bei den höheren Dosieraten niedrigere Stickoxidumsätze zutage als bei den niedrigeren Dosieraten. So hat man in diesem Fall bei allen Raumgeschwindigkeiten bei  $\alpha=1,34$  die höchsten Reduktionsraten und bei

$\alpha=1,8$  die niedrigsten Reduktionsraten. Dies hat sich auch schon bei der im vorherigen Abschnitt besprochenen Vermessung der vier Stationärpunkte im Bereich der Harnstoffüberdosierung gezeigt. Auch hier wurde ein Absinken der Stickoxidumwandlung bei einer Steigerung des Feedverhältnisses über  $\alpha=1,34$  beobachtet.

Neben den Stickoxidreduktionen wurde auch der Ammoniakverlust in den einzelnen Messpunkten bestimmt. Abbildung 47 zeigt die Ammoniakkonzentrationen in ppm für die verschiedenen Feedverhältnisse über der Raumgeschwindigkeit bei konstanter Abgastemperatur von 330°C.



**Abbildung 47:** Ammoniakkonzentrationen bei  $T_{\text{Abgas}}=330^\circ\text{C}$  für verschiedene Feedverhältnisse

Die Ammoniakkonzentration hinter dem SCR-Katalysator steigt dabei über der Raumgeschwindigkeit an. Dies könnte sowohl auf den besseren Stickoxidumsatz bei kleineren Raumgeschwindigkeiten im SCR-Katalysator als auch einer höheren Effektivität des Ammoniak-Sperrkatalysators bei kleinen Raumgeschwindigkeiten zurückzuführen sein. Absolut gesehen ist natürlich der Ammoniakverlust bei höheren Feedverhältnissen für die jeweiligen Raumgeschwindigkeiten höher. Der Ammoniakverlust bei  $\alpha=1,6$  und  $\alpha=1,8$  nimmt auch bei geringen Raumgeschwindigkeiten bereits Werte an, die wesentlich höher liegen als es der gesetzliche Grenzwert vorschreibt.

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde auf dem Transientenprüfstand des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU-Graz ein SCR-Katalysatorsystem aufgebaut und in Betrieb genommen. In einer anfänglichen Literaturstudie wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Reduktionsmittelbereitstellung und -einbringung ins Abgassystem näher beleuchtet und die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme untersucht. Auf Basis dieser Vorarbeiten wurde dann ein Dosiersystem für den Prüfandaufbau ausgewählt. Es handelt sich dabei um ein druckluft-

loses Dosiersystem der Firma BOSCH, auf AdBlue-Basis, wie es bereits auch im Nutzfahrzeugsbereich in der Serie verwendet wird. Damit hatte man ein technisch bereits ausgereiftes System zur Verfügung und konnte sich auf die Aufgabe konzentrieren auf dem Motorprüfstand ein funktionierendes Meßsystem zur Vermessung von SCR-Katalysatoren aufzubauen.

Eine der Aufgaben beim Aufbau des Systems war es auch, die Ansteuerung des Dosiersystems so zu gestalten dass man unabhängig von einer elektronischen Motorsteuerung war, und die Harnstoffdosieraten autark vorgeben konnte. Als Motor wurde deshalb ein Nutzfahrzeugdieselmotor mit einer rein mechanisch gesteuerten Dieleinspritzanlage ausgewählt. Der verwendete Motor lag von seinen Stickoxidemissionen etwas schlechter als der EURO 3-Grenzwert und war somit sehr gut für diese Untersuchungen.

Auf dem Prüfstand sollten zwar in erster Linie stationäre Vermessungen zur Beurteilung der Eigenschaften von SCR-Katalysatoren für Nutzfahrzeuge vorgenommen werden, das Meßsystem sollte aber auch für zukünftige transiente Messungen geeignet sein. Da eine Erfassung des Ammoniakschlupfes ein zentrales Kriterium zur Beurteilung eines SCR-Katalysators darstellt, war es notwendig ein Meßsystem zur Ammoniakmessung anzuschaffen und für den Motorprüfstand zu adaptieren. Die Ammoniakmessung machte am Anfang einige Probleme, so dass die ersten Stationärmessungen in den ESC-Punkten mit Variation der Harnstoffeindosierung noch ohne Ammoniakmessung vorgenommen werden mussten. In weiterer Folge wurden diese Probleme aber behoben und bei den folgenden Messungen konnte am Prüfstand auch der Ammoniakschlupf erfasst werden.

Bei den Vermessungen in den ESC-Punkten mit einer Variation der Harnstoffdosierung hat sich gezeigt, dass man mit diesem Motor bereits bei  $\alpha$  von 0,9 den EURO 5-Grenzwert für die Stickoxide erfüllen würde. Das heißt mit einer in allen Punkten konstanten Harnstoffeindosierung von  $\alpha=0,9$  in den ESC-Punkten könnte man einen Motor in den Stickoxidemissionen vom Euro 3-Niveau auf EURO 5-Niveau bringen. Dabei muss aber erwähnt werden dass zum Zeitpunkt dieser Messungen das Ammoniakmeßsystem am Prüfstand noch nicht einsatzbereit war, und daher keine Informationen über den Ammoniakschlupf vorliegen. Es ist zwar aus den aus späteren Messungen mit Feedverhältnis  $\alpha=1,2$  ersichtlich dass hier die Ammoniakemissionen in den einzelnen ESC-Punkten entweder unter dem Grenzwert von 25ppm, oder nur knapp darüber liegen, und somit für Harnstoffeindosierungen mit  $\alpha < 1$  keine zu hohen Ammoniakkonzentrationen zu erwarten sind, trotzdem sollte dies bei einer zukünftigen Vermessung eines Katalysators auch für Feedverhältnisse unter 1 noch einmal überprüft werden.

Nach den stationären Vermessungen der ESC- und ARTEMIS-Punkte in Hinblick auf die Stickoxidreduktion bei verschiedenen Harnstoffdosierungen wurden noch einige ausgewählte Stationärpunkte mit Feedverhältnissen zwischen 0, und 1,8 untersucht. Auffällig an den Ergebnissen der Messungen war dabei vor allem ein Absinken des Stickoxidumsatzes bei Überdosierung, d.h. bei Feedverhältnissen über 1. Dies würde bedeuten, dass trotz höherem Reduktionsmittelangebot die Effizienz absinkt. Dieses Verhalten ist möglicherweise auf Oxidationsvorgänge im Ammoniaksperrkatalysator zurückzuführen. Da wir bei unseren Versuchen die Emissionen nur nach dem SCR-Katalysator erfassen können, war eine detailliertere Untersuchung dieses Phänomens nicht möglich. Weitere Untersuchungen z.B. an einem SCR-Katalysator ohne



integrierten  $\text{NH}_3$ -Sperrkatalysator könnten dabei in Zukunft eventuell nähere Erkenntnisse bringen.

Ein Ziel der Messungen war es auch, grundlegende Erkenntnisse über das zeitliche Verhalten des Katalysators bzw. des gesamten Systems in Hinblick auf einen Transientbetrieb des SCR-Katalysatorsystems in einem Fahrzeug zu erhalten. Aufgrund der großen Dimensionierung des SCR-Katalysators im Vergleich zum Hubvolumen unseres Versuchsmotors und des guten Speichervermögens dieses Katalysatortyps ergab sich vor allem in den Bereichen mit Feedverhältnissen unter 1 oft ein sehr träges Ansprechverhalten des Systems. Die Zeiten bis zum Stationärwerden eines Zustands lagen zumeist im Minutenbereich. Vor allem bei Temperaturen im Bereich unter  $300^\circ\text{C}$  ergaben sich oft Haltezeiten von 20 Minuten und mehr bis zum Stationärwerden des Messergebnisses. Nach dem Start der Eindosierung erfolgte zunächst ein rasches Absinken der Stickoxide, die dann bei längerem Halten der Harnstoffzufuhr anstiegen, um dann einen stationären Wert zu erreichen. Während der Harnstoffeindosierung blieb die Ammoniakkonzentration ebenfalls nicht konstant, sondern steigerte sich von anfangs wenigen ppm auf einen von der Dosierrate abhängigen stationären Endwert in der gleichen Zeitspanne. Je höher die Harnstoffdosierrate desto höher auch dieser Ammoniakendwert.

Im transienten Betrieb eines Motors mit raschen Lastwechseln, wie er im Fahrzeugbetrieb auftritt, spielt das Ammoniakspeichervermögen des Katalysators eine besondere Rolle. Bei z.B. einem Wechsel des Motorbetriebszustands von einem Betriebspunkt mit hohen  $\text{NO}_x$ -Rohemissionen auf einen solchen mit niedrigen  $\text{NO}_x$ -Emissionen, würde es bei Beibehalten der Harnstoffdosiermenge des vorigen Lastpunktes durch z.B. eine langsamere Reaktion des Dosiersystems zu einer Überdosierung kommen und das überschüssige Ammoniak müsste ohne die Fähigkeit des Katalysators Ammoniak zu speichern nur durch den Sperrkatalysator wieder abgebaut werden. Durch die Speicherfähigkeit des Katalysators besteht die Möglichkeit in solchen Phasen Ammoniak im Katalysator zwischenzuspeichern, das im umgekehrten Fall des Wechsels des Betriebszustandes von einem Betriebspunkt mit niedrigen  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu einem solchen mit hohen  $\text{NO}_x$ -Emissionen wieder freigesetzt werden und zur Stickoxidumwandlung beitragen kann. Dies setzt allerdings voraus das der Katalysator zu diesen Zeitpunkten genügend Speicherfähigkeit aufweist, bzw. im anderen Fall genug Ammoniak gespeichert ist. Da das Speichervermögen temperaturabhängig ist, ergibt sich auch hier wiederum eine Abhängigkeit vom Motorbetriebspunkt. Diese Phänomene könnten aber bei der Ausarbeitung einer Doserstrategie für den transienten Betrieb des Katalysators in einem Fahrzeug berücksichtigt werden.

Was die Untersuchungen an unserem Institut betrifft, so ist geplant diese in nächster Zukunft auf den Transientbetrieb auszudehnen und dazu weitere Messungen mit dem Katalysatorsystem auf dem Motorprüfstand bzw. eventuell in einem Fahrzeug durchzuführen. Dazu sollen begleitend auch Untersuchungen des Systemverhaltens bei tieferen Temperaturen durchgeführt werden.

## 10 Literatur

- [1] Robert Bosch GmbH, Dieselmotor-Management ,Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2004 - ISBN 3-528-23873-9
- [2] Jacob, E., Perspektiven der mobilen SCR-Technik, Beiträge zum 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006, [http://www.emitec.de/download/library/de/061030\\_Aachen\\_SCR\\_deutsch\\_final.pdf](http://www.emitec.de/download/library/de/061030_Aachen_SCR_deutsch_final.pdf)
- [3] Frank, W.; Hühwohl, G.; Maurer, B., SCR-Technologie für Nutzfahrzeuge In: MTZ 65 (2004), Nr. 9, S. 632–639
- [4] Hernier, M. M., Kompakte Dosierverfahren für den mobilen Einsatz zur Stickoxidminderung sauerstoffhaltiger Abgase nach dem Prinzip der selektiven katalytischen Reduktion (SCR), Dissertation RWTH Aachen, 2002
- [5] Jacob, E; Hilbrig, F: FVV-Forschungsbericht: Untersuchung der NO<sub>x</sub>-Reduktion im Abgas von Dieselmotoren durch SCR-Katalysatoren – Instationär-SCR. Heft 506 (1992), Teil 1: Screening von SCR- und Oxidationskatalysatoren im Labortest Lopperhof, G.; Hühwohl, G.; Li, Q.: F: FVV-Forschungsbericht: Untersuchung der NO<sub>x</sub>-Reduktion im Abgas von Dieselmotoren durch SCR-Katalysatoren – Instationär-SCR. Heft 506 (1992), Teil 2: Stationäre und instationäre Motorprüfstandsversuche
- [6] Buchholz, F., Einsatz von festem Harnstoff als Reduktionsmittel für die NO<sub>x</sub>-Minderung nach dem SCR-Verfahren, Dissertation TH Karlsruhe, 2000
- [7] Herr, A., Thermische Zersetzung von Festharnstoff für mobile SCR-Katalysatoranwendungen, Dissertation TU Kaiserslautern, 2004
- [8] Käfer, S., Trockenharnstoff-SCR-System und Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit Dieselmotor, Dissertation TU Kaiserslautern, 2004
- [9] Mayer, T., Feststoff-SCR-System auf Basis von Ammoniumcarbamat, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2005
- [10] Teigeler, M., Experimentelle Untersuchungen zur nichtkatalytischen Reduzierung der Stickoxidemissionen mit Kohlenwasserstoffen und Harnstoff am aufgeladenen Nutzfahrzeug-Dieselmotor, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998
- [11] Hilite-SCR-System: Homepage der Firma Hydraulik Ring GmbH <http://www.hydraulik-ring.com>
- [12] Waldbüßer, N., NO<sub>x</sub>-Minderung am Pkw-Dieselmotor mit einem Kombinationssystem zur Abgasnachbehandlung, Dissertation TU Kaiserslautern, 2005
- [13] Bettoni, F.R., Untersuchungen zum stationären und dynamischen Verhalten eines Entstickungssystems nach dem SCR-Prinzip mit realem Dieselaabgas, Dissertation ETH Zürich, 1997
- [14] Maurer, B., NO<sub>x</sub>-Verminderung nach dem SCR-Verfahren mit Hilfe von stickstoffhaltigen Reduktionsmitteln, Dissertation Technische Universität Karlsruhe, 1997
- [15] Kunz, D., Abgasanalytik bei Dieselmotoren mit Anlagen zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden, Dissertation Universität Kaiserslautern, 1996

- [16] Elsener, M.; Geering, H.P.; Jaussi, F., Aufbau und Vermessung eines DeNO<sub>x</sub>-Systems auf der Basis von Harnstoff-SCR. In: MTZ 64 (2002), Nr. 11, S. 966-971
- [17] Koebel, M.; Elsener, M.; Madia, G.: NO<sub>x</sub>-Verminderung in Dieselabgasen mit Harnstoff-SCR bei tiefen Temperaturen. In: MTZ 62 (2001), Nr. 2, S. 166–175
- [18] Leippe, G.; Lenzen, B.; Spurk, P.: Neues System zur Messung von Stickstoffkomponenten im Einsatz an SCR-Katalysatoren. In: MTZ 65 (2004), Nr. 5, S. 392-399
- [19] Firmenschrift BOSCH, Installation Guideline DENOXTRONIC 2 for Commercial Vehicles
- [20] Präsentation der Firma ABB, Limas 11HW
- [21] GRUNDFOS SCR Dosing Systems.pdf, Homepage der Firma Grundfos: <http://net.grundfos.com/doc>
- [22] Final\_Report\_ARTEMIS\_WP400\_final.pdf
- [23] Präsentation der Firma BOSCH: DNOX2 presentation 2006-07-04.pdf
- [24] Präsentation Müller, Werner, TU-Kaiserslautern: Festharnstoff-SCR.pdf
- [25] Krüger, M.; Nisius, P. ;Scholz, V.: Ein kompaktes Feststoff-SCR-System. In: MTZ 64 (2003), Nr.6, S. 482-491
- [26] EU-Richtlinie 2005-78-EG