



Diplomarbeit

Applikation eines SCR-Nachrüstsystems in einen Stadtbus

Von:

Harald Scheer

Eingereicht am:

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
der Technischen Universität Graz

Institutsvorstand:

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

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger

Dipl. Ing. Michael Zallinger

Graz, 22.März 2010

Vorwort

Diese Diplomarbeit „Applikation eines SCR-Nachrüstsystems in einen Stadtbus“ entstand im Rahmen eines Leitprojekts des Bundesministeriums für Verkehr und Innovation (BMVIT) mit dem Projekttitel Innovative Clean Urban Transport (ICUT) im Zeitraum von Juni 2009 bis März 2010 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 für das Ermöglichen dieser Diplomarbeit bedanken.

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

Für die Arbeiten am Rollenprüfstand möchte ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Thomas Vuckovic recht herzlich bedanken.

Für die Weiterentwicklung der Dosierstrategie möchte ich mich bei den Herren Prof. Martin Horn und Dipl.-Ing. Markus Reichhartinger von der Alpen-Adria Universität Klagenfurt und für die zur Applikation der SCR-Komponenten notwendigen gestellten Räumlichkeiten bei der Werkstättenleitung der Grazer Verkehrsbetriebe recht herzlich bedanken.

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.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinem Vater, für die Unterstützung während meiner Ausbildung recht herzlich bedanken.

Graz, März 2010

Harald Scheer

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit hatte das Ziel, einen von den Grazer Verkehrsbetrieben zur Verfügung gestellten Stadtbus mit einem Abgasnachbehandlungssystem nachzurüsten. Dabei wurde ein Verfahren zur selektiven-katalytischen-Reduktion (SCR), das auf die Reduzierung der Stickoxide (NO_x) im dieselmotorischen Abgas abzielt, verwendet.

Darauffolgend bestand unter anderem die Aufgabe darin, ein bereits im transienten Betrieb getestetes SCR-System in einen Stadtbus mit Euro II Abgasnorm einzubauen und eine dazugehörige Dosierstrategie für den Betrieb mit dem Stadtbus zu applizieren. Dieses SCR-System, bestehend unter anderem aus dem SCR-Katalysator, einem Harnstoff-Dosiersystem, der zugehörigen Steuerung und den zur Funktion notwendigen Sensoren, musste in den Stadtbus integriert und getestet werden.

Der Einbau der SCR-Katalysatorelemente erfolgte dabei von den am Projekt beteiligten Firmen Roth Technik Austria und CERAM Catalysts. Der Katalysator wurde in einen gesondert angefertigten Schalldämpfer integriert. Das Harnstoff-Dosiersystem selbst wurde von der Firma BOSCH zur Verfügung gestellt und entspricht einem in LKW serienmäßig angewandten System. Außerdem war die bestehende Abgasanlage so zu modifizieren, dass der SCR-Katalysator und das Dosiersystem in den bestehenden Bauraum im Bus integriert werden können. Dabei musste darauf geachtet werden, dass der Einbau der jeweiligen Komponenten nach den Einbau- und Konstruktionsrichtlinien der jeweiligen Hersteller erfolgt, um die Funktionen des Systems nicht einzuschränken.

Um eine objektive Übersicht über die Platzverhältnisse und Anschlussmaße zu ermöglichen, wurde eine Recherche über die bestehende Abgasanlage, Platzverhältnisse, Anschlussmaße und Abmessungen durchgeführt und Zeichnungen der Komponenten konstruiert.

Die Dosiersteuerung wurde bereits bei vorhergehenden Projekten adaptiert und musste unter Berücksichtigung verschiedenster Randparameter für den instationären und realen Stadtbetrieb eines Stadtbusses adaptiert werden.

Am Beginn der Prüfstandsversuche wurden mehrere Prüfstandsläufe durchgeführt. Dies hatte zum einen den Grund, die Charakteristik und das Temperaturverhalten des SCR-Katalysators und andererseits die Konvertierung des Ammoniaksperrkatalysators zu bestimmen um die jeweilige Dosierstrategie bewerten zu können.

Am Ende der Versuchsreihe wurde mit dem Stadtbus eine reale Messfahrt in der Grazer Innenstadt unternommen. Dabei wurden alle notwendigen Kenndaten aufgezeichnet, ausgewertet und die daraus resultierenden Konvertierungsraten für den realen Stadtbetrieb berechnet.

Abstract

This thesis had the objective, to retrofit a city bus from the Grazer transportation services with an exhaust aftertreatment system. To achieve this, a special procedure called **Selective-Catalytic-Reduction (SCR)** was used. Hereby the focus was to reduce the nitrogen oxides (NO_x) in the diesel engine exhaust.

Based on this, another task was to implement in a city bus with Euro II emission standard the tested transient operating SCR-System as well as the corresponding dosing strategy. This SCR-System, which had to be implemented and tested in the city bus, consists amongst others of a SCR-Catalyst, a Urea-Dosing system, an associated control system and necessary sensors.

The installation of the SCR-Catalyst was carried out by the firms Roth Technik Austria and CERAM Catalysts, two companies that were involved in the project. The components were integrated into a separately build exhaust silencer in the SCR-System. The urea dosing system itself was provided by the company BOSCH. The dosing system which can also be found in a standard SCR-System used in series-production trucks. The existing exhaust system had to be modified in such a way that the SCR-Catalyst and the Dosing System could be installed in the city bus. For the implementation the design and construction guidelines of the various components had to be taken into consideration in order to ensure a smoothly running system.

To provide an objective overview on the space and connection dimensions of the components, a research about existing exhaust systems as well as connection sizes and dimensions was conducted. Furthermore, drawings of the components were constructed.

The dosing control system has already been elaborated in previous projects and had to be adapted, under the consideration of various parameters, to a transient and real operating city bus.

At the beginning of the bench testing several test runs were carried out. The reason was on the one hand to determine the characteristics and temperature variations of the SCR-Catalyst and on the other hand to identify the conversion of the Ammonia Catalyst as well as to evaluate the respective dosing strategy. At the end of the bench testing, a test drive with the city bus in the center of Graz was conducted. All necessary data was recorded and analyzed. Finally, the resulted conversion rates were calculated.

Inhaltsverzeichnis

1	Definitionen	15
2	Abkürzungen	16
3	Einleitung.....	17
4	Allgemeines zum SCR-Verfahren.....	18
4.1	Komponenten eines SCR-Systems	19
4.1.1	Temperatursensoren	20
4.1.2	NO _x -Sensoren	20
4.1.3	Tanksystem.....	20
4.1.4	Fördermodul	21
4.1.5	Dosiermodul	21
4.1.6	Steuerungseinheit, Dosiersteuerungsgerät	21
4.2	Prozessschritte des SCR-Verfahrens.....	22
4.3	Chemismus.....	23
4.3.1	Bereitstellung von Ammoniak	23
4.3.2	SCR-Reaktionsverfahren.....	24
4.4	Temperaturverhalten	25
4.5	Allgemeines zum Katalysatoraufbau	27
4.6	Wichtige Katalysatorkenngrößen.....	28
4.6.1	Der Konvertierungsgrad K(i)	28
4.6.2	Ansringtemperatur Ta	28
4.6.3	Raumgeschwindigkeit RG.....	29
4.6.4	Verweilzeit t _v	29
4.7	Katalysatoralterung	29
4.8	Abhängigkeit der Konvertierung von der Abgastemperatur.....	30
4.9	SCR-Katalysatoren	31
4.9.1	Platin basierende Katalysatoren	32
4.9.2	Vanadium / Titan basierende Katalysatoren	32
4.9.3	Katalysatoren auf Zeolith-Basis	34
4.9.4	Oxidationskatalysator	35
4.9.5	Hydrolysekatalysator.....	36
4.10	Niedertemperaturverhalten eines SCR-Katalysatorsystems	39
4.11	Aktuelle SCR-Katalysatoren und deren Bestandteile	40
4.11.1	Kombination von Systemen zur PM-Minderung und NO _x -Reduktion.....	40
5	Bestimmungsgrößen der Harnstoffeindosierung	42
5.1	Reaktionsgleichungen für die Ermittlung der erforderlichen Eindosiermenge	42

5.2	Ermittlung der stöchiometrischen Eindosiermenge	43
5.2.1	Diverse Vereinfachungen für die Ermittlung der Eindosiermenge	43
5.2.2	Ermittlung der Stickoxidrate aus der Abgasanalyse	44
5.2.3	Berechnung des Massenstroms an Harnstoff-Wasserlösung für $\alpha=1$	45
5.2.4	Berechnung der Harnstoff-Eindosierung für ein beliebiges α	45
6	Konstruktion und Integration des SCR-Systems in den Stadtbus	46
6.1	Randbedingungen für den Einbau eines SCR-Systems	47
6.1.1	Einbausituation des gesamten SCR-Systems	47
6.2	Komponenten und ihre Funktionsweise.....	49
6.2.1	Steuerungshardware	50
6.2.2	SCR-Katalysator.....	52
6.2.3	NO _x -Sensoren	55
6.2.4	Temperatursensoren	56
6.2.5	HFM-Heißfilmanemometer.....	57
6.2.6	AdBlue-Reduktionsmittel-Tank.....	58
6.2.7	Fördermodul	60
6.2.8	Dosiermodul /-ventil	61
7	Prüfstands Aufbau und Versuchsfahrzeug	63
7.1	Technische Daten des Rollenprüfstands	63
7.1.1	Betriebsarten.....	64
7.2	Abgasanalyse	64
7.3	Versuchsfahrzeug.....	65
7.3.1	Technische Daten des Fahrzeugs	65
7.3.2	Technische Daten des Motors	65
8	Dosierstrategien.....	66
8.1	Steuerung der Dosiermenge	68
8.2	Regelung der Dosiermenge.....	69
9	Messungen auf dem Prüfstand und Auswertung.....	70
9.1	Überblick über die Messungen auf dem Rollenprüfstand.....	71
9.1.1	Stationäre Versuche.....	72
9.1.2	Identifikationsversuche	75
9.1.3	Grazer Zyklus	76
9.1.4	HBEFA-Stadtzyklus.....	79
9.2	Vergleich Dosierstrategien.....	81
9.3	Untersuchung des Reduktionsmittelschlupfes und der Harnstoffablagerung am SCR-Katalysator	83

9.3.1	Bestimmung der Konvertierungsrate des Ammoniaksperrkatalysators	83
9.3.2	Berechnung der NH_3 -Konvertierungsrate am Ammoniaksperrkatalysators bei $\text{Alpha}=1.5$	86
9.3.3	Berechnung der NH_3 -Konvertierungsrate am Ammoniaksperrkatalysator bei $\text{Alpha}=3$	87
10	Realer Test als Messfahrt in der Stadt.....	89
10.1	Ergebnisse aus der Messfahrt.....	91
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	94
12	Literatur.....	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SCR-System in einem Kohlekraftwerk 1-Ammoniak (NH_3) Einspritzung 2-SCR-Reaktor; 3-Gasaustritt 4-Reaktor Bypass [Quelle:Hitachi].....	18
Abbildung 2: Beispiel eines SCR-Systems in einer mobilen Anwendung [Quelle:DieselNet].....	18
Abbildung 3: Bestandteile eines Harnstoff-Einspritzsystems A: Fördermodul, B: Dosiermodul. C:Einspritzdüse [Quelle:Bosch]	19
Abbildung 4: Konventionelles SCR-System mit Druckluftunterstützung [Quelle:Bosch GmbH]	20
Abbildung 5: Dosiermodul: Einbausituation im Abgasrohr [Quelle:Bosch].....	21
Abbildung 6: Dosierung und Katalysatoranordnung eines SCR-Systems	22
Abbildung 7:Prozessschritte des SCR-Verfahrens in der mobilen Anwendung [36]	22
Abbildung 8: Notwendige Verfahrensschritte zur Generierung von Ammoniak	23
Abbildung 9: Chemismus bei einem SCR-Katalysator.....	24
Abbildung 10: Typische NO_x -Konvertierung im SCR-Verfahren [36].....	25
Abbildung 11: Einfluss des NO_2 -Anteils auf den NO_x -Umsatz [10]	26
Abbildung 12: Aufbau eines Trägerkatalysators [Quelle: Emitec].....	27
Abbildung 13:Keramikträger (links) und Metallträger (rechts) [Quelle: Emitec]	27
Abbildung 14: Thermische Alterung eines $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ Katalysators [Quelle:DieselNet].....	30
Abbildung 15: Temperaturbereich verschiedener SCR-Katalysatoren [Quelle:DieselNet].....	31
Abbildung 16: NO_x -Umsatz von SCR-Katalysatoren mit unterschiedlicher V_2O_5 - Massenbeladung in Abhängigkeit von der Temperatur bei $\text{Alpha}=1,0$ - Raumgeschwindigkeit=18000 l/h [38].....	32
Abbildung 17: Einfluss von Schwefeltrioxid (SO_3) auf einen V_2O_5 -SCR-Katalysator [22].....	33
Abbildung 18: Vergleich DeNO_x -Konvertierungsraten zwischen einem $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$, Cu-ZSM5 und Fe-ZSM5 SCR-Katalysator, $\text{RG} = 52000$ l/h [37].....	34
Abbildung 19: NO_x -Umsatz am SCR-Katalysator in Abhängigkeit vom NO_2 -Anteil [17].....	35
Abbildung 20: Einfluss von NO_2 auf die Hydrolyse von HNCO zu NH_3 [28].....	37
Abbildung 21: Nebenstrom Hydrolysesystem bei einem Hydrolysekatalysator [24].....	37
Abbildung 22:Optimierter Hydrolyse-Katalysator im Vergleich zu konventionellem Produkt (ESC-Test) [35].....	38
Abbildung 23:“Grazer Zyklus“, Abgastemperatur- und Fahrgeschwindigkeitsprofil eines Stadtbusses der Abgasgesetzgebung-EU3.....	39
Abbildung 24: Kombinationssystem zur NO_x -und Partikelreduzierung für EU V [Quelle: Emitec, MAN]	40

Abbildung 25: Nutzfahrzeugausführung eines kombinierten Systems [Quelle: MAN Nutzfahrzeuge AG].....	41
Abbildung 26: Prinzipsskizze zur Ermittlung der erforderlichen Reduktionsmittelmenge	42
Abbildung 27: Schematische Skizze der Einbausituation des SCR-Systems im Stadtbus (Ansicht: hinten)	46
Abbildung 28: Einbaulage der SCR-Steuerung im Innenraum des Stadtbusses.....	47
Abbildung 29: SCR-Gesamtsystem Bosch Denoxtronic 2 [5].....	47
Abbildung 30: Einbauhöhenrichtlinie eines SCR-Systems [5].....	48
Abbildung 31: Einbausituation der SCR-Komponenten in den Stadtbus (CAD-Modell)	48
Abbildung 32: Schemenhafter Aufbau der Sensoren des SCR-Systems	49
Abbildung 33: Einbausituation der Sensoren und des Microcontrollerboards	50
Abbildung 34: Spannungsversorgung für das Microcontrollerboard und die zugehörige Sensorik.....	50
Abbildung 35: Microcontrollerboard	51
Abbildung 36: Blockschaltbild des Microcontrollerboards [Quelle: phyCore-167, QuickStart Instructions].....	51
Abbildung 37: Aufbau des SCR-Katalysators	52
Abbildung 38: Vollextrudierter Wabenkörper eines SCR-Katalysatormoduls [CERAM]	52
Abbildung 39: Seitliche Einbausituation des SCR-Katalysators	54
Abbildung 40: Untere Einbausituation am SCR-Katalysator	54
Abbildung 41: Smart NO _x -Sensor SNS14 von Siemens VDO Automotive [Smart NO _x -Sensor "Uninox"].....	55
Abbildung 42: Vorgeschriebene Einbaulage der NO _x -Sensoren [Quelle: Smart NO _x -Sensor "Uninox"].....	55
Abbildung 43: NO _x -Sensoranschlüsse der Steuerungshardware, links:CAN-Schnittstelle, rechts:Spannungsversorgung	56
Abbildung 44: Temperatursensor [Quelle: Delta GmbH].....	56
Abbildung 45: Pt200 Kalibrierkennlinie	56
Abbildung 46: Einbausituation des HFM in den Stadtbus.....	57
Abbildung 47: Kalibrieraufbau für den im Stadtbus eingesetzten Heißfilmanemometer (HFM7).....	57
Abbildung 48: Vergleich der kalibrierten Messung zur nominellen Kennlinie von Bosch	58
Abbildung 49: AdBlue-Tank von der Firma Elkamet, rechts: 3D CAD-Darstellung.....	58
Abbildung 50: links: Einbausituation des Tanks im Bus rechts: Anschluss der Harnstoffleitungen	59
Abbildung 51: Verschiedene Ansichten des Fördermoduls der Denoxtronic 2 [5].....	60

Abbildung 52: Komponenten und Innenleben des Fördermoduls [5].....	60
Abbildung 53: Bosch Dosiermodul (Bild links: Ansicht von vorne rechts: Ansicht von rechts)	61
Abbildung 54: Verbindungsflansch des SCR-Dosierventils am SCR-Katalysator.....	62
Abbildung 55: Stadtbus als Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand.....	63
Abbildung 56: CVS-Anlage [3]	64
Abbildung 57: Anordnung der Ein- und Ausgangssignale für die Bestimmung der Reduktionsmittelmenge am Microcontroller-Board.....	66
Abbildung 58: Schema der Dosierstrategie: Steuerung	68
Abbildung 59: Schema der Dosierstrategie: Regelung	69
Abbildung 60: Bedienungsfeld im Tornado für die CVS-Anlage.....	70
Abbildung 61: SCR Anzeige- und Bedienungsfenster im Tornado und im Stadtbus.....	71
Abbildung 62: NO _x -Konvertierungsraten im stationären Versuch (Alpha=0.15-0.9).....	72
Abbildung 63: Bestimmung der NO _x -Konvertierungskennlinie des SCR-Systems.....	74
Abbildung 64: Alpha und AdBlue-Massenstrom im Identifikationsversuch bei 210°C Abgastemperatur nach SCR-Katalysator	75
Abbildung 65: Stickoxide im Identifikationsversuch bei 210°C Abgastemperatur nach SCR-Katalysator	76
Abbildung 66: Geschwindigkeitsverlauf Grazer Zyklus.....	77
Abbildung 67: Abgastemperaturen im Grazer Zyklus, Dosierstrategie: Steuerung.....	77
Abbildung 68: Stoffmengenstrom im Grazer Zyklus, Dosierstrategie: Steuerung	78
Abbildung 69: NO _x -Konvertierungsrate im Graz Zyklus, Dosierstrategie: Steuerung	78
Abbildung 70: Geschwindigkeitsverlauf des HBEFA-Stadtzyklus	79
Abbildung 71: Abgastemperaturen des HBEFA-Stadtzyklus, Dosierstrategie: Steuerung	80
Abbildung 72: Stoffmengenstrom im HBEFA-Stadtzyklus, Dosierstrategie: Steuerung	80
Abbildung 73: NO _x -Konvertierungsrate im HBEFA Stadtzyklus, Dosierstrategie: Steuerung	81
Abbildung 74: Vergleich der NO _x -Konvertierungsraten, Dosierstrategie: Steuerung	82
Abbildung 75: Vergleich der NO _x -Konvertierungsraten, Dosierstrategie: Regelung	82
Abbildung 76: Schlupftest zur Abschätzung des NH ₃ -Schlupfes: t _{VOR_SCR} =320°C, Alpha=1.5	83
Abbildung 77: Schlupftest zur Abschätzung des NH ₃ -Schlupfes: t _{VOR_SCR} =340°C, Alpha=3	83
Abbildung 78: Ein- und Ausgangskonzentration am SCR-Katalysatorsystem.....	84
Abbildung 79: Harnstoffablagerungen beim SCR-Katalysator	88
Abbildung 80: SCR-Katalysator, Bereich perforiertes Rohr. links:vor Messung, rechts:nach Messung.....	88

Abbildung 81: SCR-Katalysator, Bereich Krümmer. links:vor Messung, rechts:nach Messung	88
Abbildung 82: Messfahrt in der Grazer Innenstadt	89
Abbildung 83: Fahrtübersichtplan der realen Messfahrt	89
Abbildung 84: Geschwindigkeitsprofil der realen Messfahrt	90
Abbildung 85: Abgastemperaturprofil der realen Messfahrt	90
Abbildung 86: Vergleich der eindosierten Ammoniakmenge zwischen den Dosierstrategien bei der realen Messfahrt	91
Abbildung 87: Vergleich der reduzierten Stickoxide zwischen den Dosierstrategien bei der realen Messfahrt.....	92
Abbildung 88: Vergleich des Regelfehlers zwischen den Dosierstrategien bei der realen Messfahrt.....	92
Abbildung 89: Vergleich der Dosierstrategien bei der Messfahrt.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SCR-Katalysatortechnologien [Quelle: DieselNet]	32
Tabelle 2: Normzustand	44
Tabelle 3: Bestandteile des SCR-Katalysatormodule (CERAM)	53
Tabelle 4: Technische Daten des Rollenprüfstands	63
Tabelle 5: Abmessungen und Kenndaten des Versuchsfahrzeugs	65
Tabelle 6: Abmessungen und Motorkenngößen des Versuchsfahrzeugs	65
Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Steuerung.....	68
Tabelle 8: Vor- und Nachteile der Regelung	69
Tabelle 9: Vergleich der Stickoxide (NO _x) in der EU Abgasklassifikation EU II und EU V	71
Tabelle 10: Durchschnittswerte des Grazer Zyklus	76
Tabelle 11: Durchschnittswerte des HBEFA-Stadtzyklus	79
Tabelle 12: Vergleich der Dosierstrategien.....	81
Tabelle 13: Durchschnittswerte der realen Messfahrt.....	91
Tabelle 14: Vergleich der beiden Dosierstrategien bei der Messfahrt	93

Formelverzeichnis

Gleichung 4-1	23
Gleichung 4-2	23
Gleichung 4-3	24
Gleichung 4-4	24
Gleichung 4-5	26
Gleichung 4-6	26
Gleichung 4-7	28
Gleichung 4-8	29
Gleichung 4-9	29
Gleichung 4-10	35
Gleichung 4-11	36
Gleichung 5-1	42
Gleichung 5-2	43
Gleichung 5-3	43
Gleichung 5-4	43
Gleichung 5-5	43
Gleichung 5-6	44
Gleichung 5-7	44
Gleichung 5-8	44
Gleichung 5-9	45
Gleichung 5-10	45
Gleichung 5-11	45
Gleichung 5-12	45
Gleichung 6-1	54
Gleichung 6-2	54
Gleichung 6-3	54
Gleichung 9-1	71
Gleichung 9-2	72
Gleichung 9-3	73
Gleichung 9-4	73
Gleichung 9-5	84
Gleichung 9-6	84
Gleichung 9-7	85
Gleichung 9-8	85
Gleichung 9-9	85

1 Definitionen

AdBlue	Markenname für eine 32,5%-ige Harnstoff-Wasserlösung.
Äquimolar.....	Es besteht ein Verhältnis von zwei verschiedenen Molekülen im Verhältnis von 1:1.
DeNO _x -System	System zur Reduzierung von Stickoxiden
Diesel Nfz.....	Kraftfahrzeug mit Dieselmotor, das zum gewerblichen Personentransport oder Gütertransport dient.
Emissionen	Abgas-Emissionsmenge [g] von limitierten Komponenten (CO, HC, NO _x , Partikel) und nicht limitierten Komponenten (CO ₂ ,CH ₄ , usw.)
Gravimetrische Partikelmessung.	Dient zur integralen Messung der Partikelemission während einer bestimmten Messphase.
ICUT-Projekt.....	Leitprojekt des Bundesministeriums für Verkehr und Innovation (BMVIT) mit dem Projekttitel Innovative Clean Urban Transport
Leichtes Nutzfahrzeug.....	Nutzfahrzeug bis 3,5 Tonnen maximal zulässigem Gesamtgewicht
Off-Road Fahrzeug.....	Geländefahrzeug die in der europäischen Richtlinie (Richtlinie 70/156/EWG) definiert sind.
SCR-System	Gesamte Komponenten zur Reduzierung der Stickoxide im Abgas mittels selektiver katalytischer Reduktion

2 Abkürzungen

(NH ₂) ₂ CO	Harnstoff
CAN-Bus	Controller Area Network-Bus
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
ESC.....	European Stationary Cycle
ETC	European Transient Cycle
EU.....	Europäische Abgasnorm
FTP	Federal Test Procedure
HC	Kohlenwasserstoff
HNCO.....	Isocyansäure
ICUT-Projekt.....	Innovative Clean Urban Transport-Projekt
K(i)	Konvertierungsgrad
Kfz.....	Kraftfahrzeug
MAK-Wert	Maximale Arbeitsplatz Konzentration
n.....	Motordrehzahl [1/min]
Nfz.....	Nutzfahrzeug
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide (NO und NO ₂)
OBD	On-Board Diagnose
PKW	Personenkraftwagen
RG	Raumgeschwindigkeit
SCR	Selektive Katalytische Reaktion
Ta.....	Ansprings temperatur
tv.....	Verweilzeit
v.....	Geschwindigkeit [km/h]
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle

3 Einleitung

In Graz zurzeit aktuelles Thema ist die Emissionsproblematik und die auftretenden Grenzwertüberschreitungen. Diese Grenzwertüberschreitungen weisen unter anderem auf eine im innerstädtischen Bereich gesundheitlich bedenkliche NO_2 -Luftgüte hin. Als Hauptverursacher für diese Grenzwertüberschreitungen wird der Fahrzeugverkehr in der Stadt verantwortlich gemacht. Um spezifisch diese vom Straßenverkehr verursachte Schadstoffkomponente zu reduzieren, wird an verschiedensten Maßnahmen und Möglichkeiten gearbeitet, um die Luftgüte wieder zu verbessern.

Eine mögliche Variante dies zu erreichen, besteht in der gezielten Minderung dieser Schadstoffkomponente Stickoxid durch ein sogenanntes SCR-Nachrüstsystem.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit bestand unter anderem die Aufgabe, die Machbarkeit und das mögliche NO_x -Minderungspotenzial eines solchen Abgasnachbehandlungssystems anhand einer Entwicklung eines SCR-Nachrüstsystems für einen EU II Stadtbus der Grazer Verkehrsbetriebe (GVB) zu untersuchen.

Dieses SCR-Verfahren selbst wandelt die Stickoxide (NO_x) mit einem geeigneten Reduktionsmittel (NH_3) in Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O) um. Um eine adäquate Konvertierungsrate und einen hohen Wirkungsgrad eines SCR-Verfahrens zu erhalten, muss der Ammoniak (NH_3) entsprechend den entstandenen NO_x -Emissionen im Abgas eindosiert werden.

Aufgrund des gesundheitlichen Risikos, das durch das Mitführen von Ammoniak gegeben ist, wird ein Reduktionsmittel auf Basis einer wässrigen Harnstoff-Wasserlösung verwendet, die unter dem kommerziellen Markennamen „AdBlue“ bekannt ist. Aus diesem Reduktionsmittel wird nach einem definierten Prozess das notwendige Ammoniak (NH_3) für die SCR-Reaktion generiert. Verschiedene Rollenprüfstandtests ergaben, dass bei der Einbringung des Reduktionsmittels die Abgastemperatur bei einem solchen System nicht unter 220°C liegen sollte, da es ansonsten zu Nebenreaktionen und Ablagerungen im Abgasnachbehandlungssystem kommen kann und dies zu einer reversiblen Desaktivierung des SCR-Systems führen kann. Eine hohe NO_x -Konvertierung ist daher nur bei einer ausreichend hohen Abgastemperatur möglich.

Eine Lösung für bestehende Dieselnutzfahrzeuge ist es, ein autarkes SCR-Nachrüstsystem in das Abgasnachbehandlungssystem zu implementieren. Um eine vollständige Funktion des SCR-Systems gewährleisten zu können, müssen zusätzlich dafür die NO_x -Konzentration im Abgas, die Luftmasse des Ansaugsystems und die Abgastemperatur gemessen werden.

Vorteile eines solchen SCR-Verfahrens sind, dass kein zusätzlicher Kraftstoffmehrverbrauch zu erwarten ist und die zugleich hohen möglichen Konvertierungsgraden, die dieses System bietet. Ein Nachteil ergibt sich aufgrund des für das System notwendigen Platzbedarfes. Dieser Nachteil ergibt sich aufgrund des mitzuführenden Mediums in einem für das Reduktionsmittel speziell hergestellten Tank und eine mitzuführende Dosiereinrichtung samt Dosiersteuerungseinheit.

4 Allgemeines zum SCR-Verfahren

Die wichtigste in Frage kommende Sekundärmaßnahme zur Reduzierung des NO_x -Emissionsniveaus im dieselmotorischen Abgas ist die selektive katalytische Reduktion, kurz als SCR-Verfahren bezeichnet [17]. Dieses Verfahren wird bereits seit Ende der 70er Jahre zur Verminderung der Stickoxidemissionen in Kraftwerken und Industrieanlagen eingesetzt [12].

In Abbildung 1 ist ein Kohlekraftwerk mit einem SCR-System, zur Abgasnachbehandlung, gezeigt.



Abbildung 1: SCR-System in einem Kohlekraftwerk 1-Ammoniak (NH_3) Einspritzung 2-SCR-Reaktor; 3-Gasaustritt 4-Reaktor Bypass [Quelle:Hitachi]

Vor allem im Bereich der Nutzfahrzeuge (als Beispiel einer mobilen Anwendung siehe Abbildung 2) stellt sich das Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion mit Ammoniak (NH_3) als die derzeit aussichtsreichste Technik zur Erfüllung zukünftiger Abgasgrenzwerte dar. Dementsprechend weit ist die Entwicklung im Bereich der selektiven katalytischen Reduktion fortgeschritten und erste Seriensysteme sind seit der Markteinführung aus dem Jahre 2004 im Einsatz.

Um ein SCR-System im mobilen Einsatz effizient nützen zu können, wurde die Raumgeschwindigkeit von 20.000 auf bis zu 100.000 [1/h] erhöht. Das Volumen des SCR-Katalysators beträgt dabei etwa das 2-fache Hubvolumen [11].



Abbildung 2: Beispiel eines SCR-Systems in einer mobilen Anwendung [Quelle:DieselNet]

Als Reduktionsmittel kommt Ammoniak (NH_3) zum Einsatz. Der Grenzwert für die Konzentration am Arbeitsplatz (MAK-Wert) von Ammoniak liegt bei 18 mg/m^3 [7].

Ammoniak weist sehr hohe Selektivität bei einer guten Aktivität bezüglich der Abgaskomponente Stickoxid auf, sodass NO_x -Umsätze bis zu 99% erzielt werden können. Das Mitführen von Ammoniak stellt bei mobilen Anwendungen aufgrund des gesundheitlichen Risikos ein Problem dar. Daher wird statt des Ammoniaks oft Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) bzw. dessen wässrige Lösung als Trägerstoff verwendet. Harnstoff selbst ist farblos, geruchsfrei, ungiftig und biologisch abbaubar.

Die 32,5%-Lösung des Harnstoffes, unter dem kommerziellen Namen AdBlue bekannt, wird bei den jeweiligen SCR-Katalysatoren anstelle von Ammoniak als Reduktionsmittel verwendet. AdBlue ist in DIN 70070 [2] charakterisiert. Harnstoff selbst hat keine Nebenwirkungen [8].

Der Einsatz dieser wässrigen Lösung bringt allerdings auch eine Reihe von Nachteilen mit sich. Die eutektische Harnstoff-Wasser-Lösung gefriert bei $-11,5\text{ }^\circ\text{C}$. Lösungen mit anderen Mischungsverhältnissen haben höhere Schmelztemperaturen und sind zum Teil nicht langzeitstabil genug. Um eine uneingeschränkte Praxistauglichkeit sicher zu stellen, ist es im Betrieb im Winter notwendig, den Reduktionsmitteltank und die entsprechenden Rohrverbindungen mit einer Heizung zu versehen [17].

Der Reduktionsmittelverbrauch liegt bei einer Dosierung von wässrigem Harnstoff bei einem Dieselnutzfahrzeug bei etwa 4% im Bezug zum Kraftstoffverbrauch abhängig vom gesamten Lastprofil des Fahrzeugs im Fernverkehr [4].

4.1 Komponenten eines SCR-Systems

Serienreife Systeme befinden sich schon länger im Markt und werden, wie in Abbildung 3 beispielhaft gezeigt, von der Firma Bosch unter dem Handelsnamen „Denoxtronic“ verkauft.

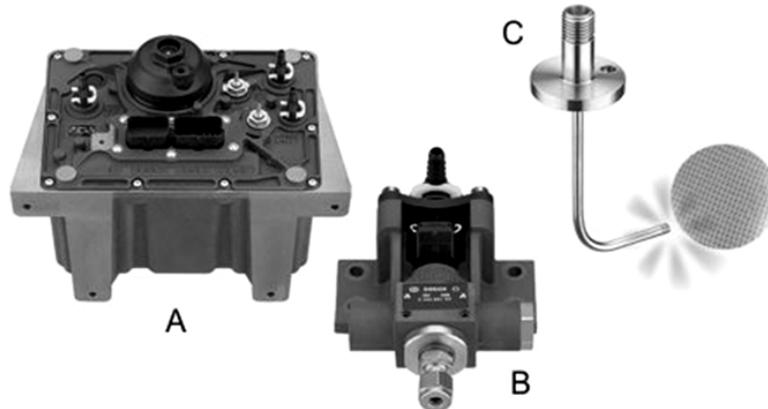


Abbildung 3: Bestandteile eines Harnstoff-Einspritzsystems A: Fördermodul, B: Dosiermodul. C:Einspritzdüse [Quelle:Bosch]

Eines der ersten SCR-Systeme, Abbildung 4, wurde im Nutzfahrzeugsektor mit Druckluftunterstützung unter dem Markennamen „Denoxtronic 1“ in Einsatz gebracht. Dabei wurde die Druckluft zur Zerstäubung des Reduktionsmittels aus der Druckluftversorgung der Bremsanlage entnommen.

Als Reduktionsmittel wurde die AdBlue Harnstoff-Wasser-Lösung verwendet.

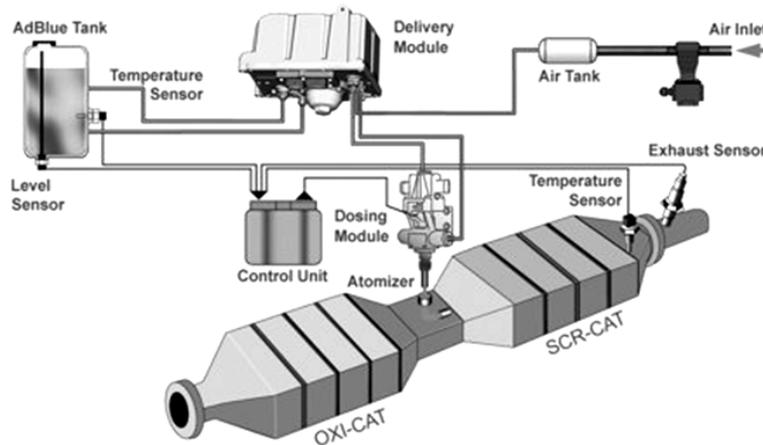


Abbildung 4: Konventionelles SCR-System mit Druckluftunterstützung [Quelle: Bosch GmbH]

Ein gesamtes SCR-System umfasst folgende Komponenten und Teilsysteme:

4.1.1 Temperatursensoren

Temperatursensoren werden in einem konventionellen SCR-System, je nach Dosierstrategie, vor und nach dem SCR-Katalysator zur Bestimmung der Temperatur im Abgas angebracht. Eine präzise Temperaturmessung ist bei einem SCR-System essentiell, da es bei einer Dosierung bei nicht ausreichender Abgastemperatur im SCR-Katalysator zu Nebenreaktionen und dadurch zur Desaktivierung des Katalysators kommen kann.

4.1.2 NO_x-Sensoren

NO_x-Sensoren können als Nachrüstlösung für Motoren, die über kein elektronisches Motormanagement (eingespeicherte NO_x-Kennfelder des Motors) verfügen, eingesetzt werden. NO_x-Sensoren werden in der OBD2 bereits detektiert und sind ab EU V-Fahrzeugen verbaut. Sie dienen zur Bestimmung der Stickoxidkonvertierungsrate. NO_x-Sensoren vor dem SCR-Katalysator werden zur Verbesserung der Regelgüte eingesetzt und werden eventuell in zukünftigen Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommen (EU VI).

4.1.3 Tanksystem

Das Tanksystem dient zur Speicherung des Reduktionsmittels und kann noch zusätzlich mit einigen Sensoren (Füllstands-, Qualitäts- und Temperatursensoren) ausgestattet sein. Harnstoff als Reduktionsmittel ist eine ungefährliche Substanz und wird bei einem SCR-System über den Markennamen AdBlue vertrieben. AdBlue ist in der DIN 70070 spezifiziert.

4.1.4 Fördermodul

Das Fördermodul (siehe Abbildung 3, Bauteil A) besteht aus einer Pumpe, welche die Harnstoff-Wasser-Lösung vom Tank zum Dosiermodul fördert. Bei einer luftunterstützten Gemischbildung wird außerdem mit einem Luftregelventil und einem Luftdrucksensor ein geeigneter Luftmassenstrom vom Luftvorratsbehälter (NFZ-System) zum Dosiermodul eingestellt.

4.1.5 Dosiermodul

Im Dosiermodul (siehe Abbildung 3, Bauteil B) wird über einen Flansch in einem genau definierten Einbauwinkel direkt auf das Abgasrohr angebaut. Die für die NO_x -Reduktion erforderliche Dosiermenge wird durch ein Magnetventil bereitgestellt. In Systemen ohne Luftunterstützung erfolgt die Zerstäubung und Gemischbildung über eine entsprechende Düse direkt am Abgasrohr. (siehe Abbildung 5)

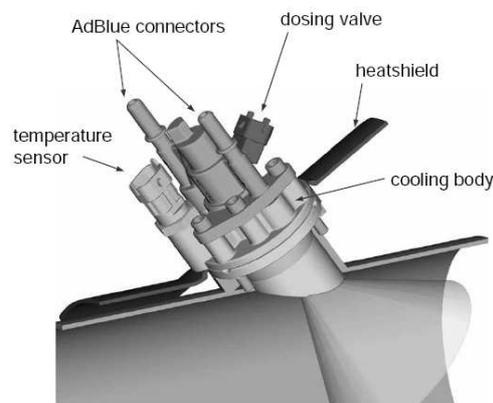


Abbildung 5: Dosiermodul: Einbausituation im Abgasrohr [Quelle: Bosch]

4.1.6 Steuerungseinheit, Dosiersteuerungsgerät

Die Steuerungseinheit bestimmt alle Funktionen des Dosiersystems. Über den CAN-Bus¹ können dabei alle Informationen, die den Betriebszustand des Motors betreffen, vom Motorsteuerungsgerät übermittelt werden. In die sogenannte Steuerungseinheit werden die Daten von den jeweiligen Sensoren (z.B.: Temperatur- und NO_x -Sensoren) eingelesen und gemäß der Dosierstrategie werden die entsprechenden Aktoren angesteuert.

Bei Seriennutzfahrzeugen werden die Komponenten über entsprechende Diagnosefunktionen überwacht und gegebenenfalls ein Ausfall detektiert und an die OBD des Motorsteuerungsgerätes überliefert.

¹ CAN-Controller Area Network: Ist ein Übertragungsprotokoll zwischen mehreren Steuergeräten. Weitere Informationen unter: <http://www.me-systeme.de/canbus.html>

4.2 Prozessschritte des SCR-Verfahrens

Wie in Abbildung 6 ersichtlich ist, wird das Reduktionsmittel vor dem eigentlichen SCR-Katalysatorsystem über ein Dosiermodul in den Abgasstrang eingebracht. Das eigentliche Abgas durchströmt dann mit dem Harnstoff den SCR-Katalysator und reagiert mit dem im Abgas befindlichen Stickoxiden (NO_x).

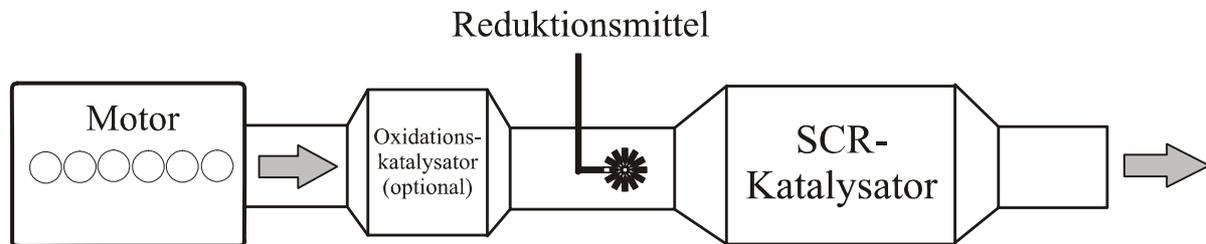


Abbildung 6: Dosierung und Katalysatoranordnung eines SCR-Systems

Damit ein vollständiges SCR-Verfahren ablaufen kann müssen weitere Prozessschritte vor und nach der eigentlichen SCR-Reaktion stattfinden. In Abbildung 7 werden diese Prozessschritte im Überblick gezeigt.

Am Beginn des SCR-Prozesses werden in einer Oxidationsstufe die Abgasbestandteile CO und Kohlenwasserstoffe zu CO_2 und Wasser verbrannt und NO teilweise zu NO_2 aufoxidiert. Letzteres ist für eine schnelle und vollständige SCR-Reaktion notwendig und kann sowohl in der Oxidationsstufe (in einem eigens angebrachten Oxidationskatalysator, Kapitel 4.9.4) oder auch in der SCR-Stufe selbst erfolgen. In der nächsten Stufe der SCR-Prozesskette wird das Ammoniak aus dem Harnstoff generiert (siehe dazu Kapitel 4.3.1).

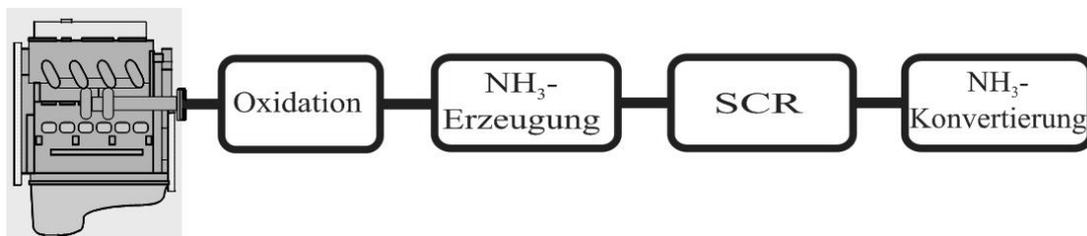


Abbildung 7: Prozessschritte des SCR-Verfahrens in der mobilen Anwendung [36]

Nach der eigentlichen SCR-Stufe, in der das generierte Ammoniak mit den Stickoxiden reagiert (Reaktion in Abbildung 9), folgt eine weitere Konvertierungsstufe, wobei dies in einem geeigneten Ammoniaksperrkatalysator erfolgen kann. In dieser Konvertierungsstufe wird die Freisetzung von überschüssigem Ammoniak verhindert (mehr über Ammoniaksperrkatalysatoren im Kapitel 6.2.2).

4.3 Chemismus

4.3.1 Bereitstellung von Ammoniak

Damit Ammoniak für den SCR-Prozess bedarfsgerecht vorliegt, müssen die zur Ammoniak-Erzeugung gehörenden Prozessschritte (Abbildung 3) auf einem begrenzten Raum realisiert werden. Dies stellt eine enorme Herausforderung für die SCR-Systementwicklung dar. Die Flüssigkeit wird als Spray eidosiert, dann folgt die Verdampfung des Wasseranteils aus der Flüssigkeit, gefolgt von Mischungsstufen und den Prozessen „Thermolyse“ und „Hydrolyse“, in denen der Harnstoff zu Ammoniak umgewandelt wird [36].

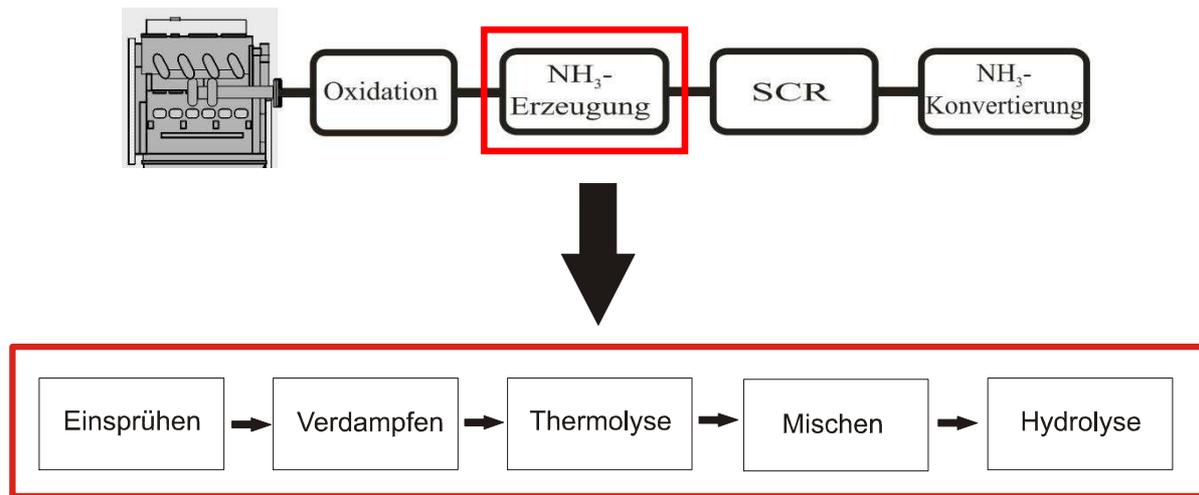
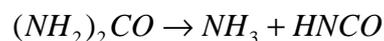


Abbildung 8: Notwendige Verfahrensschritte zur Generierung von Ammoniak

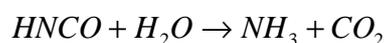
Bevor die eigentliche SCR-Reaktion stattfinden kann, muss der Wasseranteil der Flüssigkeit verdampfen. Danach wird vor der eigentlichen Thermolyse der Harnstoff, Schmelzpunkt bei etwa 133°C, verdampft.

Für den ersten Reaktionsschritt, die thermische Zersetzung des Harnstoffs, wird die Energie des Abgases genutzt. Diese thermische Zersetzung (Thermolyse), bei dem der Harnstoff zu gleichen Teilen in Ammoniak NH₃ und Isocyanäure HNCO zerfällt, kann unter günstigen Bedingungen (hohe Abgastemperatur und geringe Strömungsgeschwindigkeiten) vollständig vor dem eigentlichen SCR-Katalysator ablaufen [10].



Gleichung 4-1

Auf die Thermolyse reagiert anschließend die zuvor in der Thermolyse generierte Isocyanäure (HNCO) mit dem Wasser (H₂O). Die für die Hydrolyse notwendige Wassermenge wird von der wässrigen Harnstofflösung und dem im Abgas befindlichen Wasserdampf bereitgestellt. Bei der Hydrolyse reagiert die Isocyanäure mit dem Wasser schlussendlich zu Ammoniak (NH₃) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) (Gleichung 4-2). Das dabei produzierte CO₂ ist zum Vergleich zu der motorischen CO₂-Emission eines Nutzfahrzeugs sehr gering und entspricht bei einem EU IV-Nutzfahrzeug weniger als 1% [10].



Gleichung 4-2

4.3.2 SCR-Reaktionsverfahren

Im SCR-Reaktionsverfahren reagieren die im Abgas befindlichen Stickoxide mit dem zuvor in der Ammoniakbereitstellung (Kapitel 4.3.1) generierten Ammoniak zu elementarem Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O) (Abbildung 9).

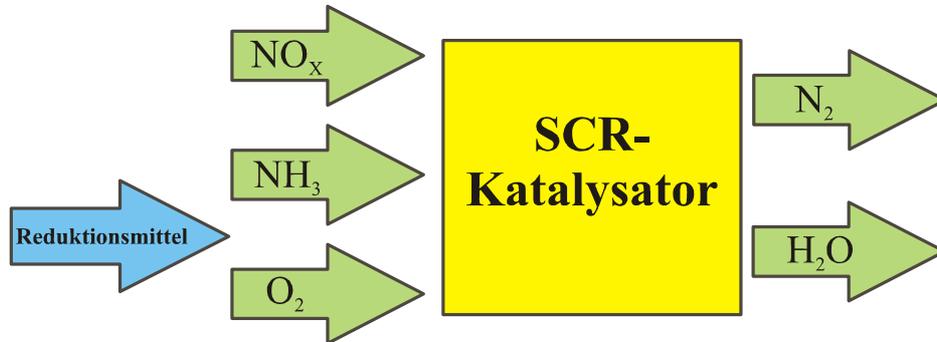
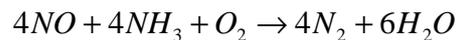


Abbildung 9: Chemismus bei einem SCR-Katalysator

Die eigentliche Standard-SCR-Reaktion verläuft im Wesentlichen gemäß der folgenden Reaktionsgleichung ab:



Gleichung 4-3

Bei höheren Abgastemperaturen (Temperaturen ab mindestens 200°C) und bei gleichen Teilen NO-NO₂ kann eine „schnelle SCR-Reaktion“ nach Gleichung 4-4 ablaufen. Diese sogenannte schnelle SCR-Reaktion läuft bei einem Temperaturniveau von etwa 200°C zehnmal schneller ab, als die Umsetzung nach Gleichung 4-3.



Gleichung 4-4

Im Falle des in den Stadtbus integrierten SCR-Systems und der aufgrund des dort herrschenden Temperatur- und NO₂-Niveaus (kein zusätzlicher Oxidationskatalysator im System integriert) dominiert in diesem Fall hauptsächlich die SCR-Standardreaktion nach Gleichung 4-3.

4.4 Temperaturverhalten

In Abbildung 10 ist eine typische NO_x -Konvertierungsrate in Abhängigkeit von der Temperatur gezeigt. Die erzielbare NO_x -Umsatzrate beträgt in einem breiten Temperaturbereich ca. 90%. Bei höheren Temperaturen, oberhalb von etwa 450°C , sinkt die NO_x -Konvertierungsrate. Dies erfolgt aufgrund der Oxidation des Reduktionsmittels mit Luftsauerstoff. Die höchsten Umsätze lassen sich mit Ammoniak (NH_3) in einem Temperaturbereich von 250°C bis 450°C erreichen.

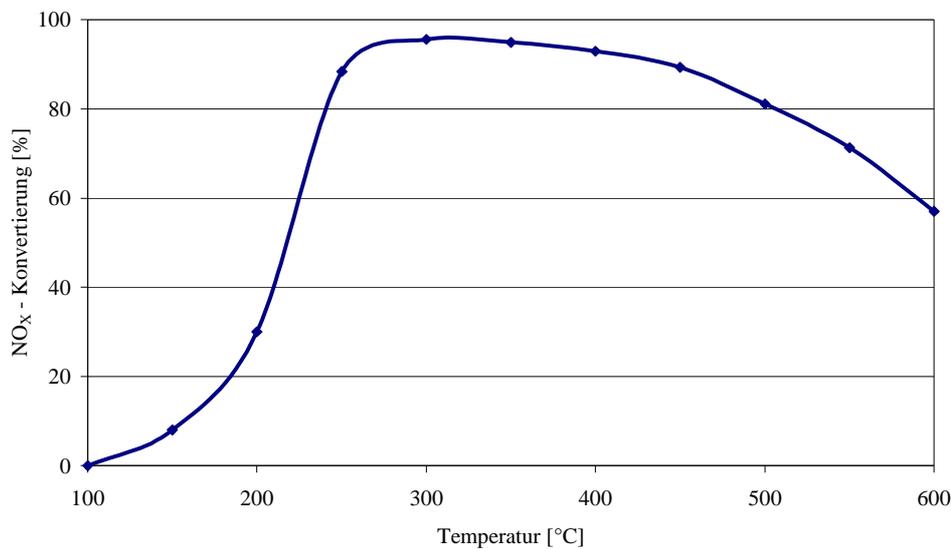


Abbildung 10: Typische NO_x -Konvertierung im SCR-Verfahren [36]

Bisher ist es den Katalysatorherstellern nicht gelungen, einen Katalysator, der mit einer hohen Konvertierungsrate über den gesamten Temperaturbereich von etwa 150°C - 500°C (beim dieselmotorischen Abgas) effektiv arbeitet, herzustellen. Gerade im Bereich der Kaltstartphase ist die Katalysatortemperatur gering und damit die Anforderung an die Aktivität des Abgasnachbehandlungssystems besonders hoch. Das dabei entstandene Ammoniak (NH_3) wird im SCR-Katalysator adsorbiert und steht dann für die eigentlichen SCR-Reaktionen (Gleichung 4-3) zur Verfügung. Dabei beeinflusst ein Oxidationskatalysator das NO_2 -Verhältnis und die NO_x -Konvertierungsrate bei niedrigen Temperaturen signifikant.

Abbildung 11 veranschaulicht anhand eines Diagramms den beschriebenen Einfluss des NO₂-Anteils auf die NO_x-Konvertierungsrate. Dabei zeigt sich, dass bei einem Anteil von 50%-NO₂ im Abgas die höchste DeNO_x-Konvertierungsrate je Abgastemperatur erreicht wird.

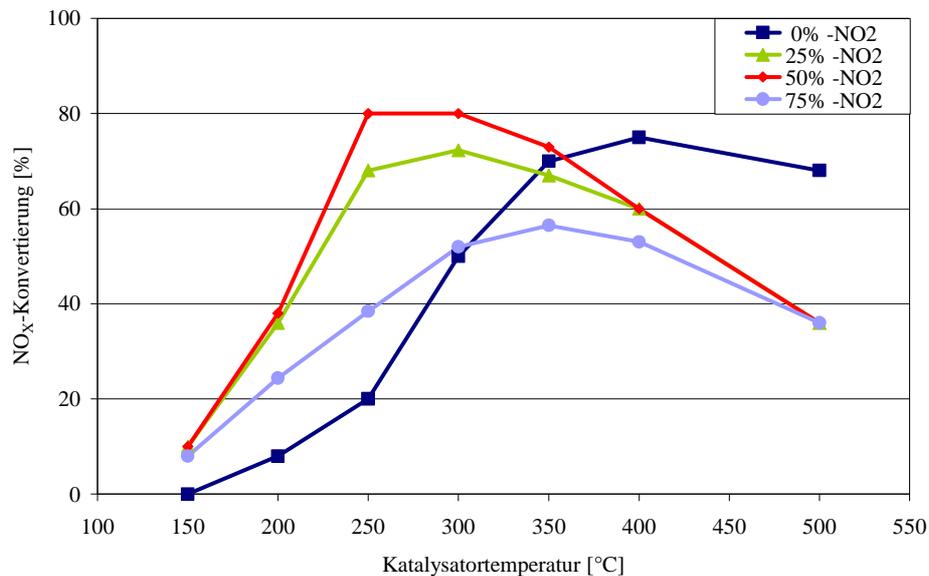


Abbildung 11: Einfluss des NO₂-Anteils auf den NO_x-Umsatz [10]

Um etwaige Nebenreaktionen, die zu einer Desaktivierung des SCR-Katalysators führen können, auszuschließen, sind vor allem AdBlue Dosierungen bei niedrigen Temperaturen (<200°C) bei einem SCR-System zu vermeiden [18].

Um die Einspeicherung jeglicher Ablagerungen (Biuret und höhermolekulare Verbindungen) zu vermeiden, ist eine geeignete Wahl an SCR-Katalysatoren (Vanadium-Gehalt), der NO₂-Anteil (Einspeicherung steigt mit höherem NO₂-Anteil) und eine ausreichend hohe Katalysatortemperatur (ab 200°C) für die SCR-Reaktion erforderlich [40].

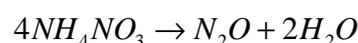
Bei Temperaturen unterhalb von 200°C muss, wie bereits erwähnt, neben der Standard-SCR-Reaktion (Gleichung 4-3) zusätzlich noch mit einer weiteren Reaktionen gerechnet werden. Diese Reaktion kann durch Nebenreaktionen (Ammoniumnitrit) schlussendlich zur Bildung von Ammoniumnitrat (NH₄NO₃) führen [19].



Gleichung 4-5

Das dabei entstehende Ammoniumnitrat kann sich auf der Oberfläche des Katalysators ablagern und zu einer reversiblen Desaktivierung des Katalysators führen [18]. Bei Temperaturen über 200°C zerfällt das Ammoniumnitrat (NH₄NO₃) wieder, wobei es zur unerwünschten Bildung von Distickstoffmonoxid N₂O, trivial als Lachgas [17] bekannt, kommen kann.

Die mögliche Reaktionsgleichung ist in Gleichung 4-6 ersichtlich.



Gleichung 4-6

4.5 Allgemeines zum Katalysatoraufbau

Monolithische Katalysatoren können in folgende Bauarten unterteilt werden:

- Vollkatalysatoren
- Katalytisch beschichtete Trägerkatalysatoren

Bei Vollkatalysatoren enthält die gesamte Struktur des Katalysators die aktive Komponente. Bei diesem Katalysatortyp ist das gesamte Wabenkörpermaterial katalytisch aktiv. Ein Trägerkatalysator besteht wiederum aus einem Trägerkörper, einer Zwischenschicht und der katalytisch aktiven Schicht.

In Abbildung 12 werden der Aufbau sowie die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten eines Trägerkatalysators gezeigt.

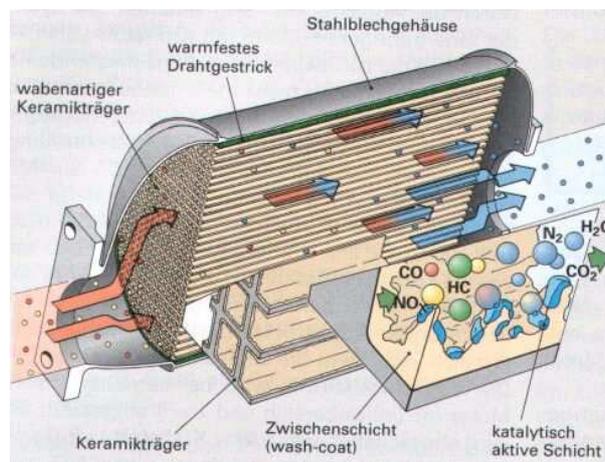


Abbildung 12: Aufbau eines Trägerkatalysators [Quelle: Emitec]

Gehalten wird der Katalysator in einem Gehäuse, dem sogenannten Canning (in der Abbildung als Stahlblechgehäuse gekennzeichnet). Ebenso ist eine Glasfasermatte in den Katalysatorkörper integriert. Sie dient als Zwischenlage, da es bei verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten im Katalysatorträgermaterial zu Verspannungen kommen kann. Die Struktur, durch die das Abgas strömt, ist wabenförmig mit parallel verlaufenden Kanälen.

Bei den Trägerstrukturen kann prinzipiell zwischen Keramik- und Metallträgern (Abbildung 13) unterschieden werden. Metallträger bieten grundsätzlich den Vorteil, höhere Zelldichten und daher größere geometrische Oberflächen zu erlauben. Keramikträger weisen aber aufgrund der geringeren Wärmekapazität ein günstigeres Aufheizverhalten im dynamischen Betrieb auf.

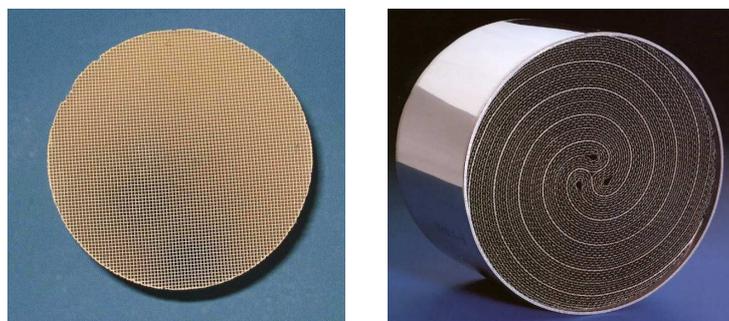


Abbildung 13: Keramikträger (links) und Metallträger (rechts) [Quelle: Emitec]

Bestimmte Katalysator Kenngrößen sind für die Auslegung eines Katalysatorsystems von großer Bedeutung und werden im nächsten Kapitel näher erörtert.

4.6 Wichtige Katalysator Kenngrößen

Der Katalysator wird durch eine Reihe von Kenngrößen charakterisiert. Die Geometrie des Katalysators wird beschrieben durch:

- das Katalysatorvolumen VK
- das Lückenvolumen VL und
- das Reaktorvolumen VR

Das Katalysatorvolumen ist das Volumen der Festphase, also des monolithischen Trägers. Das Lückenvolumen entspricht dem Gesamtvolumen der durchströmten Kanäle. Das Reaktorvolumen stellt die Summe aus Katalysatorvolumen und Lückenvolumen dar und beschreibt das durch die geometrischen Abmessungen des Monolithen begrenzte Volumen.

4.6.1 Der Konvertierungsgrad $K(i)$

Der Konvertierungsgrad $K(i)$ oder Umsatz stellt ein Maß für die Wirksamkeit des Katalysators bezüglich der Verminderung einer Schadstoffkomponente i im Abgas dar.

$$\frac{Emission_{ein}(i) - Emission_{aus}(i)}{Emission_{ein}(i)} = K(i)$$

Gleichung 4-7

Der Konvertierungsgrad hängt hauptsächlich ab von:

- der Abgastemperatur
- der Abgaszusammensetzung und
- dem Abgasmassenstrom.

4.6.2 Anspringtemperatur T_a

Die Anspringtemperatur T_a oder auch Light-Off-Temperatur beschreibt die Temperatur, bei der ein Konvertierungsgrad von 50% erreicht wird.

4.6.3 Raumgeschwindigkeit RG

Als relatives Maß für das Reaktorvolumen wird die Raumgeschwindigkeit-RG verwendet. Sie ist definiert als das Verhältnis von Abgasvolumenstrom bei Normbedingungen² und dem Reaktorvolumen. Das heißt, je kleiner die Raumgeschwindigkeit ist, desto länger hat das Abgas Kontakt mit der katalytisch aktiven Oberfläche und desto höher wird im Allgemeinen die Konvertierung sein.

$$\frac{\dot{V}_{Abg}}{V_R} = RG \left[\frac{1}{h} \right]$$

Gleichung 4-8

\dot{V}_{Abg} ...Abgasvolumenstrom bei Normzustand [m^3_N/h]
 V_R ...Reaktorvolumen [m^3]

4.6.4 Verweilzeit t_v

Als Verweilzeit t_v wird die Zeitspanne bezeichnet, in der Reaktand und Katalysatoroberfläche in Kontakt treten können. Der Kehrwert der Raumgeschwindigkeit entspricht somit einer Verweildauer des Abgases im Katalysator.

$$\frac{V_R}{\dot{V}_{Abg}} = \frac{1}{RG} [h] = t_v$$

Gleichung 4-9

4.7 Katalysatoralterung

Auch ein absolut frei von Katalysatorgiften in reinem Abgasstrom wirkender Katalysator verliert einen Teil seiner Aktivität durch Alterung. Dabei wird ein Teil der aktiven Oberfläche und der Zwischenschicht (Washcoat) durch sogenannte Sinterprozesse der Edelmetallkristalle verkleinert. Dieser Prozess ist stark von der Temperatur abhängig und wird als thermische Alterung bezeichnet. Die thermische Alterung verläuft mit zunehmender Temperatur schneller ab [10].

Abbildung 14 zeigt die typische Veränderung der spezifischen Oberfläche durch Alterung in Abhängigkeit der Temperatur. Durch entsprechend große Auslegung der Katalysatoroberfläche wird auch bei zunehmender Alterung eine genügend hohe Konvertierungsrate erhalten. Dabei hängt der Konvertierungsgrad stark von der Katalysatortemperatur ab. Um ein frühes Anspringen zu erreichen, wird aus diesem Grund eine möglichst motornaher Katalysatorposition gewählt. Bei der Auslegung muss allerdings beachtet werden, dass es dabei nicht zu einem starken thermischen Alterungsprozess kommt [22].

Um eine größere thermische Beständigkeit der Katalysatoren zum Beispiel des Typs V_2O_5/TiO_2 zu erreichen, wird Wolframtrioxid (WO_3) als Temperaturstabilisator verwendet.

Mit diesem Stabilisator ist der Einfluss der thermischen Alterung bei Temperaturen ab $750^\circ C$ signifikant.

² Physikalischer Zustand eines festen Körpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases, gekennzeichnet durch die Normtemperatur $T_0 = 273,15$ K und den Normdruck $p_0 = 1013,25$ hPa. <http://www.wissen.de>

In Abbildung 14 ist der Einfluss der thermischen Alterung bei einem $V_2O_5/WO_3/TiO_2$ -Katalysator gezeigt.

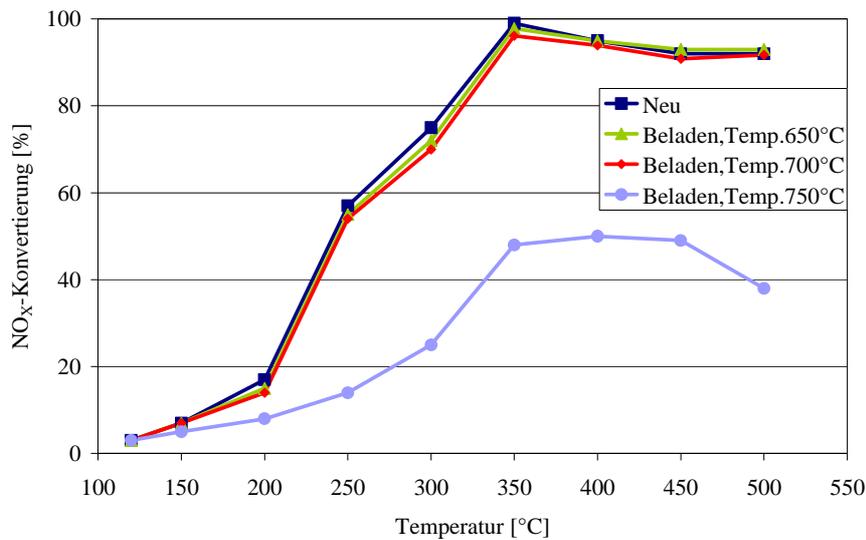


Abbildung 14: Thermische Alterung eines $V_2O_5/WO_3/TiO_2$ Katalysators [Quelle:DieselNet]

Durch diverse Additive, die dem Kraftstoff und dem Schmieröl beigemischt werden, wird der Katalysator zusätzlich vergiftet und dabei dessen Konvertierungsrate gemindert.

Dabei wird grundsätzlich zwischen 2 Arten unterschieden:

- *chemische Vergiftung*: Zusätze reagieren mit der Oberfläche
- *mechanische Vergiftung*: Zusätze decken die Oberfläche ab

Diese führen zu einem schlechteren Konvertierungsgrad und zu einer Verschiebung des Aktivitätseinsatzes des Katalysators zu höheren Temperaturen (Light-Off-Effekt) [10].

4.8 Abhängigkeit der Konvertierung von der Abgastemperatur

Der Konvertierungsgrad eines Katalysators hängt stark von der Katalysatortemperatur ab. Daher ist es von großem Vorteil eine möglichst motornahe Katalysatorposition zu wählen, damit die erforderliche Temperatur für die eigentliche SCR-Reaktion schnell erreicht werden kann. Jedoch muss bei einer frühzeitigen Reduktionsmitteldosierung mit möglichen Nebenreaktionen gerechnet werden.

Bei der konstruktiven Auslegung des Katalysatorsystems muss allerdings beachtet werden, dass je nach Beschichtung eine maximal zulässige Temperatur nicht überschritten werden darf, da es ansonsten rasch zur thermischen Alterung (siehe Kapitel 4.7) kommen kann und dadurch die Konvertierungsrate des Katalysators abnimmt (Abbildung 14).

4.9 SCR-Katalysatoren

Ein konventionelles SCR-System zur Reduzierung der Stickoxidrate besteht also aus einem Reduktionskatalysator, den Komponenten zur Harnstoffdosierung sowie entsprechenden Reduktionsmittel- und Steuerleitungen und einem Tank für das Reduktionsmittel. Einige Systeme bestehen, je nach Platzsituation und Optimierungsgrad, aus einem dem SCR-Katalysator vorgeschaltetem Oxidationskatalysator und einem Hydrolysekatalysator, sowie gegebenenfalls einem im SCR-Katalysator integrierten bzw. nachgeschalteten Ammoniaksperrkatalysator zur Minimierung des Ammoniakschlupfes.

Im Folgenden gemäß [25] sind die wesentlichsten Anforderungen, die einen SCR-Katalysator betreffen, aufgelistet:

- gute Niedertemperatureffektivität
- gute Hochtemperatureffektivität
- geringer Druckverlust
- Langzeitstabilität

Zur Erfüllung der oben angeführten Anforderungen müssen der Katalysatorträger und die darauf befindliche katalytische Beschichtung bestmöglich aufeinander abgestimmt sein und zusammenarbeiten.

Erste Entwicklungen im Bereich der NO_x -Konvertierung mittels Ammoniak mit SCR-Katalysatorsystemen wurden mit Platin (Pt) Katalysatoren unternommen [9].

Der Einsatzbereich dieses Katalysortyps ist jedoch nur für niedrige Einsatztemperaturen ($<250^\circ\text{C}$), aufgrund ihrer niedrigen Selektivität bei höheren Temperaturen, geeignet. Später wurden neben den Platin-Katalysatoren, Katalysatoren basierend auf Vanadium und Zeolith-Monolithen entwickelt und eingesetzt.

In Abbildung 15 und Tabelle 1 werden je nach Katalysatortyp die verschiedenen Einsatztemperaturbereiche der Katalysatoren dargestellt.

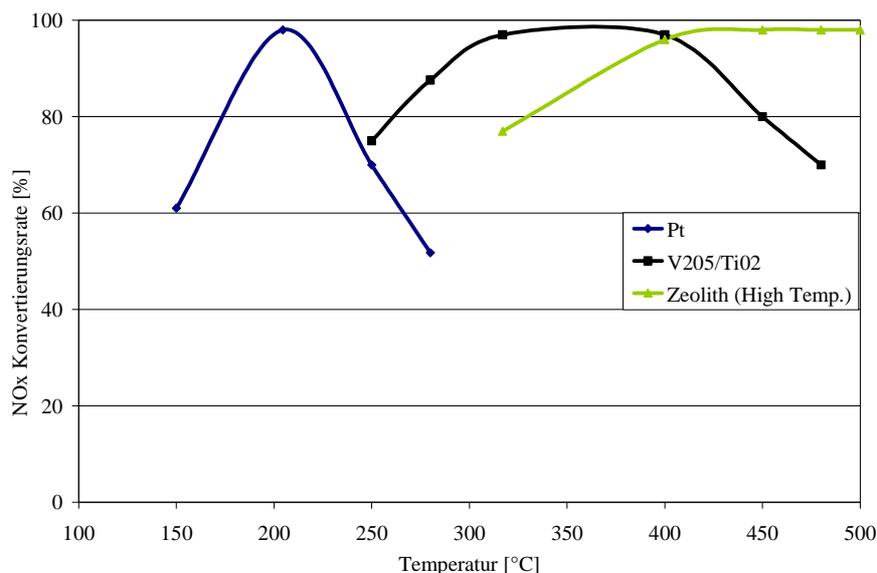


Abbildung 15: Temperaturbereich verschiedener SCR-Katalysatoren [Quelle: DieselNet]

Die Betriebstemperaturbereiche für die verschiedenen Katalysatorstechnologien werden zur Übersichtlichkeit nochmals in Tabelle 1 gezeigt.

Katalysatortyp	Temperaturbereich [°C]
Platin (Pt)	175 – 250
Vanadium (V_2O_5)	300 – 450
Zeolith (für versch. Strukturen)	150 – 600

Tabelle 1: SCR-Katalysatorstechnologien [Quelle: DieselNet]

4.9.1 Platin basierende Katalysatoren

Platin beschichtete Katalysatoren sind zwar bei niedrigen Temperaturen sehr aktiv und beeinflussen positiv das Anspringverhalten bei niedrigen Temperaturen. Nachteilig zeigt sich bei diesem Katalysatortyp jedoch die Bildung des Treibhausgases N_2O und zum anderen, dass die Kohlenwasserstoffe, die eigentlich NO_x reduzieren sollen, bereits ab etwa $200^\circ C$ an Pt oxidiert werden und damit als Reduktionsmittel nicht mehr zur Verfügung stehen. Aufgrund dessen fällt ab einem Temperaturbereich von ungefähr $200^\circ C$ die NO_x -Konvertierungsrate. Bei einem Temperaturbereich von ungefähr $200^\circ C$ besitzt dieser Katalysatortyp die höchste Konvertierungsrate.

4.9.2 Vanadium / Titan basierende Katalysatoren

Da bei den Platin Katalysatoren die NO_x -Reduktionsaktivität bei höheren Temperaturen (über $250^\circ C$) vermindert ist, wurden V_2O_5/Al_2O_3 -Katalysatoren, die in einem höheren Temperaturbereich ihre Reduktionsaktivität besitzen, entwickelt.

Der beste Arbeitstemperaturbereich und der Einfluss von V_2O_5 auf die NO_x -Konvertierungsrate dieses Katalysatortyps wird in Abbildung 16 gezeigt. Diese Katalysatoren auf V_2O_5 -Basis haben bei einem Temperaturbereich von $260^\circ C$ - $450^\circ C$ die höchste Konvertierungsrate. Zusätzlich ist in dieser Abbildung ersichtlich, dass sich eine erhöhte Menge an V_2O_5 positiv auf die Niedertemperaturaktivität des Katalysators auswirkt. Bei einem höheren Temperaturbereich ergeben sich wiederum Nachteile gegenüber Katalysatoren mit geringerem V_2O_5 -Anteil.

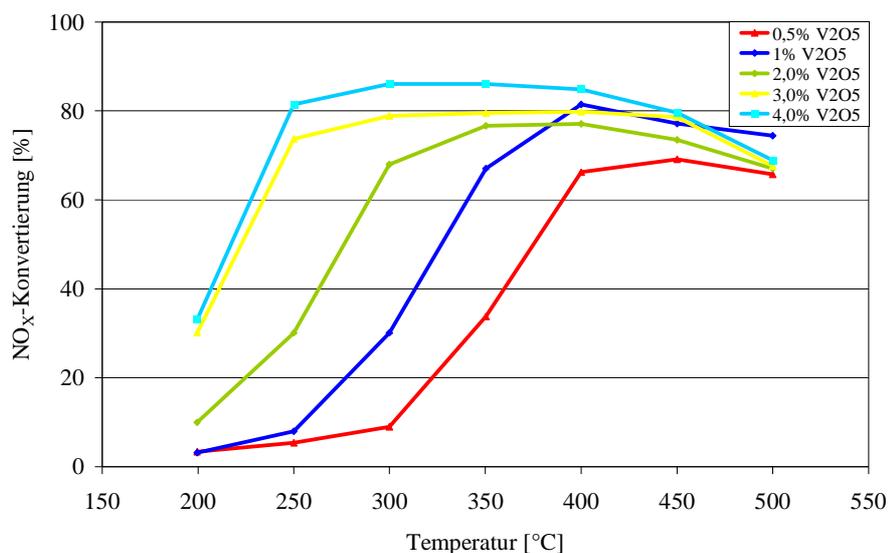


Abbildung 16: NO_x -Umsatz von SCR-Katalysatoren mit unterschiedlicher V_2O_5 -Massenbeladung in Abhängigkeit von der Temperatur bei $\alpha=1,0$ -Raumgeschwindigkeit= 18000 1/h [38]

Um den Nachteil der Konvertierungsfähigkeit bei höheren Temperaturen zu umgehen wurde als Zusatzmaterial Wolframtrioxid (WO_3) dem Katalysatorträger hinzugefügt. Diese stabilisierten Katalysatoren $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ sind dabei bis 700°C thermisch und alterungsbeständig. $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ basierende Katalysatorsysteme werden auch sehr häufig in stationären Industrieanlagen eingesetzt [16]. Unter diesen drei Oxiden wird TiO_2 als Oberflächenträger mit der höchsten Beladungsfläche eingesetzt, der typische Titangehalt beträgt dabei ungefähr 80% [1].

Der Anteil an Vanadium kann bei hohen Schwefelanwendungen weniger als 1% betragen. Dabei verringert das WO_3 die SO_2 -Oxidationsaktivität und erhöht die Temperaturstabilität, da Phasenumwandlungen des Trägers unterdrückt werden. Durch geeignete Kombination der Aktivkomponenten wird eine erhöhte Aktivität bei geringem Oxidationsvermögen erreicht [23].

Abbildung 17 zeigt die NO_x -Konvertierungsrate eines V_2O_5 -Katalysators im Vergleich zu einem regenerierten bzw. nach ungefähr 190.000 Kilometern mit einem mit Schwefeltrioxid SO_3 beladenen Katalysator [22]. Hier zeigt sich der Einfluss des Schwefelgehalts auf den Katalysator.

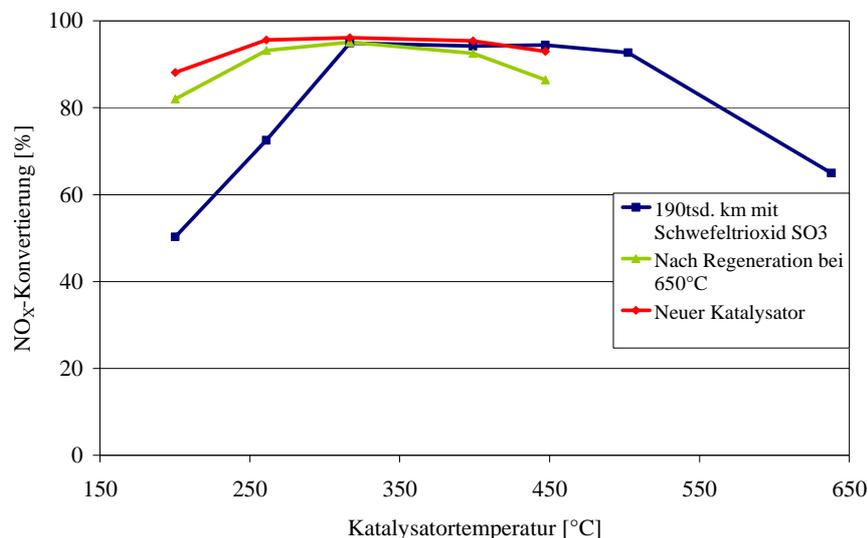


Abbildung 17: Einfluss von Schwefeltrioxid (SO_3) auf einen V_2O_5 -SCR-Katalysator [22]

4.9.3 Katalysatoren auf Zeolith-Basis

Am Beginn der SCR-Katalysatortechnologie im Automobilssektor wurden vor allem Katalysatoren auf Vanadium- und Titanbasis zum Einsatz gebracht [6]. Jedoch seit 2005 wurde Vanadiumpentoxid in einigen Ländern, vorrangig in den USA, als gesundheitsgefährdend und daher als bedenklich eingestuft [30].

Aus diesem Grund sind in diesen Ländern vorwiegend SCR-Katalysatoren auf Zeolith-Basis im technischen Einsatz [20]. Zeolithe sind komplexe Gitterstrukturen (ZSM-5) aus Silizium und Aluminium. Vor allem Zeolithe mit katalytischem Metallcluster aus Eisen (Fe) haben sich hierbei als besonders geeignet erwiesen [39]. Diese Fe-Zeolith-Katalysatoren zeigen insbesondere bei niedrigen Temperaturen jedoch eine starke Sensitivität gegenüber dem NO_2/NO -Verhältnis im Abgas. Um die Effektivität eines Zeolith-Katalysators zu steigern, muss daher ein Oxidationskatalysator vor dem SCR-Katalysator angeordnet sein.

Neue Entwicklungen zeigen hohe NO_x -Konvertierungsraten der Zeolith-Katalysatoren als übliche vanadiumbasierte SCR-Katalysatoren. Abbildung 18 vergleicht die möglichen DeNO_x -Konvertierungsraten eines $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ -Katalysators zu verschiedenen Zeolith-Katalysatoren (Fe, Cu). Dabei zeigt sich, dass bei einem Temperaturbereich von 150°C die NO_x -Konvertierungsrate bei Cu-ZSM5-Katalysatoren fast doppelt so hoch ist wie der bei einem Standard-SCR-Katalysator. Bei einem Temperaturbereich über 500°C sind höhere NO_x -Umsätze mit Fe-ZSM5-Katalysatoren möglich, was auf einen geringeren Anteil an Nebenreaktionen schließen lässt [12].

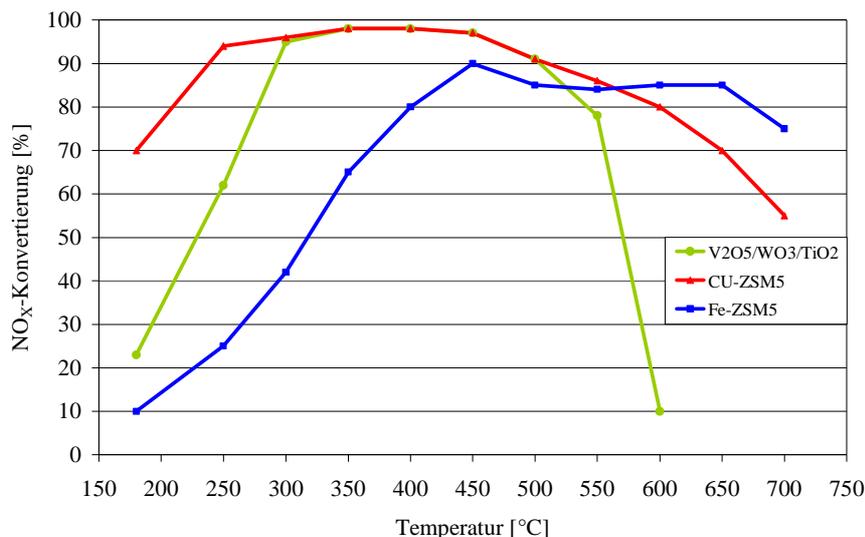


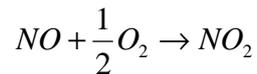
Abbildung 18: Vergleich DeNO_x -Konvertierungsraten zwischen einem $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$, Cu-ZSM5 und Fe-ZSM5 SCR-Katalysator, $\text{RG} = 52000 \text{ 1/h}$ [37]

Ein großer Nachteil dieser Zeolith-Katalysatoren ist der zum Vergleich zu einem $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ -Katalysator hohe Preis und bei den Fe-Zeolith-Katalysatoren die niedrige Reaktionsaktivität im niedrigen Temperaturbereich und die starke Sensitivität gegenüber dem NO_2/NO -Verhältnis im Abgas. Außerdem hat sich nachteilig auf die Konvertierungsrate bei Cu-Zeolith-Katalysatoren die Empfindlichkeit bei Anwesenheit von Wasserdampf und Kohlenwasserstoff im Abgas gezeigt [39].

4.9.4 Oxidationskatalysator

Ein Oxidationskatalysator in einem SCR-System hat die Aufgabe, das NO_2 zu NO_x -Verhältnis im Abgas zu erhöhen, um mögliche Bedingungen für eine „schnelle“ SCR-Reduktionsreaktion herstellen zu können (siehe Gleichung 4-4).

Da im Dieselaabgas ungefähr 90% der gesamten NO_x -Emissionen aus NO (Stickstoffmonoxid) bestehen [27], wird der Oxidationskatalysator vor dem eigentlichen SCR-Katalysator vorgeschaltet. In diesem Fall hat der Oxidationskatalysator die Aufgabe, den NO_2 -Anteil im Dieselaabgas über den Reaktionsmechanismus nach Gleichung 4-10 zu steigern.



Gleichung 4-10

Aus diesem Anstieg des NO_2 -Anteils im Abgas erhält man Bedingungen, die für eine „schnelle“ SCR-Reduktionsreaktion (Gleichung 4-4) und vor allem für die Reaktion bei tiefen Abgastemperaturen [18] erforderlich sind. Daher bringt der Einsatz eines Oxidationskatalysators im Abgasstrang signifikante Vorteile für den Betrieb in einem Dieselnutzfahrzeug mit sich.

Abbildung 19 zeigt den NO_x -Umsatz für einen V_2O_5 -Katalysator in Abhängigkeit von der Temperatur. Dargestellt sind Umsätze mit reinem NO beziehungsweise einer äquimolaren Mischung aus NO und NO_2 [17]. Vor allem in dem bei Kaltstart so wichtigen Temperaturbereich (bis ungefähr 200°C) zeigt die äquimolare Mischung wesentliche Vorteile gegenüber dem reinen 100 %- NO -haltigem Abgas.

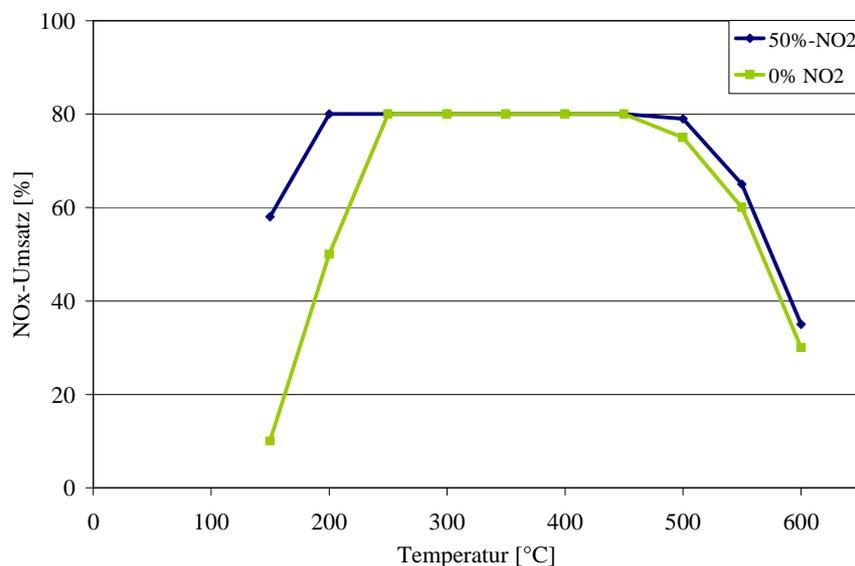
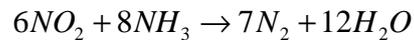


Abbildung 19: NO_x -Umsatz am SCR-Katalysator in Abhängigkeit vom NO_2 -Anteil [17]

Das Verhältnis von NO zu NO_2 im Dieselaabgas hängt zum einen von der Verbrennungstemperatur und zum anderen von dem jeweiligen Betriebszustand ab. Im unteren Teillastbereich bei niedrigen Abgastemperaturen können höhere NO_2 -Konzentrationen festgestellt werden [27].

Sollte der NO₂-Anteil im Abgas über die Hälfte ansteigen, ergibt sich wie in der Gleichung 4-11 ersichtlich, dass um 1/3 mehr Reduktionsmittel als in der „schnellen SCR-Reaktion“ verbraucht wird.



Gleichung 4-11

Daher sollte, um einen erhöhten Reduktionsmittelverbrauch zu vermeiden, der maximale NO₂-Anteil 50% nicht überschritten werden.

Diese Reaktion läuft zudem langsamer als die SCR-Standardreaktion nach Gleichung 4-3 ab. Die höchsten Stickoxidumsätze werden schlussendlich daher bei einem NO₂-Anteil von 50% erzielt.

4.9.5 Hydrolysekatalysator

Die Aufgabe eines Hydrolysekatalysators besteht in der Unterstützung und Beschleunigung der Hydrolyse des zu dosierenden Harnstoffs. Dabei ist das Ziel, eine möglichst vollständige Umwandlung von Harnstoff in Ammoniak gewährleisten zu können.

Dazu gehört im Einzelnen [13]:

- vollständige Verdampfung des Wassers
- die katalysierte thermische Zersetzung des Harnstoffs zu Ammoniak und Isocyanensäure
- die katalysierte Hydrolyse der Isocyanensäure (HNCO) zu Ammoniak (NH₃) nach (Gleichung 4-2)

Der Einsatz eines Hydrolysekatalysators beschleunigt, wie bereits eingangs erwähnt, die Umwandlung der bei der Thermolyse entstandenen Isocyanensäure (HNCO) in Ammoniak (NH₃). Hierdurch ist es möglich die Bildung von unerwünschten Nebenreaktionen zu unterbinden.

Als katalytisches Material wird in einem Hydrolysekatalysator bevorzugt V_2O_5 , WO_3/TiO_2 und Al_2O_3/SiO_2 verwendet [17].

Untersuchungen [28] ergaben, dass es bei der Anwesenheit von NO_2 im Abgas zu einer verringerten HNCO-Konvertierungsrate, im Temperaturbereich von $150^\circ C$ und $225^\circ C$, des Katalysators kommen kann (Abbildung 20).

Bei NO_2 -freiem Abgas ist bei einer Temperatur von ungefähr $200^\circ C$ die Umwandlung von der Isocyansäure (HNCO) in Ammoniak (NH_3) beinahe vollständig abgeschlossen [28].

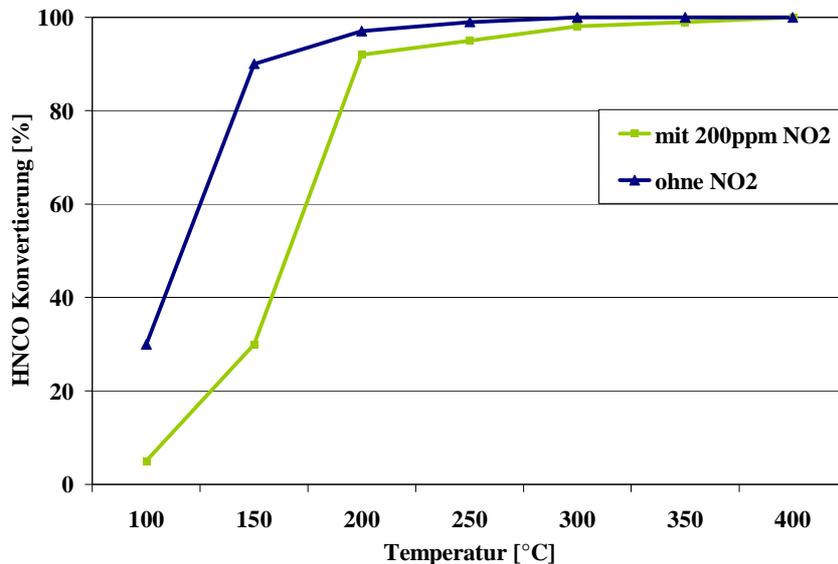


Abbildung 20: Einfluss von NO_2 auf die Hydrolyse von HNCO zu NH_3 [28]

Aufgrund der negativen Auswirkung von NO_2 auf die HNCO-Konvertierungsrate wurde in weiterer Folge der Hydrolysekatalysator als Vorkatalysator (Abbildung 21) mit integriertem Oxidationskatalysator entwickelt [13]. Dabei besteht dieser Vorkatalysator aus einem Hydrolysekatalysator und aus einem Oxidationskatalysator. Der Oxidationskatalysator ist dabei als metallischer Ringkatalysator im Nebenstrom ausgeführt.

Dies hat den großen Vorteil, dass, neben der Bildung von NO_2 durch den Oxidationskatalysator, parallel der Hydrolysekatalysator im Hauptstrom betrieben werden kann. Der Hydrolysekatalysator wird dabei zentral mit dem für die Hydrolyse notwendigen Harnstoff beaufschlagt.

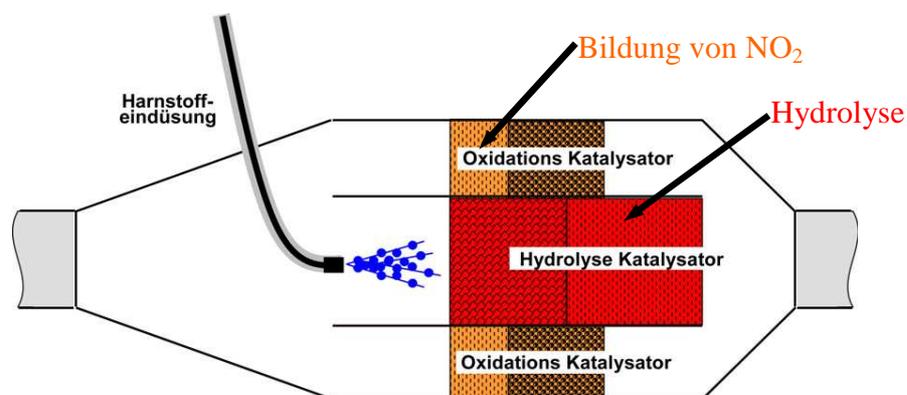


Abbildung 21: Nebenstrom Hydrolysesystem bei einem Hydrolysekatalysator [24]

Bei einem Einsatz dieses Vorkatalysators in ein SCR-System ist es möglich, die notwendige Größe des SCR-Systems deutlich zu reduzieren. Der Grund für die Reduktion der Katalysatorgröße ergibt sich bei der größeren Verweilzeit (t_V) des Abgases im Nebenstromhydrolysekatalysator und dadurch, dass die Hydrolyse nicht durch die Anwesenheit von einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator erzeugtem NO_2 behindert wird [24].

4.9.5.1 Vorteile eines Hydrolysekatalysators

Die Vorteile, die für einen Einsatz eines Hydrolyse-Katalysators im SCR-System sprechen, zeigen sich vor allem durch die beschleunigte Hydrolyse bei den sogenannten „kalten“ Testzyklen wie z.B.: US-FTP, WHTC und den diversen japanischen Tests.

In Abbildung 22 werden diese Vorteile eines Hydrolysekatalysators im Bezug zu einem konventionellen SCR-System ohne Hydrolysekatalysator, für den ESC Testzyklus gezeigt. Auch in diesem Testzyklus ergeben sich Vorteile für die Integrierung eines Hydrolysekatalysators in ein SCR-System.

Die deutliche Überlegenheit des Hydrolysekatalysators ist in dieser Abbildung als ΔHNCO und in ΔNH_3 ersichtlich. Die Isocyanensäure (HNCO) wurde mittels Hydrolysekatalysator beinahe vollständig in Ammoniak umgewandelt, und daher ist der NH_3 -Anteil um etwa 50% gestiegen. Durch die bessere Ausnutzung des Reduktionspotentials für die Umwandlung von der Isocyanensäure zu Ammoniak ergeben sich mit dem Hydrolysekatalysator weniger Ablagerungen und Nebenreaktionen im gesamten Abgassystem [13].

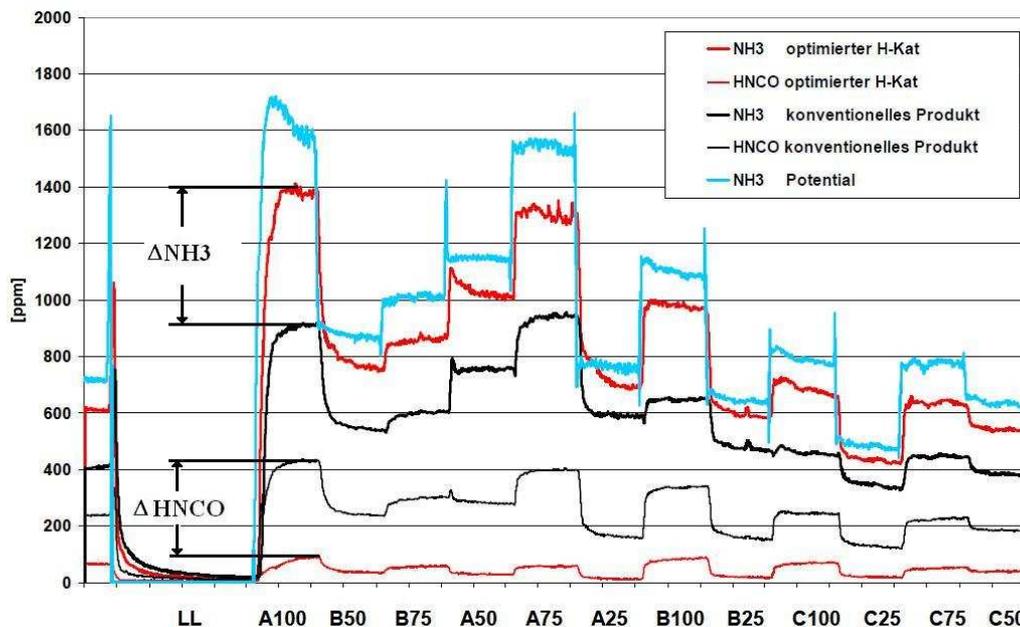


Abbildung 22: Optimierter Hydrolyse-Katalysator im Vergleich zu konventionellem Produkt (ESC-Test) [35]

4.9.5.2 Nachteile eines Hydrolysekatalysators

Gegen den Einsatz eines Hydrolysekatalysators im SCR-System spricht jedoch, dass aufgrund der thermischen Masse das Anspring- und Konvertierungsverhalten des SCR-Katalysators ungünstig beeinflusst wird. Außerdem haben weitere Untersuchungen [29] gezeigt, dass die Hydrolysefunktion auch vom SCR-Katalysator selbst übernommen werden kann. Dies ist gerade bzgl. der Bauraumeinsparung im PKW-Einsatz von besonderer Bedeutung. Daher wird in vielen Fällen auf den Einsatz eines Hydrolysekatalysators verzichtet, dessen Aufgaben entsprechend ein SCR-Katalysator übernehmen muss [17].

4.10 Niedertemperaturverhalten eines SCR-Katalysatorsystems

Da die von den Last- und Betriebszuständen abhängigen Abgastemperaturen in einer realen Stadtfahrt sehr gering sind, ist es von großer Bedeutung, die Niedertemperaturaktivität des gesamten SCR-Systems zu kennen.

In Abbildung 23 ist ein realer Stadtzyklus „Grazer Zyklus“, vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik entwickelter dynamischer Stadtzyklus, ersichtlich. In diesem Zyklus, der repräsentativ für eine Stadtfahrt eines Busses in der Grazer Innenstadt entwickelt wurde, liegt das Abgastemperaturniveau im Mittel bei ungefähr 200 °C.

Aufgrund des niedrigen Abgastemperaturniveaus ist es daher von großer Bedeutung, eine Optimierung des SCR-Katalysatorsystems in Richtung Niedertemperaturaktivität zu erreichen.

In weiterer Folge ist es notwendig, die Dosierstrategie des SCR-Systems für die jeweilige Eindosiermenge des Reduktionsmittels auf dieses Temperaturniveau auszulegen, um eine möglichst hohe NO_x-Konvertierungsrate bei gleichzeitig niedrigem Ammoniakslupf zu erhalten.

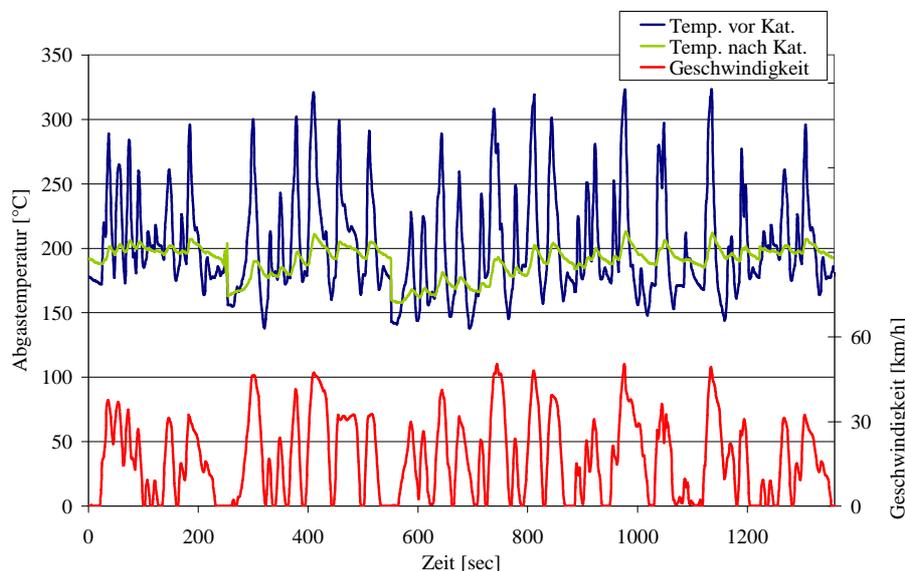


Abbildung 23: „Grazer Zyklus“, Abgastemperatur- und Fahrgeschwindigkeitsprofil eines Stadtbusses der Abgasgesetzgebung-EU3

Darüber hinaus wird über einen neuen Testzyklus, den WHTC (World Harmonized Test Cycle), mit der Einführung der EU VI-Abgasgesetzgebung diskutiert.

Dieser Testzyklus ist zumindest in Europa geplant und senkt das Temperaturniveau aufgrund der niedrigeren Motorlasten gegenüber dem ETC. Zusätzlich zu dem bisherigen Warmtest muss auch ein Kalttest gefahren werden, dies wiederum senkt das mittlere Abgastemperaturniveau weiter.

Daher wird es, um auch bei zukünftigen Nutzfahrzeugzyklen mit dem SCR-System respektable NO_x-Konvertierungsraten zu erhalten, sehr wichtig sein, diverse Bestrebungen und Entwicklungen, z.B. neue Katalysatormaterialien, Einsatz von Katalysatoren auf Zeolith-Basis (Kupfer-Zeolith) und Vorkatalysatoren (Nebenstrom-Hydrolysekatalysator), im Bezug auf die Niedertemperaturaktivität eines SCR-Katalysatorsystems auch weiterhin zu forcieren.

4.11 Aktuelle SCR-Katalysatoren und deren Bestandteile

Als SCR-Katalysatoren werden im heutigen Serienbetrieb, vor allem im Nutzfahrzeugsbereich, Vollextrudatkatalysatoren mit Vanadiumpentoxid als aktive Komponente eingesetzt. Zusätzlich werden die meisten SCR-Katalysatoren mit integrierten Mischerzonen versehen, um eine gute homogene Verteilung der Reduktionsmittellösung im Abgasstrang zu erreichen. Heutige SCR-Beschichtungen erfordern eine gute Niedertemperatureffektivität bei einer großen Washcoatmenge. Eine größere Washcoatmenge bedeutet jedoch, dass stärkere Beschichtungen im Katalysator notwendig sind. Dies führt jedoch im Katalysator zu einem schlechteren Stofftransport [26].

Zur Aufbereitung des zur SCR-Reaktion notwendigen Ammoniaks bestehen diese SCR-Katalysatoren im Allgemeinen aus zwei Katalysatormodulen. Die Aufgabe des ersten Moduls ist die Restverdampfung, Hydrolyse und Vermischung des Reduktionsmittels. Dies ist vor allem im Niedertemperaturbereich von großer Bedeutung. Die Aufgabe des zweiten Moduls ist die eigentliche NO_x-Reduktion. [25].

4.11.1 Kombination von Systemen zur PM-Minderung und NO_x-Reduktion

Um zukünftige Emissionsgrenzwerte (z.B. Emissionsrichtlinie EU VI) zu erreichen, geht die Tendenz der Nutzfahrzeughersteller dahin, ein kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem einzusetzen, das zur Minderung der Partikel und gleichzeitig zur NO_x-Reduktion beiträgt. Dieses kombinierte System zur Abgasnachbehandlung wurde bereits mehrmals erprobt.

Die Eindosierstelle wird dabei zentral vor dem Vorkatalysator angebracht und die Dosierung des Reduktionsmittels erfolgt dabei direkt in den Hydrolysekatalysator. Dabei kommt es nicht zu einer Behinderung der eigentlichen Hydrolyse, durch vermehrtes NO₂ im Abgas, wie in Kapitel 4.9.5 beschrieben.

Der PM-Katalysator wird dabei unter anderem aus platztechnischen Gründen in den SCR-Katalysator integriert. Dieser sorgt auch für eine bessere Durchmischung der Komponenten (HNCO, Ammoniak und Motorabgas), was wiederum eine bessere Ausnützung des Reduktionskatalysators ergibt [14].

Abbildung 24 zeigt eine mögliche Variante einer kombinierten Abgasnachbehandlung.

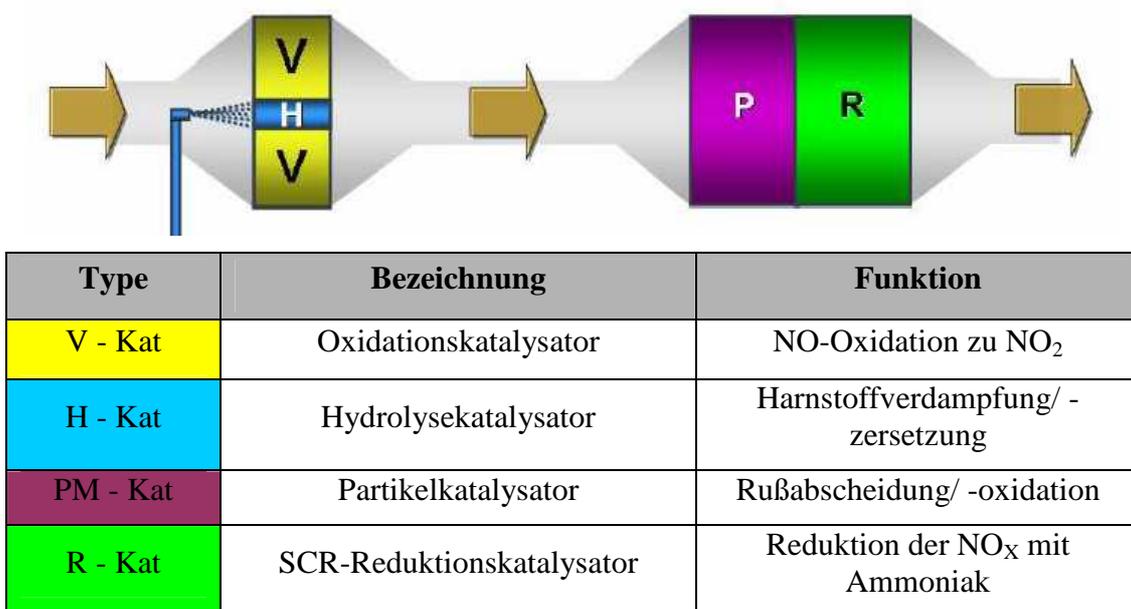


Abbildung 24: Kombinationssystem zur NO_x- und Partikelreduzierung für EU V [Quelle: Emitec, MAN]

Um ein komplettes Abgasnachbehandlungssystem für die Reduzierung der Stickoxide und der Partikel im Abgasstrang eines Nutzfahrzeugs unterzubringen, wurden verschiedene Möglichkeiten entwickelt.

In Abbildung 25 wird eine mögliche Variante eines kombinierten Systems in einem Nutzfahrzeug gezeigt. Der Vorkatalysator besteht aus dem Hydrolysekatalysator und einem, um eine Behinderung der Hydrolyse durch auftretendes NO_2 zu vermeiden, ringförmig angeordneten Oxidationskatalysator (Kapitel 4.9.5). Um die Anzahl der Partikel im Abgas zu reduzieren, ist vor dem eigentlichen SCR-Katalysator ein Partikelkatalysator integriert.

Der eigentliche SCR-Katalysator ist ein Vollextrudatkatalysator vom Typ $\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$. Zusätzlich befindet sich, um etwaigen Ammoniakslupf zu minimieren, eine ca. 10mm breite mit Platin imprägnierte Schicht am Ende des SCR-Katalysators.

Ziel weiterer Entwicklungen für diese Art der Abgasnachbehandlung wird es sein, eine weitere Verkleinerung der Katalysatoren, bei gleichzeitig verringertem Gegendruck und Minimierung des Ammoniakslupfes, zu erreichen [14].

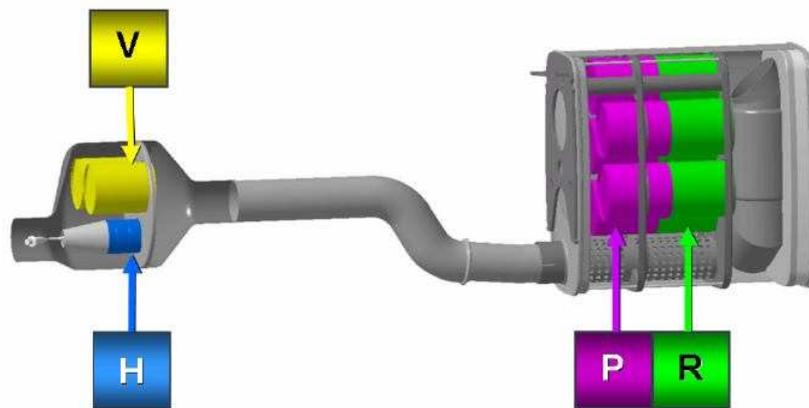


Abbildung 25: Nutzfahrzeugausführung eines kombinierten Systems [Quelle: MAN Nutzfahrzeuge AG]

5 Bestimmungsgrößen der Harnstoffeindosierung

Um die für das notwendige SCR-Reaktionsverfahren notwendige Harnstoffmenge zu erhalten, sind mehrere Bestimmungsgrößen notwendig. Die über diese Bestimmungsgrößen ermittelte Harnstoffmenge soll mit der Zusammensetzung im Abgas korrelieren, da einerseits die eingebrachte Harnstoffmenge über den in der Abgasgesetzgebung erlaubten Grenzwert für Ammoniakslupf (aktuell 25 ppm im Zyklusmittelwert [33]) begrenzt ist, und andererseits das SCR-System eine hohe DeNO_x-Konvertierungsrate ermöglichen soll.

Diese Aufgabe obliegt der implementierten Dosiersteuerung, die aus den ermittelten Bestimmungsgrößen die erforderliche Harnstoffeindosiermenge ermitteln muss (siehe Abbildung 26).

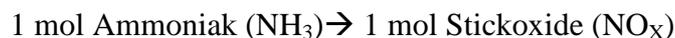


Abbildung 26: Prinzipsskizze zur Ermittlung der erforderlichen Reduktionsmittelmenge

5.1 Reaktionsgleichungen für die Ermittlung der erforderlichen Eindosiermenge

Da das Dieselrohgas überwiegend Stickstoffmonoxid (NO) beinhaltet, und davon ausgehend, dass sich kein Oxidationskatalysator im Abgasstrangsystem befindet, wird als Ausgangsreaktion die SCR-Standardreaktion (siehe Gleichung 4-3) als Bezug für die erforderliche Harnstoffeindosiermenge verwendet.

Aus der Standard-SCR-Reaktionsgleichung geht hervor, dass bei stöchiometrischer Umsetzung der gesamten Stickoxide mit NH₃, 1 mol Ammoniak (NH₃) pro mol Stickoxid benötigt wird.



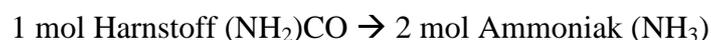
Die Ammoniakbereitstellung erfolgt, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, aus den Reaktionen der Thermolyse- und Hydrolyse.

Als Produkt der beiden Reaktionsgleichungen, Gleichung 4-1 für die Thermolyse und Gleichung 4-2 für die Hydrolyse, geht die Reaktionsgleichung für die Bereitstellung von Ammoniak aus der eingebrachten Harnstoff-Wasserlösung (AdBlue) hervor.



Gleichung 5-1

Damit entstehen bei der Dosierung von 1 mol Harnstoff ((NH₂)₂CO), 2 mol Ammoniak (NH₃) bei einer vollständigen Umsetzung.



5.2 Ermittlung der stöchiometrischen Eindosiermenge

Das Feedverhältnis (α -Alpha) beschreibt das molare Verhältnis zwischen eingebrachter Reduktionsmittelmenge (NH_3) und Stickoxidmenge (NO_x) im Abgas.

$$\alpha = \frac{\text{NH}_3}{\text{NO}_x}$$

Gleichung 5-2

5.2.1 Diverse Vereinfachungen für die Ermittlung der Eindosiermenge

Da ein konventioneller Dieselmotor immer mit Luftüberschuss betrieben wird, können Vereinfachungen bestimmter Parameter des Dieselaabgases getroffen werden. Diese Vereinfachungen sind für die Berechnung der erforderlichen Reduktionsmittelmenge aus der Abgasanalyse notwendig.

Der Lambdabereich eines Nutzfahrzeugdieselmotors von Leerlauf bis Volllast beträgt ungefähr:

- bei Leerlauf: $\lambda = 1.3$
- bei Volllast: $\lambda = 8$

In Gleichung 5-3 ist die Beziehung zwischen Lambda, der angesaugten Luftmasse und der Kraftstoffmasse gezeigt.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_L}{L_{St} \cdot \dot{m}_B}$$

λ ...Luftverhältnis

\dot{m}_L ...Luftmassenstrom

L_{St} ...Stöchiometrischer Luftbedarf

\dot{m}_B ...Kraftstoffmassenstrom

Gleichung 5-3

Da der Anteil an Kraftstoffmasse im Abgasmassenstrom im Verhältnis zum Luftmassenstrom bei einem Dieselmotor eine wesentlich geringere Konzentration besitzt, wird als Annäherung der Abgasmassenstrom dem des Luftmassenstroms gleichgesetzt.

Aus Gleichung 5-3 ergibt sich aus dem zuvor erwähnten Lambdabereich eine geringe Abweichung der Kraftstoffmasse von Leerlauf zu Volllast (Gleichung 5-4).

$$\dot{m}_{Abgas} \approx \dot{m}_L$$

\dot{m}_{Abgas} ...Kraftstoffmassenstrom

Gleichung 5-4

Gleiches wie für den Abgasmassenstrom gilt für die Gaskonstanten. Die Gaskonstante für Luft beträgt dabei $R_{Luft}=287 \text{ kJ/kgK}$.

$$R_{Abgas} \approx R_L$$

Gleichung 5-5

5.2.2 Ermittlung der Stickoxidrate aus der Abgasanalyse

Um eine hohe Konvertierung der Stickoxide zu erreichen, ist eine exakte Reduktionsmittelmenge erforderlich. Die Höhe der Reduktionsmittelmenge wird als Parameter aus der Stickoxidkonzentration im Abgas bestimmt.

Die umgesetzte Stickoxidrate ergibt sich aus der Temperatur vor und nach dem SCR-Katalysator, der Konzentration an Stickoxiden im Abgas, dem Verhältnis von NO_2/NO im Abgas, der Reduktionsmittelmenge und dem Abgasmassenstrom.

Eine genaue Abbildung der Reduktionsmittelmenge lässt sich über das im Motor implementierte Steuergerät über Kennfelder auslesen bzw. müssen bei mehreren Motor- und Rollenprüfstandtests mit entsprechenden Sensoren oder über ein Abgasmesssystem ermittelt werden. Für die Ermittlung der im Abgas enthaltenen Stickoxide (NO_x) wird als Bezug der Normzustand [DIN 1343 „Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe, Werte“, Ausgabe Januar 1990] verwendet.

Normzustand (DIN 1343)	
Bezeichnung	
Normtemperatur	$T_{\text{Norm}} = 273,15 \text{ K}$
Normdruck	$p_{\text{Norm}} = 1013,25 \text{ hPa}$
Normvolumen	$v_{\text{Norm}} = 22,4 \text{ dm}^3/\text{mol}$

Tabelle 2: Normzustand

Von der idealen Gasgleichung erhält man nach Gleichung 5-6 für die Dichte als Bezug der Normzustand:

$$\rho_{\text{Norm}} = \frac{p_{\text{Norm}}}{R_{\text{Abgas}} \cdot T_{\text{Norm}}}$$

Gleichung 5-6

Damit ergibt sich für die Dichte im Abgas, bei Normtemperatur und -druck:

$$\rho_{\text{Norm}} = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Gleichung 5-7

In Gleichung 5-8 wird die Beziehung zwischen Abgasmassenstrom, Dichte und Volumenstrom in Bezug auf den Normzustand gezeigt.

$$\frac{\dot{m}_{\text{Abgas}}}{\rho_{\text{Norm}}} = \dot{v}_{\text{Norm}}$$

Gleichung 5-8

Die Stickoxidrate [mol/h] im Abgasmassenstrom wird mit nachfolgender Gleichung berechnet. Dabei wird die tatsächliche Stickoxidrate [ppm] aus dem NO_x-Sensor bzw. aus der Abgasanalyse berechnet. Zur Vereinfachung wird der gemessene Wert des Heißfilmanemometers für den Luftmassenstrom anstelle des Abgasmassenstroms eingesetzt.

$$NO_x \left[\frac{\text{mol}}{\text{h}} \right] = \frac{[NO_x]}{10^6} \cdot \frac{\dot{m}_{Abgas}}{\rho_{Norm}} \cdot \frac{1}{\dot{V}_{Norm} \cdot 10^{-3}}$$

Gleichung 5-9

5.2.3 Berechnung des Massenstroms an Harnstoff-Wasserlösung für $\alpha=1$

Benötigter Harnstoffmassenstrom bei der Molaren Masse für Harnstoff 60 g/mol, für $\alpha=1$. Für die Reduzierung von 1 mol NO_x sind 30g Harnstoff (NH₂)₂CO notwendig.

$$(NH_2)_2CO \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = NO_x \cdot 30 \cdot 10^{-3}$$

Gleichung 5-10

Die Umrechnung auf die Harnstoff-Wasserlösung (AdBlue) gemäß 32,5-Gew% Harnstoff als Reduktionsmittel ergibt:

$$AdBlue \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = (NH_2)_2CO \cdot \frac{1}{0,325}$$

Gleichung 5-11

5.2.4 Berechnung der Harnstoff-Eindosierung für ein beliebiges α

Die NO_x-Konzentration im Abgas wird über die NO_x-Sensoren ermittelt. Mit dieser Gleichung lässt sich je nach gewünschtem Feedverhältnis (α -Alpha) die notwendige Harnstoff-Wasserlösung (AdBlue) ermitteln.

$$AdBlue \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = \frac{[NO_x]}{10^6} \cdot \frac{\dot{m}_{Abgas}}{\rho_{Norm}} \cdot \frac{1}{\dot{V}_{Norm}} \cdot \frac{30}{0,325} \cdot \alpha$$

Gleichung 5-12

Mit der obigen Beziehung 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 (AdBlue) für eine Eindosierung in das Abgassystem bestimmt werden. Der Abgasmassenstrom bzw. der aus der Vereinfachung angewandte Luftmassenstrom muss ebenfalls bekannt sein.

6 Konstruktion und Integration des SCR-Systems in den Stadtbus

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde in einen, von den Grazer Verkehrsbetrieben zur Verfügung gestellten Stadtbus, ein gesamtes SCR-System integriert. Dabei wurde eine vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, entwickelte Dosierstrategie weiterentwickelt und in mehreren realen Prüfzyklen getestet.

Um ein SCR-System in den Stadtbus nachzurüsten bedurfte es, aufgrund der sich bietenden Platzverhältnisse, an beträchtlichem konstruktivem Aufwand.

Es musste Platz für:

- die AdBlue-Dosierung mit Abstand zum SCR-Katalysator für die Hydrolyse,
- den AdBlue-Tank,
- die Steuerelektronik und die Dosiereinheit
- und die Sensoren gegeben sein.

Aufgrund der sich im Stadtbus bietenden Platzsituation mussten vorher einige konstruktive Überlegungen getroffen werden, um ein gesamtes funktionionsfähiges SCR-System (Dosiermodul, -ventil, Reduktionsmittel tank und Steuerungseinheit) in den Stadtbus integrieren zu können. Dabei wurden sämtliche Bauteile neu konstruiert und an die Gegebenheiten, die sich im Stadtbus bieten, angepasst. Zusätzlich wurde eine Aufhängungskonstruktion zur Integration des SCR-Katalysators (siehe Kapitel 6.2.2) in den Stadtbus konstruiert.

In Abbildung 27 wird schematisch die Einbausituation in den Stadtbus gezeigt. Dabei wurden, wie in der Abbildung ersichtlich ist, der Tank für die Harnstoffwasserlösung (AdBlue) im Motorraum sowie die Steuerung und das Versorgungsmodul, im Innenraum (Abbildung 28) des Stadtbusses verbaut.

Der zuvor im Stadtbus befindliche (EU II) Serienschalldämpfer wurde durch einen eigens für dieses Projekt entwickelten SCR-Katalysator ersetzt. Am SCR-Katalysator wurden das Dosierventil sowie weitere Sensoren verbaut. Die Harnstoff-Leitungen wurden vom AdBlue-Tank im Motorraum zum Versorgungsmodul in den Innenraum des Stadtbusses verlegt. Diese Leitungen wurden zusätzlich, aufgrund der höheren Temperaturen im Motorraum mit einer hitzebeständigen Isolierung versehen.

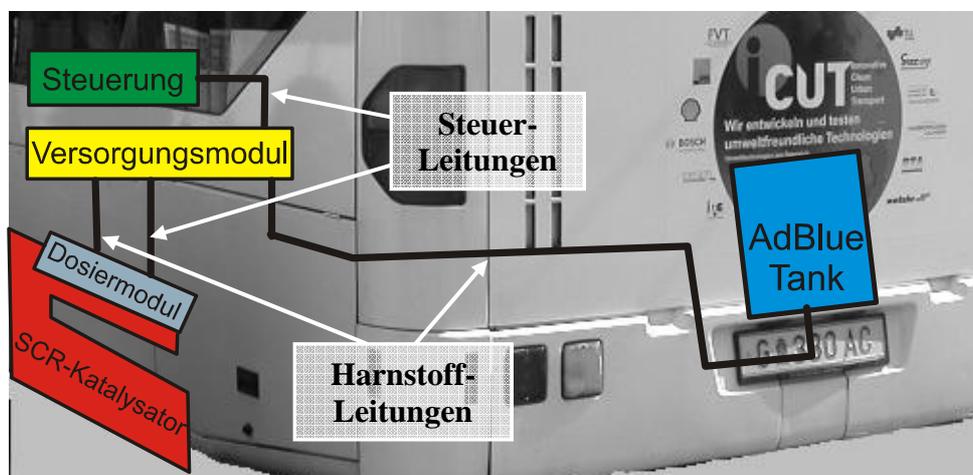


Abbildung 27: Schematische Skizze der Einbausituation des SCR-Systems im Stadtbus (Ansicht: hinten)

In Abbildung 28 ist die Einbausituation der für die SCR-Dosierung notwendigen Komponenten (Steuerungseinheit und Fördermodul) vom Innenraum des Stadtbusses gezeigt.

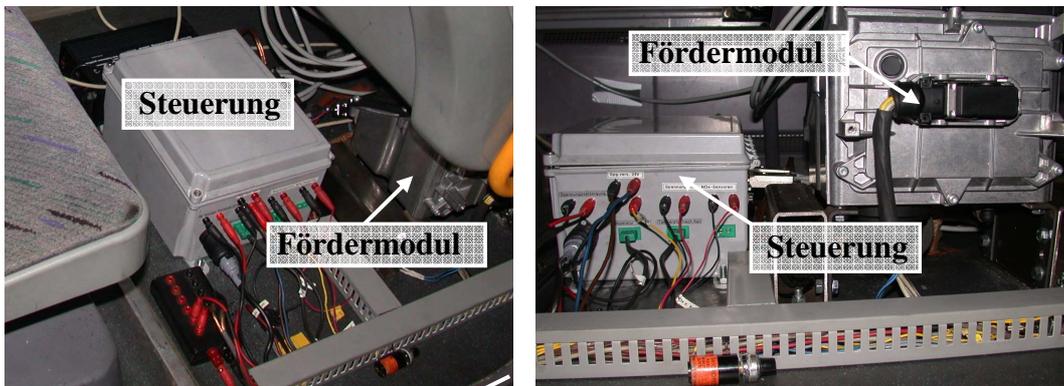


Abbildung 28: Einbaulage der SCR-Steuerung im Innenraum des Stadtbusses

6.1 Randbedingungen für den Einbau eines SCR-Systems

6.1.1 Einbausituation des gesamten SCR-Systems

Das in den Stadtbus integrierte SCR-System (Versorgungs- und Dosiermodul) ist ein von BOSCH für den Serienbetrieb entwickeltes System mit dem kommerziellen Markennamen Denoxtronic 2. Dieses System hat sich seit einiger Zeit bereits bewährt und findet sich bei EU IV- und EU V-Nutzfahrzeugen bereits im Serieneinsatz.

Das Denoxtronic 2 SCR-Dosiersystem arbeitet drucklos, d.h. die Eindosierung des Reduktionsmittels erfolgt ohne jegliche Druckluftunterstützung. Der Druck zur Eindosierung des Reduktionsmittels wird vom Dosiermodul über den vom Versorgungsmodul aufbrachten Druck bereitgestellt.

Abbildung 29 zeigt das gesamte SCR-System von Bosch Denoxtronic 2.

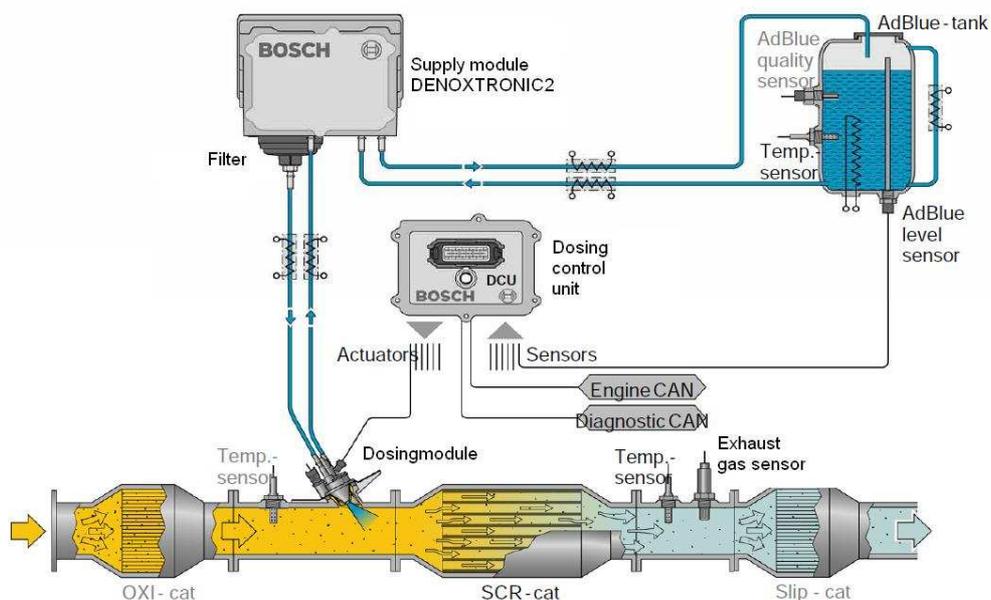


Abbildung 29: SCR-Gesamtsystem Bosch Denoxtronic 2 [5]

In Abbildung 30 ist eine mögliche Variante einer Einbauanordnung eines SCR-Systems, wie sie in der Einbaurichtlinie von Bosch vorgeschlagen ist, dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass der Unterschied in der Einbauhöhe der notwendigen SCR-Komponenten, aufgrund der möglichen Probleme mit der Druckaufbereitung (Tank, Versorgungsmodul und Dosiermodul), nicht größer als 1 Meter betragen darf.

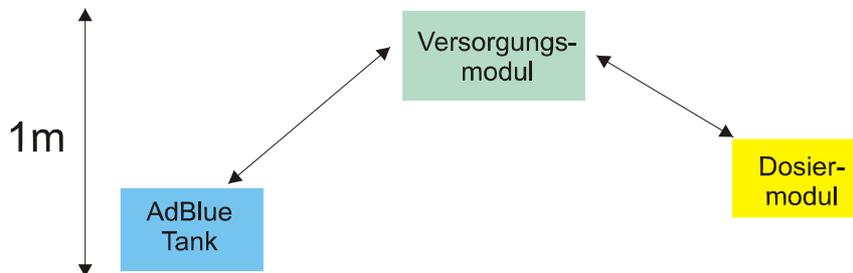


Abbildung 30: Einbauhöhenrichtlinie eines SCR-Systems [5]

Um eine objektive Übersicht über die Platzverhältnisse und Anschlussmaße zu ermöglichen, wurde eine Recherche über die bestehende Abgasanlage, Platzverhältnisse, Anschlussmaße und Abmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurden zur Veranschaulichung Zeichnungen der für das SCR-System notwendigen Komponenten konstruiert (Abbildung 31). Darauf aufbauend wurde ein Konzept zur Integration der Komponenten in den Stadtbus erstellt.

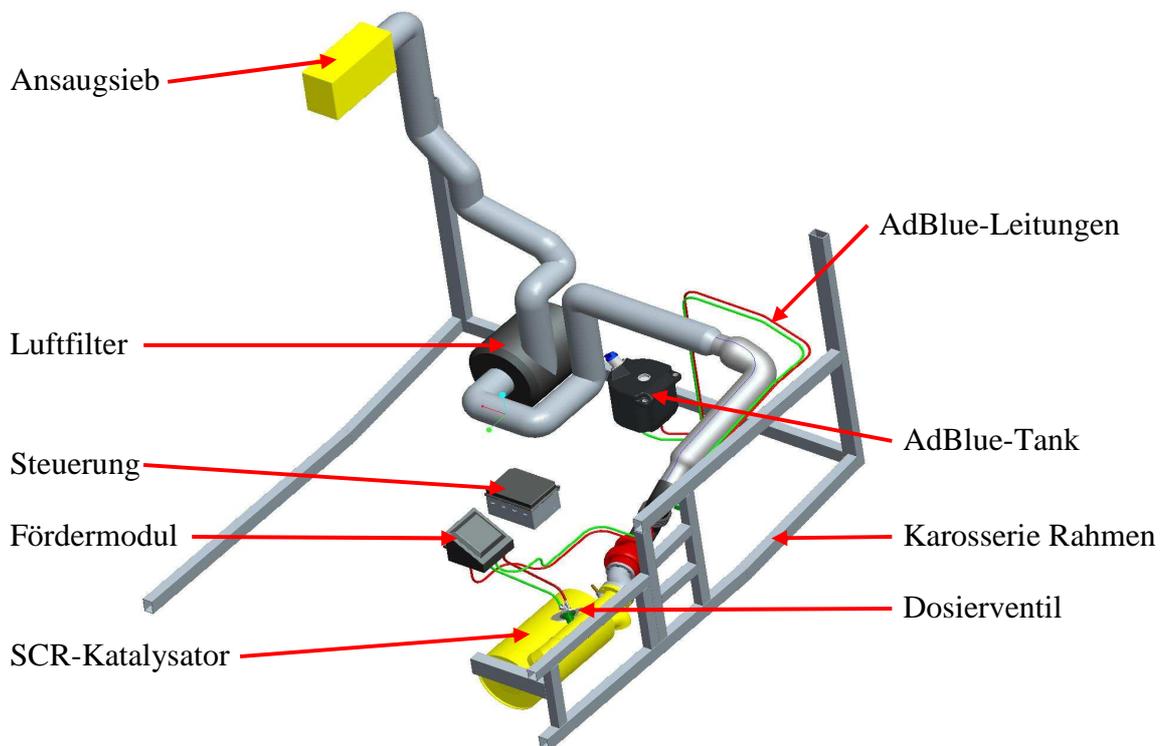


Abbildung 31: Einbausituation der SCR-Komponenten in den Stadtbus (CAD-Modell)

Schlussendlich musste ein Kompromiss zwischen den Platzverhältnissen im Stadtbus und der bevorzugten Einbauanordnung (für ein SCR-System nach Bosch) getroffen werden. Für den Stadtbus ergab sich dabei, dass das Versorgungsmodul im Innenraum des Stadtbusse sehr gut positioniert werden kann. Der AdBlue-Tank wurde dabei etwas tiefer in den Motorraum, das Dosierventil direkt an den SCR-Katalysator angebracht.

6.2 Komponenten und ihre Funktionsweise

In Abbildung 32 ist die Anordnung der Sensoren und der dazu notwendigen Komponenten für die Ansteuerung des gesamten SCR-Systems mit dem Microcontrollerboard dargestellt.

Das für die Diplomarbeit verwendete SCR-System besteht neben dem SCR-Katalysator aus einem serienmäßigen, druckluftlosen Harnstoff-Dosiersystem (BOSCH-Denoxtronic2) und einer Kombination von einem Luftmassenmesser, zwei NO_x -Sensoren und Abgastemperatursensoren, die jeweils vor und nach dem SCR-Katalysator angeordnet sind.

Da man beim Stadtbus keinen Zugriff in die Motorsteuerung hatte, wurde das SCR-Dosiersystem über eine CAN-Busverbindung angesteuert und je nach Dosierstrategie die berechnete Harnstoffdosiermenge vom Dosierventil in den Abgasstrang eingebracht.

Die NO_x -Sensoren werden dabei ebenso über die CAN-Busverbindung angesteuert. Die von den NO_x -Sensoren ermittelten Messdaten werden über das Microcontrollerboard eingelesen und in die Dosierstrategie integriert und daraus die erforderliche Harnstoffdosiermenge berechnet.

Die in das SCR-System implementierten Sensoren sind im Automotiven Bereich serienmäßig im Einsatz (NO_x -, Temperatur- und Luftmassesensor) und wurden aufgrund der einfachen Adaptierung mit den dafür vorgesehenen Steckvorrichtungen montiert.

Über den A/D-Wandler, der sich am Microcontrollerboard befindet, werden die Messsignale der Temperatursensoren sowie das Ausgangssignal des Luftmassenmessers an die Software des Microcontrollerboards übermittelt. Die Dosierung der erforderlichen Reduktionsmittelmenge erfolgt nach Gleichung 5-12, grundsätzlich als Funktion von NO_x -Emission und gewünschter Konvertierungsrate.

Das System ermöglicht aufgrund der zwei NO_x -Sensoren auch eine Regelungsstrategie der Dosiermenge. Damit ist es möglich, Untersuchungen an verschiedenen SCR-Katalysatoren mit verschiedenen Dosierstrategien rasch umzusetzen.

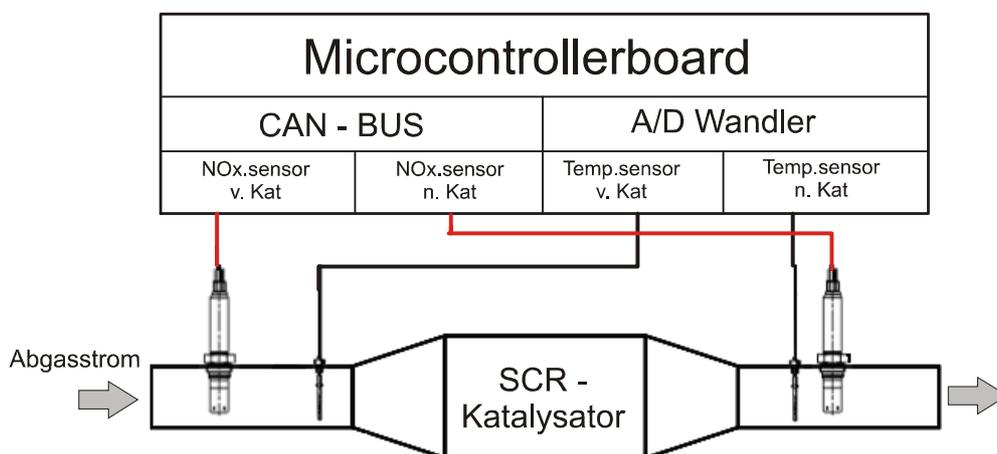


Abbildung 32: Schemenhafter Aufbau der Sensoren des SCR-Systems

6.2.1 Steuerungshardware

Die gesamte Steuerungshardware (siehe Abbildung 33) des SCR-Nachrüstsystems beinhaltet neben den Anschlussmöglichkeiten für die jeweiligen Sensoren (NO_x-, Temperatur und Heißfilmanemometer) als zentrale Steuerungseinheit ein Microcontrollerboard. Dieses Microcontrollerboard dient zur Ermittlung der jeweiligen Kenngrößen z.B.: Temperatur, Luftmasse und NO_x-Konzentration. Aus diesen Kenndaten, wird wie zuvor beschrieben, die notwendige Dosiermenge der jeweiligen Dosierstrategie ermittelt und über die CAN-Busverbindung an das Dosiermodul der Denoxtronic 2 übergeben.

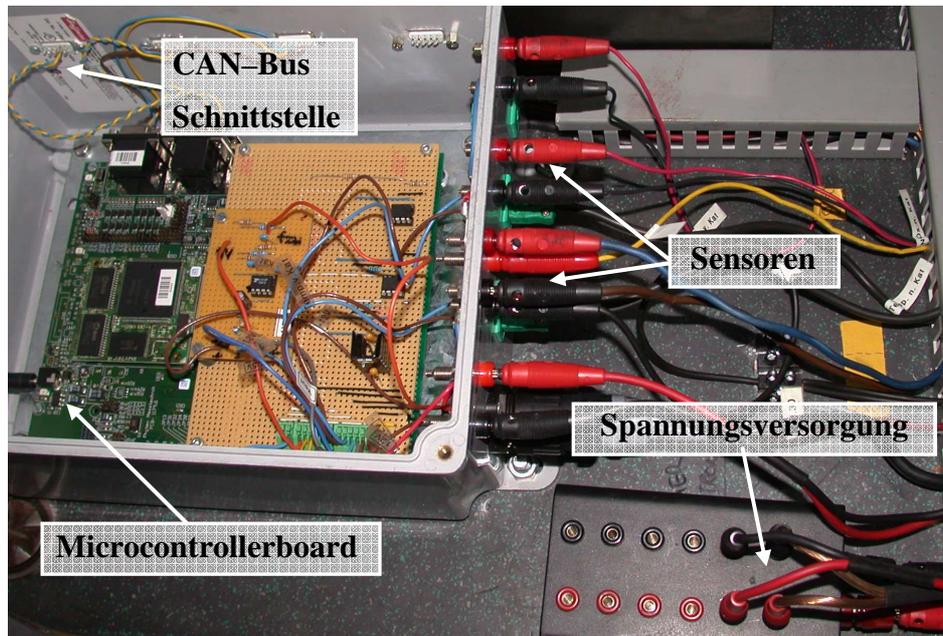


Abbildung 33: Einbausituation der Sensoren und des Microcontrollerboards

Die Spannungsversorgung für das Microcontrollerboard wird über das Bordnetz zur Verfügung gestellt. Dabei wurden die Steuerungselektronik und der Luftmassenmesser über einen Spannungswandler mit jeweils 12V versorgt. Die gesamte Spannungsversorgung für die Komponenten des SCR-Systems werden dabei von der Batterie des Stadtbusses bereitgestellt (Abbildung 34).

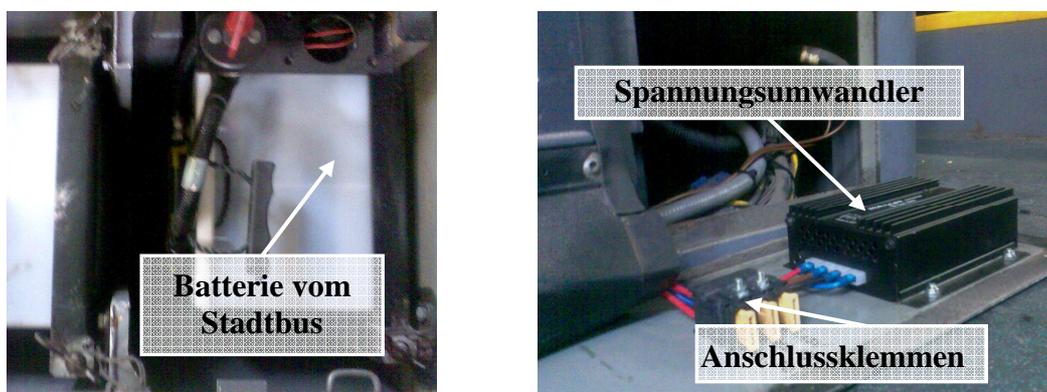


Abbildung 34: Spannungsversorgung für das Microcontrollerboard und die zugehörige Sensorik

In Abbildung 35 ist die gesamte Steuerungshardware, die das Microcontrollerboard beinhaltet, ersichtlich. Dabei wurde ein Microcontrollerboard der Firma „phyCore“ des Typs phyCore 167-CS verwendet. Als Microcontroller wurde ein 16-Bit Single-Chip-Controller von der Firma „Infineon“ in das Microcontrollerboard des Typs „C167CS-LM“ integriert.

Die am Microcontrollerboard befindlichen CAN-Schnittstellen dienen zur Kommunikation mit den Sensoren. Zusätzlich dient die integrierte serielle Schnittstelle des Microcontrollerboards zur Kommunikation mit dem PC.

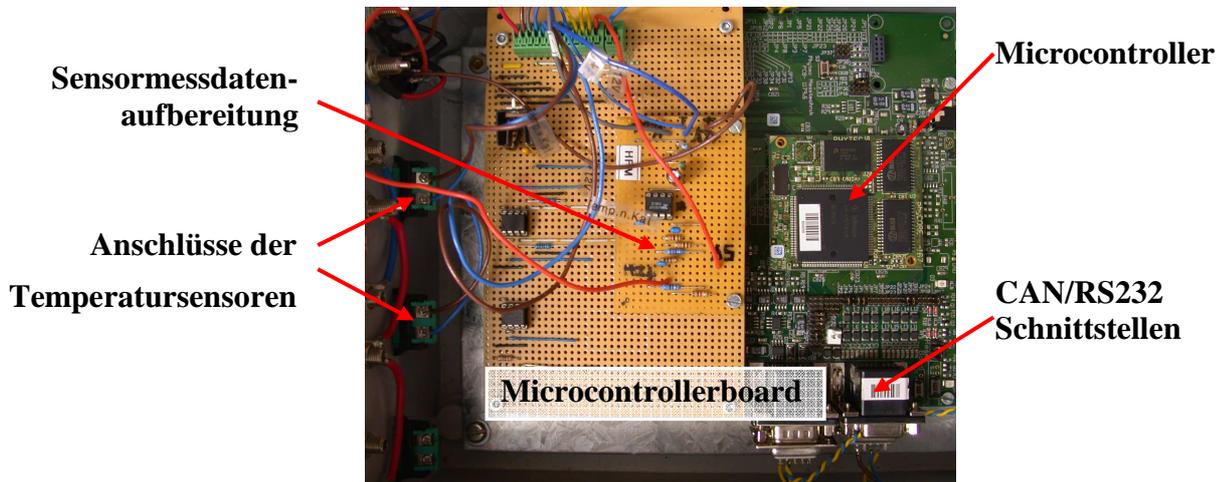


Abbildung 35: Microcontrollerboard

Das Microcontrollerboard bietet folgende wichtige Funktionalitäten:

- 16bit demultiplexed Busmode
- 20 MHz CPU-Takt
- On-Board Flash-Programmierung
- Serielle RS232 und CAN-Bus Schnittstellen
- Integrierte A/D-Wandler

Eine Übersicht über die vorhandene Hardware des Microcontrollerboards ist im Blockschaltbild, Abbildung 36, ersichtlich.

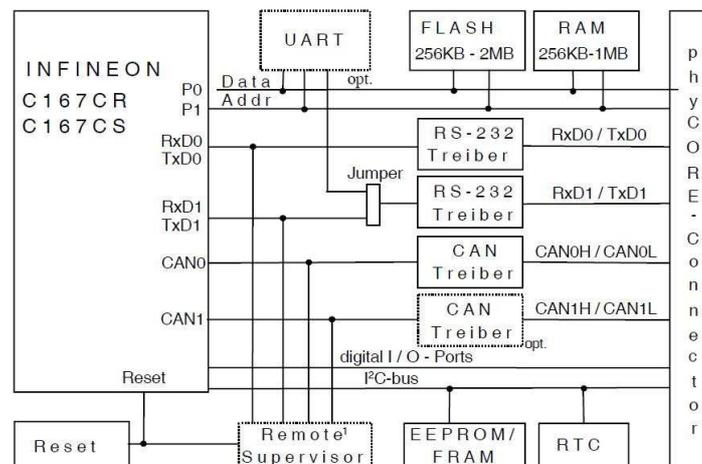


Abbildung 36: Blockschaltbild des Microcontrollerboards [Quelle: phyCore-167, QuickStart Instructions]

Der Upload der jeweiligen Dosierstrategie zum Microcontrollerboard erfolgte über die serielle Schnittstelle (RS232). Zur Datenübertragung mit dem Computer wurde das Freewaretool „Minimon“ verwendet.

6.2.2 SCR-Katalysator

Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist ein SCR-Katalysator der Firma CERAM zum Einsatz gekommen (Abbildung 37). Dieser SCR-Katalysator besteht aus zwei in einem Edelstahlschalldämpfergehäuse von der Firma RTA seriell angeordneten zylindrischen Katalysatormodulen.

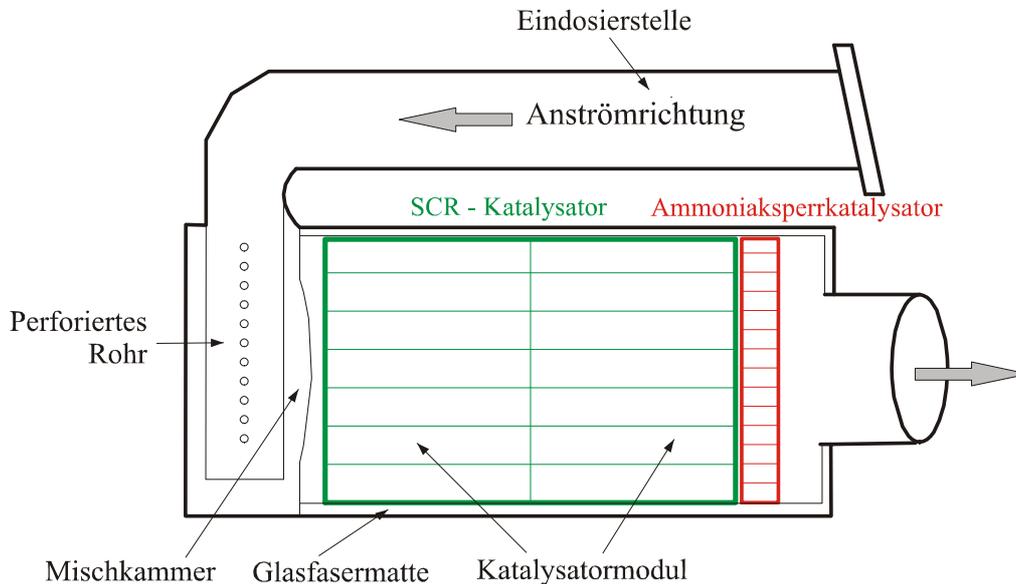


Abbildung 37: Aufbau des SCR-Katalysators

Die einzelnen Katalysatormodule wurden von der Firma CERAM speziell für diesen Katalysator hergestellt. Die Katalysatormodule, Abbildung 38, bestehen aus einem monolithisch vollextrudierten Wabenkörper, der über eine Zelldichte von 300 cpsi (cell per square inch) verfügt.

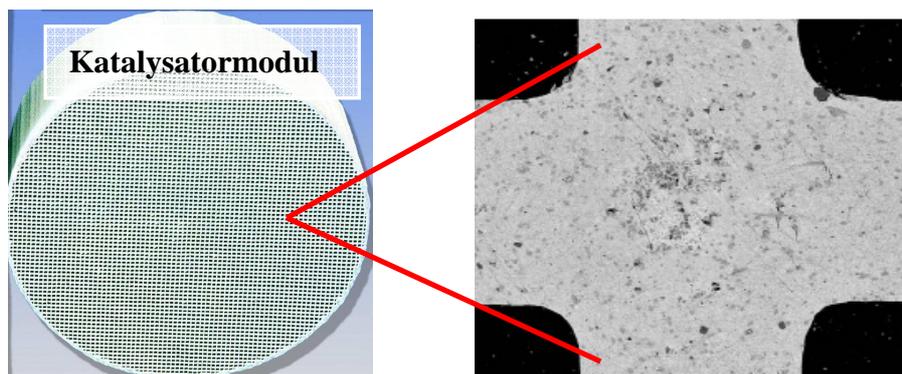


Abbildung 38: Vollextrudierter Wabenkörper eines SCR-Katalysatormoduls [CERAM]

Der vollextrudierte Wabenkörper hat mit dieser Zelldichte den Vorteil ein schnelleres Aufwärmverhalten, gegenüber herkömmlichen Katalysatoren, zu besitzen.

Im Inneren des Katalysators befindet sich eine Glasfasermatte zur Wärmedämmung. Ein im Eingang des Katalysatorkörpers befindliches perforiertes Rohr sorgt für eine gleichmäßige Beaufschlagung des Katalysatorkörpers. Dies wiederum hat den Vorteil, eine bessere Umsetzung und eine Erhöhung der Konvertierungsrate im SCR-Katalysator zu erreichen.

Außerdem zeichnet sich dieser Katalysatortyp durch eine besonders hohe katalytische Aktivität, Selektivität und Lebensdauer aus. Im SCR-Katalysatorvolumen sind zwei dieser vollextrudierten Wabenkörper (Abmessungen 305x178mm) seriell verbaut. Dieser SCR-Katalysator ist, um eine hohe Anzahl an Zellen pro jeweils eingebrachten Monolithen zu erreichen, mit einem speziellen Fertigungsverfahren, der Extrusionstechnik, hergestellt und anschließend thermisch kalziniert worden. Mit diesem speziellen Verfahren ist es möglich, 40.000 Zellen pro Monolithen unterzubringen. Dies hat zur Folge, dass das Abgas auf kleinere Kanäle treffen kann und daher insgesamt eine höhere Konvertierungsrate möglich ist.

Die Katalysatormodule des SCR-Katalysators setzen sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

Anteil	Bestandteile
80 %	Titandioxid TiO_2
8 %	Wolframtrioxid WO_3
2 %	Vanadiumoxid V_2O_5
10 %	Glasfaser

Tabelle 3: Bestandteile des SCR-Katalysatormodule (CERAM)

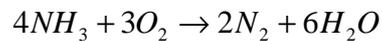
Das gesamte SCR-Katalysatorvolumen beträgt dabei insgesamt 26 Liter und das Katalysatorvolumen des Ammoniaksperrkatalysators dabei ungefähr 0,7 Liter. Der Ammoniaksperrkatalysator ist mit Platin beschichtet und verhindert die Freisetzung von überschüssigem Ammoniak.

Die Ursachen für Ammoniak-Durchbrüche können in der schlechten Gleichverteilung (lokale Überdosierung) des Ammoniaks am Eintritt des SCR-Katalysators oder an der Katalysatoralterung liegen.

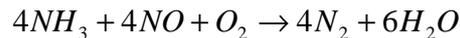
Im SCR-Katalysator eingespeichertes Ammoniak kann bei etwaiger Unterdosierung so zu einer Stickoxidreduktion beitragen. Diese Ammoniakspeicherfähigkeit ist vor allem im transienten Betrieb, da vor allem im innerstädtischen Verkehr sehr viele Lastwechsel auftreten, eine wichtig zu beachtende Eigenschaft.

Durch die Platin (Pt) Tauchbeschichtung des Ammoniaksperrkatalysators können bereits bei tiefen Temperaturen NH_3 -Umsätze ermöglicht werden. Aufgrund dieser Aktivkomponente können allerdings Nebenprodukte wie NO , NO_2 und Lachgas N_2O entstehen (siehe Gleichung 6-1 bis Gleichung 6-3).

Folgende Reaktionen zur NH_3 -Konvertierung können dabei im Ammoniaksperrkatalysator auftreten:

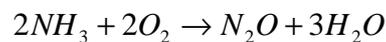


Gleichung 6-1



Gleichung 6-2

N_2O Bildung im Ammoniaksperrkatalysator:



Gleichung 6-3

Der in den Stadtbus implementierte SCR-Katalysator wurde, wie in Abbildung 39 und Abbildung 40 ersichtlich, zusätzlich mit mehreren Sensoren (Temperatur- und NO_x -Sensoren) und mit dem für die Reduktionsmitteldosierung notwendigen Dosierventil ausgestattet. Dabei wurden insgesamt zwei Temperatursensoren (Pt200-Widerstandsthermometer), zwei NO_x -Sensoren und ein Anschlussflansch für eine mögliche Gegendruckmessung angebracht.

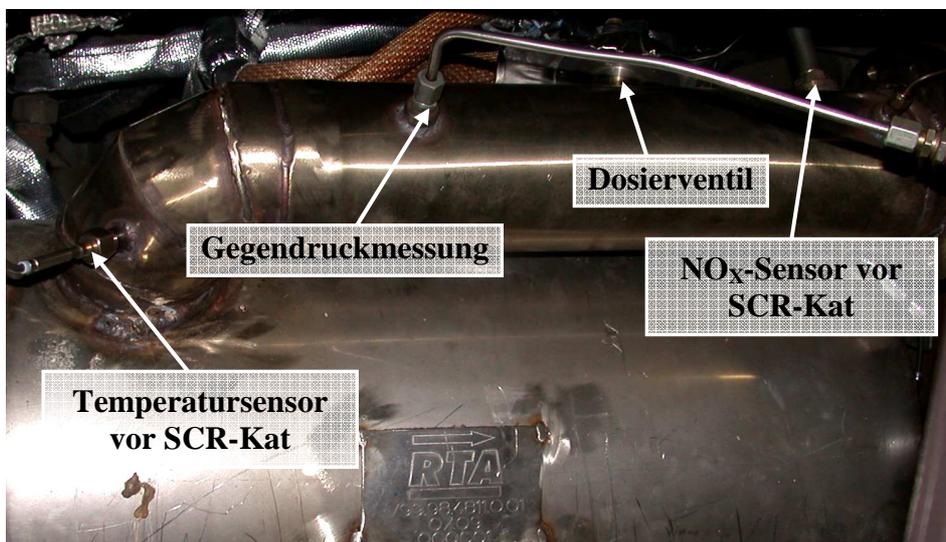


Abbildung 39: Seitliche Einbausituation des SCR-Katalysators



Abbildung 40: Untere Einbausituation am SCR-Katalysator

6.2.3 NO_x-Sensoren

In das SCR-Nachrüstsystem wurden insgesamt zwei Sensoren (siehe Abbildung 41), von der Firma Siemens VDO Automotive, zur Bestimmung der Stickoxide (NO_x) im Abgas in den SCR-Katalysator integriert.



Abbildung 41: Smart NO_x-Sensor SNS14 von Siemens VDO Automotive [Smart NO_x-Sensor "Uninox"]

Dabei wurden die Sensoren jeweils vor und nach dem SCR-Katalysator, gemäß der vom Hersteller vorgeschriebenen Einbaurichtlinien, laut Benutzerhandbuch: Smart NO_x-Sensor „Uninox“ (siehe Abbildung 42), verbaut.

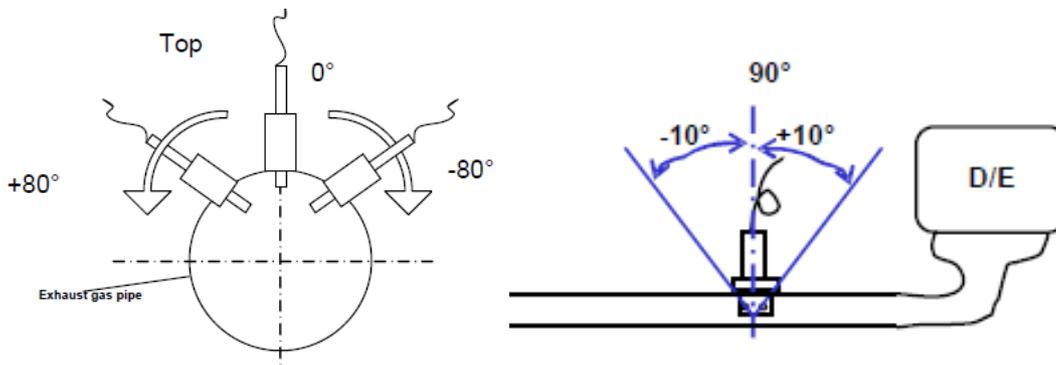


Abbildung 42: Vorgeschriebene Einbaulage der NO_x-Sensoren [Quelle: Smart NO_x-Sensor "Uninox"]

Der NO_x-Sensor vor dem SCR-Katalysator wurde zur Bestimmung der NO_x-Konzentration im Rohabgas integriert. Der zweite NO_x-Sensor befindet sich nach dem SCR-Katalysator. Dieser NO_x-Sensor wurde für die Quantifizierung der NO_x-Konvertierungsrate und für den dafür vorgesehenen Regelalgorithmus appliziert.

Aus der Konvertierungsrate, dem sogenannten DeNO_x, ist die Differenz der NO_x-Konzentrationen vor und hinter dem Katalysator ablesbar. Damit lässt sich eine laufende Korrektur der eindosierten Reduktionsmittelmenge im transienten Betrieb realisieren. Bei der Auswertung der NO_x-Kenndaten ist auf die Querempfindlichkeit der Sensoren im Bezug auf Ammoniak bzw. auf eine bestimmte Trägheit des Sensors bei dynamischen Messungen zu achten.

Die Datenübertragung mit diesen Sensoren wurde mittels CAN-Busverbindung (siehe Abbildung 43) über das Microcontrollerboard hergestellt. Die daraus ermittelten Messdaten wurden in die Dosierstrategie übernommen, um daraus die erforderliche Eindosiermenge ermitteln zu können. Die NO_x-Sensoren wurden über die Zündspannung im Stadtbus mit jeweils 24V versorgt.

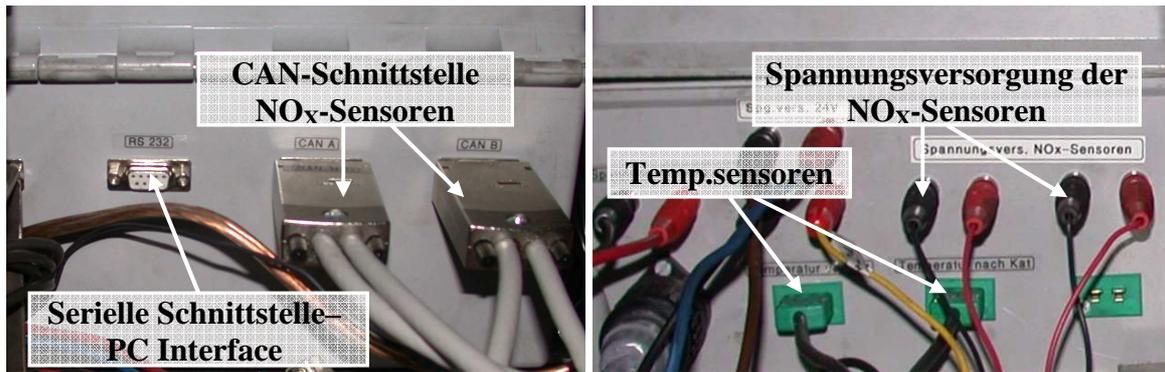


Abbildung 43: NO_x-Sensoranschlüsse der Steuerungshardware, links:CAN-Schnittstelle, rechts:Spannungsversorgung

Kenndaten der jeweiligen NO_x-Sensoren:

- Spannungsversorgung: 24 V
- NO_x-Messbereich: 0 – 1500 ppm

6.2.4 Temperatursensoren

In Abbildung 39 und Abbildung 40 ist die Einbausituation der am SCR-Katalysator integrierten Temperatursensoren dargestellt. Dabei wurde jeweils ein Temperatursensor vor bzw. nach dem SCR-Katalysator angebracht. Als Temperatursensoren wurden Widerstandstempertursensoren aus Platin verwendet. Die Nennwiderstände betragen jeweils 200 Ohm.

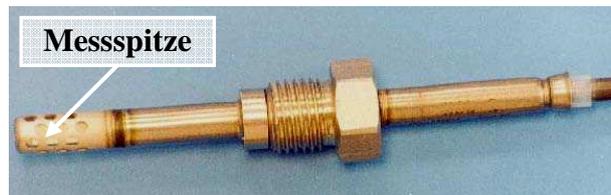


Abbildung 44: Temperatursensor [Quelle: Delta GmbH]

Um eine genaue Temperaturmessung zu erreichen, wurden die Widerstandstempertursensoren mit einem Kalibrierofen bei einer eingestellten Temperatur kalibriert. Das Ausgangsspannungssignal des Temperatursensors wurde dabei mit der Temperatur des Kalibrators verglichen und anschließend ausgewertet (Abbildung 45).

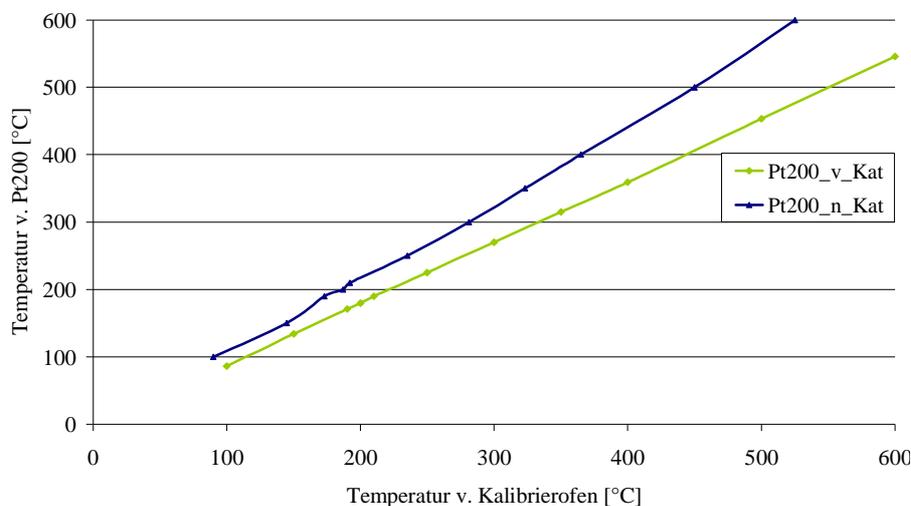


Abbildung 45: Pt200 Kalibrierkennlinie

Die hieraus resultierten Abweichungen wurden aufgezeichnet und in die jeweilige Dosierstrategie des SCR-Systems integriert.

Um Messungenauigkeiten bei der Integration eines Temperatursensors in das Abgasrohr zu vermeiden, wurde darauf geachtet, dass sich um die Messspitze des Sensors kein Kondenswasser sammeln bzw. bilden kann.

6.2.5 HFM-Heißfilmanemometer

Für die Messung der Luftmasse im Ansaugtrakt wurde ein Heißfilmanemometer der Firma Bosch verwendet. Der Luftmassenmesser, ein Heißfilmanemometer des Typs HFM7, wurde im Luftansaugsystem vor dem Abgasturbolader, Abbildung 46, integriert. Dabei ist die Position, Einbauart und -richtung des Luftmassenmessers für die Regelgüte des Systems von großer Bedeutung.

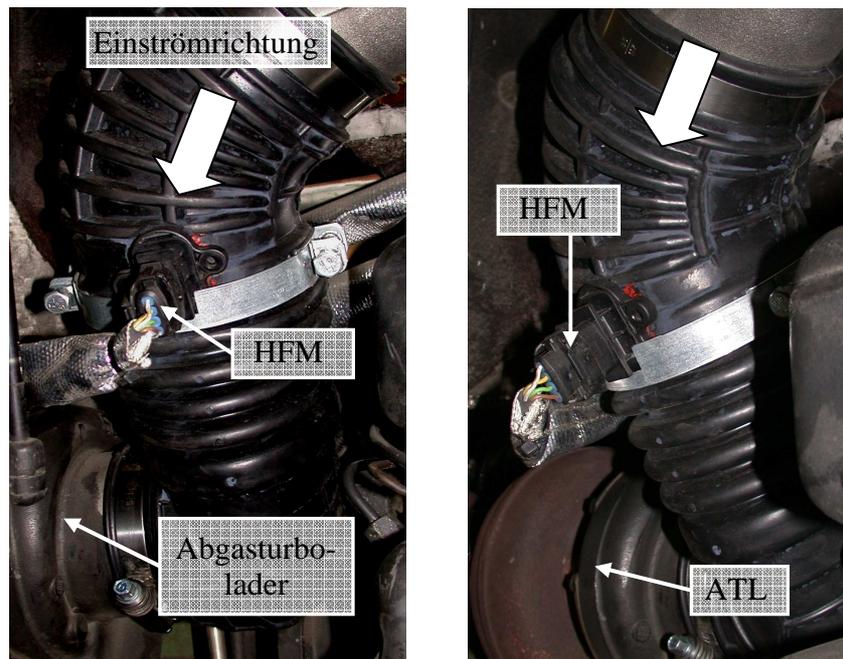


Abbildung 46: Einbausituation des HFM in den Stadtbus

Der Luftmassenmesser wurde dafür eigens vor dem Einbau in den Stadtbus kalibriert. Für die Kalibrierung des Luftmassenmessers wurde mit dem Ansaugschlauch des Luftmassenmessers, wie in Abbildung 47 ersichtlich ist, eine Messung durchgeführt. Die angesaugte Luftmasse wurde dabei über ein Gebläse mit einem Spannungstransformator mit variabler Ausgangsspannung eingestellt. Mit einem standardisierten Sensyflow, des Typs P für einen Luftmassenstrom von maximal 2400 kg/h, wurde der vom Gebläse erzeugte Luftmassenstrom abgelesen.

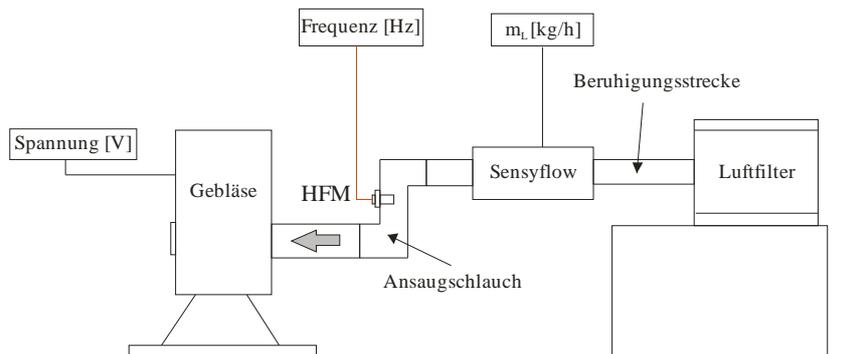


Abbildung 47: Kalibrierlaufbau für den im Stadtbus eingesetzten Heißfilmanemometer (HFM7)

Aus dieser vorgegebenen Luftmasse wurde die resultierende Frequenz und schlussendlich das Spannungssignal des Luftmassenmessers zugeordnet und als Kennlinie, Abbildung 48, aufgezeichnet. In dieser Kennlinie sind zum Teil große Abweichungen vor allem im höheren Frequenzbereich, im Vergleich zu der nominellen Kennlinie des Herstellers, ersichtlich. Dies ist auf die im Stadtbus befindliche Ansaugluftführung und auf die nicht exakt zentrale Position des Luftmassenmessers zurückzuführen.

Die ermittelten Kenndaten dieser Kennlinie (Spannung, Luftmasse und Frequenz) wurden als Eingangsparameter in die Dosierstrategie des Stadtbusses implementiert.

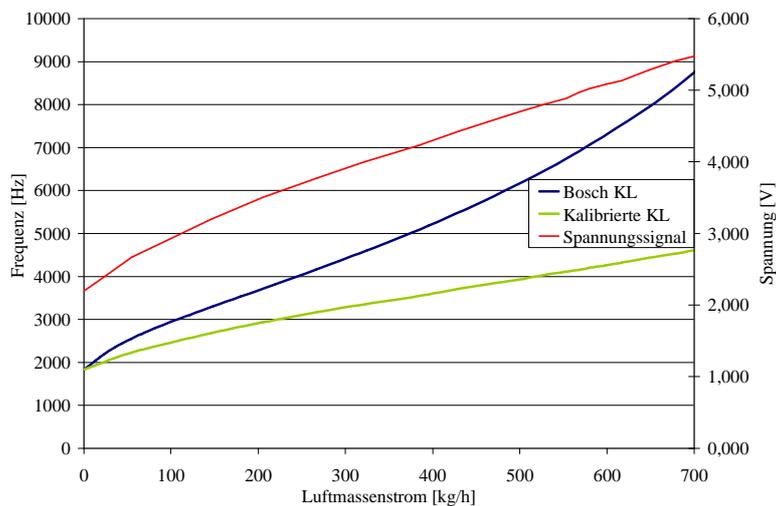


Abbildung 48: Vergleich der kalibrierten Messung zur nominellen Kennlinie von Bosch

6.2.6 AdBlue-Reduktionsmittel-Tank

Das Reduktionsmittel wird in ein separat in den Stadtbus integriertes Tanksystem gefüllt (Abbildung 49). Der AdBlue-Tank ist ein von der Firma Elkamet hergestellter Reduktionsmittelbehälter und findet in mehreren Anwendungsbereichen (leichte Nfz, Off-Road-Fahrzeuge) Einsatz.



Abbildung 49: AdBlue-Tank von der Firma Elkamet, rechts: 3D CAD-Darstellung

Der AdBlue-Tank hat ein Fassungsvermögen von insgesamt 8 Litern und besteht aus einem eigens für den Behälter entwickelten Kunststoffhohlkörper. Außerdem besitzt der Tank im Inneren eine Heizspirale. Dies ermöglicht es, den Tank mit dem Kühlsystem des Busses zu verbinden und damit das Reduktionsmittel im Tank zu beheizen.

Da der Stadtbus in den Sommermonaten betrieben wurde, war die Heizspirale nicht in Verwendung und wurde daher auch nicht an das Kühlsystem des Busses angeschlossen.

Da aus platztechnischen Gründen keine Alternative vorzufinden war, wurde der AdBlue-Tank im Motorraum, über eine eigens konstruierte Halterung, in den Stadtbus integriert (Abbildung 50).

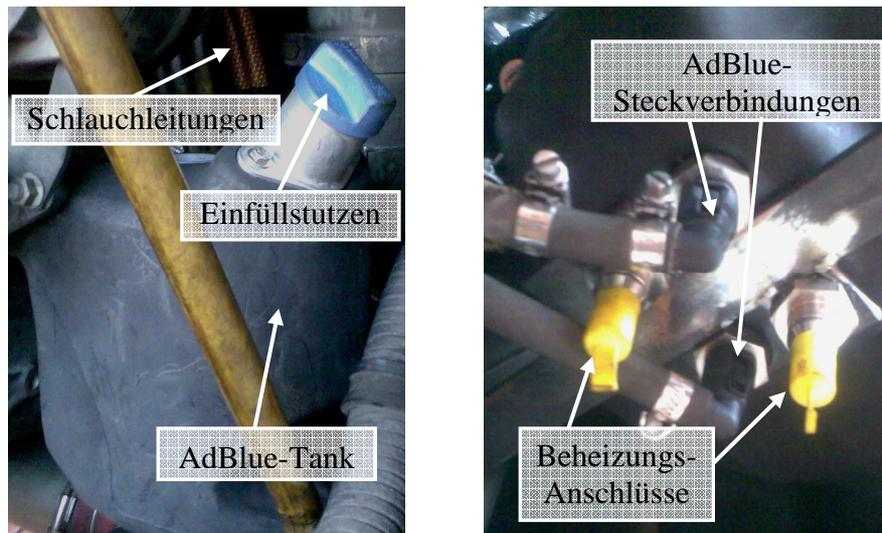


Abbildung 50: links: Einbausituation des Tanks im Bus rechts: Anschluss der Harnstoffleitungen

Der AdBlue-Tank wurde mit speziell für den Betrieb mit AdBlue geeigneten Schlauchleitungen mit dem Dosiermodul über genormte Steckverbindungen (SAE J 2044) verbunden. Da die Leitungen im Motorraum verlegt wurden, wurden sie zusätzlich mit einer Hitzeisolierung (Material aus Kevlargete) ummantelt.

6.2.7 Fördermodul

Die Aufgabe des Fördermoduls ist die Förderung des Reduktionsmittels aus dem Tanksystem. Außerdem muss das Fördermodul den notwendigen Druck für die Eindosierung des Reduktionsmittels über das Dosiermodul bereitstellen.

In Abbildung 51 ist ein Fördermodul, wie es in das SCR-System des Stadtbusses integriert wurde, gezeigt.

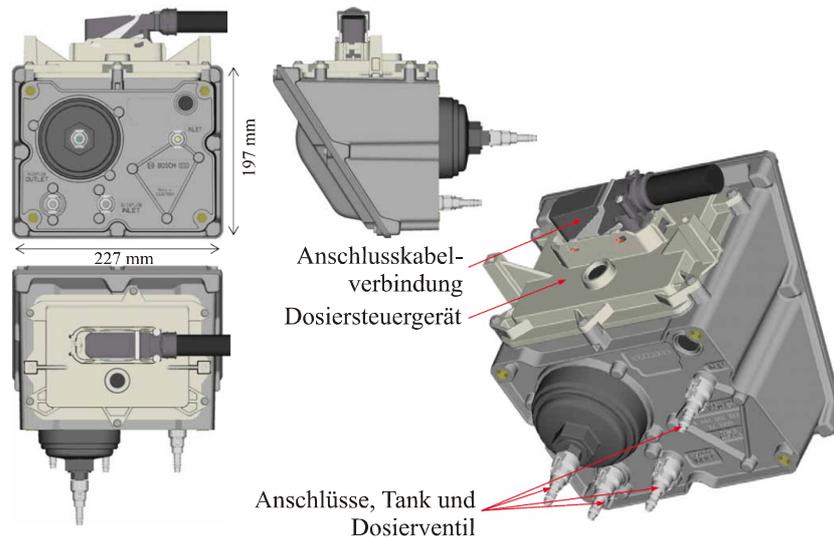


Abbildung 51: Verschiedene Ansichten des Fördermoduls der Denoxtronic 2 [5]

Das Fördermodul besteht aus folgenden Komponenten (siehe Abbildung 52). Eine elektrisch angetriebene Membranpumpe für den Druckaufbau, ein beheizbarer Filter, ein 4/2-Wege-Magnetventil das die Dosierung und Verteilung der Harnstoff-Wasserlösung übernimmt. Außerdem steuert ein weiteres Magnetventil die Kühlung des Dosierventils, da es ansonsten zur Zerstörung durch Überhitzung des Dosierventils kommen kann.

Weiters sind noch ein Druck- und ein Temperatursensor zur Messung von Harnstoffdruck und -temperatur im Fördermodul integriert.

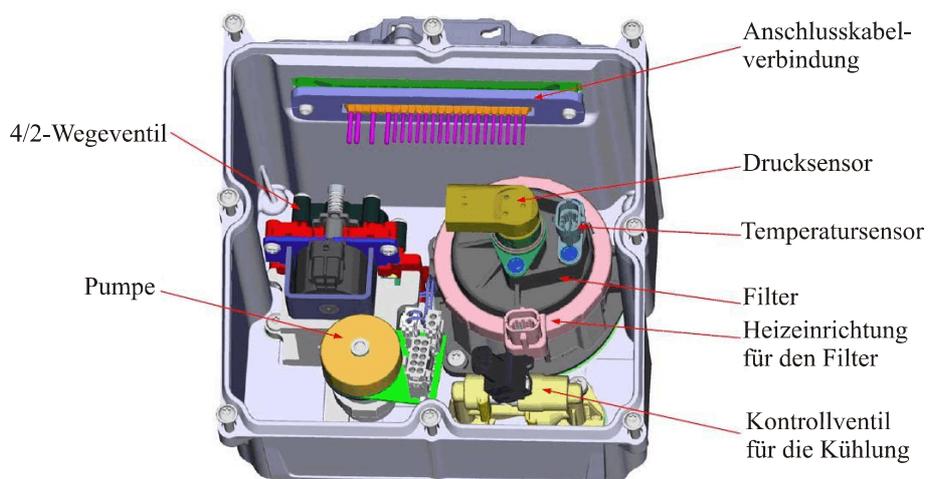


Abbildung 52: Komponenten und Innenleben des Fördermoduls [5]

6.2.8 Dosiermodul /-ventil

Das Dosiermodul /-ventil hat die Aufgabe, das Reduktionsmittel an der Eindosierstelle in den Abgasstrom feinverteilt zu zerstäuben. In den Stadtbus wurde ein Dosiermodul mit einer maximalen AdBlue-Dosiermenge von 6kg/h integriert.

Dabei kann der Druck, der direkt am Dosierventil beaufschlagt ist, über das Fördermodul eingestellt werden. Vom Fördermodul wird die Harnstofflösung über eine integrierte Membranpumpe aus dem Vorratsbehälter angesaugt, gefiltert, und über die Zulaufleitung dem Dosiermodul zugeführt. 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.

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 Einfrierschutz. Als Harnstoffversorgungsleitungen wurden Harnstoffleitungen, wie sie im Serienbetrieb in Verwendung sind, verbaut.

In Abbildung 53 ist ein Dosiermodul ohne dem zugehörigen Hitzeschild, wie es im SCR-System verwendet wurde, gezeigt. Da das Dosiermodul direkt auf das Abgasrohr aufgesetzt wird, werden die Kunststoffmaterialien von den hohen Bauteiltemperaturen zusätzlich durch ein Hitzeschild geschützt.

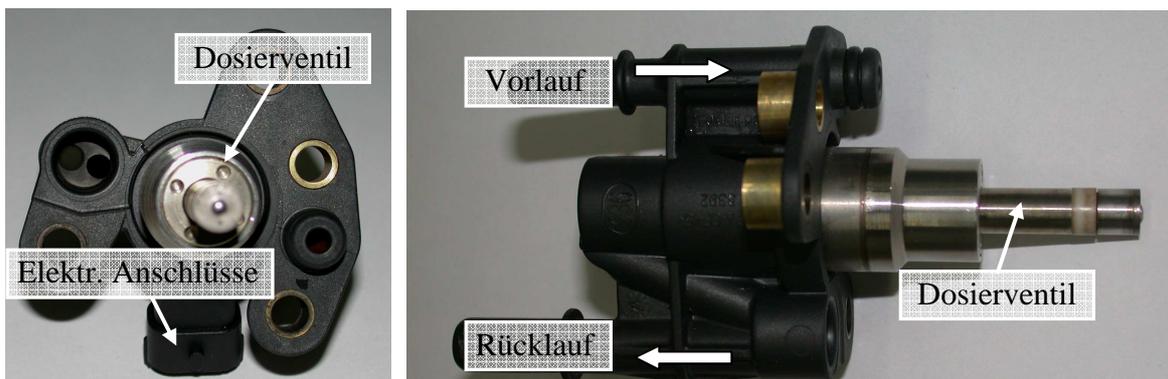


Abbildung 53: Bosch Dosiermodul (Bild links: Ansicht von vorne rechts: Ansicht von rechts)

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 pulsweitenmodulierten Signal angesteuert, dessen Tastverhältnis die Eindosiermenge bestimmt.

In Abbildung 54 ist die Einbausituation des Dosierventils am SCR-Katalysator gezeigt. Das Dosiermodul wurde über einen sogenannten Anbauflansch direkt, in einem Winkel von $30^\circ \pm 1^\circ$, laut Hersteller, am SCR-Katalysator angebracht.

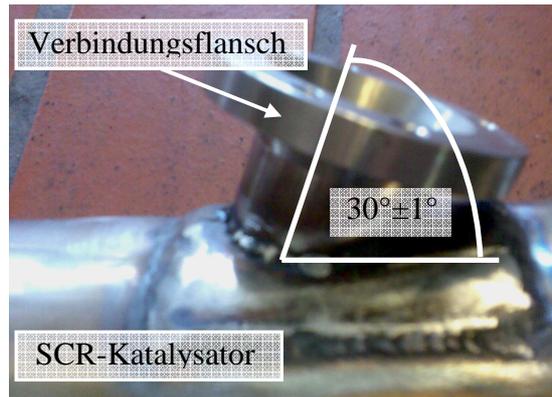


Abbildung 54: Verbindungsflansch des SCR-Dosierventils am SCR-Katalysator

7 Prüfstands Aufbau und Versuchsfahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Stadtbus auf dem Rollenprüfstand für Nutzfahrzeuge des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU-Graz getestet.

Es wurden verschiedene Messungen und Testzyklen am Rollenprüfstand mit und ohne Harnstoffdosierung durchgeführt. Dabei wurden am Rollenprüfstand mehrere dynamische Fahrzyklen untersucht und weiters spezielle Testversuche für die Optimierung der SCR-Regelstrategie durchgeführt.

Zusätzlich wurden zu den dynamischen Fahrzyklen stationäre Testversuche unternommen, um zum einen die Katalysatorcharakteristik zu bewerten und zum anderen auf ein mögliches Stickoxidreduzierungspotenzial des SCR-Systems bei einer bestimmten Abgastemperatur schließen zu können.



Abbildung 55: Stadtbus als Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand

7.1 Technische Daten des Rollenprüfstands

Rollenprüfstand	
max. Zugkraft:	22 kN
max. Bremsleistung:	360 kW
max. Schleppleistung:	290 kW (ab 50km/h)
max. Geschwindigkeit:	120 km/h
simulierbare Fahrzeugmasse:	3,5t bis 38t
Rollendurchmesser:	0,5 m
max. Achslast:	12 t

Tabelle 4: Technische Daten des Rollenprüfstands

Der Prüfstand ist als Doppelrollenprüfstand ausgeführt und damit für Fahrzeuge mit einer angetriebenen Achse geeignet. Die Zugkraftübertragung erfolgt auf dem vorderen Rollensatz. Dieser ist über einen Zahnriementrieb mit einer Schwungmasse verbunden. Das Übersetzungsverhältnis beträgt 1:2.

Als Bremse dient eine thyristorgesteuerte Gleichstrommaschine, welche generatorisch (Bremsbetrieb) und motorisch (Schleppbetrieb) gefahren werden kann. Die Bremsenregelung ist für einen instationären Fahrbetrieb ausgelegt. Die Ermittlung der Zugkraft am Radaufstandspunkt erfolgt durch Drehmomentmessung an der pendelnd gelagerten Bremsmaschine mittels einer Kraftmessdose. Diese arbeitet nach dem DMS-Messprinzip.

7.1.1 Betriebsarten

Der Prüfstand kann im stationären und instationären Betrieb gefahren werden, wobei sowohl Brems- als auch Schleppbetrieb möglich ist.

7.1.1.1 Stationärbetrieb (Leistungsprüfstand)

Die Regelung bei dieser Betriebsart erfolgt entweder bei konstanter Zugkraft oder konstanter Fahrgeschwindigkeit.

- Konstante Zugkraft: Das Antriebsdrehmoment an den Hinterrädern bleibt über dem Fahrgeschwindigkeitsbereich konstant.
- Konstante Fahrgeschwindigkeit: Die Raddrehzahl an der antreibenden Achse bleibt konstant. Die Zugkraft wird durch die Gleichstrommaschine eingestellt.

7.1.1.2 Instationärbetrieb (Fahrwiderstandssimulation)

In dieser Betriebsart ermöglicht der Prüfstand die Simulation von Fahrwiderstandskennlinien für Nutzfahrzeuge. Der Fahrwiderstandsgleichung entsprechend werden die straßen- und fahrzeugspezifischen Faktoren am Prüfstand eingestellt. Der zu fahrende Geschwindigkeitsverlauf als Funktion der Zeit wird dem Fahrer mit einem Fahrleitgerät über einen Bildschirm vorgegeben.

7.2 Abgasanalyse

Die Messung der Emissionen erfolgt über eine Vollstrom CVS-Anlage und Abgasanalytoren der Firma AVL (CEB II). Die Emissionen können als Beutelwert und im zeitlichen Verlauf (z.B. Sekundenschritte) erfasst und ausgegeben werden.

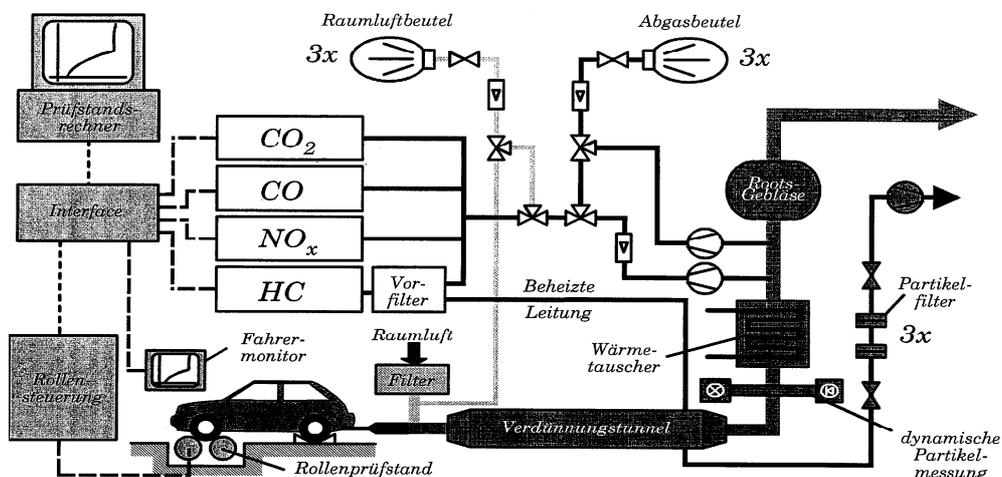


Abbildung 56: CVS-Anlage [3]

Die CVS-Anlage arbeitet mit 3 Venturi-Düsen, die für unterschiedliche Verdünnungsraten kombiniert geschaltet werden können (Durchfluss regelbar zu 30, 60, 90, 110 m³/min).

7.3 Versuchsfahrzeug

Das Versuchsfahrzeug, ein Mercedes Citaro des Typs 530 N3, wurde von den Grazer Verkehrsbetrieben (GVB) im Rahmen des ICUT-Projekts für diese Arbeit zu Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich um einen Stadtbus, der vor allem im innerstädtischen Verkehr (Stadt Graz) zum Einsatz kommt. Der Stadtbus selbst wurde von „EvoBus Mercedes Benz“ hergestellt.

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten technischen Daten des Stadtbusses für Fahrzeug und Motor angeführt.

7.3.1 Technische Daten des Fahrzeugs

Mercedes Citaro Typ 530 N3	
Hersteller	EvoBus Mercedes Benz GmbH, Stuttgart
Betreiber	Grazer Verkehrsbetriebe AG
Baujahr	11/1999
Schadstoffklasse	EU II
Eigengewicht	11600 kg
Länge	11950 mm
Breite	2500 mm
Höhe	3000 mm
Radstand	5845 mm
Bauartgeschwindigkeit	85 km/h
Emissionsgrenzen lt. Fahrzeughersteller	CO/HC/NO _x /PM:0,58/0,33/6,63/0,114 g/kWh

Tabelle 5: Abmessungen und Kenndaten des Versuchsfahrzeugs

7.3.2 Technische Daten des Motors

OM 457 HLA	
Zylinderanzahl	6 in Reihe
Bohrung	128 mm
Hub	155 mm
Hubvolumen	11,967dm ³
Zylinderkopf	2 Ventile pro Zylinder
Nennleistung	185 kW/2000 min ⁻¹
Aufladung	Abgasturboaufladung

Tabelle 6: Abmessungen und Motorkenngrößen des Versuchsfahrzeugs

Der Betrieb des Stadtbusses erfolgte mit einem Biodiesel-Kraftstoff³. Dieser Kraftstofftyp ist in der Europäischen Dieselnorm EN 14214 definiert.

³ Da die Grazer Verkehrsbetriebe ihre Busflotte, so auch das Versuchsfahrzeug, zur Gänze auf Biodieselbetrieb umgestellt hat.

8 Dosierstrategien

Da in den nächsten Jahren weltweit neue Richtlinien für die Abgasgesetzgebung in Kraft treten werden, sind die Fahrzeug- und Motorenhersteller gezwungen, neue Systeme zur Abgasreinigung zu entwickeln bzw. bestehende Systeme kontinuierlich zu verbessern. Besonders in der Dieselmotorisierung gilt es, die Forderungen der Abgasgesetzgebung vor allem im Bezug auf die Stickoxidemissionen und die Partikel im Abgas einzuhalten.

Bei einem SCR-System ist es notwendig eine präzise und effektiv arbeitende Dosierstrategie zu applizieren. Durch verschiedene Verbesserungsmaßnahmen in der Dosierstrategie und in der Betriebsweise des Systems kann ein stabiles und funktionierendes Abgasnachbehandlungssystem gewährleistet werden.

Da die Stadtbusse der Grazer Verkehrsbetriebe vorwiegend im innerstädtischen Verkehr im Einsatz sind, wurde die Dosierstrategie auf den realen, dynamischen, innerstädtischen Verkehr angepasst. Primäres Ziel ist es daher, dem SCR-Katalysator das Reduktionsmittel ab einer bestimmten Abgastemperatur und nach im Abgas befindlicher Stickoxidkonzentration eine genaue Dosiermenge zur Verfügung zu stellen. Dabei soll die angestrebte NO_x -Konvertierungsrate bei gleichzeitiger Minimierung des NH_3 -Schlupfes, in Abhängigkeit der Katalysatortemperatur, erreicht werden.

In Abbildung 57 wird der Aufbau der Dosierung mit den Ein- und Ausgängen der jeweiligen Sensoren gezeigt. Die Daten der Sensoren werden über die jeweiligen Schnittstellen an das Microcontroller-Board übermittelt⁴. Aus den Daten der Eingangssignale und aus der im Microcontroller-Board implementierten Dosierstrategie wird die notwendige Reduktionsmittelmenge (AdBlue-Massenstroms) berechnet und an das Dosiermodul des SCR-Systems übermittelt.

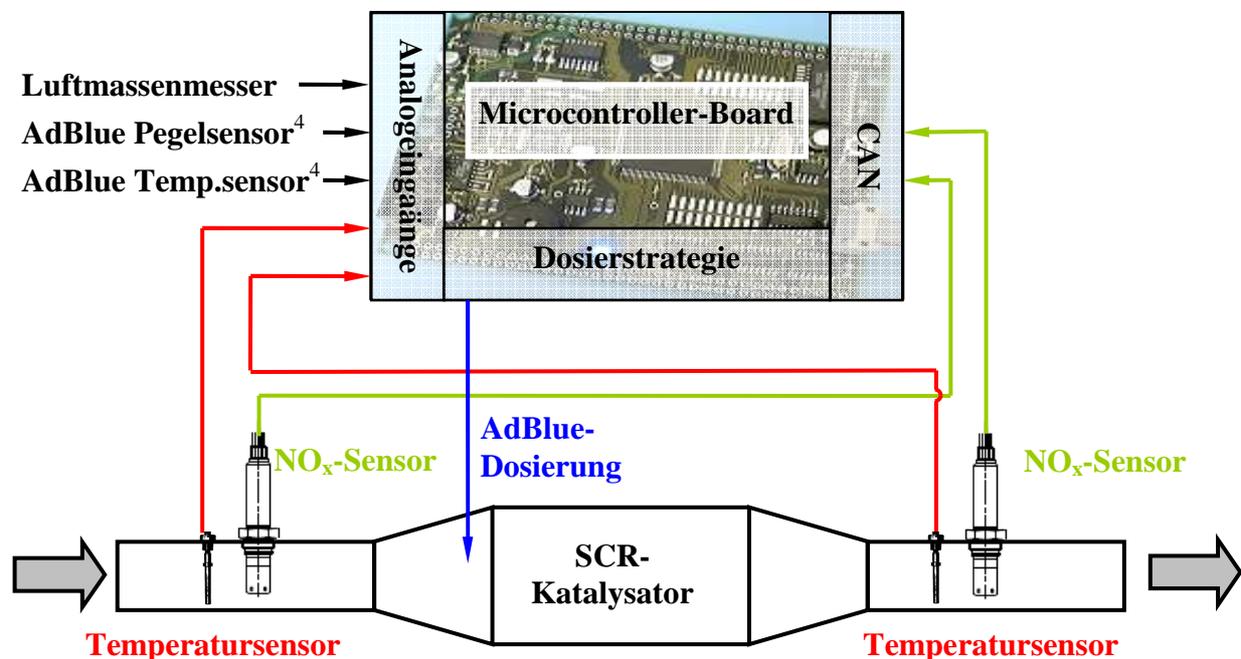


Abbildung 57: Anordnung der Ein- und Ausgangssignale für die Bestimmung der Reduktionsmittelmenge am Microcontroller-Board

⁴ In dem im Stadtbus verwendeten SCR-Nachrüstsystem sind die AdBlue-Sensoren für Temperatur und Pegelstand dabei nicht in Verwendung.

Das bei dieser Arbeit integrierte SCR-Nachrüstsystem wurde ohne Kommunikation mit dem Motorsteuergerät des Stadtbusses betrieben. Das SCR-System arbeitet daher autark und als Folge dessen mussten zusätzlich NO_x-Sensoren zur Stickoxid-Messung in den Abgasstrang integriert werden.

Grundsätzlich kann bei dieser Arbeit zwischen zwei unterschiedlichen Dosierstrategien unterschieden werden. Einerseits besteht die Möglichkeit einer Steuerung (open-loop Strategie) oder eine Regelung (closed-loop Strategie) für die Eindosierung der Reduktionsmittelmenge.

Die Aufgabe der jeweiligen Dosierstrategie liegt darin, stationär und dynamisch geeignete Sollwerte für die erforderliche AdBlue-Dosiermenge zu bestimmen. Diese Dosiermenge kann als Sollwert über die Vorsteuerung eingestellt werden (Steuerung-open-loop) oder auf eine geeignete Größe geregelt (Regelung-closed-loop) werden. Welche Dosierstrategie man schlussendlich in das SCR-System integriert hängt von verschiedenen Entscheidungskriterien ab.

Wichtige Faktoren zur Entscheidung welche Dosierstrategie schlussendlich zum Einsatz kommt, sind unter anderem die Gesamtkosten des SCR-Systems und die Anforderungen an OBD-Fähigkeit. Für ein hohes NO_x-Konvertierungsziel ergeben sich hohe Anforderungen an die jeweilige Dosierstrategie.

Bei der Implementierung der mathematischen Modellierung und Weiterentwicklung der Dosierstrategien wurde in Kooperation mit dem Institut für Intelligente Systemtechnologien an der Alpen-Adria Universität Klagenfurt gearbeitet.

8.1 Steuerung der Dosiermenge

Bei der Steuerung des SCR-Systems ist die Berechnung der Menge an Reduktionsmittel aus der NO_x-Konzentration am Eingang des SCR-Katalysators und dem gewünschten Feedverhältnis möglich. Die Steuerung der erforderlichen AdBlue-Menge basiert auf dem NO_x-Rohemissionswert, dem Luftmassenstrom im Ansaugsystem und der Temperatur des SCR-Katalysators.

Das Strukturbild der Steuerungsstrategie ist in Abbildung 58 schematisch dargestellt.

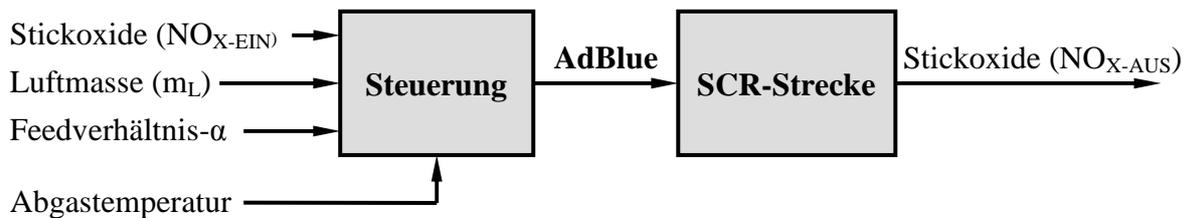


Abbildung 58: Schema der Dosierstrategie: Steuerung

- Feedverhältnis (α): Für das mögliche Feedverhältnis über die Abgastemperatur wird die aus den stationären Versuchen ermittelte Alpha-Kennlinie (Kapitel 9.1.1) verwendet.
- Luftmasse (m_L): Für die Messung des Luftmassenstroms [kg/h] wurde im Ansaugtrakt ein Heißfilmanemometer (Kapitel 6.2.5) installiert. Das am Heißfilmanemometer abgegebene Signal (Periodendauer als Funktion der Luftmasse $T = f(\dot{m}_L)$) wird am Microcontrollerboard in ein Spannungssignal umgewandelt und danach aus der kalibrierten Kennlinie in ein Luftmassensignal umgerechnet.
- Stickoxide (NO_x): Die vorhandene Stickoxidkonzentration wird über den in den Abgasstrang eingebauten NO_x-Sensor vor dem SCR-Katalysator (Kapitel 6.2.3) bestimmt.
- Steuerung: Die Steuerung und die Berechnung des AdBlue-Massenstroms wird, wie in Kapitel 5.2.4 gezeigt, durchgeführt. Als Führungsgröße dient dafür die aus der Dosierstrategie ermittelte α -Kennlinie ($\alpha = f(T_{\text{Abgas}})$).
- SCR-Strecke: Die Ermittlung der SCR-Streckenparameter erfolgte über eine mathematische Modellierung der Regelstrecke aus den aufgezeichneten Identifikationsversuchen (Kapitel 9.1.2). Aus diesen Versuchen wurde der SCR-Strecke ein äquivalentes PT1-Verhalten charakterisiert.

Die Vor- und Nachteile der Dosierstrategie „Steuerung“ zeigt die nachstehende Tabelle auf.

Dosierstrategie	Vorteile	Nachteile
Steuerung	+ geringere Anzahl an Sensoren nötig	- keine Nachjustierung bei Änderung der Katalysatoreigenschaften - Kein Überprüfen der tatsächlichen NO _x -Konvertierungsrate - keine Überprüfung der Eindosiermenge möglich - Störungen des Dosiermoduls /-ventils nicht detektierbar

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Steuerung

8.2 Regelung der Dosiermenge

Beim closed-loop Regelungskonzept wird grundsätzlich ein zusätzlicher NO_x-Sensor nach dem SCR- oder Ammoniaksperrkatalysator verwendet. Das Ziel dieser Regelung ist eine genaue Einhaltung der vorgegebenen NO_x-Konvertierungsrate.

Das Strukturbild der Regelungsstrategie ist in Abbildung 59 schematisch dargestellt.

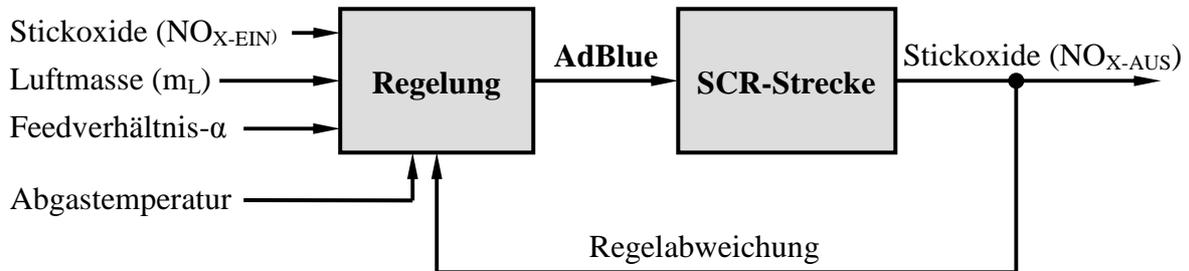


Abbildung 59: Schema der Dosierstrategie: Regelung

Die Regelgröße bei der Dosierstrategie (Regelung) ist die zu erreichende NO_x-Konvertierungsrate. Diese Führungsgröße wird über den implementierten Regler in Abhängigkeit zur Abgastemperatur eingestellt und über die Auswertung der Regelabweichung nachjustiert.

- **Regelung:** Als Regler wurde in diese Dosierstrategie ein PI-Regler implementiert. Dessen Regelparameter wurde in Abhängigkeit von der gemittelten Abgastemperatur (vor und nach dem SCR-Katalysator) ermittelt.
- **Regelabweichung:** Die Regelabweichung ergibt sich aus dem DeNO_x und dem vorgegebenen Sollwert. Dahingehend versucht der Regler über ein Verändern der Reduktionsmitteleindosiermenge diesen Sollwert zu erreichen.

In Tabelle 8 sind die Vor- bzw. Nachteile der Dosierstrategie „Regelung“ aufgelistet.

Dosierstrategie	Vorteile	Nachteile
Regelung	+ Information über den Grad der Konvertierung verfügbar + Unterscheidung zwischen geänderten Motorrohmissionen und geändertem SCR-Verhalten möglich + Dosiermenge über Regelabweichung nachjustierbar	- Zusätzlicher NO _x -Sensor nach dem SCR-Katalysator notwendig

Tabelle 8: Vor- und Nachteile der Regelung

9 Messungen auf dem Prüfstand und Auswertung

Das in den Stadtbus integrierte SCR-System wurde am Rollenprüfstand und am Ende der Versuchsreihe in einer Messfahrt durch das Grazer Stadtgebiet getestet. Die CVS-Anlage des Rollenprüfstands wurde über die Software „Tornado“ gesteuert und am Beginn jeder Messreihe über das Bedienungsfeld (Abbildung 60) in Betrieb genommen.

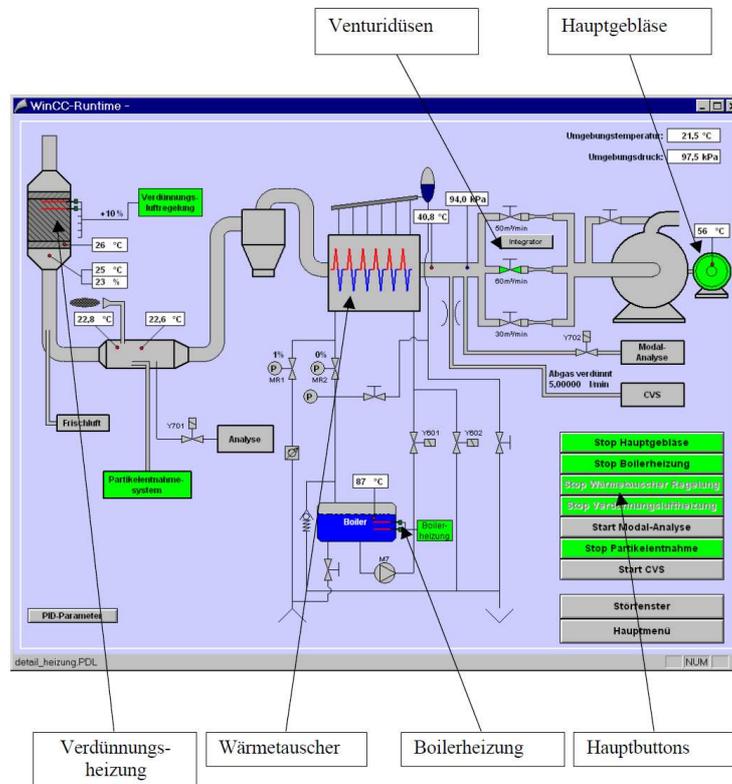


Abbildung 60: Bedienungsfeld im Tornado für die CVS-Anlage

Als Softwaretool für die Auswertung der jeweiligen Messdaten wurde das am LKW-Rollenprüfstand in Verwendung befindliche Tornado von der Firma Kristl, Seibt&Co verwendet. In Abbildung 61 sind das Anzeigefenster für die Messdaten am SCR-System und das Fahrerleitgerät im Stadtbus dargestellt. Damit wurde es möglich, in der Prüfstandssteuerung kontinuierlich auf das bestehende System zuzugreifen, um gegebenenfalls verschiedene Parameter und Kenndaten analysieren und verändern zu können.

In der Prüfstandssteuerung bestand die Möglichkeit die Daten gemäß Abbildung 61 zu verändern. Folgende Daten konnten dabei verändert werden:

- Regler_Modus: Wahl der jeweiligen Dosierstrategie (Steuerung, Regelung)
- Taupunkt_ueberschritten: Heizung für die NO_x-Sensoren
- Alpha

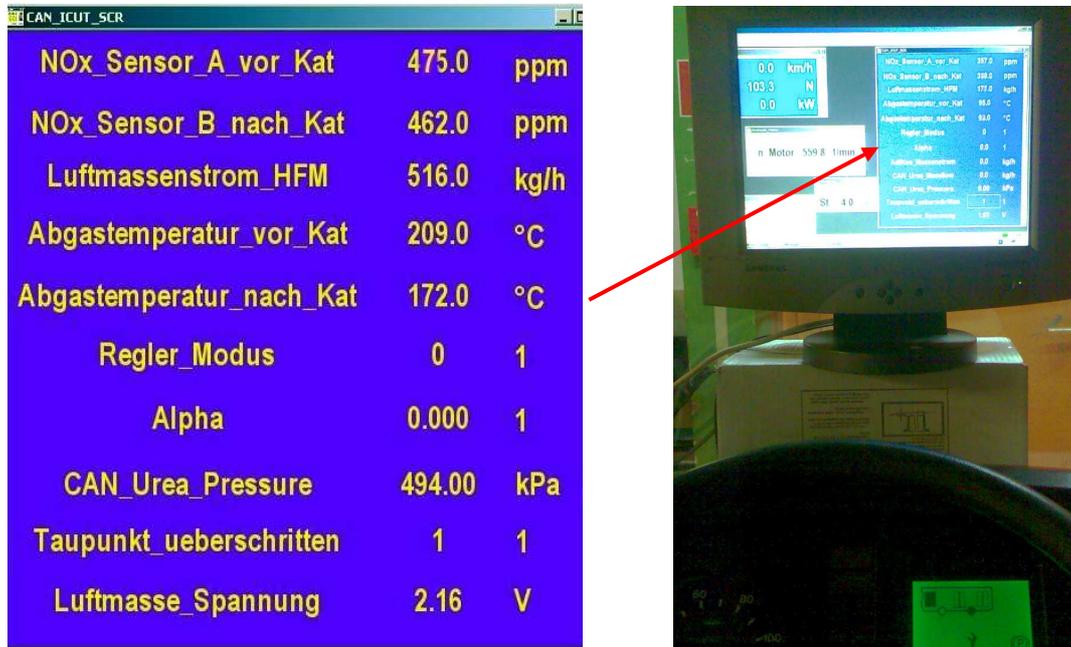


Abbildung 61: SCR Anzeige- und Bedienungsfenster im Tornado und im Stadtbus

9.1 Überblick über die Messungen auf dem Rollenprüfstand

Um eine gute Reproduzierbarkeit und für die Auswertung aussagekräftige Messergebnisse sowie eine stetige Verbesserung der Dosierstrategie des SCR-Systems zu erreichen, wurden eine Reihe an stationären sowie auch diverse Stadtzyklentests auf dem Rollenprüfstand mit dem Stadtbus durchgeführt.

In der nachstehenden Gleichung 9-1 ist die Berechnung der DeNO_x-Konvertierungsrate veranschaulicht. Sie ermittelt sich aus der Differenz der NO_x-Messwerte der jeweiligen Sensoren, die „vor“ bzw. „nach“ dem SCR-Katalysator angebracht sind.

$$DeNO_x = \frac{NO_{x_EIN} - NO_{x_AUS}}{NO_{x_EIN}} = 1 - \frac{NO_{x_AUS}}{NO_{x_EIN}}$$

Gleichung 9-1

Aus dieser Gleichung lässt sich die notwendige Konvertierungsrate aus den gewünschten NO_x-Emissionen des Stadtbusses am Katalysatorausgang und den Ist-Rohemissionen errechnen. Als Zielvorgabe für den Stadtbus der EU II-Abgasklasse wurde als Bezug das Erreichen der Stickoxidrate der EU V-Abgasklasse vorgegeben (siehe Tabelle 9).

Abgasnorm	Einführung	NO _x [g/kWh]
EU II	1996	7,0
EU V	2008	2,0

Tabelle 9: Vergleich der Stickoxide (NO_x) in der EU Abgasklassifikation EU II und EU V

Nach Gleichung 9-1 ergibt sich, um die angestrebte NO_x -Emission der EU V-Abgasklassifikation mit dem Stadtbus zu erreichen, dass eine NO_x -Konvertierungsrate des SCR-Systems von etwa 70% notwendig ist.

$$\text{DeNO}_x \approx 70\%$$

Gleichung 9-2

Diese NO_x -Konvertierungsrate wurde als Zielvorgabe spezifiziert und über die Konvertierungskennlinie des SCR-Systems in die Dosierungsstrategie integriert.

9.1.1 Stationäre Versuche

Am Beginn der Prüfstandsreihe wurden mehrere stationäre Messungen aufgezeichnet. Bei den stationären Versuchen wurden definierte Parameter (Geschwindigkeit, Feedverhältnis-Alpha) bei den Messungen konstant gehalten. Dies hatte vor allem das Ziel, die möglichen NO_x -Konvertierungsraten des SCR-Systems und die dazugehörige Katalysatorcharakteristik des SCR-Katalysators bei einem bestimmten Abgastemperaturniveau zu ermitteln.

In Abbildung 62 sind die Kennlinien aus den stationären Versuchen gezeigt. Diese Versuche wurden jeweils mit einer konstanten Geschwindigkeit durchgeführt. Eine Steigerung der Abgastemperaturen von 200°C bis 400°C wurde direkt über eine Steigerung der Last bewerkstelligt. Insgesamt wurden vier stationäre Versuche bei einem jeweils konstantem Feedverhältnis von $\alpha = 0.15; 0.3; 0.5$ bis 0.9 aufgezeichnet.

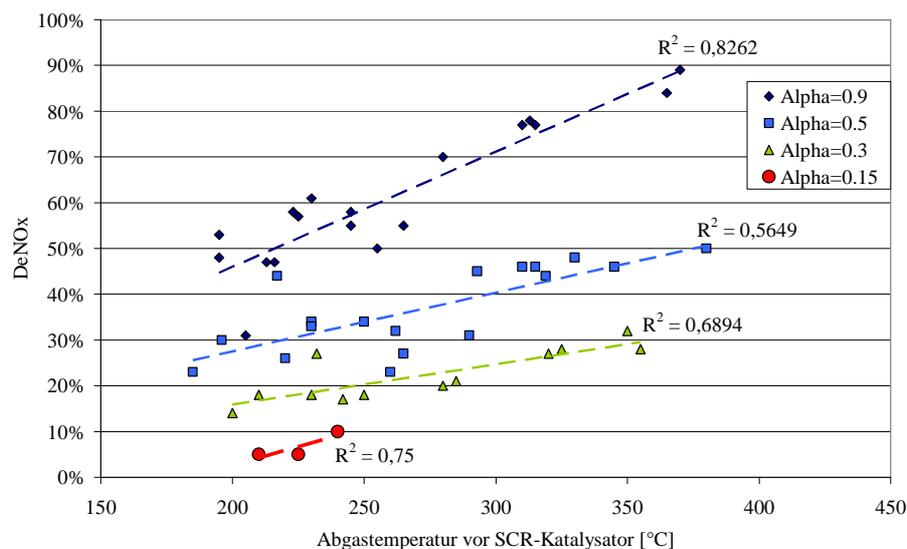
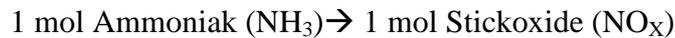


Abbildung 62: NO_x -Konvertierungsraten im stationären Versuch (Alpha=0.15-0.9)

Aus dieser Versuchsreihe lässt sich die Abhängigkeit zwischen der möglichen NO_x -Konvertierungsrate und der Abgastemperatur eruieren. Mit dieser wurde die Charakteristik des SCR-Systems abgeleitet, um daraus eine NO_x -Konvertierungskennlinie (Abbildung 63) des SCR-Katalysators erstellen zu können.

Im Idealfall ergibt sich aus der SCR-Reaktionsgleichung, dass bei einer stöchiometrischer Umsetzung, 1 mol Ammoniak (NH_3) pro mol Stickoxid benötigt wird.



Bei niedrigen Abgastemperaturen kann, wie in Abbildung 63 ersichtlich ist, bei einem vorgegebenen Feedverhältnis z.B. $\alpha=0.9$, eine Konvertierungsrate von 90% nicht erreicht wird. Das restliche Ammoniak nimmt am eigentlichen SCR-Reaktionsprozess nicht teil und soll im Ammoniaksperrkatalysator konvertiert werden.

Der Ammoniaksschlupf ist mit 25ppm (lt. EU V) gesetzlich begrenzt. Daher ergibt sich über die mögliche Konvertierungsrate im Ammoniaksschlupfkatalysator eine mögliche Ammoniakrohkonzentration ($\text{NH}_3\text{-Roh}$) am Eintritt des Ammoniaksschlupfkatalysators wie folgt.

$$\frac{[\text{NH}_3\text{-Limit}]}{1 - \text{NH}_3\text{-AK}} = [\text{NH}_3\text{-Roh}]$$

$$\frac{25}{1 - 0.5} = [\text{NH}_3\text{-Roh}]$$

Gleichung 9-3

Um den oben genannten Umstand der Differenz des Feedverhältnisses zur tatsächlichen NO_x -Konvertierungsrate ($\alpha\text{-DeNO}_x$) zu berücksichtigen wird folgende Gleichung beschrieben verwendet.

$$(\alpha - \text{DeNO}_x) \cdot [\text{NO}_x\text{-Mittel}] = [\text{NH}_3\text{-Roh}]$$

$$(\alpha - \text{DeNO}_x) = \frac{[\text{NH}_3\text{-Roh}]}{[\text{NO}_x\text{-Mittel}]}$$

$$(\alpha - \text{DeNO}_x) = \frac{50}{500} = 0.1 = 10\%$$

Gleichung 9-4

- $\text{NH}_3\text{-Limit}$: Maximale Ammoniakemissionen, lt. EU V 25ppm im Zyklusmittelwert
- $\text{NH}_3\text{-AK}$: NH_3 -Umwandlungsrate des Ammoniaksperrkatalysators beträgt im Mittel 50% (Kapitel 9.3.1)
- $\text{NO}_x\text{-Mittel}$: Aus den Rollenprüfstandtests ermittelte NO_x -Konzentration (500ppm) als Zyklusmittelwert.

In Abbildung 63 ist die NO_x -Konvertierungskennlinie für die Stadtbusapplikation gezeigt. Dabei ist die Alpha-Kennlinie um 10% gegenüber der DeNO_x -Kennlinie nach oben verschoben.

Zur Bestimmung der für die Dosierstrategie notwendigen NO_x -Konvertierungskennlinie wurden nachstehend folgende Randparameter berücksichtigt:

- Die verschiedenen Rollenprüfstandstests ergaben eine minimale Abgastemperatur zur Reduktionsmitteleindosierung von 200°C . Unter diesem Temperaturniveau ist die Umwandlung des Reduktionsmittels in Ammoniak bei diesem SCR-System nicht möglich. Im SCR-Katalysator wurden unter diesem Temperaturniveau vermehrt Harnstoffablagerungen detektiert.
- Die maximale Soll- NO_x -Konvertierungsrate wurde wie in Kapitel 9.1 gezeigt auf 70% festgelegt.

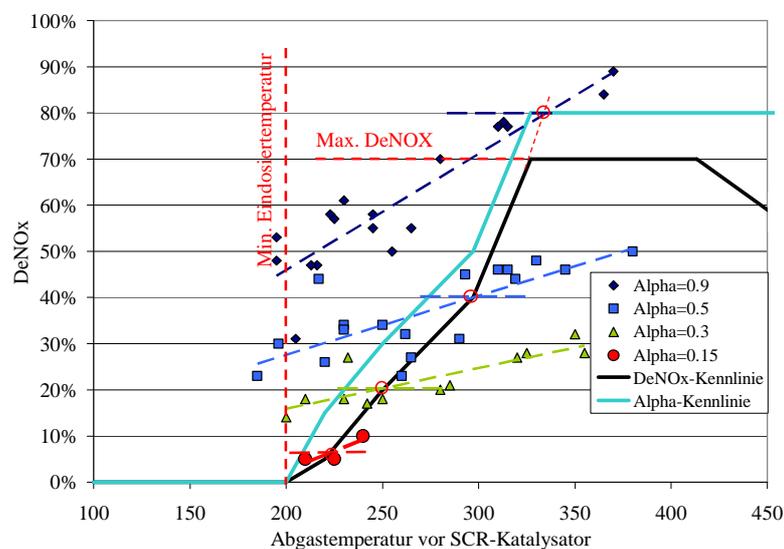


Abbildung 63: Bestimmung der NO_x -Konvertierungskennlinie des SCR-Systems

Aus dieser Kennlinie lässt sich bei einer Abgastemperatur ein mögliches DeNO_x -Potenzial des SCR-Systems ablesen.

9.1.2 Identifikationsversuche

Um die Charakteristik des SCR-Systems und das daraus erhaltene NO_x -Konvertierungsverhalten in die jeweilige Dosierstrategie zu integrieren, wurden sogenannte Identifikationstests am Rollenprüfstand durchgeführt.

In diesen Identifikationsversuchen ging es darum, eine Charakterisierung der Strecke des SCR-Systems zu erhalten. Dieses mathematische Modell dient danach als Basis für die SCR-Strecke in der Dosierstrategie. Für die Weiterentwicklung der Dosierstrategien wurde in Kooperation mit dem Institut für Intelligente Systemtechnologien an der Alpen-Adria Universität Klagenfurt zusammen gearbeitet.

In Abbildung 64 ist ein Identifikationsversuch bei konstanter Abgastemperatur (210°C) gezeigt.

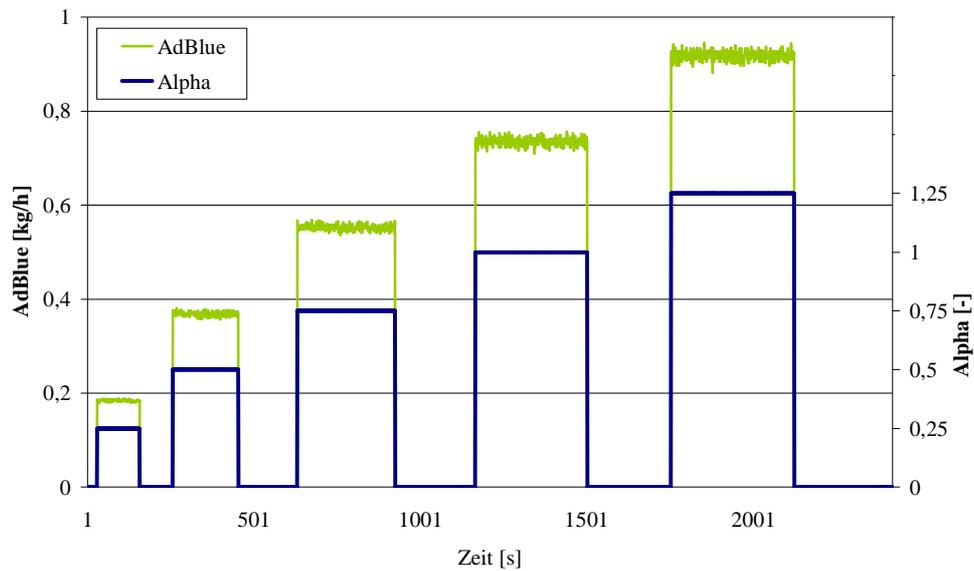


Abbildung 64: Alpha und AdBlue-Massenstrom im Identifikationsversuch bei 210°C Abgastemperatur nach SCR-Katalysator

In Abbildung 65 ist das Reduktionsverhalten der Stickoxide am SCR-Katalysator gezeigt, das sich mit der AdBlue-Dosierung aus Abbildung 63 ergibt.

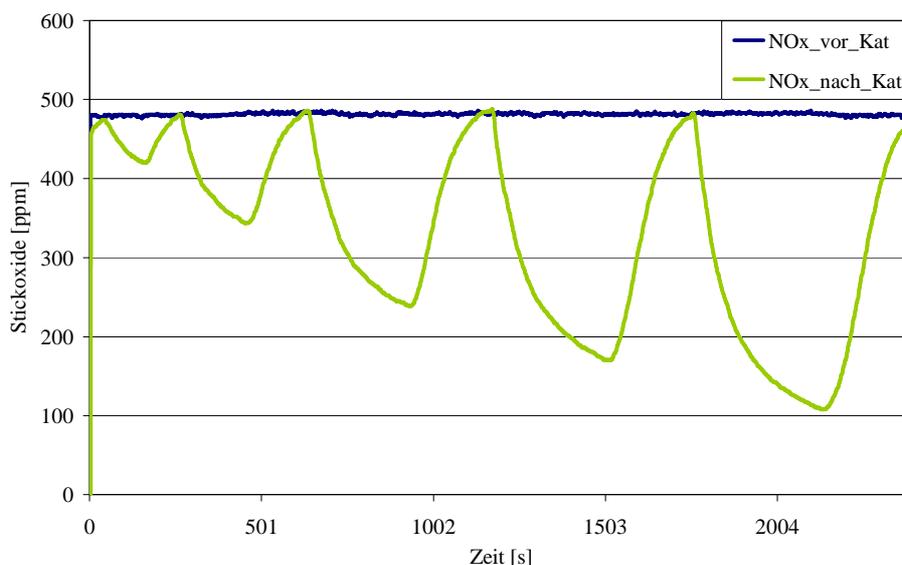


Abbildung 65: Stickoxide im Identifikationsversuch bei 210°C Abgastemperatur nach SCR-Katalysator

Als Ergebnis der Identifikationsversuche wurde das NO_x-Konvertierungsverhalten des SCR-Systems als PT1-Glied identifiziert.

9.1.3 Grazer Zyklus

Der Grazer Zyklus wurde im Rahmen des „ICUT-Projekts“ erstellt und ist repräsentativ für eine Stadtbuslinie in Graz. Dieser Messzyklus stellt einen Teil des gemessenen Geschwindigkeitsverlauf eines Linienbusses der Strecke Bad Eggenberg-Jakominiplatz dar. (Abbildung 66). Dazu wurde ein Bus der Grazer Verkehrsbetriebe mit einer On-Board-Messeinrichtung zur sekundlichen Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Abgastemperatur ausgerüstet. Aus den Messschrieben wurde ein 23-minütiger Teil entnommen, der bezüglich Geschwindigkeit, Beschleunigung, Leerlaufanteilen und Abgastemperatur dem Durchschnitt aller aufgezeichneten Fahrprofile auf dieser Linie entspricht.

Nachstehend in Tabelle 10 werden die Durchschnittswerte des Grazer Zyklus gezeigt.

Grazer Zyklus	
Mittlere Geschwindigkeit	16,5 km/h
Mittlere Temperatur vor SCR-Kat.	235°C
Mittlere Temperatur nach SCR-Kat.	225°C

Tabelle 10: Durchschnittswerte des Grazer Zyklus

Abbildung 66 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf des Grazer Zyklus.

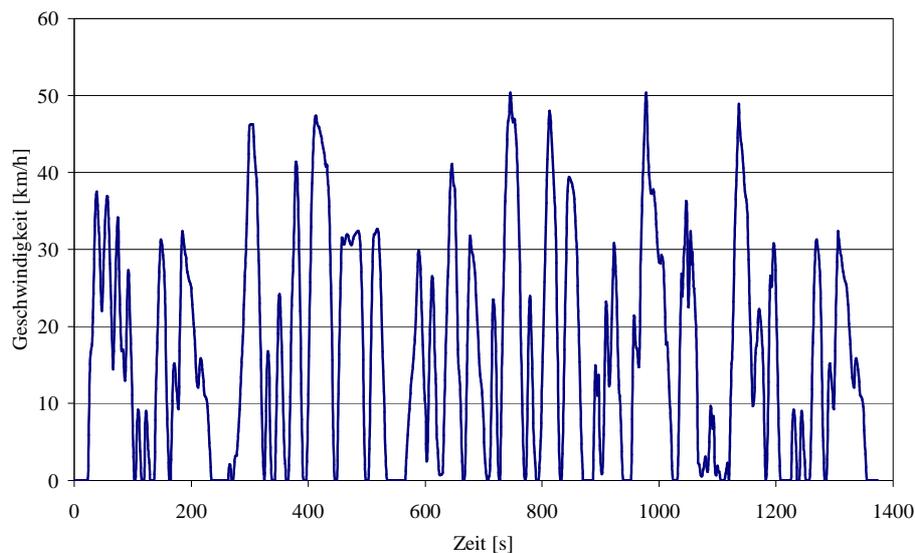


Abbildung 66: Geschwindigkeitsverlauf Grazer Zyklus

Zur besseren Veranschaulichung werden in den nächsten Abbildungen nur die ersten 700 Sekunden des Grazer Zyklus gezeigt, da dieser Abschnitt am Beginn eher den unteren Geschwindigkeitsbereich dargestellt und dabei ein durchschnittliches Abgastemperaturniveau um die 200 °C erreicht wird.

Hier kann aufgrund der niedrigen Temperaturen wenig bis kaum Harnstoff in den Abgasstrom eingebracht werden und die Umsetzraten sind daher in diesem Abschnitt auch wesentlich geringer, siehe Abbildung 68.

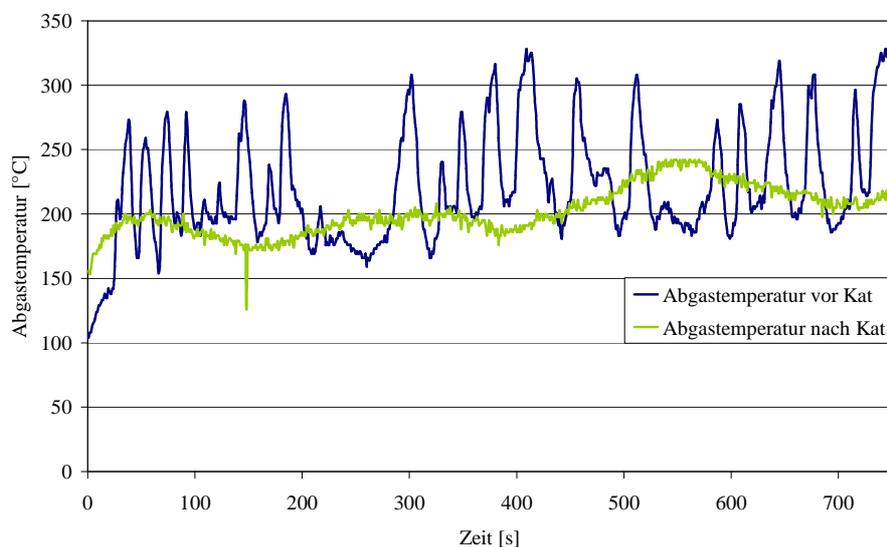


Abbildung 67: Abgastemperaturen im Grazer Zyklus, Dosierstrategie: Steuerung

In Abbildung 68 sind die Stoffmengen für die Stickoxidraten vor dem Katalysator und die aufgrund der Reduktionsmitteleindosierung reduzierten Stickoxide aufgetragen. Dabei ergeben sich bei höheren Abgastemperaturen höhere NO_x -Reduktionsraten.

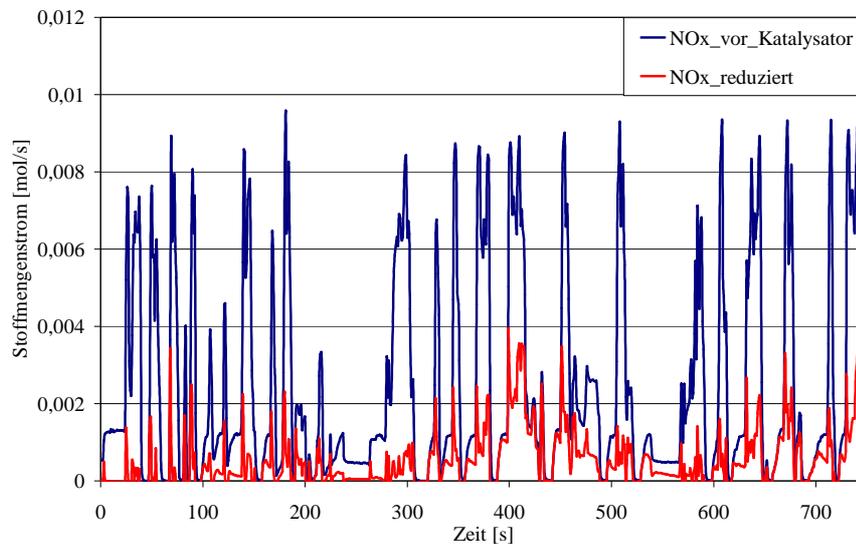


Abbildung 68: Stoffmengenstrom im Grazer Zyklus, Dosierstrategie: Steuerung

In Abbildung 69 ist die Stoffmenge kumuliert über den gesamten Grazer Zyklus dargestellt. Dabei ergab es insgesamt eine reduzierte Stickoxidmenge von 0,85 mol, dies wiederum eine NO_x -Konvertierungsrate von 29% zur Folge hat. Die Reduktionsmitteleindosiermenge betrug dabei insgesamt 0,9 mol.

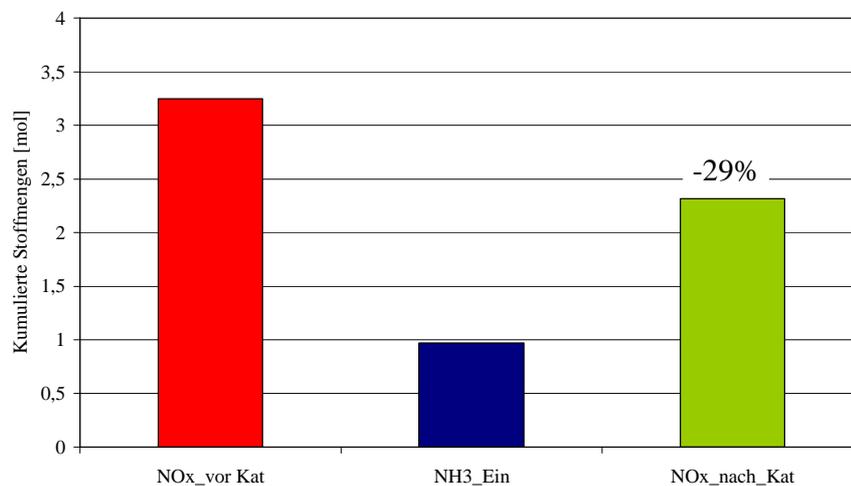


Abbildung 69: NO_x -Konvertierungsrate im Graz Zyklus, Dosierstrategie: Steuerung

9.1.4 HBEFA-Stadtzyklus

Dieser Testzyklus für den Rollenprüfstand wurde aus der SNF Zyklus-Datenbank [31] für das aktuelle „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ entnommen. In diesem Zyklus wurde eine Fahrt eines Stadtbusses auf einer mehrspurigen Hauptstrasse mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 60km/h simuliert. Dabei sind im Testzyklus mehrere Haltestationen und keine Verkehrsbehinderungen inkludiert.

Nachstehend in Tabelle 11 werden die Durchschnittswerte des HBEFA Stadtzyklus gezeigt:

HBEFA-Zyklus	
Mittlere Geschwindigkeit	40,6 km/h
Mittlere Temperatur vor SCR-Kat.	270°C
Mittlere Temperatur nach SCR-Kat.	256°C

Tabelle 11: Durchschnittswerte des HBEFA-Stadtzyklus

In Abbildung 70 ist der Geschwindigkeitsverlauf des HBEFA-Stadtzyklus gezeigt. Dieser Stadtzyklus hat gegenüber dem Grazer Zyklus ein hohes Geschwindigkeitsprofil mit wenigen Haltestellenphasen.

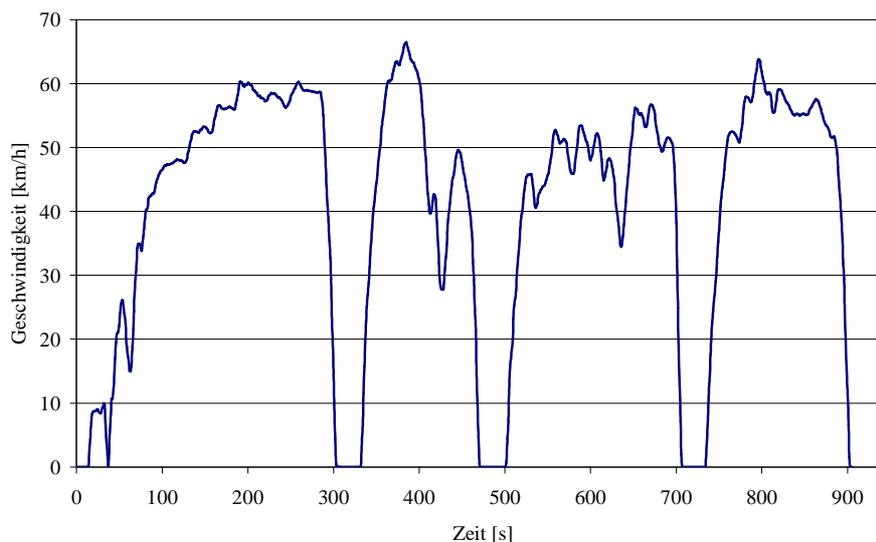


Abbildung 70: Geschwindigkeitsverlauf des HBEFA-Stadtzyklus

Aufgrund der hohen mittleren Geschwindigkeit des HBEFA-Stadtzyklus hat dieser Testzyklus im Mittel eine höhere Abgastemperatur (Abbildung 71) als der Grazer Zyklus. Bei den Prüfstandstests war die höchste Abgastemperatur vor dem Katalysator 350°C. Aufgrund dessen arbeitet das SCR-System wesentlich effektiver und es wurden in diesem Stadtzyklus Konvertierungsraten von bis zu 46% (Dosierstrategie:Steuerung) möglich.

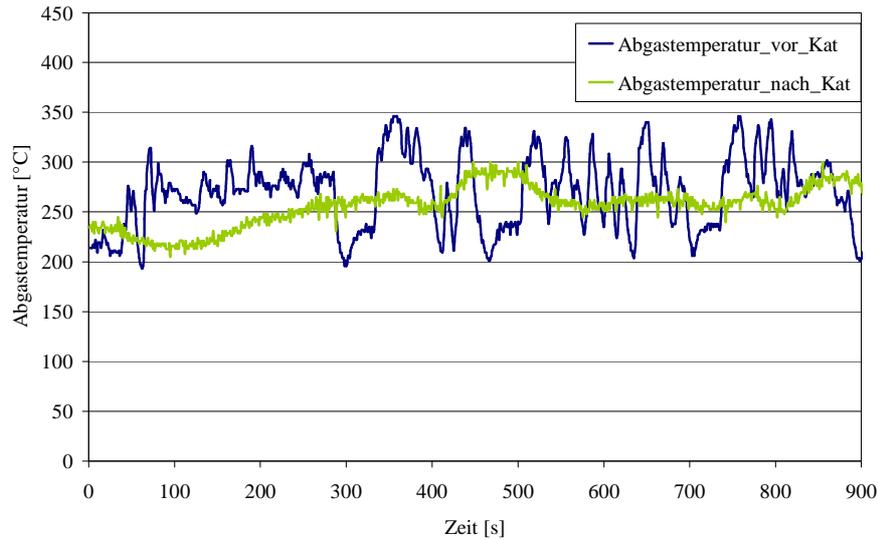


Abbildung 71: Abgastemperaturen des HBEFA-Stadtzyklus, Dosierstrategie: Steuerung

In Abbildung 72 ist der NO_x -Molenstrom über den Stadtzyklus dargestellt. Ähnlich wie in Abbildung 68 für den Grazer Zyklus sind die Stoffmengen für die Stickoxidraten vor dem Katalysator und die reduzierten Stickoxide in diesem Diagramm aufgetragen.

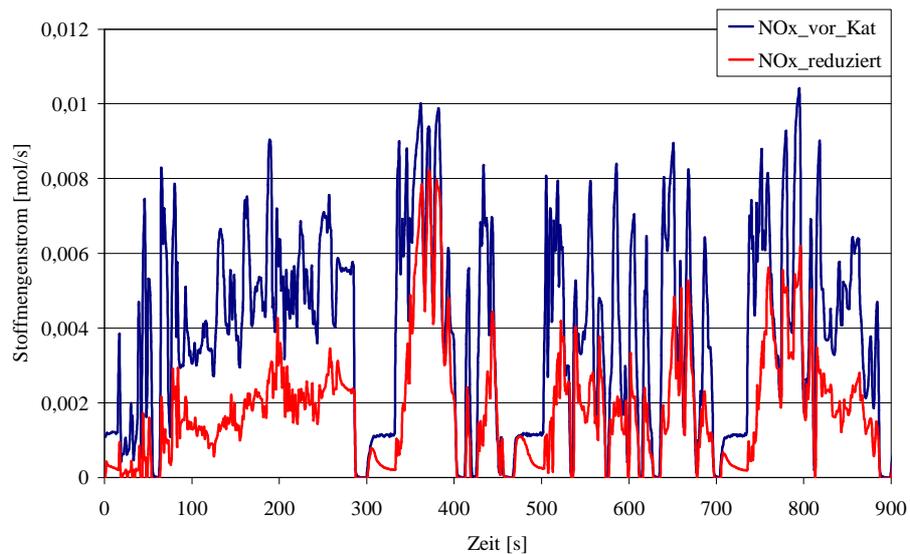


Abbildung 72: Stoffmengenstrom im HBEFA-Stadtzyklus, Dosierstrategie: Steuerung

In Abbildung 73 ist die Stoffmenge kumuliert über den gesamten HBEFA-Stadtzyklus dargestellt. Dabei ergab es insgesamt eine reduzierte Stickoxidmenge von 1,6 mol, dies wiederum hat eine NO_x -Konvertierungsrate von 46% zur Folge. Die Reduktionsmitteleindosierung betrug dabei insgesamt 1,6 mol.

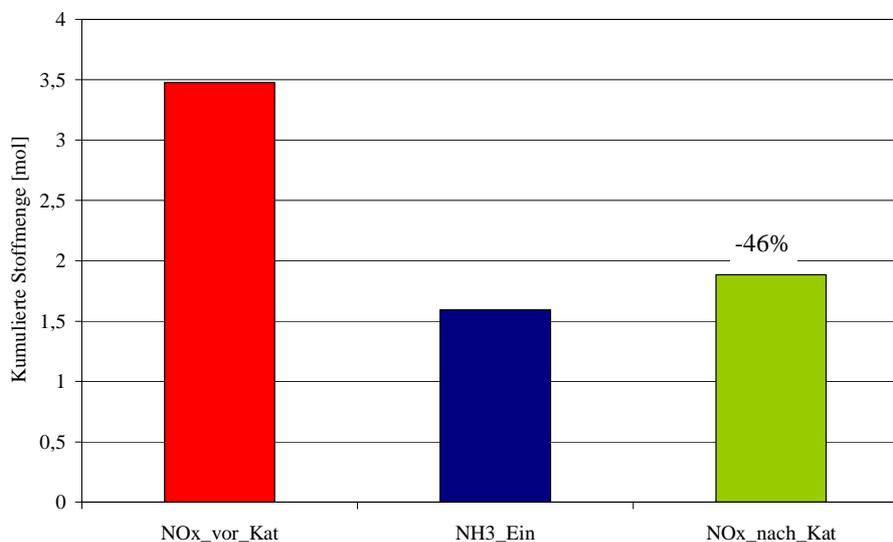


Abbildung 73: NO_x -Konvertierungsrate im HBEFA Stadtzyklus, Dosierstrategie: Steuerung

9.2 Vergleich Dosierstrategien

Die Regel- bzw. Steuergüte der jeweiligen Dosierstrategien kann aufgrund der verschiedenen DeNO_x - und Alpha-Kennlinien nicht verglichen werden, daher ist kein aussagekräftiges Ergebnis zwischen den Dosierstrategien möglich.

In der Tabelle 12 sind für die jeweiligen Dosierstrategien die NO_x -Konvertierungsraten im Überblick veranschaulicht. Der Ammoniak schlupf wurde, wie in der Berechnung im Kapitel 9.3 erläutert ist, abgeschätzt. Als Basiswert der jeweiligen Dosierstrategie wurde eine maximale DeNO_x -Rate von 70% definiert.

Testzyklus	AdBlue Dosierstrategie	DeNO_x soll [%]	DeNO_x ist [%]	Schlupf im Zyklusdurchschnitt (Abschätzung) [ppm]
Zyklus Graz	Steuerung	27	29	3
	Regelung	42	46	5
Zyklus HBEFA	Steuerung	40	46	7
	Regelung	55	53	3

Tabelle 12: Vergleich der Dosierstrategien

In beide Dosierstrategien wurde zusätzlich eine Abschaltung der Reduktionsmitteleindosierung bei Schubbetrieb integriert. Das bedeutet für den Schleppebetrieb, dass bei einem niedrigeren NO_x -Rohemissionswert als im Leerlauf (150ppm) kein zusätzliches Reduktionsmittel in den Abgasstrang eingebracht wird.

In Abbildung 74 und Abbildung 75 ist ein Vergleich der beiden Dosierstrategien für die jeweiligen Zyklen gezeigt.

Dabei ergaben sich tendenziell höhere NO_x -Konvertierungsraten in Bezug auf höhere Abgastemperaturen. Diese Abhängigkeit ist in der Dosierstrategie Steuerung wesentlich höher. Hier wurden im Grazer Zyklus 29% und im HBEFA-Stadtzyklus, der ein höheres Temperaturprofil hat, eine NO_x -Konvertierungsrate von 46% erreicht.

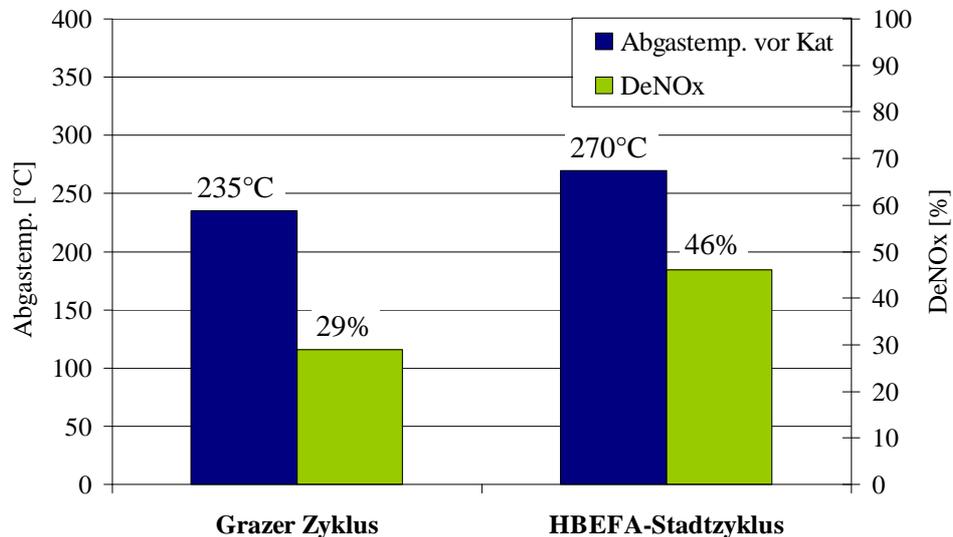


Abbildung 74: Vergleich der NO_x -Konvertierungsraten, Dosierstrategie: Steuerung

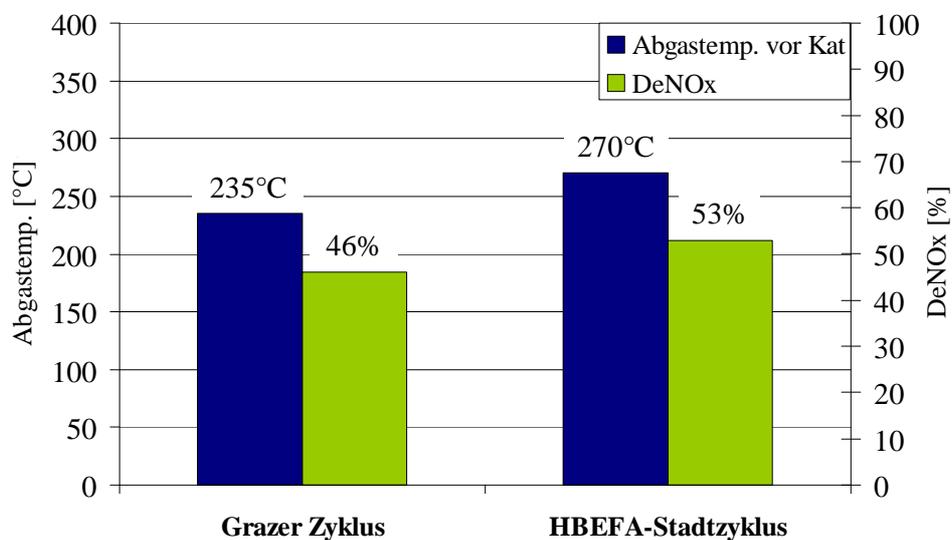


Abbildung 75: Vergleich der NO_x -Konvertierungsraten, Dosierstrategie: Regelung

9.3 Untersuchung des Reduktionsmittelschlupfes und der Harnstoffablagerung am SCR-Katalysator

Da nach der aktuellen Emissionsrichtlinie (EU V) ein Ammoniakgrenzwert von 25 NH₃ ppm als Zyklusmittelwert vorgeschrieben ist, wurde der Ammoniakslupf in den Rollenprüfstandsversuchen abgeschätzt. Um die Höhe des auftretenden Ammoniakslupfes annähernd quantifizieren zu können, ist es essentiell, die Menge an Ammoniak, die im Ammoniaksperrkatalysator konvertiert wird, eingrenzen zu können.

9.3.1 Bestimmung der Konvertierungsrate des Ammoniaksperrkatalysators

Da im Rahmen dieser Diplomarbeit keine genaue und aussagekräftige Messvorrichtung (z.B. FTIR-Spektrometer) für die Bestimmung des Reduktionsmittelschlupfes zu Verfügung stand, wurden zur groben Abschätzung und Bestimmung des möglichen Ammoniakslupfes im Ammoniaksperrkatalysator sogenannte Schlupftests, siehe Abbildung 76 und Abbildung 77, durchgeführt.

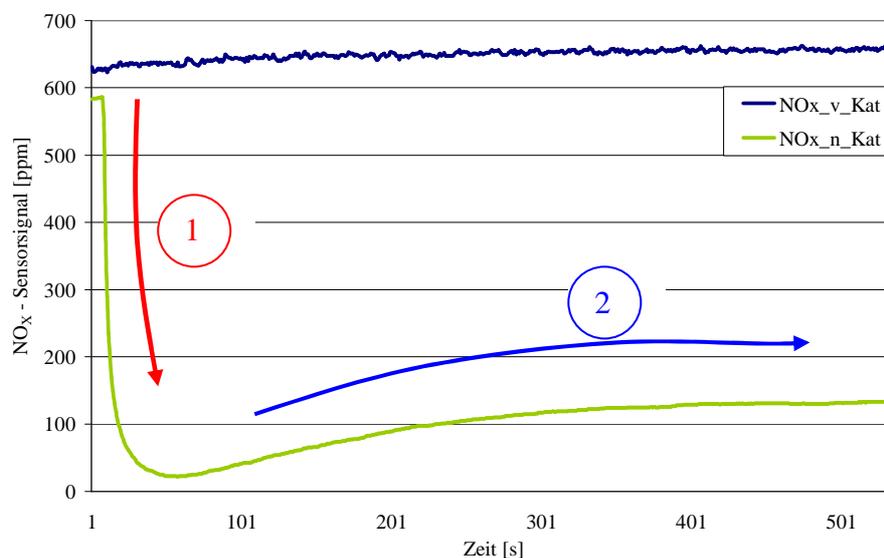


Abbildung 76: Schlupftest zur Abschätzung des NH₃-Schlupfes: $t_{\text{VOR_SCR}}=320^{\circ}\text{C}$, $\text{Alpha}=1.5$

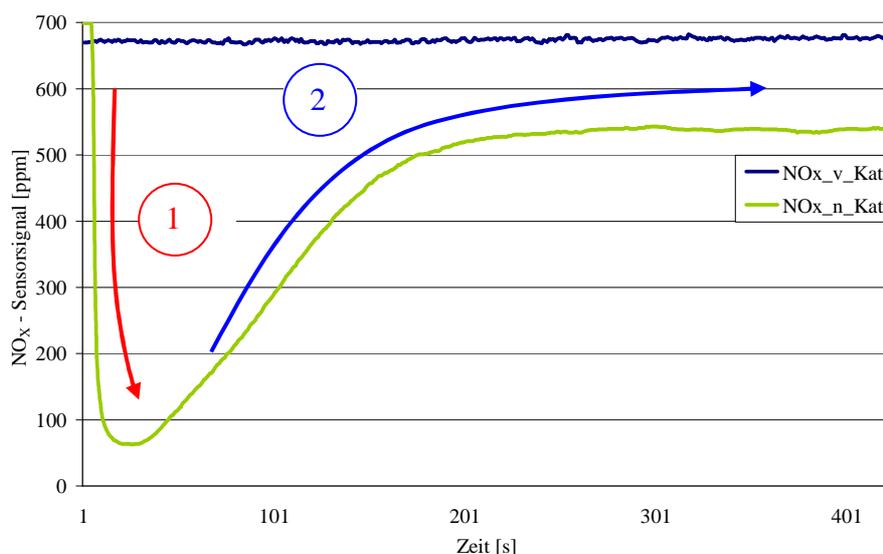


Abbildung 77: Schlupftest zur Abschätzung des NH₃-Schlupfes: $t_{\text{VOR_SCR}}=340^{\circ}\text{C}$, $\text{Alpha}=3$

Aus diesen Schlupftests wurde die Ammoniak-Konvertierungsrate des Ammoniaksperrkatalysators bestimmt.

Für das Detektieren eines möglicherweise auftretenden Ammoniakschlupfes wurde bei den Schlupftests bewusst ein hohes Feedverhältnis ($\alpha=1.5$ und $\alpha=3$) gewählt, um bei dieser Überdosierung einen daraus entstehenden Ammoniakschlupf am Katalysatorende bewerten und anschließend die Konvertierungsrate des Ammoniaksperrkatalysators berechnen zu können.

Zur Messung der Ammoniakkonvertierungsrate wurden die Kennlinien der Schlupftests jeweils in zwei Teilschritte unterteilt:

- ① Beladen des SCR-Katalysators
- ② Durchbruch von Ammoniak aus dem SCR-Katalysator

Beladen des SCR-Katalysators

Am Beginn der Schlupfversuche wird der SCR-Katalysator aufgrund der Überdosierung mit einer hohen Ammoniakkonzentration beaufschlagt.

In Abbildung 78 ist der SCR-Katalysator mit der vom Motor verursachten NO_x -Emission und der eindosierten Ammoniakmenge am Eingang gezeigt. Nach dem SCR-Katalysator treten die unkonvertierten Konzentrationsanteile von Stickoxid (NO_x) und Ammoniak (NH_3) auf.

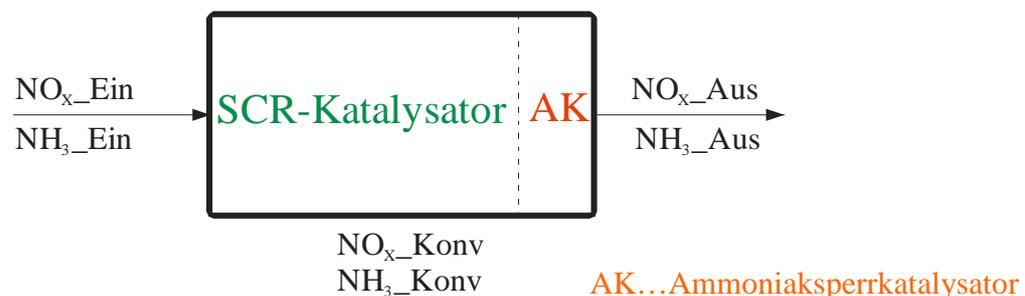


Abbildung 78: Ein- und Ausgangskonzentration am SCR-Katalysatorsystem

Die Konvertierungsrate des SCR-Katalysators wird aus der Differenz der NO_x -Konzentration vor und nach dem Katalysator berechnet (Gleichung 9-1).

$$\text{DeNO}_x = 1 - \frac{\text{NO}_x\text{-Aus}}{\text{NO}_x\text{-Ein}}$$

Da nach Kapitel 5.1 im Idealfall für die Konvertierung von 1 mol Stickoxid (NO_x) genau 1 mol Ammoniak (NH_3) benötigt wird, lässt sich aus der konvertierten NO_x -Konzentration die dafür benötigte NH_3 -Konzentration, Gleichung 9-5, berechnen.

$$\text{NH}_3\text{-Konv} = \text{NO}_x\text{-Konv}$$

Gleichung 9-5

Die konvertierte Stickoxidmenge wird aus der Differenz der Stickoxidkonzentrationen vor und nach dem SCR-Katalysator, Gleichung 9-7, berechnet.

$$\text{NO}_x\text{-Konv} = \text{NO}_x\text{-Ein} - \text{NO}_x\text{-Aus}$$

Gleichung 9-6

Durchbruch von Ammoniak aus dem SCR-Katalysator

Nachdem vom SCR-Katalysator die Ammoniakspeicherfähigkeit erschöpft ist, bricht schlussendlich das Ammoniak aus dem SCR-Katalysatorsystem durch. Dieser Austritt des Ammoniaks wird über die Querempfindlichkeit der NO_x -Sensoren zu NH_3 detektiert und führt zu einem Anstieg des NO_x -Signals am Sensor.

Der aufgrund der Überdosierung auftretende Ammoniaküberschuss wird aus der Differenz der Ein- und Ausgangsammoniakkonzentration, im Durchbruch von Ammoniak aus dem SCR-Katalysator aus Gleichung 9-7, berechnet.

$$\text{NH}_3_{\text{Rest}} = \text{NH}_3_{\text{Ein}} - \text{NH}_3_{\text{Konv}}$$

Gleichung 9-7

Die Konvertierungsrate des Ammoniakkatalysators wird aus der Differenz der NH_3 -Konzentration vor und nach dem Katalysator berechnet.

$$\text{DeNH}_3 = 1 - \frac{\text{NH}_3_{\text{Aus}}}{\text{NH}_3_{\text{Rest}}}$$

Gleichung 9-8

Zusätzlich musste, wie bereits erwähnt, die Querempfindlichkeit der NO_x -Sensoren, gegenüber dem im Abgas befindlichen Ammoniak (NH_3), berücksichtigt werden.

Die gemessene NO_x -Konzentration der Sensoren im Abgas steht im folgenden Zusammenhang, Gleichung 9-9, mit der Querempfindlichkeit der NO_x -Sensoren [34].

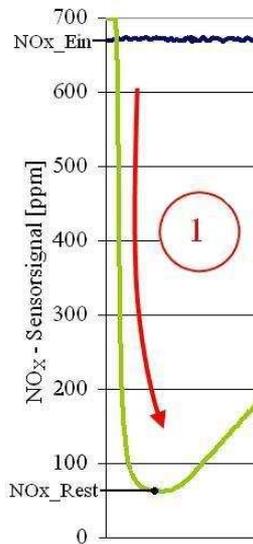
Dabei wird die gesamte NO_x -Konzentration im Abgas wie folgt berechnet:

$$c_{\text{NO}_x_{\text{Gesamt}}} = c_{\text{NO}_x_{\text{Sensor}}} + 0,65 \cdot c_{\text{NH}_3}$$

Gleichung 9-9

9.3.2 Berechnung der NH_3 -Konvertierungsrate am Ammoniaksperrkatalysators bei $\alpha=1.5$

- Beladen des Ammoniaksperrkatalysators



$$NO_x \text{ _Ein} = 660 \text{ ppm}$$

$$NO_x \text{ _Aus} = 30 \text{ ppm}$$

Über das am Dosiermodul eingestellte Feedverhältnis werden die dazugehörigen Ammoniakkonzentrationen berechnet.

$$\alpha = \frac{NH_3}{NO_x} \rightarrow \alpha = 1.5$$

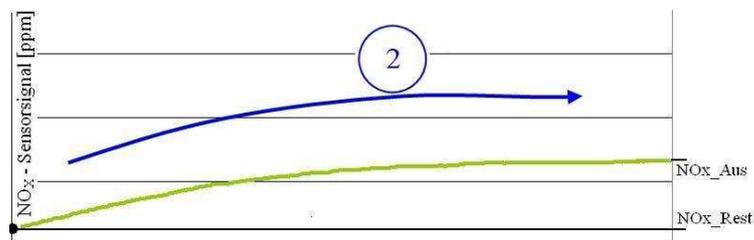
$$NH_3 \text{ _Ein} = 990 \text{ ppm}$$

$$DeNO_x = 1 - \frac{NO_x \text{ _Aus}}{NO_x \text{ _Ein}} = 95\%$$

$$NO_x \text{ _Konv} = NO_x \text{ _Ein} - NO_x \text{ _Aus} = 630 \text{ ppm} = NH_3 \text{ _Konv}$$

$$NH_3 \text{ _Rest} = NH_3 \text{ _Ein} - NH_3 \text{ _Konv} = 360 \text{ ppm}$$

- Durchbruch von Ammoniak aus dem Ammoniaksperrkatalysator



$$NO_x \text{ _Aus} = 130 \text{ ppm}$$

$$NO_x \text{ _Rest} = 30 \text{ ppm}$$

Über die Querempfindlichkeit der NO_x -Sensoren wird der tatsächliche Ammoniak schlupf am Austritt des Ammoniaksperrkatalysators berechnet.

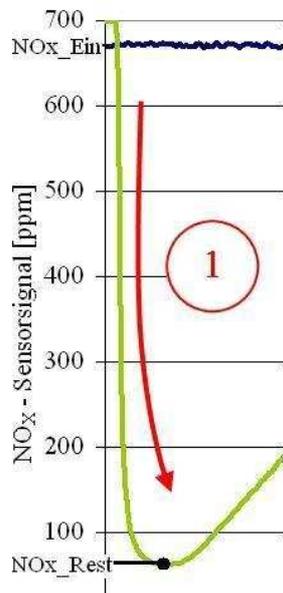
$$c_{NO_x \text{ _Aus}} = c_{NO_x \text{ _Rest}} + 0,65 \cdot c_{NH_3 \text{ _Aus}} \rightarrow c_{NH_3 \text{ _Aus}} = \frac{c_{NO_x \text{ _Aus}} - c_{NO_x \text{ _Rest}}}{0,65} \approx 155 \text{ ppm}$$

$$DeNH_3 = 1 - \frac{NH_3 \text{ _Aus}}{NH_3 \text{ _Rest}} = 1 - \frac{155 \text{ ppm}}{360 \text{ ppm}} \approx 57\%$$

Bei einem $\alpha=1,5$ ergibt sich bei einer NO_x -Eingangskonzentration von 660ppm eine NH_3 -Konvertierungsrate im Ammoniaksperrkatalysator von ungefähr 57%.

9.3.3 Berechnung der NH_3 -Konvertierungsrate am Ammoniaksperrkatalysator bei $\text{Alpha}=3$

- Beladen des Ammoniaksperrkatalysators



$$\text{NO}_x_Ein = 660 \text{ ppm}$$

$$\text{NO}_x_Aus = 50 \text{ ppm}$$

Über das das am Dosiermodul eingestellte Feedverhältnis werden die dazugehörigen Ammoniakkonzentrationen berechnet.

$$\alpha = \frac{\text{NH}_3}{\text{NO}_x} \rightarrow \alpha = 3$$

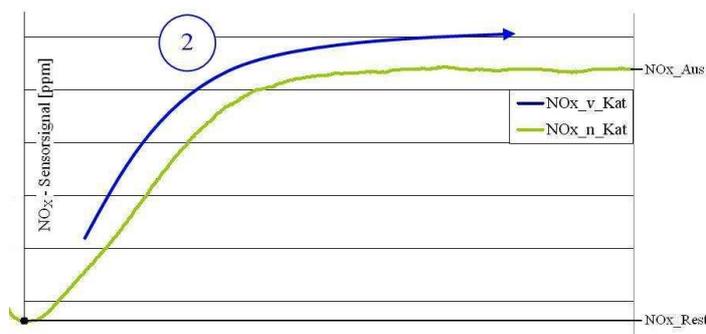
$$\text{NH}_3_Ein = 1980 \text{ ppm}$$

$$\text{DeNO}_x = 1 - \frac{\text{NO}_x_Aus}{\text{NO}_x_Ein} = 92\%$$

$$\text{NO}_x_Konv = \text{NO}_x_Ein - \text{NO}_x_Aus = 610 \text{ ppm} = \text{NH}_3_Konv$$

$$\text{NH}_3_Rest = \text{NH}_3_Ein - \text{NH}_3_Konv = 1370 \text{ ppm}$$

- Durchbruch von Ammoniak aus dem Ammoniaksperrkatalysator



$$\text{NO}_x_Aus = 550 \text{ ppm}$$

$$\text{NO}_x_Rest = 50 \text{ ppm}$$

Über die Querempfindlichkeit der NO_x -Sensoren wird der tatsächliche Ammoniakschlupf am Austritt des Ammoniaksperrkatalysators berechnet.

$$c_{\text{NO}_x_Aus} = c_{\text{NO}_x_Rest} + 0,65 \cdot c_{\text{NH}_3_Aus} \rightarrow c_{\text{NH}_3_Aus} = \frac{c_{\text{NO}_x_Aus} - c_{\text{NO}_x_Rest}}{0,65} \approx 760 \text{ ppm}$$

$$\text{DeNH}_3 = 1 - \frac{\text{NH}_3_Aus}{\text{NH}_3_Rest} = 1 - \frac{760 \text{ ppm}}{1370 \text{ ppm}} \approx 45\%$$

Bei einem $\text{Alpha}=3$ ergibt sich eine NH_3 -Konvertierungsrate bei einer NO_x -Eingangskonzentration von 660ppm im Ammoniaksperrkatalysator von ungefähr 45%.

Aus diesen Schlupftestversuchen und der Analyse ergibt sich für die spätere Quantifizierung des Ammoniakslupfes eine mittlere Ammoniakkonvertierungsrate des Ammoniaksperrkatalysators von 50%.

Um die durch etwaige Überdosierung entstandenen Harnstoffablagerungen optisch untersuchen zu können, wurde nach den Messversuchen ein Endoskop im Bereich vor den SCR-Katalysatormodulen eingeführt (Abbildung 80 und Abbildung 81). Diese Harnstoffablagerungen wurden vor jeder Messung durch erhöhte Abgastemperaturen größtenteils aus dem SCR-Katalysator entfernt.

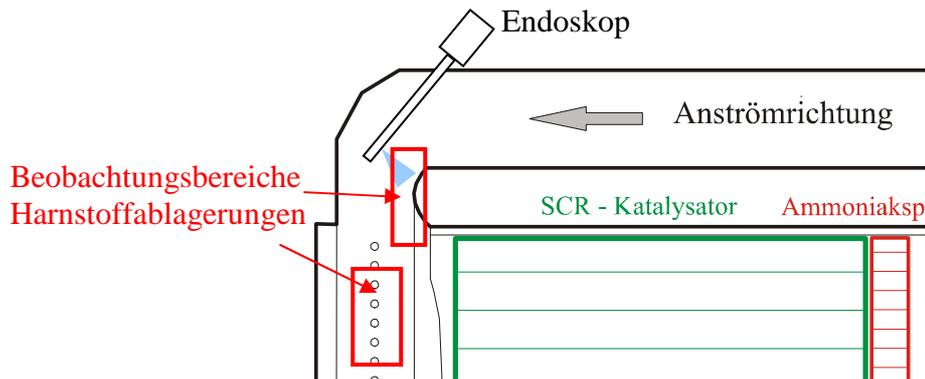


Abbildung 79: Harnstoffablagerungen beim SCR-Katalysator

- Bereich des perforierten Rohres

In Abbildung 80 wurde der Bereich am Beginn des perforierten Rohres des SCR-Katalysators untersucht. In dem eingezeichneten Bereich sind am Rohr Ablagerungen sichtbar.

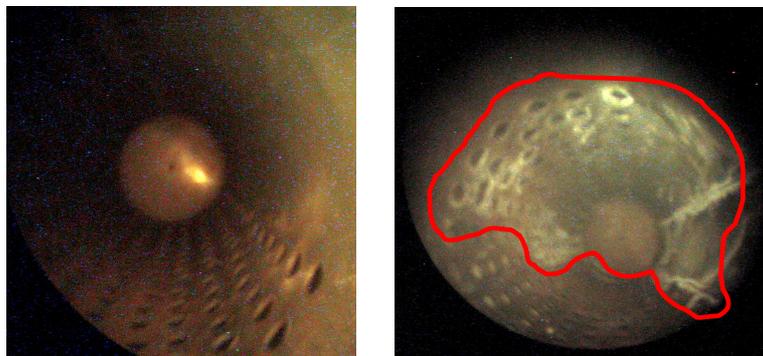


Abbildung 80: SCR-Katalysator, Bereich perforiertes Rohr. links:vor Messung, rechts:nach Messung

- Krümmer zwischen Dosierventil und SCR-Katalysator

In Abbildung 81 wurde der Bereich des Krümmers im SCR-Katalysator untersucht. In diesem Bereich wurden vermehrt sichtbare Harnstoffablagerungen detektiert.

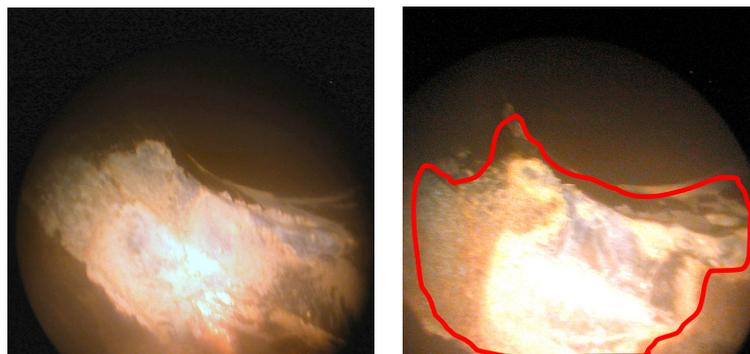


Abbildung 81: SCR-Katalysator, Bereich Krümmer. links:vor Messung, rechts:nach Messung

10 Realer Test als Messfahrt in der Stadt

Am Ende der Versuchsreihe wurde am Stadtbus mit dem integrierten SCR-System ein realer Test in der Grazer Innenstadt durchgeführt (Abbildung 83).



Abbildung 82: Messfahrt in der Grazer Innenstadt

Als Route der Messfahrt wurde ein Teil der Buslinie 31 (Jakominiplatz-Wirtschaftskammer und wieder retour) der Grazer Verkehrsbetriebe (GVB) gewählt. In Abbildung 83 ist die befahrene Messstrecke im Übersichtsplan der Grazer Verkehrsbetriebe eingezeichnet.

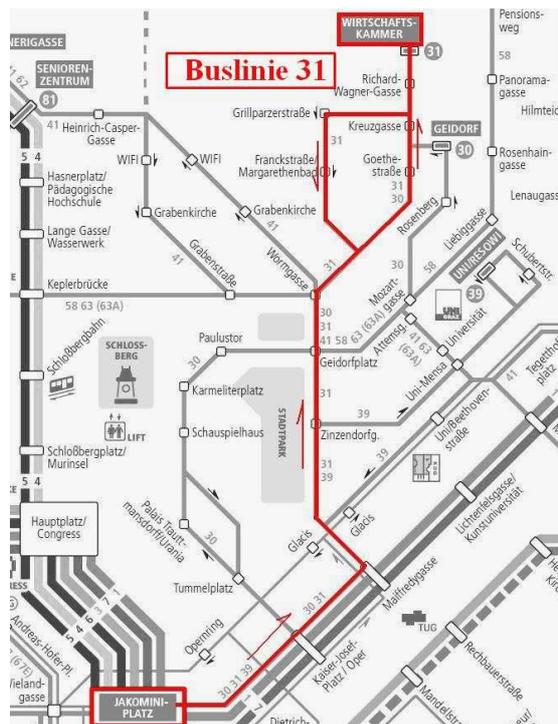


Abbildung 83: Fahrtübersichtplan der realen Messfahrt

Die Strecke der Buslinie 31 besteht aus vielen „Stop&Go“-Phasen und ist daher als Messstrecke mit einem eher niedrigen Lastprofil als „worst case“ für das mögliche DeNO_x-Potential des SCR-Systems im Stadtbusbetrieb zu sehen.

Um einen realitätsgetreuen Vergleich eines herkömmlichen Linienbusbetriebs zu ermöglichen, wurde an jeder eigentlichen Haltestelle der Buslinie 31 der Bus für ungefähr 30 Sekunden angehalten.

Außer der Evaluierung des resultierenden DeNO_x-Potenzials des SCR-Systems wurden verschiedene Kenndaten über die gesamte Route aufgezeichnet, berechnet und später ausgewertet. Die Route wurde jeweils mit verschiedenen Dosierstrategien (Regelung und Steuerung) befahren, um auch einen Vergleich der beiden Strategien zu ermöglichen.

In Abbildung 84 ist das Geschwindigkeitsprofil des Stadtbusses für die Buslinie 31 (Jakominiplatz-Wirtschaftskammer und retour) dargestellt.

Dabei ist ersichtlich, dass die maximale Geschwindigkeit ungefähr 47 km/h und die durchschnittliche Geschwindigkeit ungefähr 14 km/h ist.

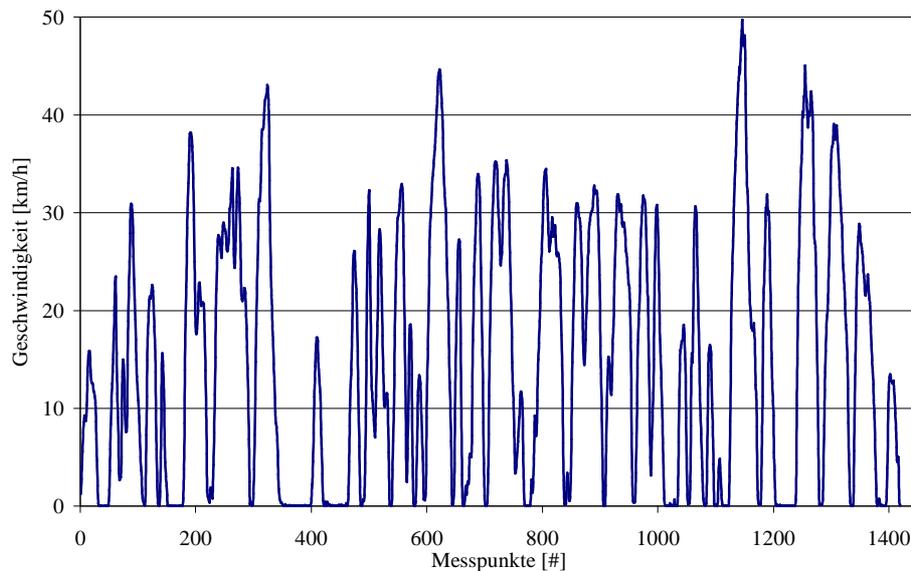


Abbildung 84: Geschwindigkeitsprofil der realen Messfahrt

Aufgrund dieses niedrigen Geschwindigkeitsprofils ergibt sich wie in Abbildung 85 ersichtlich ist, ein niedriges Abgastemperaturprofil im realen Stadtzyklus im Vergleich zu den Rollenprüfstandtests.

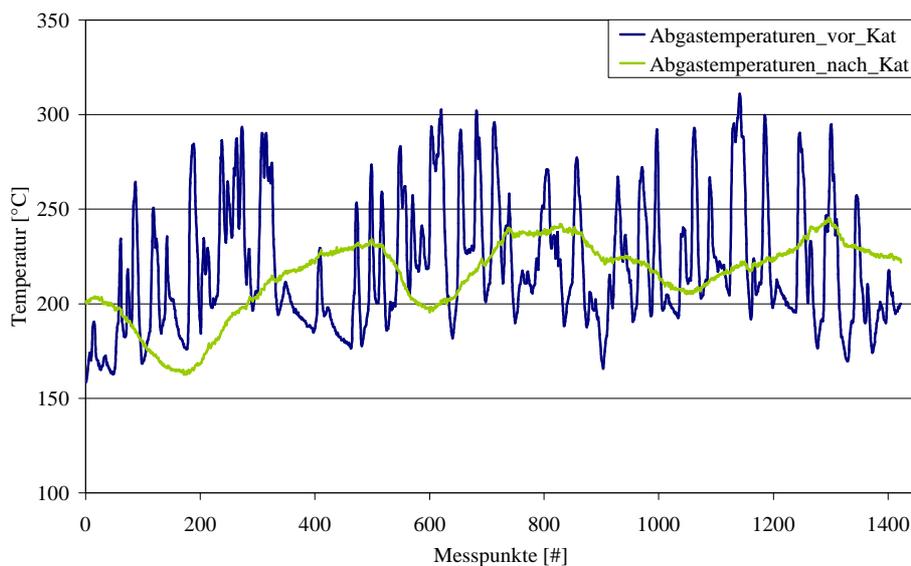


Abbildung 85: Abgastemperaturprofil der realen Messfahrt

Nachstehend in Tabelle 10 werden die Durchschnittswerte der realen Messfahrt in der Grazer Innenstadt gezeigt:

Reale Messfahrt–GVB Linie 31	
Mittlere Geschwindigkeit	14 km/h
Mittlere Temperatur vor SCR-Kat.	214°C
Mittlere Temperatur nach SCR-Kat.	210°C

Tabelle 13: Durchschnittswerte der realen Messfahrt

Während der Messfahrt wurden alle notwendigen Kenndaten über die eingebauten Sensoren, wie zum Beispiel NO_x-Emissionen, Abgastemperaturen und auch die dazugehörige Position des Stadtbusses mit einem GPS-System aufgezeichnet. Die Kenndaten wurden ausgewertet und die daraus resultierenden Konvertierungsraten berechnet.

10.1 Ergebnisse aus der Messfahrt

In realen Buszyklen ergaben sich aufgrund der zum Teil sehr geringen Abgastemperaturen, Reduktionsraten von unter 40%.

In Abbildung 86 sind die beiden Dosierstrategien über die eindosierte Ammoniakmenge verglichen. Dabei ist ersichtlich dass bei der Dosierstrategie Regelung mehr Ammoniak in den Abgasstrang eindosiert und in Folge dessen mehr Stickoxide umgesetzt werden.

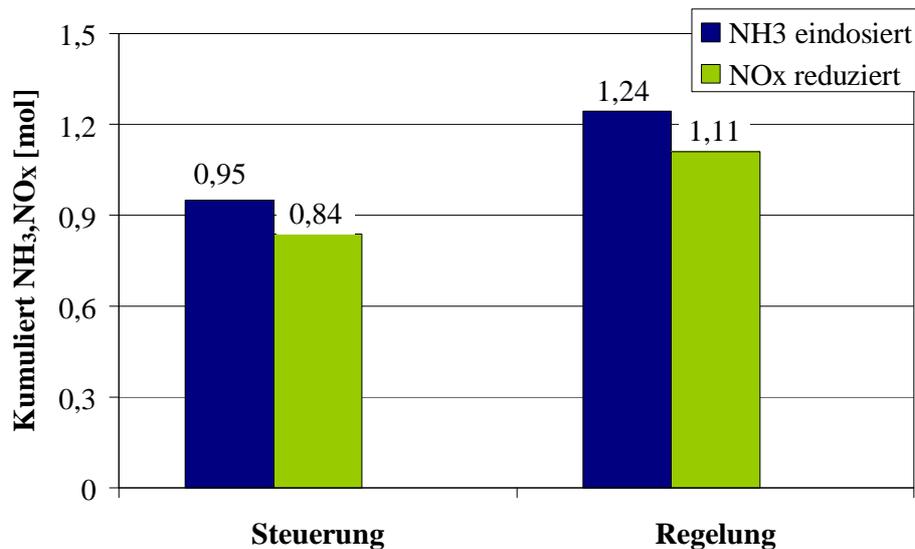


Abbildung 86: Vergleich der eindosierten Ammoniakmenge zwischen den Dosierstrategien bei der realen Messfahrt

Aufgrund der höheren Ammoniakdosiermenge der Dosierstrategie „Regelung“ ergibt sich insgesamt bei der realen Messfahrt eine höhere reduzierte Stickoxidmenge (Abbildung 87).

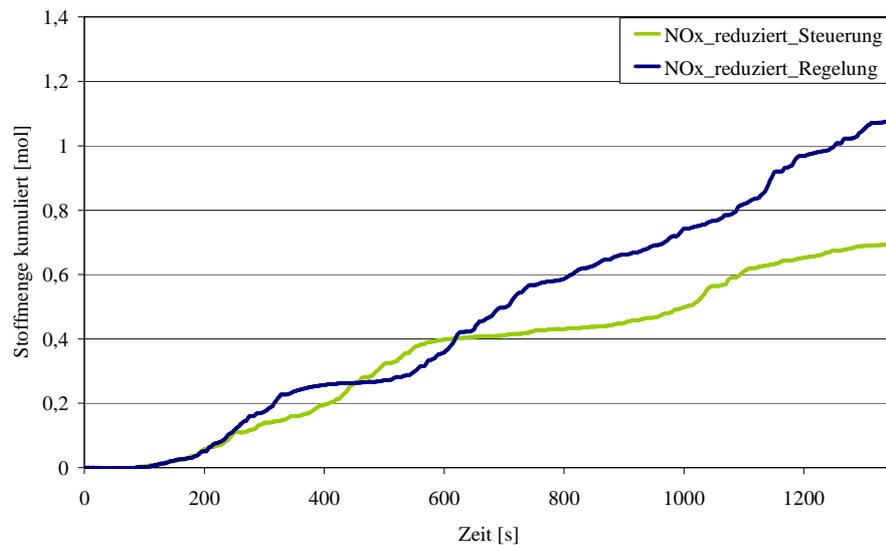


Abbildung 87: Vergleich der reduzierten Stickoxide zwischen den Dosierstrategien bei der realen Messfahrt

In Abbildung 88 sind die Regelfehler der jeweiligen Dosierstrategien dargestellt. Der Regelfehler ergibt sich aus folgendem Zusammenhang:

$$\text{Regelfehler} = (1 - \text{DeNO}_X) \cdot \text{NO}_{X_Vor} - \text{NO}_{X_Nach}$$

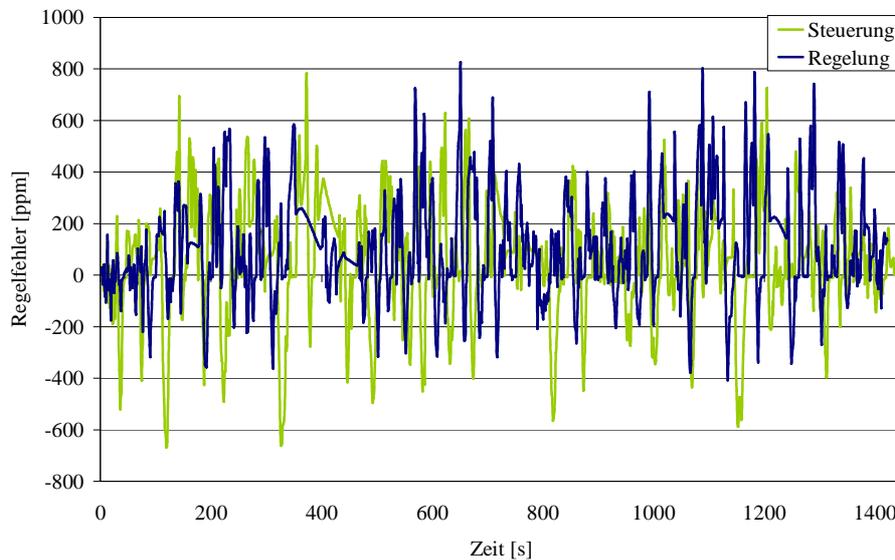


Abbildung 88: Vergleich des Regelfehlers zwischen den Dosierstrategien bei der realen Messfahrt

Dabei ist in der Abbildung ersichtlich, dass der Regelfehler [ppm] bei der Dosierstrategie „Regelung“ eine geringe Abweichung zur eingestellten Konvertierungsrate besitzt.

In Abbildung 89 wird der Vergleich der beiden Dosierstrategien in Bezug auf die reduzierte Stickoxidmenge und eindosierter Reduktionsmittelmenge gezeigt. Dabei ergibt sich für die Dosierstrategie Regelung eine höhere Stickoxidumsetzrate von 7 %.

Abbildung 89: Vergleich der Dosierstrategien bei der Messfahrt

In Tabelle 9 ist der Vergleich der NO_x-Konvertierungsrate und der Schlupf (abgeschätzt) für die beiden Dosierstrategien bei der realen Messfahrt zur Übersicht gezeigt.

Dosierstrategie	DeNO _x ist [%]	Schlupf im Zyklusdurchschnitt (Abschätzung) [ppm]
Steuerung	28	9
Regelung	35	11

Tabelle 14: Vergleich der beiden Dosierstrategien bei der Messfahrt

11 Zusammenfassung und Ausblick

Ein grundsätzliches Problem stellte sich bei der Integration des SCR-Nachrüstsystems bei den im Stadtbus vorhandenen Einbaumöglichkeiten dar. Aufgrund der unzureichenden Platzverhältnisse wurde es notwendig, konstruktive Überlegungen zu treffen, um genügend Einbauraum für das gesamte SCR-Nachrüstsystem bestehend aus Reduktionsmitteltank, Dosiersystem, Elektronik und der notwendigen Sensoren zu treffen. Zusätzlich musste auf die von den Herstellern empfohlenen Einbaurichtlinien und eine für die Umwandlung von AdBlue in Ammoniak (NH_3) notwendige Umwandlungsstrecke im Abgasstrang eingegangen werden.

Bei den am Rollenprüfstand getesteten Prüfstandsläufen mit dem Versuchsbus ergab sich beispielhaft im Grazer Zyklus ein durchschnittliches Temperaturniveau von 230°C . Dies hat vor allem Einfluss auf die Generierung von Ammoniak (NH_3) im Abgasstrang und Auswirkungen auf die Stickoxidumwandlung im SCR-Katalysator. Außerdem ergaben die verschiedenen Prüfstandsversuche, dass die untere Grenztemperatur für die Eindosierung von AdBlue im getesteten Aufbau bei ca. 200°C liegt.

Im Vergleich zu den Rollenprüfstandsläufen war das Ergebnis des SCR-Systems bei der realen Messfahrt mit dem Stadtbus etwas niedriger. Aufgrund des niedrigen Abgastemperaturniveaus bei dieser Stadtfahrt fiel die NO_x -Konvertierungsrate des SCR-Systems auf etwa 30%.

Primäres Ziel mit dem Stadtbus wäre also die Niedertemperatureigenschaften des SCR-Katalysators dahingehend zu verbessern, dass die NO_x -Konvertierungsraten im niedrigen Temperaturbereich erhöht werden. Dafür besteht die Möglichkeit, dem SCR-Katalysator beispielsweise einen Oxidationskatalysator und einen im Nebenstrom angeordneten Hydrolysekatalysator vorzuschalten. Mit dieser Implementierung ist es aus heutiger Sicht möglich, das SCR-Temperaturfenster nach unten auszudehnen.

Im Rahmen dieses Projekts konnten keine Ergebnisse in Bezug auf die Dauerhaltbarkeit, Harnstoffablagerungen und Katalysatoralterung gemacht werden. Vor allem ein mögliches Problem bei SCR-Nachrüstlösungen in Stadtbussen stellt die Dauerhaltbarkeit der einzelnen Komponenten dar. Da der Stadtbus im Linienverkehr einen verlässlichen Betrieb darstellen muss, ist bei der Nachrüstung entweder eine ausreichend lange Testphase zur Detektierung eventueller Probleme vorzuhalten bzw. das Einholen von Herstellerangaben (Sensorstabilität) zu empfehlen.

Eine Einführung in die Serienanwendung dieser SCR-Nachrüstlösung für den Stadtbusbetrieb bedarf weiterer Entwicklungsarbeit, Test- und Feldversuche. Außerdem wurden die SCR-Komponenten speziell für diesen Bustyp ausgelegt und konstruktive Anbauteile angepasst. Zusätzlich und in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, wäre es notwendig, das Reduktionsmittel und den Tank aufgrund des Gefrierpunkts bei $-11,5^\circ\text{C}$ im Winterbetrieb zu beheizen, wenn auch unter -11°C eine NO_x -Reduktion erreicht werden soll.

Wegen der je nach Bustyp unterschiedlichen Einbausituationen müsste für jeden Typ ein neues Konzept für den Einbau eines SCR-Systems erstellt werden. Das macht ein Nachrüsten eines SCR-Systems in eine Stadtbusflotte jedenfalls aufwendig.

Jedoch kann ein ausgereiftes SCR-Nachrüstsystem durchaus einen Anteil zur Reduktion der Stickstoffdioxidemission leisten und damit zu einer Verbesserung der NO_2 -Luftgütesituation beitragen.

12 Literatur

- [1] Beretta, A., Tronconi, E., Groppi G., Forzatti, P.: Monolithic Catalysts for the Selective Reduction of NO_x with NH₃ from Stationary Sources, Seite 121-148, 1998
- [2] DIN 2003 DIN: Dieselmotoren NO_x-Reduktionsmittel AUS 32 Anforderungen und Prüfverfahren DIN V 70070 / Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA). 2003
- [3] Eichlseder, H.: Institutsskriptum: Kolbenmaschinen, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 2005
- [4] Esch, T./Dahlhaus, D.: Nutzfahrzeugtechnik Grundlagen, Systeme, Komponenten 5. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-0374-0, 2008
- [5] Firmenschrift Bosch SCR-System Overview, BOSCH: DNOX2 presentation 2006-07-04.pdf, Seite: 1, 2006
- [6] Gieshoff, J.: Improved SCR Systems for Heavy Duty Applications, SAE Technical Paper 2000-01-0189, 2000
- [7] Grenzwerte für die Konzentration von Luftschadstoffen am Arbeitsplatz, Österreichischer Zivilschutzverband, In: www.siz.cc/bund/sicherheit/show/125
- [8] Gruden, D.: Umweltschutz in der Automobilindustrie, Umweltauswirkung des Dieselmotors, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, ISBN: 978-3-8348-0404-4, 2008
- [9] Heck, R., Farrauto, R., Gulati, S. T.: Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology, 2nd Edition, ISBN-10: 0471436240, 2002
- [10] Herr, A.: Thermische Zersetzung von Festharnstoff für mobile SCR-Katalysatoranwendungen, 2004
- [11] Hirata, K., Masaki N., Ueno H., Akagawa H.: Development of Urea-SCR System for a Heavy-Duty Commercial Vehicles, SAE Technical Paper 2005-01-1860, 2005
- [12] Jacob E.: 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik Perspektiven der mobilen SCR-Technik, 2006
- [13] Jacob, E., Müller R., Scheeder A., Cartus, T., Dreisbach R., Paulus, M., Spengler J.: Hochleistungs-SCR-Katalysatorsystem: Garant für niedrigste NO_x-Emission, 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 2006
- [14] Jacob, E., Müller R., Scheeder A., Treiber P.: SCRi-Abgasnachbehandlungssystem zur gleichzeitigen PM- und NO_x-Verminderung bei On- und Non-road Applikationen, , Emitec, In: www.emitec.com
- [15] Jacob, E.: Emissionslimits zukünftiger Nfz-Motoren: Balanceact zwischen Möglichkeit und Nutzen, 26. Internationales Wiener Motorensymposium, VDI-Fortschritt - Berichte, Reihe 12 Nr.595, Band 1, S.58-79, 2005
- [16] Janssen, J.J.: Environmental Catalysis-Stationary Sources, Handbook of Heterogeneous Catalysis, Wiley 1997

- [17] Käfer, S.: Trockenharnstoff - SCR-System und Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit Dieselmotor, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2004
- [18] Koebel, M., Elsener, M., Madaia, G.: NO_x-Verminderung in Dieselaabgasen mit Harnstoff-SCR bei tiefen Temperaturen, MTZ Motortechnische Zeitschrift 62, 2001
- [19] Koebel, M., Madaia G., Elsener M.: Selective catalytic reduction of NO and NO₂ at low temperatures, Paul Scherrer Institut, Catalysis Today 73, 2002
- [20] Köser, H.: SCR-DeNO_x-Katalysatoren: Qualitätssicherung, Beurteilung und neue Entwicklungen, Vulkan - Verlag, 1992
- [21] Kröcher, O., Elsener M.: Neue Reduktionsmittel für die Low NO_x-SCR-Technik, Paul Scherrer Institut, 2008
In: ega.web.psi.ch/Krocher_Emission_Forum%202008.pdf
- [22] Majewski, W.A.: Selective Catalytic Reduction, Revision 2005.05d, 2005,
In: www.dieselnet.com
- [23] Maurer, B., Jacob, E., Weisweiler, W.: Modellgasuntersuchungen mit NH₃ und Harnstoff als Reduktionsmittel für die katalytische NO_x-Reduktion; MTZ Motortechnische Zeitschrift 60, 1999
- [24] Maus, W., Brück, R.: Die Abgasnachbehandlung für Nutzfahrzeuge - Technologien und Strategien für die Zukunft, AVL List GmbH, ICPC 2007 - 2.1, 2007
- [25] Maus, W., Stock, H., Hirth, P., Brück, R.: Charakterisierung des Einflusses verschiedener Trägerstrukturen auf die Effektivität der NO_x-Nachbehandlung von PKW- und LKW Katalysatorkonzepten für die EU VI/US2010 - Gesetzgebung, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2007
- [26] Maus, W.; Brück, R.; Hirth, P.: Grundlagen der „laminaren“ und „turbulenten“ Katalyse; „Turbulent“ schlägt „Laminar“, 27. Internationales Wiener Motorensymposium 2006, Wien, 2006
- [27] Mollenhauer, K., Tschöke, H.: Handbuch Dieselmotoren, 3. Auflage, Vieweg Verlag, ISBN 978-3-540-72164-2, 2007
- [28] Piazzesi, G., Elsener M., Kröcher O., Wokaun A.: Influence of NO₂ on the hydrolysis of isocyanic acid over TiO₂, Paul Scherrer Institut, 2006
In: sciondirect.com
- [29] Porten G.: Darstellung eines Harnstoff - SCR-Systems zur Erfüllung zukünftiger Grenzwerte für Diesel-PKW, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000
- [30] Proposition 65, List of Chemicals, Kalifornien, USA, In:
www.oehha.ca.gov/prop65/prop65_list/files/P65single052705.pdf
- [31] Rexeis M., Hausberger S.: Updating of Emission Factors for Heavy Duty Vehicles, Report No. I-15/09/Rex-Em 18/07/679, 16.11.2009
- [32] Richtlinie 2005/78/EG, Der Kommission vom 14. November 2005, Kapitel 6.5.1.7,
In: eur-lex.europa.eu/
- [33] Richtlinie 2005/78/EG, Der Kommission vom 14. November 2005, Kapitel 6.5.1.7, 2005

-
- [34] Schär, C.: Control of a Selective Catalytic Reduction Process, Dissertation, Universität Zürich, 2003
- [35] Scheeder, A., Müller, R.: „Downsizing“ von zukünftigen Abgasnachbehandlungssystemen für Nutzfahrzeuge, 4. FAD Konferenz „Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren“, 2006
- [36] Schüssler, M.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz, Teil II SCR, Skript Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2008
- [37] Spurk, P. C., Pfeifer, M., Gieshoff, J., Lox, E.: Ein SCR-Katalysator auch für den Einsatz im Pkw, 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Seite 833-854, 2001
- [38] Weisweiler, W., Maurer, B.: Stickoxidverminderung in Abgasen von Diesel- und Mager-Otto-Motoren nach dem SCR-Verfahren; Dieselmotorentechnik 98, Band 553, Expert Verlag, 1998
- [39] Weisweiler, W., Schmitzer, S., Emiliojoiu E.: Kinetische Untersuchungen an Fe- und Cu- haltigen MCM-48-Zeolithen zur Minderung von Stickstoffoxiden in sauerstoffreichen Abgasen nach dem SCR-Verfahren, Chemie Ingenieur Technik, S. 1554-1558, 2002
- [40] Weisweiler, W., Walz, C.: Effiziente NO_x-Minderung nach dem SCR-Verfahren bei niedrigen Temperaturen durch Erhöhung des NO₂ - Anteils, Chemie Ingenieur Technik, S.117 - 121, 2002