Aufbau und Vermessung eines DeNO_x-Systems auf der Basis von Harnstoff-SCR

Die Autoren

Martin Elsener ist technischer Mitarbeiter der Gruppe Abgasnachbehandlung am Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.

Prof. Dr. Hans Peter Geering ist ordentlicher Professor am Institut für Mess- und Regeltechnik (IMRT) der ETH Zürich, Schweiz.

Dipl.-Ing. François Jaussi ist Leiter des Dieselmotorenversuchs bei Liebherr Machines Bulle SA, Schweiz.

Dr. sc. techn. Manfred Koebel war bis März 2003 Leiter der Gruppe Abgasnachbehandlung am Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.

Dr. sc. nat. Oliver Kröcher ist neuer Leiter der Gruppe Abgasnachbehandlung am Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.

Matthias Mangold ist Vertriebsleiter (OEM) der Oberland Mangold GmbH, Garmisch-Partenkirchen.

Dr. Christopher Onder ist wissenschaftlicher Adjunkt am IMRT der ETH Zürich, Schweiz.

Dr. sc. techn. Roger Röthlisberger ist Projektleiter für Abgasnachbehandlung und Motorsimulation bei der Dieselmotorenentwicklung von Liebherr Machines Bulle SA, Schweiz.

Dipl.-Ing. ETH Christoph Schär ist Doktorand am IMRT der ETH Zürich, Schweiz.

Bei Liebherr Machines Bulle SA wurde ein DeNO_x-System für die Entstickung von Dieselmotor-Abgasen mit einem einzigen hochaktiven SCR-Katalysator aufgebaut, dessen Volumen dem doppelten Hubvolumen des Dieselmotors entspricht. An diesem System wurden verschiedene Steuer- und Regelalgorithmen für die Harnstoffdosierung erprobt. Erstmals stand für diese Versuche ein serientauglicher NO_x-Sensor zur Verfügung, der für die Messung von NO_x und Ammoniak nach Katalysator eingesetzt wurde und eine Regelung der Harnstoffdosierung ermöglichte. Der Beitrag stellt die dabei gewonnenen Ergebnisse vor.

1 Einleitung

Die grundsätzliche Problematik der gleichzeitigen Reduktion von Partikeln und Stickoxiden im Abgas von Dieselmotoren ist in Fachkreisen hinlänglich bekannt und wurde bereits in einem früheren Beitrag über Harnstoff-SCR in dieser Zeitschrift ausführlich dargelegt [1]. Dort wurde auch das große Potenzial des SCR-Verfahrens (Selective Catalytic Reduction) beschrieben, das dieses in Verbindung mit partikeloptimierten Motoren aufweist. In den letzten Jahren haben verschiedene Firmen Prototypen für Harnstoff-SCR gebaut und getestet. Hierzu gehören zum Beispiel das SINO_x-System von Siemens [2] und das VHRO-System von MAN [3, 4].

Am Paul Scherrer Institut wurden seit 1989 Versuche mit Harnstoff als Ammoniak-Speichersubstanz und SCR-Katalysatoren für die NO_x-Verminderung bei stationären Dieselmotoren durchgeführt [5]. Ab 1995 wurden diese Arbeiten auch auf die Anwendung in Fahrzeugen erweitert. Mobile Anwendungen verlangen nach einer deutlichen Verringerung des Katalysatorvolumens sowie einer aufwändigeren Harnstoffdosierung [6, 7]. Letztere muss in der Lage sein, der last- und drehzahlbedingten Dynamik des NO_x-Massenstroms zu folgen. Die Arbeiten konzentrierten sich zunächst auf die Entwicklung und Erprobung von Katalysatoren mit erhöhter volumetrischer Aktivität, um mit einem vergleichsweise kleinen Kataly-

satorvolumen auch bei tieferen Abgastemperaturen (unter 300 °C) noch brauchbare NO_x-Konversionen erreichen zu können. Die wichtigsten Maßnahmen zum Erreichen dieses Ziels waren die Erhöhung der Zelldichte der Monolithen und die Erhöhung der intrinsischen Aktivität der Katalysatormasse. Zum einen wurden in dieser Zeit kommerzielle Vollkatalysatoren mit erhöhter Zelldichte verfügbar, zum anderen wurden am PSI Beschichtungen auf der Basis von TiO₂-WO₃-V₂O₅ zur Herstellung von monolithischen Schichtkatalysatoren hoher Zelldichte entwickelt [8]. Diese Arbeiten umfassten sowohl Laborversuche als auch Prüfstandsversuche an einem Dieselmotor.

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Ergebnisse eines Projekts, dessen Hauptziel der Aufbau und die Vermessung eines Harnstoff-SCR-Prototypen für den 10-l-Dieselmotor eines Mobilkrans war. Es handelt sich um ein gemeinsames Projekt des Paul Scherrer Instituts, des Instituts für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich sowie den Industriepartnern Liebherr Machines Bulle SA und Oberland Mangold GmbH. Das Projekt wurde durch das Schweizerische Bundesamt für Energie gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

Zur Bewertung verschiedener SCR-Katalysatoren wurden Vorversuche mit einem kleineren 6,6-l-Dieselmotor durchgeführt. Die Ergebnisse wurden beim Aufbau des eigentlichen Prototypen berücksichtigt. Das

Gesamtsystem Motor und DeNO_x-System wurde zuerst in stationären Versuchen ausgemessen. Die gewonnenen Messergebnisse wurden zur Auslegung einer ersten, stationären Dosierstrategie für die Harnstoffdosierung verwendet. Dynamische Versuche erlaubten die Parametrierung eines Katalysatormodells und den Entwurf von modellbasierten, dynamischen Dosierstrategien. Deren Eignung wurde in statischen und dynamischen Testzyklen validiert.

Das Gesamtprojekt wurde von Laborarbeiten an SCR-Katalysatoren begleitet. Erwähnenswert sind die Anpassung der früher entwickelten Technik zur Herstellung von SCR-Beschichtungskatalysatoren an metallische Trägerstrukturen und Untersuchungen zum Verständnis der SCR-Reaktion bei tiefen Temperaturen. Über die Reaktionen bei tiefen Temperaturen ist bereits in einem früheren Heft dieser Zeitschrift berichtet worden [1]. Dort sind auch die grundlegenden Reaktionen von Harnstoff-SCR vorgestellt worden, so dass im vorliegenden Beitrag auf deren erneute Darlegung verzichtet wird.

2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden an einem Sechszylinder-Dieselmotor mit 9.96 l Hubvolumen, Turbolader und Ladeluftkühler (Liebherr D926 TI-E A4) durchgeführt. Die maximale Leistung von 270 kW wird bei einer Drehzahl von 2100/min erreicht. Der Motor wurde mit seinem serienmäßigen Steuergerät betrieben, welches so eingestellt ist, dass im ESC-13-Stufen-Test etwa 5.8 g NO_x/kWh und 0.08 g Partikel/kWh ausgestoßen werden.

Der Dieselmotor wurde auf einem Prüfstand mit hydrostatischer Bremse aufgebaut. Zur Steuerung/Regelung des Prüfstands und zur Datenerfassung wurde ein Echtzeitrechnungssystem von dSpace eingesetzt. **Bild 1** und **Bild 2** zeigen schematisch den Versuchsaufbau.

Wichtige Charakteristika der Prüfstandsversuche:

- Die vorliegenden Versuche wurden mit einem Beschichtungskatalysator auf Metallträger (400 cpsi) durchgeführt. Die aktive Schicht besteht aus TiO₂-WO₃-V₂O₅ und das Katalysatorvolumen beträgt 19,9 l (zwei Monolithe von 325 mm Durchmesser und einer Gesamtlänge von 240 mm). Somit entspricht das eingesetzte Katalysatorvolumen etwa dem doppelten Hubvolumen. Durch den Einbau in den Schalldämpfer ergibt sich ein vergleichsweise handliches System.
- Als Reduktionsmittel wird eine eutektische Harnstofflösung mit 32.5 Massen-%

2 Versuchsaufbau

Bild 1: Schema des Versuchsaufbaus

Figure 1: Schematic of the experimental set-up

Bild 2: Sensorik und Rechner

Figure 2: Sensors and data processor

Harnstoff verwendet. Sie weist eine Gefrieretemperatur von zirka -11 °C auf.

■ Als Dosiervorrichtung kommt ein älterer, leicht modifizierter Prototyp von Bosch zum Einsatz. Mittels eines pulsweitenmodulierten Magnetventils kann die Dosierate der Harnstofflösung gesteuert werden.

■ Die NO_x-Konzentrationen nach Motor und nach Katalysator werden sowohl mit einem relativ langsamen Tecan CLD 502 als auch mit einem schnellen Combustion fNO_x400 gemessen. Zusätzlich wird für die Regelung nach Katalysator ein „Smart NO_x-Sensor“ von Siemens-NGK eingesetzt.

■ Das Gewicht der eingespritzten Harnstofflösung wird mit einer Waage erfasst, die Ammoniakkonzentration nach Katalysator mit einem am PSI entwickelten nasschemischen Analysator.

3 Stationäre Versuche

Bild 3 zeigt die mittlere Abgastemperatur im Katalysator in Funktion von Drehmoment und Drehzahl, sowie die drei Drehzahlen A, B und C, bei welchen der ESC-Test durchzuführen ist. Die Temperaturkurven reichen von 130 ° bis 570 °C, wobei die höchsten Temperaturen im Katalysator bei den höchsten Lasten und bei Drehzahlen von 1000 bis 1500/min auftreten.

Bild 4 zeigt, dass die höchsten NO_x-Konzentrationen nach Motor bei hoher Last und niedriger Drehzahl auftreten. Im Bereich der ESC-Drehzahlen A, B und C werden NO_x-Konzentrationen zwischen 300 und 1200 ppm erreicht. Bei gleichem Drehmoment nimmt die NO_x-Konzentration von A zu B zu C ab.

3 Stationäre Versuche

Bild 3: Mittlere Abgastemperatur über dem Katalysator in Funktion von Drehmoment und Drehzahl

Figure 3: Average exhaust temperature in the catalyst as a function of torque and speed

Bild 4: NO_x-Rohemission [ppm] in Funktion von Drehmoment und Drehzahl

Figure 4: NO_x emissions [ppm] as a function of torque and speed

Bild 5: Ammoniakschlupf in Funktion der NO_x-Konversion bei der Drehzahl B (1590/min)

Figure 5: Ammonia slip as a function of NO_x conversion at speed B (1590/min)

Bild 5 zeigt das Leistungsvermögen des SCR-Systems für verschiedene Lasten bei der ESC-Drehzahl B. Bei einem konstanten Lastpunkt wurde die Harnstoffdosierung stufenweise erhöht, wobei jeweils stationäre Messwerte von NO_x und Ammoniak (NH₃) abgewartet werden. Da im praktischen Einsatz des DeNO_x-Systems eine übermäßige Ammoniakemission unzulässig ist, können die maximal erreichbaren Werte von DeNO_x nicht genutzt werden. Für die nachfolgenden Versuche wird deshalb ein Ammoniakschlupf von 10 ppm als Zielgröße definiert. Bild 5 zeigt, dass unter dieser Voraussetzung für 400 und 1570 Nm bereits eine DeNO_x-Rate von 80 % erreicht wird, während zwischen 540 und 1185 Nm Werte über 95 % erreicht werden. Einzig beim tiefen Drehmoment von 330 Nm beträgt die DeNO_x-Rate nur noch 54 %.

Die derart ermittelten Werte für verschiedene Drehzahlen und Lasten sind in Bild 6 zusammengefasst. In einem großen Teil des Kennfelds sind demnach NO_x-Konversionsraten von 80 bis 95 % realisierbar. Die schlechteren Konversionsraten bei tiefer Motorbelastung sind auf verminderte Abgastemperaturen und die damit verbundene geringere Katalysatoraktivität zurückzuführen. Beim ESC-Test liegen neun der insgesamt 13 Stufen im Bereich von > 80 % NO_x-Konversion, und es lässt sich eine NO_x-Reduktion von 85 % abschätzen. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass das Katalysatorsystem während der zwei Minuten Betrieb pro Stufe die Gleichgewichtstemperatur jeweils nicht erreicht.

Verfahrenstechnisch betrachtet wird die NO_x-Konversion des SCR-Katalysators am besten in Abhängigkeit der Parameter mittlere Katalysatortemperatur und Raumgeschwindigkeit aufgetragen, Bild 7. Die Raumgeschwindigkeit ist dabei ein Maß für die „Katalysatorbelastung“ und berechnet sich aus dem Verhältnis von Abgasvolumenstrom unter Standardbedingungen zu Katalysatorvolumen. Bei konstanter Temperatur nimmt mit zunehmender Raumgeschwindigkeit der NO_x-Umsatz ab. Wird die Raumgeschwindigkeit konstant gehalten, so nimmt mit steigender Temperatur der NO_x-Umsatz zunächst zu und erreicht zwischen 350 und 450 °C ein Maximum. Bei noch höheren Temperaturen fällt der NO_x-Umsatz wieder ab, da die SCR-Reaktion langsamer, unerwünschte Nebenreaktionen dagegen schneller werden. Es sind dies die Oxidation des Reduktionsmittels Ammoniak mit Sauerstoff zu Stickstoff (N₂), zu Lachgas (N₂O) und zu neuem Stickoxid (NO). Dabei trägt die Bildung von Stickstoff weitaus am meisten zum Mehrverbrauch an Reduktionsmittel bei. Die Bildung von

Lachgas wird ab 450 °C messbar. Sie beträgt bei 475 °C etwa 15 ppm, bei 500 °C etwa 30 ppm, bei 550 °C 100 ppm. Parallel zur Lachgasbildung steigt auch der spezifische Reduktionsmittelverbrauch als Indikator für die zunehmende Bedeutung obiger Nebenreaktionen an. Theoretisch ist pro reduziertem NO-Molekül ein NH₃-Molekül beziehungsweise ein halbes Harnstoffmolekül erforderlich [1, 7]. Dieses Verhältnis wird bis zu Temperaturen von etwa 400 °C eingehalten. Darüber steigt der spezifische Reduktionsmittelverbrauch an. So wurden bei Temperaturen oberhalb 500 °C Extremwerte bis zum Doppelten des theoretischen Werts gefunden. Einschränkend muss gesagt werden, dass der Motor mehrere Minuten mit hoher Last gefahren werden muss, damit derart hohe mittlere Katalysatortemperaturen erreicht werden.

4 Entwicklung von Dosieralgorithmen

Um auch unter den sich rasch ändernden Betriebsbedingungen des typischen Fahrbetriebs eine hohe mittlere NO_x-Konversion bei geringem Ammoniakschlupf zu erreichen, muss die aktuelle Harnstoffdosierung laufend den Erfordernissen angepasst werden. Für diese Aufgabe wurden verschiedene Dosieralgorithmen entwickelt. Die Dosierung besteht aus der Zusammenschaltung verschiedener Elemente, wie in **Bild 8** dargestellt. Alle in diesen Elementen enthaltenen Kennfelder werden aus den Daten der stationären Versuche generiert.

Die Datenaufbereitung verarbeitet die Eingangssignale, bevor sie der Vorsteuerung und dem Vorfilter übergeben werden: vom Motorsteuergerät werden die Drehzahl und das Lastmoment des Motors (n_{mot} , M_{mot}), der Druck und die Temperatur vor Einlassventil (p_{VM} , T_{VM}) und der Brennstoffmassenstrom ($\dot{m}_{\text{Di}}$) empfangen. Zusätzlich werden die Temperaturen vor und nach Katalysator (T_{VK} , T_{NK}) gemessen. Daraus werden eine Schätzung für die NO_x-Konzentration nach Motor ($c_{\text{NO}_{x,\text{NM,est}}}$), die mittlere Katalysatortemperatur (T_{C}) sowie die Raumgeschwindigkeit (RG) berechnet.

Die Vorsteuerung hat die Aufgabe, eine möglichst präzise Dosiervorgabe zu berechnen. Im einfachsten Fall ist die Vorsteuerung statisch: zuerst wird aus einem Kennfeld das optimale Stöchiometrieverhältnis $\alpha_{\text{OD}} = (\dot{n}_{\text{Harnstoff}}^* / \dot{n}_{\text{NO}_{x,\text{NM}}})$ ermittelt, dann wird die Harnstoffdosierrate berechnet.

Mit einem mathematischen Modell lässt sich das Speicherverhalten des Katalysators für thermische Energie und eingespeichertes Ammoniak beschreiben [11]. Darauf basierend können dynamische, modellba-

3 Stationäre Versuche

Bild 6: NO_x-Konversion bei einem Schlupf von 10 ppm Ammoniak in Funktion von Drehzahl und Drehmoment
Figure 6: NO_x conversion at 10 ppm ammonia slip as a function of torque and speed

Bild 7: NO_x-Konversion bei einem Schlupf von 10 ppm Ammoniak in Funktion von Katalysatortemperatur und Raumgeschwindigkeit
Figure 7: NO_x conversion at 10 ppm ammonia slip as a function of mean converter temperature and space velocity

4 Entwicklung von Dosieralgorithmen

Bild 8: Regelkonzept für das SCR-Katalysatorsystem
Figure 8: Dosing algorithm for the SCR system

sierte Dosieralgorithmen entworfen werden. Das Katalysatormodell kann beispielsweise dazu verwendet werden, laufend die aktuelle Temperatur und die Ammoniakbeladung nachzurechnen. Übersteigt die Beladung einen betriebspunkt-abhängigen Schwellenwert, so wird rechtzeitig die Harnstoffdosierrate $m_{\text{HSL,soll}}^*$ reduziert, um Ammoniakschlupf zu verhindern [12]. Durch teilweise Invertierung des Katalysatormodells lassen sich weitere, modellbasierte Vorsteuerungen generieren. Beispielsweise kann ein Sollwert von 10 ppm für den Ammoniakschlupf vorgegeben werden. Das Ausgangssignal dieser Vorsteuerung steuert dann die Dosierrate der Harnstofflösung, die unter Berücksichtigung der anderen Eingangsgrößen zur Erreichung des angestrebten Ammoniakschlupfs nötig ist.

Im Falle einer reinen Steuerung kann es leicht zu einer Über- oder Unterdosierung von Harnstoff kommen, und in Folge davon zu einer geringen Entstickung oder zu übermäßigem Ammoniakschlupf. Hauptursachen sind Veränderungen in der NO_x -Bildung des Motors, in der Harnstoff-Dosiervorrichtung oder in der Konzentration der Harnstofflösung [9]. Erst das Hinzufügen einer Regelung garantiert, dass die Abweichungen vom gewünschten Betriebszustand klein bleiben.

Zur Verminderung eines statischen Nachlauffehlers weist der NO_x -Regler inte-

grierendes Verhalten auf. Die Stellgröße des Reglers (k_R) wird mit $m_{\text{HSL,soll}}^*$ multipliziert. Der Sollwert für die NO_x -Regelung ($c_{\text{NO}_x,\text{nK,soll}}$) wird im Vorfilter durch ein Kennfeld für den nicht reduzierbaren Anteil NO_x (1-DeNO_x) und der anschließenden Multiplikation mit $c_{\text{NO}_x,\text{nM,est}}$ bestimmt.

Für die NO_x -Messung wird ein fahrzeugtauglicher NO_x -Sensor verwendet. Dieser ist querempfindlich auf NH_3 . Zwei weitere Systemeigenschaften erlauben das Trennen der beiden Signale: erstens kann nur entweder NO_x oder Ammoniak in nennenswerten Konzentrationen hinter dem Katalysator gemessen werden, zweitens wird das Sensorrauschen stark gedämpft, wenn zu viel Harnstoff dosiert wird. Diese Dämpfung wird durch Adsorption / Desorption von Ammoniak auf der Katalysatoroberfläche verursacht. Alle drei Eigenschaften sind aus dem in **Bild 9** dargestellten Dosierampenversuch ersichtlich.

Durch Modulation des Harnstoffmassenstroms und einer digitalen Auswertung des Messsignals kann aus dem Sensorsignal eine fast lineare Sensorkennlinie generiert werden. Ein Auftreten von Ammoniak wird dabei als NO_x -Mangel interpretiert. Mit dem gefilterten NO_x -Sensorsignal $c_{\text{NO}_x,\text{nK,fil}}$ können auf diese Weise Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt sowohl in Richtung Über- als auch Unterdosierung quantifiziert werden. Dies ermöglicht eine Regelung auf den oben definierten Betrieb-

spunkt bei tiefen NO_x - und tiefen Ammoniakkonzentrationen [12]. Dies gelingt nur dank der Querempfindlichkeit des NO_x -Sensors für Ammoniak. Diese Regelung ist damit einer mit einem idealen NO_x -Sensor ohne Ammoniakquerempfindlichkeit ausgerüsteten Regelung überlegen.

5 Dynamische Versuche

Die Validierung der Dosieralgorithmen erfolgte sowohl mit ESC- als auch ETC-Tests. **Bild 10** zeigt den Verlauf der Stoffströme $\text{NO}_{x,\text{nM}}$, $\text{NO}_{x,\text{nK}}$ und $\text{NH}_{3,\text{nK}}$ während eines ESC-Tests mit dem statischen Dosieralgorithmus. Im ESC wird der Betriebspunkt des Motors alle zwei Minuten verstellt. Bei der Berechnung der spezifischen Emission werden pro Betriebspunkt aber nur die letzten 30 s berücksichtigt. Auf diese Weise werden schnelle transiente Vorgänge beim Lastwechsel ausgeblendet, und der Vorteil einer dynamischen Steuerung ist kaum ersichtlich. Auch nach zwei Minuten konstantem Betrieb ist der Abgasstrang thermisch noch nicht im Gleichgewicht. Damit ist der ESC zwar für den Motor ein „Stationärzyklus“, nicht aber für das Abgasnachbehandlungssystem. **Bild 11** zeigt die Schadstoffemissionen während eines ETC-Tests mit einem modellbasierten Dosieralgorithmus.

Die Versuchsergebnisse mit je einem statischen und einem modellbasierten, dyna-

4 Entwicklung von Dosieralgorithmen

Bild 9: Dosierampenversuch bei konstant betriebenen Motor: Der NO_x -Sensor ist Ammoniakquerempfindlich. Durch Anregung und Signalfilterung kann eine fast lineare Sensorkennlinie generiert werden

Figure 9: Dosing experiment with constantly operated engine: The NO_x sensor is ammonia sensitive. By alterations and by applying an electronic filter, an almost linear characteristic curve is obtained

5 Dynamische Versuche

Bild 10: Statische Dosierstrategie: Primär- und Sekundäremissionen im ESC-Test

Figure 10: Static dosing algorithm: emission levels during an ESC

5 Dynamische Versuche

Bild 11: Modellbasierte Dosierstrategie:
Primär- und Sekundäremissionen im ETC-Test

Figure 11: Model based dosing algorithm: emission levels during an ETC

Tabelle 1: Spezifische Emissionen im vorkonditionierten ESC

Table 1: Specific emissions in pre-conditioned ESC

Dosieralgorithmus	NO _{x,M} [g/kWh]	NO _{x,nK} [g/kWh]	DeNO _x [%]	NH _{3,nK} [g/kWh]	Ø N _{H3,nK} [ppm]
statisch	5,62	0,30	94,6	0,066	33
dynamisch (modellbasiert)	5,79	0,53	90,8	0,044	14

Tabelle 2: Spezifische Emissionen im vorkonditionierten ETC

Table 2: Specific emissions in pre-conditioned ETC

Dosieralgorithmus	NO _{x,M} [g/kWh]	NO _{x,nK} [g/kWh]	DeNO _x [%]	NH _{3,nK} [g/kWh]	Ø N _{H3,nK} [ppm]
statisch	4,87	0,44	91,0	0,180	48
dynamisch (modellbasiert)	4,87	0,64	87,0	0,030	8,2

mischen Dosieralgorithmus im ESC- und ETC-Test sind in **Tabelle 1** und **Tabelle 2** zusammengefasst. Vor jedem Test wurden Motor und Abgasnachbehandlungssystem vorkonditioniert (Vorwärmung und Vordosierung von Harnstoff). Die modellbasierte Dosierstrategie bewirkt eine geringere NO_x-Reduktion als die statische Strategie, dafür kann sie den NH₃-Schlupf deutlich senken. Mit der modellbasierten Dosierstrategie lassen sich die spezifischen NO_x-Emissionen um 91 % beziehungsweise 87 % reduzieren. Das Ziel von 10 ppm Ammoniak schlupf wird im ESC-Test leicht über-, im ETC-Test hingegen knapp unterschritten.

Es ist bemerkenswert, dass im beinahe statischen ESC und im dynamischen ETC ähnlich hohe DeNO_x-Werte erreicht werden. Dies spricht für die Güte der Vorsteuerung und letztlich des Katalysatormodells.

Zwei Beobachtungen belegen, dass der Regler die Auswirkungen der diversen Fehlerquellen kompensieren kann: erstens erreicht die Regelung auch in dynamischen,

nicht vorkonditionierten Zyklen den gewünschten Betriebszustand, zweitens lassen sich die Ergebnisse auch bei sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gut reproduzieren.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Es wurde ein konstruktiv einfaches Harnstoff-SCR-System für die NO_x-Verminderung eines 10-l-Dieselmotors aufgebaut. Dieses weist einen einzigen SCR-Beschichtungskatalysator hoher volumetrischer Aktivität auf, dessen Volumen etwa dem doppelten Hubvolumen des Dieselmotors entspricht. Für die Optimierung der Harnstoffdosierung wurden modellbasierte Steueralgorithmus entwickelt, die die hohe Entstickungsgrade bei minimalem Ammoniak schlupf erreichen. Erstmals konnte bei diesen Versuchen ein serientauglicher NO_x-Sensor eingesetzt werden, der die Messung von Stickoxid und Ammoniak nach Katalysator erlaubt. Er ermöglicht die Überlage-

rung der Dosiersteuerung mit einer NO_x-Regelung. Damit kann die DeNO_x-Leistung des SCR-Katalysators besser genutzt werden, da Veränderungen in der NO_x-Bildung des Motors sowie Veränderungen der Dosierparameter kompensiert werden. In verschiedenen Versuchen, auch in hochdynamischen Testzyklen, werden Entstickungsgrade von über 85 % bei einem mittleren Ammoniak schlupf um 10 ppm erreicht.

Der Bau eines einfachen SCR-Systems für die mobile Anwendung, mit welchem die kommenden Euro-4/5-Grenzwerte für NO_x erreicht werden können, ist somit technisch realisierbar. Hochaktive Katalysatoren sind dazu eine wichtige Voraussetzung. Der Einsatz von modellbasierten Dosieralgorithmen mit NO_x-Regelung stellt dabei sicher, dass die Leistungsfähigkeit des Katalysators auch unter dynamischen Bedingungen und über lange Betriebszeit optimal genutzt wird.

Literaturhinweise

- [1] Koebel, M.; Elsener, M.; Madia, G.: NO_x-Verminderung in Dieselabgasen mit Harnstoff-SCR bei tiefen Temperaturen. In: MTZ 62 (2001), Nr. 2, S. 166–175
- [2] Hofmann, L.; Mathes, W.; Fischer, S.: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 376, Bd. 2, S. 267–81 (1999)
- [3] Jacob, E.; Emmerling, G.; Döring, A.; Graf, U.; Harris, M.; Hupfeld, B.: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 348, Bd. 1, S. 366–86 (1998)
- [4] Jacob, E.: Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 420, Bd. 2, S. 311–329 (2000)
- [5] Koebel, M.: VDI-Berichte 1019, S. 195–211 (1993)
- [6] Kleemann, M. Catal.: Today 59 (2000), S. 335–345
- [7] Koebel, M.; Elsener, M.; Madia, G.: SAE Technical Paper Series 2001-01-3625
- [8] Kleemann, M.P.: Dissertation Nr. 13401, ETH Zürich, November 1999
- [9] Song, Q.; Zhu, G.: SAE Technical Paper Series 2002-01-0287
- [10] Schär, C.; Elsener, M.; Onder, C.; Geering H. P.: Proceedings of FISITA 2002, Helsinki, Juni 2002
- [11] Schär, C.; Onder, C.; Geering H. P.: Proceedings of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Barcelona, Juli 2002
- [12] Schär, C.; Onder, C.; Geering H. P.; Elsener, M.: SAE Technical Paper Series 2003-01-0776

For an English version of this article, see **MTZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.

MTZ Vieweg Verlag · Postfach 1546 · D-65173 Wiesbaden
Hotline 06 11/78 78-151 Fax 06 11/78 78-423
email: vieweg.service@bertelsmann.de