

„Downsizing“ von zukünftigen Abgasnachbehandlungssystemen für Nutzfahrzeuge

„Downsizing“ of future exhaust aftertreatment systems for HD vehicles

Dr. Andreas Scheeder, Dr. Raimund Müller

Emitec GmbH, Lohmar

Dr. Martin Paulus, Dr. Jörg Spengler

Süd-Chemie AG, Bruckmühl

Kurzfassung

Für die Erfüllung zukünftiger Abgasgrenzwerte von Nutzfahrzeugen zeichnet sich der zu beschreitende Weg immer deutlicher ab. Zur Einhaltung von EU4 und EU5 werden noch unterschiedliche Strategien angewandt. Sowohl die Abgasrückführung zur NO_x-Minimierung mit Partikelreduktion in der Nachbehandlung wie auch die Selektive Katalytische Reduktion mit partikeloptimierten Motoren sind hier zielführend. Spätestens für die im nächsten Jahrzehnt einzuhaltenden Grenzwerte (EU6, US2010, Japan 09) stellt sich die Frage, ob eine dieser beiden Maßnahmen allein noch in der Lage ist, die Grenzwerte einzuhalten. Dass die Absenkung der motorischen Rohemissionen hier ausreichen, wurde von vielen Seiten bereits jetzt verneint.

Durch die wahrscheinlich notwendige Kombination der SCR-Technik mit einem partikelreduzierenden System entsteht sowohl für den Schalldämpfer- wie auch für den Fahrzeughersteller die anspruchsvolle Aufgabe, diese zum Teil sehr großvolumigen Systeme im Nutzfahrzeug so unterzubringen, dass weiterhin ausreichend Platz für alle anderen Komponenten zur Verfügung steht sowie die gewohnte Nutzung durch den Fahrzeug-Betreiber nicht eingeschränkt wird.

Die Verwendung von turbulenz-erzeugenden Trägerstrukturen mit hochaktiven Beschichtungen in der Harnstoffaufbereitung sowie im NO_x-Reduktionssystem ermöglicht eine Volumenreduktion dieser Einheiten von über 35% gegenüber konventionellen Systemen. Eine Kombination mit einem kontinuierlich arbeitenden Partikelminderungssystem sorgt dann dafür, dass mit entsprechenden Fortschritten in der Entwicklung der Motor-Rohemissionen bereits vorhandene Schalldämpfer-Geometrien beibehalten werden können beziehungsweise ein „Downsizing“ von größeren Anlagen, die bisher mit konventionellen Katalysator-Technologien ausgelegt waren, vorgenommen werden.

Abstract

The road to compliance with the future exhaust gas legislation for heavy trucks is becoming clearer. Different strategies are currently being pursued to fulfill EU4 and EU5. Both minimization of NO_x-emissions through exhaust gas recirculation with particulate matter control in the exhaust and Selective Catalytic Reduction with PM-optimized engines lead to the desired result. The question arises if either of the two methods will be able to fulfill the legislation of the next decade (EU6, US2010, Japan 09) on its own. Many sources have stated that a reduction of the engine-out emissions will not be sufficient.

The challenge that the likely required combination of SCR-technology with particulate matter reduction poses to muffler and vehicle manufacturers is to integrate these fairly large-volume systems into the vehicle while leaving enough space for other components and without limiting the operator's utilization of the vehicle.

The use of structured, turbulence-creating substrates with highly reactive coatings for urea decomposition and NO_x-reduction allows for a volume saving of more than 35% compared to a traditional system. In combination with a continuously regenerating PM-control-system and the continued advances in engine-out emissions existing muffler geometries can be used further on, or large muffler systems based on conventional technology can be "downsized".

1. Einleitung

Katalysatoren unterstützen den Ablauf von chemischen Reaktionen, ohne selbst daran teilzunehmen. Hierbei spielt der direkte Kontakt der umzusetzenden Medien (Gasen) mit den aktiven Zentren des Katalysators die entscheidende Rolle. Damit wird aber auch klar, dass der Stoffaustausch zwischen der die aktiven Zentren tragenden Beschichtung und der Kanalströmung eine wichtige Rolle bei der Leistungsfähigkeit des Katalysators spielt. So zeigen Schüttgut-Katalysatoren in der industriellen Technik eine hohe Leitungsfähigkeit durch die unregelmäßig angeordneten Strukturen und damit durch die Unterbindung von längeren laminaren Strömungsprofilen. Solche Katalysatoren eignen sich natürlich in aller Regel nicht für den Einsatz im Motorenbereich, da sie durch Gaspulsationen und mechanische Erschütterungen in kurzer Zeit zerstört werden.

In der Vergangenheit wurde ferner immer wieder auf die hohen Umsatzraten in Einströmquerschnitten beziehungsweise in Katalysator-Kaskaden hingewiesen. Schon vor Jahren wurden bei Emitec Metallträger-Strukturen entwickelt, welche für einen verbesserten Stofftransport zur chemisch aktiven Wandbeschichtung sorgen. So hat die bekannte TS-Struktur in einer Vielzahl von Serienprojekten die verbesserte Leistungsfähigkeit bewiesen. Ein weiterer Fortschritt konnte durch die Einführung der LS-Struktur erzielt werden. Eine Sekundär-Gegenwellung sorgt für eine Vielzahl von zusätzlichen Einströmprofilen entlang des Strömungskanal. An diesen turbulenz erzeugenden Stufen sorgt der erhöhte Stofftransport für gesteigerte Umsatzraten im Katalysatorvolumen. In Kombination mit gelochten Glattlagen besteht weiterhin die Möglichkeit, den Strömungs- und Konzentrationsausgleich innerhalb des Trägers zu fördern. Dadurch wird ver-

hindert, dass, wie heutzutage häufig noch vorkommend, ungünstige Einströmverhältnisse dafür sorgen, dass nur ein Teil des Katalysators genutzt und damit auch eine schnellere Alterung dieses zum Teil überlasteten Bereichs auftritt [Ma05, Br06].

In einer Vielzahl von Entwicklungsprojekten konnte gezeigt werden, dass durch einen mit dem Beschichter abgestimmten Washcoat deutliche Volumeneinsparungen von über 35% gegenüber einem konventionellen Träger möglich sind [Br06, Da06]. Auch bei der dieselmotorischen Abgasnachbehandlung läuft diese Struktur als Oxidationskatalysator inzwischen in Serie und steht in weiteren Projekten direkt vor der Serieneinführung.

2. Aufgabenstellung

Gerade im Nutzfahrzeugsbereich hat in den letzten Jahren eine rasche Verschärfung der Grenzwerte für einen hohen Aufwand im Bereich der Verbrennungsentwicklung und Abgasnachbehandlung gesorgt. Die EU3-Grenzwerte konnten mit innermotorischen Maßnahmen dargestellt werden und der Schalldämpfer kam ausschließlich der in seinem Namen stehenden Funktion nach. Bereits für die Einhaltung der EU4-Grenzwerte mussten in ihm Komponenten zur Nachbehandlung untergebracht werden, da es mit motorischen Maßnahmen allein nicht mehr möglich war, den Zielkonflikt zwischen russarmer Verbrennung bei ausreichend niedrigen Stickoxid-Emissionen bei niedrigem Kraftstoffverbrauch zu lösen. Zum Teil mussten hierfür schon vergrößerte Schalldämpfergehäuse eingeführt werden, da gleichzeitig auch die Anforderungen an die Schallemission verschärft wurden. Zukünftige Grenzwertvorschriften innerhalb Europas (EU6), den USA (US2010) und in Japan (Jp09) zeigen, dass für die Abgasnachbehandlung noch höhere Effektivitäten erforderlich sind und die gleichzeitige Anwendung von partikel- und stickoxidreduzierenden Technologien kaum mehr zu umgehen ist [Ja00, Mi00, Dö01, Ja03, Ja05, Hü06, Lä06, Mü06].

Die Steigerung der Effektivitäten kann entweder durch weitere Vergrößerung des Reaktors im Schalldämpfer oder durch sinnvolle Anwendung von Katalysatoren mit höherer spezifischer Leistung erfolgen. Die weitere Vergrößerung der abgasnachbehandelnden Volumen wird aber mehr und mehr an Grenzen stoßen, welche durch andere fahrzeugrahmenorientierte Komponenten wie beispielsweise Tankkapazitäten definiert sind. Der Kostenaspekt von Werkzeugen für weiter vergrößerte Volumen sowie die damit einhergehenden Katalysatorkosten spielen eine immer entscheidendere Rolle.

Das „Downsizing“ von Motoren zeigt gerade im Bereich von Pkw-Anwendungen, dass weniger sogar mehr sein kann, sowohl bei Otto- wie auch bei Dieselmotoren. Auch im Bereich der Abgasnachbehandlung von Nutzfahrzeugen kann man sich durch höhere spezifische Leistungen ein „Downsizing“ vorstellen, welches sowohl einen Kosten- wie auch einen Bauraum- und Gewichtsvorteil hat.

In diesem Projekt soll die sinnvolle Anwendung von Hochleistungskatalysatoren zeigen, dass ohne die Vergrößerung von abgasnachbehandelnden Volumen eine deutlich verminderte Ge-

samtemission erzielt und bei einhergehender Verbesserung der Motor-Rohemissionen auch zukünftige Grenzwerte wie EU6 und US2010 sicher erreicht werden können.

3. Systembeschreibung

In einem motornahen Teilstrom-System aus Hydrolyse- und Oxidationskatalysator werden NH_3 und NO_2 für die folgenden Reaktionsstufen katalytisch aus dem eingedüsten AdBlue bzw. dem im Abgas enthaltenen NO gebildet. Dabei besteht der Hydrolyse-Katalysator aus einer ersten, hauptsächlich harnstoffverdampfenden Mischerstruktur und einer zweiten, ammoniak erzeugenden LS/PE-Struktur. In beiden Stufen sorgt eine abgestimmte, preiswerte Hydrolyse-Beschichtung (z.B. TiO_2) für einen ablagerungsfreien Betrieb [Je05, Ha06]. Im Parallelstrom konnte wahlweise mit einem Oxidationskatalysator NO_2 erzeugt werden, wobei der Einsatz eines unbeschichteten Trägers die Massenstromverteilung stets konstant hielt.

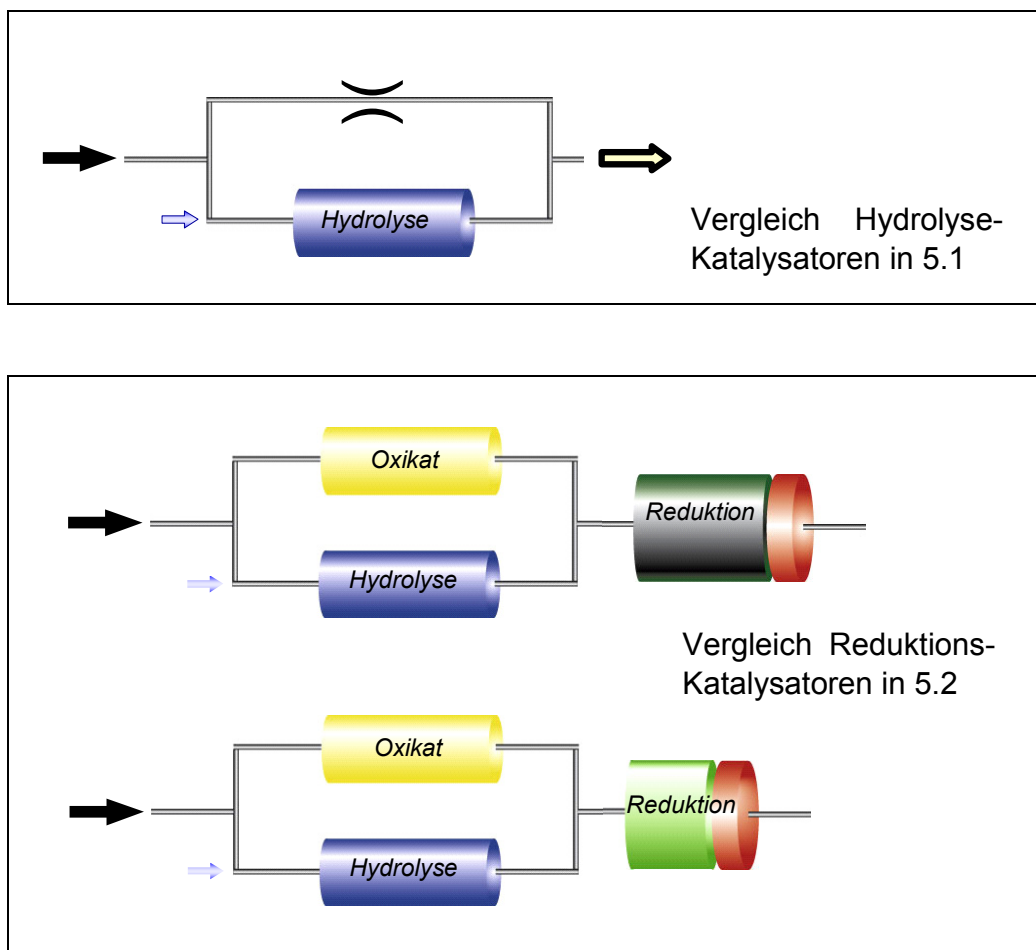


Bild 1: Prinzipskizze der gegenübergestellten Systeme (Kap. 5,1 und 5.2)

Die Reduktionskatalysatoren waren in Modulbauweise in einem Schalldämpfergehäuse der EU3-Größe untergebracht. Die fünf Module mit LS/PE-Struktur und Hochleistungs-Reduktionsbeschichtung auf Mischoxid-Wolfram-Vanadium-Titan-Basis stellen mit 13,3 Litern ein gegenüber einem derzeit angebotenen Seriensystem ein um 35% reduziertes Gesamtvolumen dar. Die Zelldichte von 300/600 cpsi erweist sich als optimaler Kompromiss zwischen aktiver Oberfläche und geringem Gegendruck.

Im weiteren Verlauf wird noch erläutert, dass durch diese Volumenverkleinerung ein kontinuierlich arbeitendes Partikelreduzierungssystem im gleichen Gehäuse vor den Reduktionskatalysatoren untergebracht werden kann. Dieser nutzt das im Oxidationskatalysator gebildete NO₂ auch bei gleichzeitiger Anwesenheit von NH₃ zur kontinuierlichen Regeneration des abgeschiedenen Rußes.

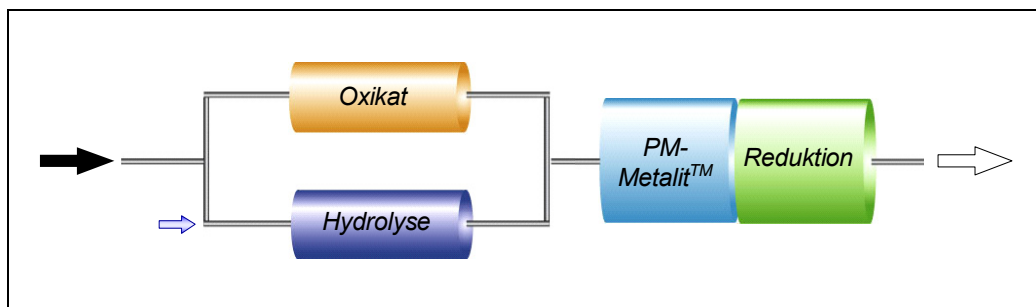


Bild 2: Prinzipskizze des kombinierten Systems (Kap. 6)

4. Versuchsaufbau

Der Prüfstands Aufbau ist in **Bild 3** dargestellt. Die Versuche wurden an einem EU5-nahen Reihen-6-Zylinder-Nutzfahrzeug-Motor mit 326 kW Nennleistung bei 1,75 Liter Zylinderhubvolumen durchgeführt. Es wurden jeweils parallel sowohl die Motor-Rohemissionen wie auch die Komponenten nach Vor- beziehungsweise Hauptschalldämpfer ermittelt.

Für den Nachweis aller stickstoffbasierenden Komponenten kamen zwei FTIR-Analysatoren zum Einsatz. Neben der gravimetrischen Partikelmassenbestimmung konnte mit Hilfe zweier PASS-Sensoren die Russ-Konzentrationen im Abgasstrom ermittelt werden.

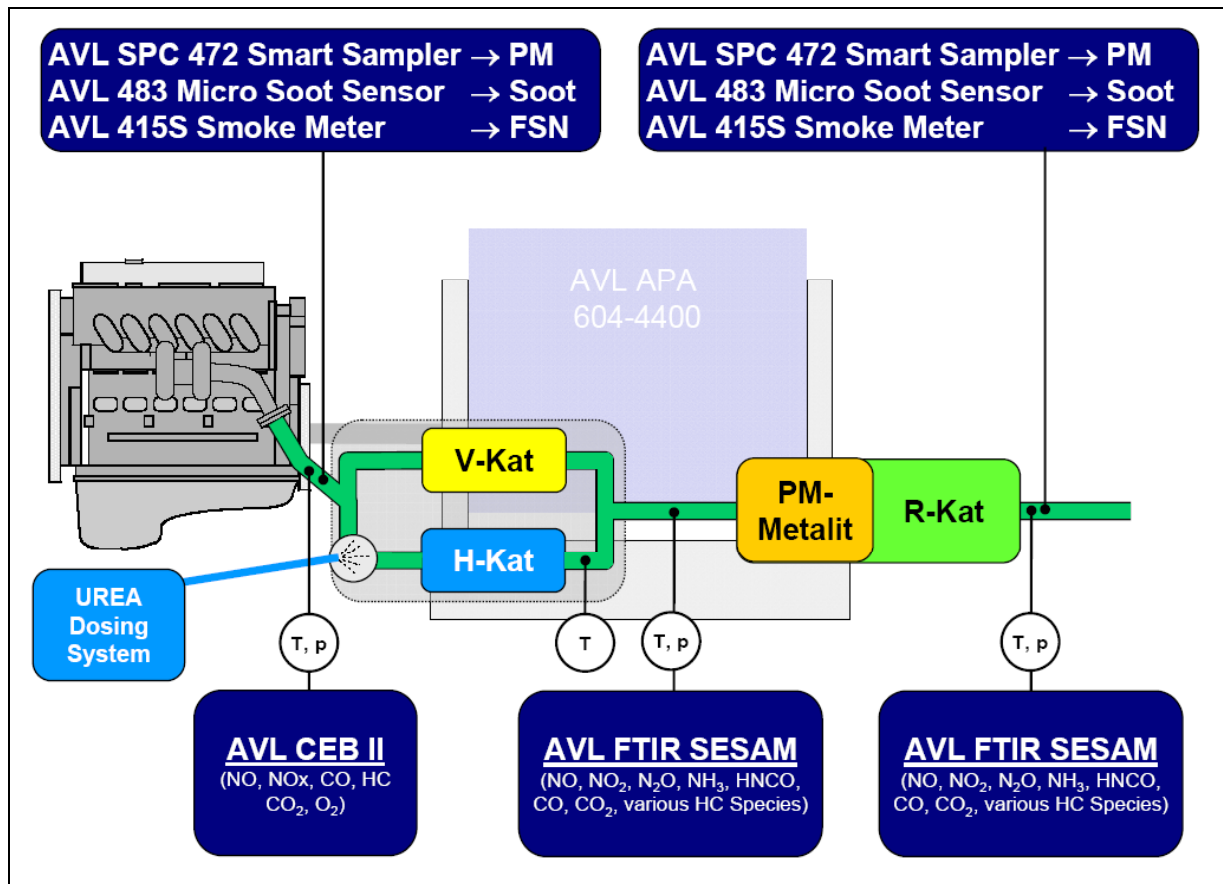


Bild 3: Dynamischer Nutzfahrzeug-Prüfstand mit Abgasanalytik

5. Ergebnisse

5.1 Hydrolyse

Die deutliche Überlegenheit des Hydrolyse-Katalysators gegenüber konventionellen Systemen zeigt sich in von **Bild 4**. Anhand des Isocyanäure-Schlupfes lässt sich die Qualität einer solchen Einheit objektiv bewerten. Isocyanäure konnte mit dem optimierten System nahezu vollständig zu Ammoniak umgesetzt werden, wodurch der NH_3 -Anteil um etwa die Hälfte gegenüber dem konventionellen System angestiegen ist, bei dem noch mehrere hundert ppm Isocyanäure nach H-Kat vorliegen. Diese gesteigerte Umwandlung von Harnstoff in Ammoniak entlastet den Reduktionskatalysator und ermöglicht diesem eine bessere Ausnutzung des Reduktionspotenzials. Dabei wird auch das Risiko der Bildung von Ablagerungen im Abgasstrang und der Bildung von Polymerisaten und korrosiven Nebenprodukten unterdrückt. Die Vorteile

durch Einsatz eines H-Kats zeigen sich weniger in den relativ warmen europäischen Nutzfahrzeug-Testzyklen ESC und ETC, dafür vielmehr in kalten Zyklen wie US-FTP, WHC und den japanischen Tests sowie im Niedriglast-Fahrbetrieb von PKW und leichten Nutzfahrzeugen. Die Beschichtung des Katalysators wurde neben deren Aktivität insbesondere auch hinsichtlich der mechanischen Haftungseigenschaften auf Metallträgern und Haltbarkeit optimiert [Ja06a].

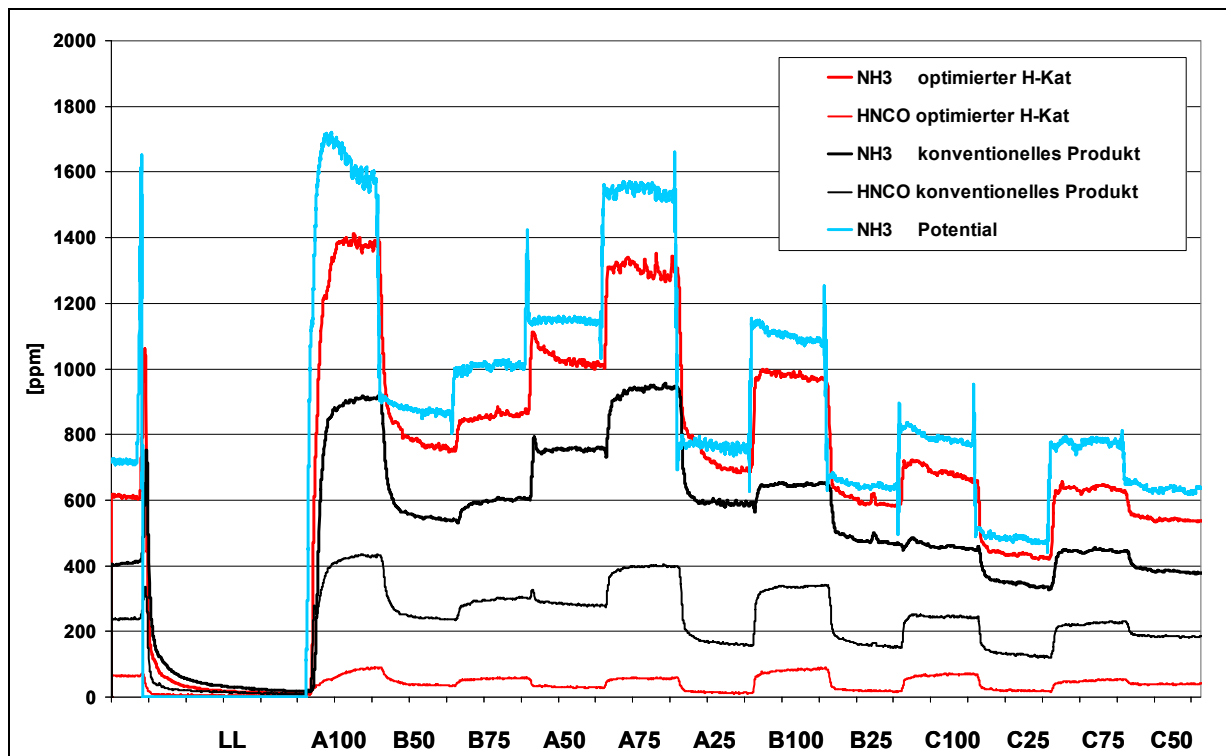


Bild 4: Optimierter Hydrolyse-Katalysator im Vergleich zu konventionellem Produkt (ESC-Test)

5.2 Reduktion

Der um 35% verkleinerte Reduktionskatalysator (**Bild 5**) mit 5 Modulen von Ø150 x 150 mm in 300/600 LS/PE-Struktur zeigt auf, welches Potenzial in der Optimierung des Stofftransports in Kombination mit der aktiven Oberfläche steckt. Mit nur 65% des für konventionelle Katalysatoren benötigten Volumens konnte mit der Serien-Eindüsung-Strategie ohne jegliche Anpassung auf die Katalysatoreigenschaften schon der gleiche NO_x-Umsatz im ESC und ETC erzielt werden wie mit dem heutigen Serienprodukt (**Bild 6**). Bei gesteigerter Harnstoff-Einspritzmenge bietet das optimierte, „turbulente“ System Leistungsreserven, d.h. der NH₃-Schlupf ist geringer und bietet so das Potential für weiter erhöhten NO_x-Umsatz bzw. für Lebensdauerreserven. In beiden Fällen hat eine durch Zone-Coating aufgebrachte Oxikat-Beschichtung den Ammoniak-Schlupf auf maximal 10 ppm begrenzt.

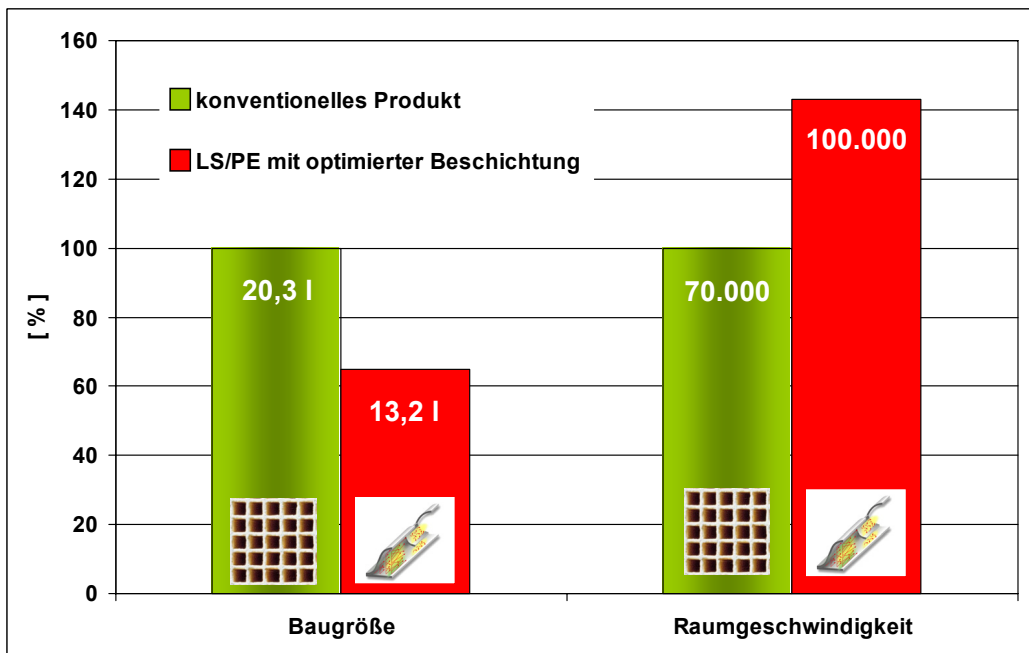


Bild 5: Vergleich von Einbaugröße und Raumgeschwindigkeit der gegenübergestellten Reduktions-Katalysatoren

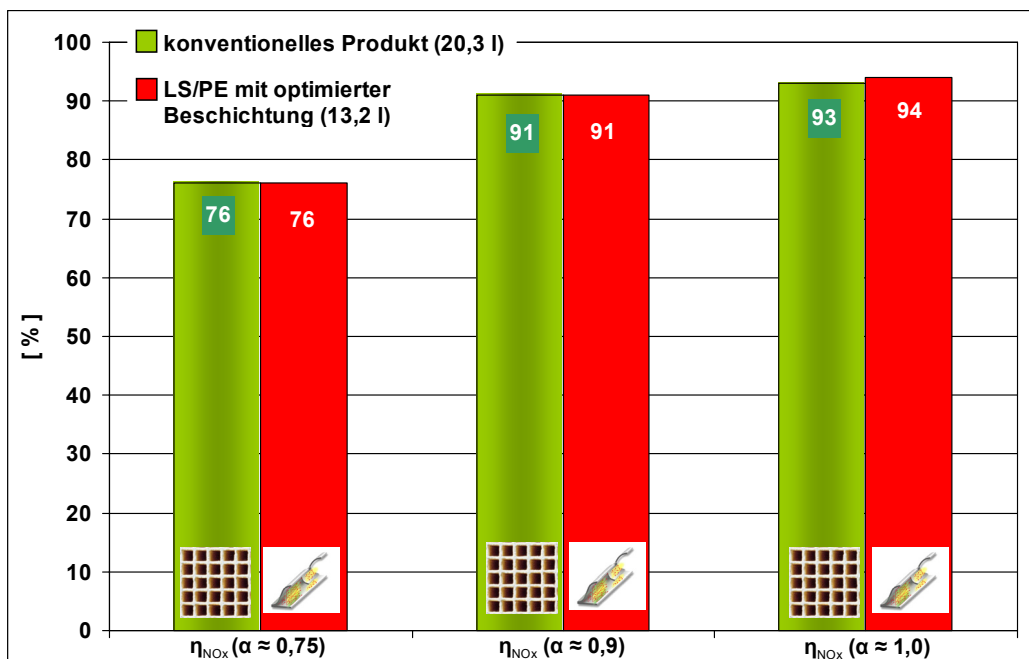


Bild 6: Gleiche NO_x-Effektivität für Serien- und gesteigerte Eindüsung trotz Volumenreduktion um 35% mit optimiertem Reduktionskatalysator (ESC-Test)

Aufgrund der überlegenen Eigenschaften der dargestellten Hochleistungskatalysatoren kann neben der Verkleinerung des Katalysatorvolumens auch noch eine Verringerung des Abgasgedrucks erreicht werden. Der Druckverlust des Katalysators ist um ca. 20% geringer als beim konventionellen Katalysator für gleiche NO_x-Umsatzleistung (**Bild 7**).

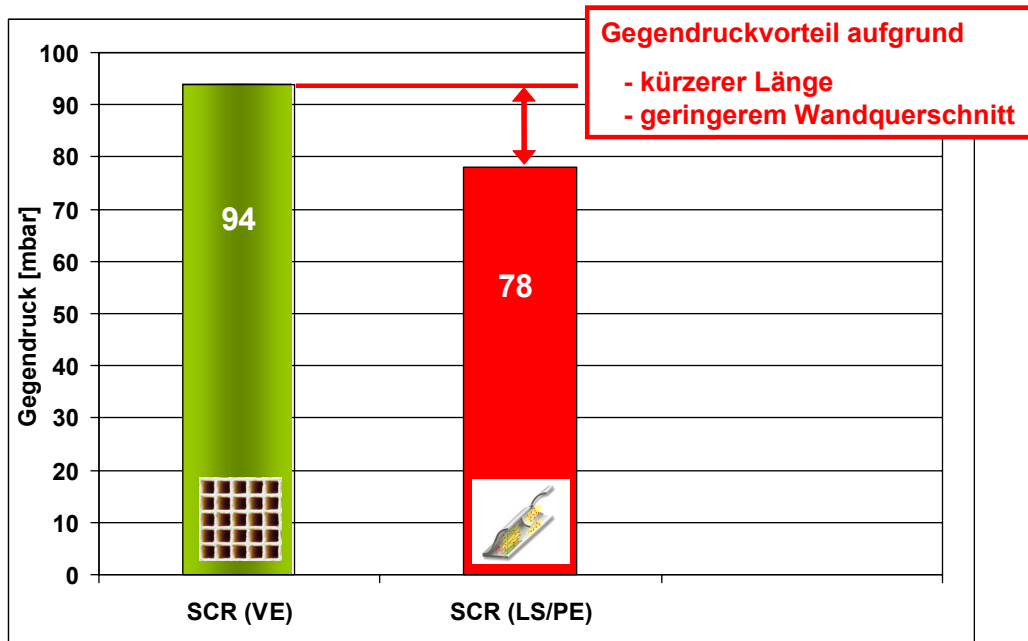


Bild 7: Gegendruck-Verhalten der gegenübergestellten R-Schalldämpfer

6. Integrierte kontinuierliche Partikelreduzierung – Weiterentwicklung zum Kombinationssystem für EU 6 und US 2010

In vielen Untersuchungen wurden unterschiedliche Anordnungs-Varianten zur Kombination von Systemen der Partikel- und Stickoxid-Reduktion vorgestellt. Meist wird die Kombination aus Oxikat und Partikelfilter vorangestellt, um den Effekt der kontinuierlichen Russregeneration mit NO₂ nutzen zu können. Bei aktiv regenerierenden Systemen bringt dies den Nachteil mit sich, dass die nachfolgende Reduktionsstufe auf die zum Teil sehr hohen Temperaturen abgestimmt sein muss sowie Schutzmechanismen für den Fall von möglicher Grenztemperatur-Überschreitung vorgesehen werden müssen. Ein System mit nachgeschalteter Partikelreduzierung nutzt den CRT-Effekt nicht aus und muss dementsprechend häufiger regeneriert werden, verbunden mit dem höheren Kraftstoffaufwand.

Ausgehend von den heute üblichen Motorrohmissionen und mit Blick auf die Anforderungen von 2010 wird häufig die Verwendung von Wall-Flow-DPF für die Zukunft impliziert. Dies lässt außer Acht, dass die zukünftigen Motoren durch die weiter verbesserten Brennverfahren,

Einspritz- und Aufladetechnologien sowie optimierte Abgasrückführung und Thermomanagement wesentlich verändertes Abgasverhalten aufweisen werden, und gerade durch eine aufeinander abgestimmte Entwicklung von Motortechnologie und Verbrennungseinstellung sowie der Abgasreinigungssysteme erhebliche Einsparpotentiale bei Bauraum und Kosten gehoben werden können, die in zusätzlicher Betriebssicherheit und geringerem Wartungsaufwand unmittelbar dem Kunden nutzen. Zukünftige Nutzfahrzeug-Dieselmotoren werden äußerst geringe Partikelemissionen aufweisen, die ähnlich wie bei Ottomotoren im unsichtbaren Bereich liegen werden. Die weitestgehende Verminderung dieser Partikelfraktionen mit dem PM-Metaliten™ wurde an verschiedenen Stellen schon gezeigt [Ja00, Ro04, Lä06]. Bei Nutzfahrzeugen werden mit PM-Metalit-System PM-Minderungsraten erreicht, die diese Technologie für Euro 5 ohne SCR weiterhin zur Anwendung bringen.

Wenn nun die beiden für Euro 4 und Euro 5 bewährten Technologien, kontinuierliche Rußminderung mit dem PM-Metalit und NO_x-Minderung mit dem SCR-System in geschickter Weise kombiniert werden, lässt sich über die Addition dieser beiden Minderungseffekte hinaus die Wirksamkeit des Abgasreinigungssystems steigern.



Bild 8: Kombinations-Schalldämpfer mit PM-Metaliten™ und Reduktionskatalysatoren

In Laborversuchen wurde schon mehrfach über den Effekt berichtet, dass die Russverminderung in Anwesenheit von NH_3 besser abläuft. Dies motiviert natürlich für die Anordnung des kontinuierlich arbeitenden PM-Metaliten™ „innerhalb“ der Reduktionsstufe. Voraussetzung hierfür ist die möglichst vollständige Umsetzung von Harnstoff in Ammoniak im Hydrolysekatalysator vor dem Filtersystem, um die Bildung von polymerisierenden Zwischenprodukten wie beispielsweise der Isocyanäure zu verhindern, welche durch Ablagerungen im Filter die Funktionsfähigkeit des Systems beeinträchtigen könnten.

Die zweigeteilte Anordnung des CRT-Systems ermöglicht bei motornahem Oxidationskatalysator eine lange parallele Anwesenheit von NO_2 und Ruß im Gasstrom und damit eine bessere Ausnutzung des Reduktionspotentials im PM-Metaliten™.

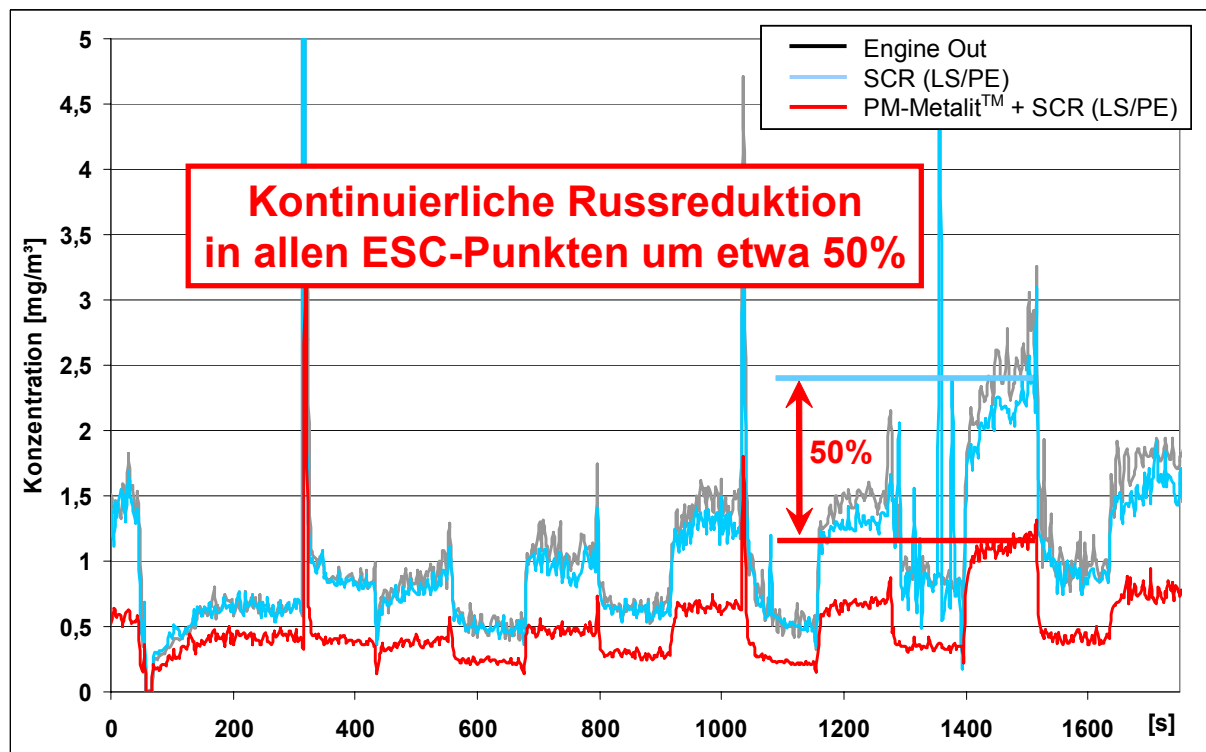


Bild 9: Russemission (gemessen mit PASS) im SCR-System ohne und mit kontinuierlicher Russreduktion im PM-Metalit (ETC-Test)

In **Bild 9** ist die Russemission bei kontinuierlicher Reduktion im Kombinationssystem PM-Metalit™ und SCR-System gegenüber dem SCR-System allein dargestellt. Deutlich erkennt man die bei dieser PM-Metalit™-Länge erreichbare Russabscheidung von zusätzlich etwa 50% in allen Zykluspunkten des ESC-Tests über das reine SCR-System hinaus. Ferner ist auch die zum Teil allerdings nur gering ausgeprägte Abscheideleistung des reinen SCR-Systems erkennbar. Die Messungen der Russemission wurden mit dem kontinuierlich arbeitenden „Photo-Acoustic Soot Sensor“ (PASS) durchgeführt.

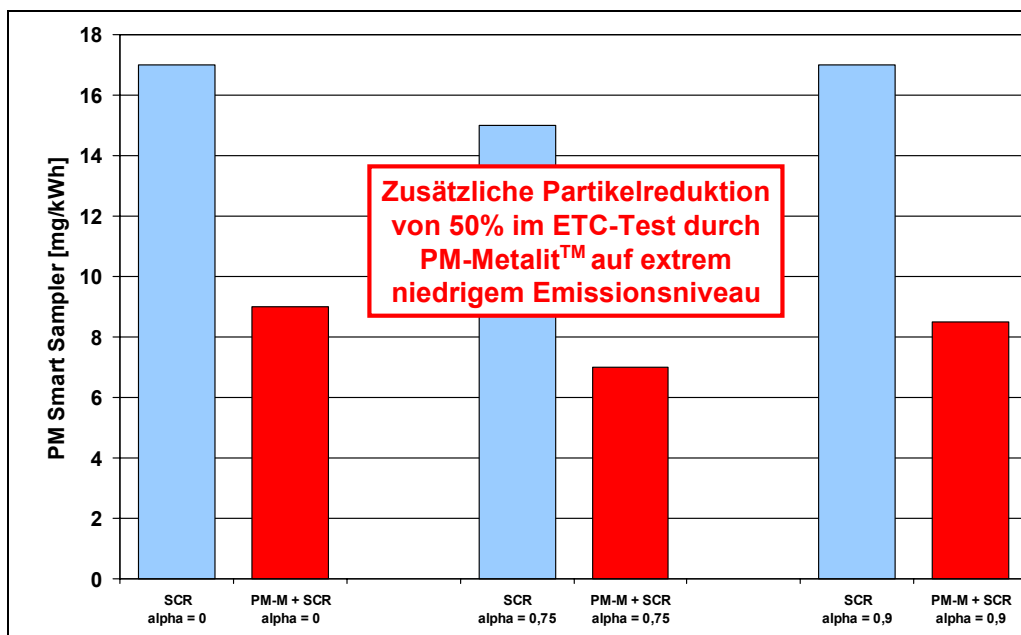


Bild 10: Gesamtpartikelemission: Vergleich für Kombinationssystem von PM-Metaliten mit SCR gegenüber reinem SCR-System (ETC-Test)

Das **Bild 10** zeigt die gravimetrische gemessene Partikelmassen-Emission im transienten Test mit zusätzlicher PM-Reduktion durch Verwendung des Nebenstrom-Filters im PM-MetalitTM-SCR-Kombinations-System gegenüber dem reinen SCR-System, ohne und mit Serieneindüsung sowie mit erhöhter Harnstoffzugabe. Die Abscheiderlänge von 145 mm ergibt auf diesem niedrigen Rohemissions-Niveau eine stabile zusätzliche PM-Verminderung von 50% (gravimetrisch). Auch die erhöhte Zugabe von Harnstoff hat in allen Versuchen zu keinerlei Effekten durch Ablagerungen geführt. Selbstverständlich ist dies in weiteren Untersuchungen für alle Grenzbereiche wie beispielsweise Kaltzyklen und Hochdosierung noch weiter nachzuweisen. Das erreichte Niveau der PM-Emission mit dem äußerst kompakten Kombinationssystem aus kontinuierlich arbeitendem PM-MetalitTM und SCR liegt bei nur ca. 8 mg/kWh im ETC-Test.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Es ist gelungen aufzuzeigen, dass zukünftige Nutzfahrzeug-Abgasnachbehandlungssysteme mit der Herabsetzung der Grenzwerte nicht zwingend überproportional an Größe zunehmen müssen. So kann, wie hier erfolgt, der durch Optimierung des SCR-Katalysators gewonnene Bau-raum bestens für ein kontinuierlich arbeitendes Partikelreduzierungssystem genutzt werden, dessen Wirkungsgrad unabhängig vom Aufbau eines Filterkuchens insbesondere bei den zu erwartenden immer kleiner werdenden Partikelgrößen überproportional hoch ist. Im Zusammenwirken mit den prognostizierten Verbesserungen bei den Motor-Rohemissionen und den dargestellten Hochleistungs-Abgasreinigungssystemen werden Ziele wie US2010 und EU6 mit noch vertretbarem Aufwand erreichbar.

Danksagung

Unser besonderer Dank für die professionelle Vorbereitung und Durchführung der Motorenprüfstandtests gilt den Herren Stefan de Buhr, Holger Herrmuth, Thomas Cartus und Rolf Dreisbach (AVL List GmbH). Für die großzügige Unterstützung und Beratung beim „Canning“ der Anlagen möchten wir uns außerdem bei den Herren Hans-Peter Mai, Markus Böhm und Christian Eck (Roth-Technik Austria GmbH) recht herzlich bedanken.

8. Literatur

- [Br06] R. Brück, P. Hirth, W. Maus, O. Deutschmann, N. Mladenov, „Grundlagen der „laminaren“ und „turbulenten“ Katalyse: „Turbulent“ schlägt „Laminar“, 27. Internationales Wiener Motorensymposium, H.P. Lenz (Hrsg.) VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12 Nr.622, Band 2, 2006; http://emitec.de/pdf/wien_paper2006.pdf
- [Da06] K. Dawson, J. Kramer, „Faster is Better: The Effect of Internal Turbulence on DOC-Efficiency“, SAE World Congress 2006, SAE-Paper 2006-01-1525
- [Dö01] A. Döring, E. Jacob, „GD-KAT: Abgasnachbehandlungssystem zur Verringerung von Partikel- und NOx-Emissionen bei Nutzfahrzeug-Dieselmotoren“ in: A. Leipertz (Hrsg.) Motorische Verbrennung - aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze (5. Tagung, HdT Essen) , BEV Heft 2001.1, Erlangen, S. 513-528, 2001
- [Ha06] P. Hauck, A. Jentys, J. A. Lercher, „Surface chemistry and kinetics of the hydrolysis of isocyanic acid on anatase“, 2006, in press
- [Hü06] E. Hünnekes, S. A. Roth, J. A. Patchett, T. Neubauer, „Selektive Katalytische Reduktion (SCR) für die mobile Anwendung – LKW, Beiträge 4. Intern. Forum Abgas-und Partikelemissionen 2006, AVL Deutschland, www.abgas-partikel-forum.com, Ludwigsburg, 14.-15. März 2006
- [Ja98] E. Jacob, G. Emmerling, A. Döring, U. Graf, M. Harris, B. Hupfeld, „NOx-Verminderung für Nutzfahrzeugmotoren mit Harnstoff-SCR-Kompaktsystemen (GD-KAT)“, 19. Internationales Wiener Motorensymposium, H. P. Lenz (Hrsg.), Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 348, Band 2, 366-86, 1998
- [Ja00] E. Jacob, A. Döring, GD-KAT: „Abgasnachbehandlungssystem zur simultanen Kohlenstoffpartikel-Oxidation und NOx-Reduktion für Euro 4/5 -Nfz-Dieselmotoren“, 21. Internationales Wiener Motorensymposium, H. P. Lenz (Hrsg.) VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12 Nr.420, Band 2, S.311-329, 2000
- [Ja03] E. Jacob, A. Döring, „Vom SCR-Katalysator zum Gesteuerten Dieselkatalysator (GD-KAT)“, VDA Technischer Kongress, Wolfsburg 2.-3.4.2003, Tagungsband VDA Frankfurt, S.163-171, 2003

4. FAD Konferenz „Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren“ 2006

- [Ja04a] E. Jacob, „Ammoniakgeneratoren für GD-KAT-Systeme“, 2. Emission Control 17.-18. Juni 2004, IVK, Technische Universität Dresden, Tagungsband S. 358-367 (2004)
- [Ja04b] E. Jacob, „GD-KAT: Katalysatoren, Systemaufbau und zugehörige Messtechnik (Catalysts, Set-up and Corresponding Exhaust Gas Measurement Technique)“ Beiträge 3. Intern. Forum Abgas- und Partikelemissionen 2004, S. 186-203, AVL Deutschland, www.abgas-partikel-forum.com, Sinsheim 14./15. Sept. 2004
- [Ja05] E. Jacob, „Emissionslimits zukünftiger Nfz-Motoren: Balanceact zwischen Möglichkeit und Nutzen“ 26. Internationales Wiener Motorensymposium, H. P. Lenz (Hrsg.) VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12 Nr.595, Band 1, S.58-79, 2005
- [Ja06a] E. Jacob, R. Müller, A. Scheeder, T. Cartus, R. Dreisbach, H.-P. Mai, M. Paulus, J. Spengler, „Hochleistungs-SCR-Katalysatorsystem: Garant für niedrigste NOx-Emission“, 27. Internationales Motorensymposium 2006, http://emitec.de/pdf/wien_paper_2006.pdf
- [Ja06b] E. Jacob: „Perspektiven der mobilen SCR-Technik“, 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006
- [Je05] A. Jentys, Ph. Hauck, J.A. Lercher, „Kinetik der Hydrolyse von Isocyanat im Harnstoff-SCR-Prozess“, 3. FAD-Konferenz, Dresden 2005
- [Lä06] R. Lämmermann, W. Held, „Nutzfahrzeugmotoren und Abgasnachbehandlung im Zielkonflikt zwischen Kundennutzen und Emissionsgesetzgebung“, Beiträge 4. Intern. Forum Abgas- und Partikelemissionen 2006, AVL Deutschland, www.abgas-partikel-forum.com, Ludwigsburg 14./15. März 2006
- [Ma05] W. Maus, R. Brück, „Die Zukunft der heterogenen Katalyse im Automobil: „Turbulente“ Katalysatoren für Otto- und Dieselanwendungen“ 26. Internationales Wiener Motorensymposium, H. P. Lenz (Hrsg.) VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12 Nr.595, Band 1, S.297-319, 2005
- [Mi00] W.R. Miller, J.T. Klein, R. Mueller, W. Doelling, „ The Development of Urea-SCR-Technology for US Heavy Duty Trucks, SAE World Congress 2000, SAE-Paper 2000-01-190
- [Mü06] Wilhelm Müller, „Strategien für Nutzfahrzeugdieselmotoren zur Erfüllung der weltweiten Abgasgesetze“, Beiträge 4. Intern. Forum Abgas- und Partikelemissionen 2006, AVL Deutschland, www.abgas-partikel-forum.com, Ludwigsburg 14./15. März 2006
- [Pi06] G. Piazzesi, M. Elsener, O. Kröcher, A. Wokaun, „Influence of NO₂ on the hydrolysis of isocyanic acid over TiO₂“, Appl. Catal. B 65, 169-174, 2006
- [Ro04] D. Rothe, „Abgaspartikelmesstechnik der Zukunft“, Beiträge 3. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, AVL Deutschland, Sinsheim 2004

4. FAD Konferenz „Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren“ 2006

- [St01] S. Steinbach, J. Grünwald, U. Glückert, T. Sattelmayer, „CAPoC 7, Seventh International Congress on Catalysis and Automotive Pollution Control“, 30.8. bis 1.9.2006 in Brüssel
- [St02] S. Steinbach, J. Grünwald, T. Sattelmayer, „Urea-SCR-Technology – Performance of Structured Metal Substrates“, SAE Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, Chicago, 2006, SAE-Paper 2006-1-3505