

"Hocheffektive, "turbulente" metallische Wabenkörper für die Stickoxyd-Katalyse; Eine neue Herausforderung"

Rolf Brück
Friedrich-Wilhelm Kaiser
Roman Konieczny

Emitec GmbH
Emitec GmbH
Emitec GmbH

Abstract:

Zukünftige Grenzwerte in Europa und in den USA zeigen neben einer Verminderung der Partikel-, vor allem eine Verschärfung der Stickoxid (NO_x) Grenzwerte. Dies geht in Europa einher mit einer Reduzierung der innerstädtischen NO₂ Immissionen. Vor allem bei Automobilen mit Dieselantrieb bedeutet das eine neue Herausforderung, da erstmalig Katalysatoren für die Reduktion von Stickoxiden unter Luftüberschuss in Großserie eingeführt werden müssen. Zur Zeit stehen die Technologien NO_x Adsorber und die Selektive Katalytische Reduktion (SCR) im Wettbewerb.

Im Folgenden wird im wesentlichen auf die SCR Technologie und deren Möglichkeiten eingegangen. Anhand von Abgasergebnissen werden insbesondere die Einflussmöglichkeiten von "turbulenten" metallischen Katalysatorträgern dargestellt. Als Ergebnis steht ein kompaktes, kostenoptimiertes SCR System mit hoher Effektivität.

1. Einleitung

Weltweit wurden in den vergangenen Jahrzehnten Anstrengungen unternommen die Emissionen der Fahrzeuge und damit vor allem die Immissionen in den Ballungsgebieten zu reduzieren. Messungen der Kohlenwasserstoff- (HC), Kohlenmonoxid- (CO) und Stickoxidkonzentrationen (NO_x) in deutschen Städten zeigen deutlich, dass sich trotz unverminderter Fahrleistung die Luftqualität in den Städten verbessert [1]. Eine Ausnahme bilden die Stickstoffdioxidimmissionen, die auf einem konstanten Niveau stagnieren. Entsprechend wurden auch bei den Vorschlägen für die PKW EU V und EU VI Emissionsgesetzgebung die HC und CO Grenzwerte nicht weiter verschärft. Den stagnierenden NO₂ Konzentrationen wird mit einer deutlichen Reduzierung der NO_x Grenzwerte insbesondere für die Dieselmotoren entgegengewirkt. Die Partikelgrenzwerte werden beim Übergang von EU IV auf EU V ebenfalls drastisch reduziert und bleiben für EU VI auf diesem Niveau. (Abbildung 1)

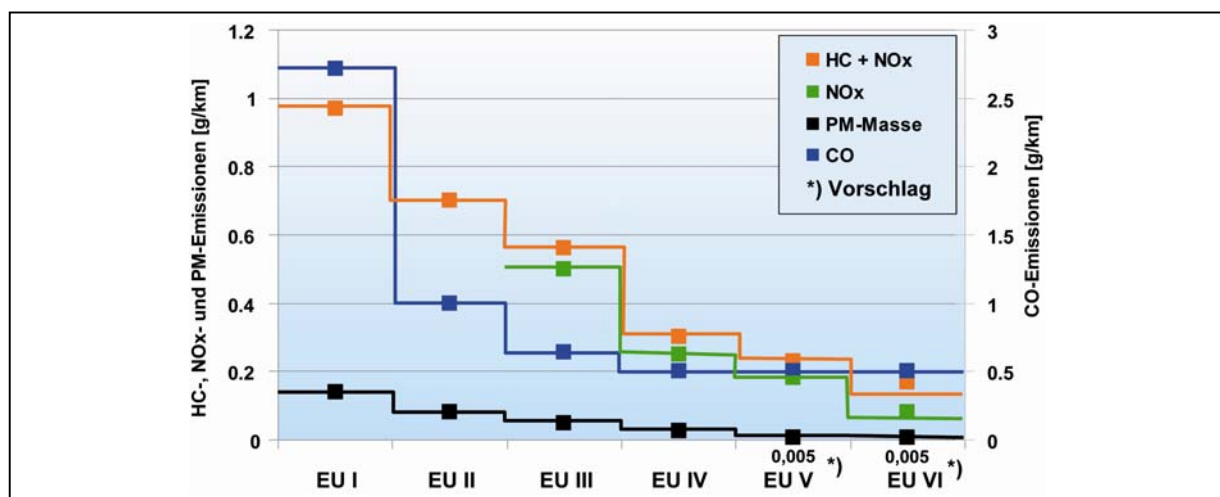


Abbildung 1: EU Abgasgesetzgebung und mögliche zukünftige Grenzwerte (Diesel-PKW) [2]

Ein weiterer Schwerpunkt im Umweltschutz stellt die Reduzierung der CO₂ Emissionen dar. Der Dieselmotor hat hier aufgrund seines höheren Wirkungsgrades gegenüber dem Ottomotor einen Vorteil. Mit Einführung der EU VI Grenzwerte ist die Umweltverträglichkeit der beiden Antriebskonzepte

vergleichbar. Allerdings stellt die deutliche Reduzierung der NO_x Grenzwerte eine Herausforderung sowohl für die Motoren- als auch für die Katalysatorentwickler dar.

Zur Erhaltung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit ist es wichtig, das europäische Know-How in der Dieselmotorenteknik auf dem weltweiten Markt einzusetzen und den Dieselmotor auch in Ländern wie den USA zum Erfolg zu führen.

Um langfristig in den USA Erfolg zu haben ist es notwendig, dass die Fahrzeuge die US Federal BIN 5 Grenzwerte einhalten. Mit einem NO_x Wert von 0,07 g/m (120k) ist die Herausforderung an die Abgasnachbehandlung hier noch größer als in Europa.

Entwicklungen auf der Motoren- und Katalysatorseite haben damit ein gemeinsames Ziel.

Neue Motoren mit optimierten Abgasrückführungen und Brennverfahren zeigen ein deutliches Potential zur Absenkung der NO_x und Partikel Rohemissionen. Doch trotz dieser Maßnahmen müssen die motorischen Stickoxidemissionen in den USA nochmals um 75 – 90% reduziert werden, um die strengen Emissionsvorschriften erfüllen zu können.

Ähnlich wie bei den PKW's sind auch die Anforderungen an die Nutzfahrzeuge. Die amerikanische US 2010 und die in Diskussion befindliche europäische EU VI Gesetzgebung bedeutet eine drastische NO_x Reduktion im Vergleich zu den heutigen Standards. Noch wichtiger als beim PKW ist beim Nutzfahrzeug der Kraftstoffverbrauch, da er einen direkten wirtschaftlichen Vorteil für den Betreiber bedeutet. Ziel muss es also sein, den Motor auf einen niedrigen Kraftstoffverbrauch einzustellen und die damit erhöhten Stickoxidemissionen durch eine optimierte Stickoxiddkatalyse zu kompensieren.

Heute gibt es 2 serienreife Technologien zur Reduktion der NO_x Emissionen. Zum einen den aus dem Bereich mager laufender Ottomotoren bekannten NO_x-Adsorber und das von der Kraftwerkstechnik und den Nutzfahrzeugen bekannte SCR- (Selective Catalytic Reduction) Verfahren. Beide Systeme haben Vor- und Nachteile. [3, 4] Beim NO_x-Adsorber wird beispielsweise kein zweiter Betriebsstoff benötigt, allerdings steigt aufgrund der notwendigen Regenerierung des NO_x Adsorbers mit CO und HC der Kraftstoffverbrauch. Auch sind NO_x-Adsorber empfindlich gegenüber Schwefelanteilen im Kraftstoff und müssen in regelmäßigen Abständen bei Temperaturen um die 650°C desulfatisiert werden, wodurch ebenfalls der Kraftstoffverbrauch ansteigt.

SCR Systeme sind aus der Kraftwerkstechnik seit langem bekannt. Auch werden seit vielen Jahren Feldversuche mit Nutzfahrzeugen durchgeführt. Nachteilig ist hier insbesondere, dass ein Reduktionsmittel im Fahrzeug mitgeführt werden muß. Als Reduktionsmittel wird üblicherweise eine Harnstoff/Wasserlösung (AdBlue[®]) verwendet.

Beide Technologien haben in Abhängigkeit der Anforderungen an Effektivität, Langzeitstabilität und Kraftstoffverbrauch Einsatzmöglichkeiten. Für Nutzfahrzeuge scheint sich aufgrund der Verbrauchsvorteile das SCR System durchzusetzen. Bei PKW's war der Nachteil eines zweiten Betriebsmittels in der Vergangenheit das ausschlaggebende Argument gegen SCR. Allerdings zeigen aktuelle Entwicklungen, dass aufgrund der notwendigen hohen Umsatzraten und der Unempfindlichkeit gegenüber Schwefel auch SCR Systeme für den Einsatz von PKW's in den USA geplant sind.

Auch aus diesem Grund wird die Entwicklung von kleinen, kompakten SCR Systemen notwendig und forciert.

2. Die Komponenten des SCR System

Ein SCR System besteht typischerweise aus den folgenden Komponenten [5]

- Reduktionsmitteltank
- Reduktionsmittelpumpe
- Förderleitungen
- Einspritzdüse
- Sensoren
- Steuergerät
- Mischer im Abgassystem
- Oxydationskatalysator
- SCR Katalysator
- Ammoniak Schlupfkatalysator

Heute im Markt befindliche SCR Systeme verwenden ein Ammoniak Wassergemisch (AdBlue®) als Reduktionsmittel. Da AdBlue® bei -11°C einfriert ist es notwendig, alle Komponenten, die flüssiges AdBlue® beinhalten bzw. transportieren, aus Frostschutzgründen zu heizen. Solche Systeme sind bekannt und wurden bereits in mehreren Veröffentlichungen vorgestellt [6,7].

2.1 Harnstoffverteilung

Für die Funktion des SCR Katalysators ist die Verteilung des Harnstoffs von extremer Bedeutung. Wird AdBlue® in das heiße Abgas eingesprüht, erfolgt eine Verdampfung von Wasser und Harnstoff. Wegen der Instabilität des molekularen Harnstoffs zerfällt er spontan in H₂NCO und Ammoniak. Dieser Prozess wird durch einen hohen Dispergierungsgrad der AdBlue®-Tröpfchen und eine längere Verweilzeit begünstigt. Damit hat die aus der Einspritzdüse austretende Tropfengrößenverteilung und die Homogenität der Tropfenverteilung einen direkten Einfluß auf die Effektivität des SCR Katalysators. Dieser Einfluß ist umso größer, je kompakter die einzelnen Baugruppen zueinander angeordnet sind. Untersuchungen zeigen, dass Tropfen mit einer Größe von 70 µm je nach Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur eine Strecke von 3,5 - 6 m benötigen, bis sie vollständig verdampft sind [8]. Da eine solche freie Weglänge im automobilen Bereich nicht bereitgestellt werden kann ergeben sich 2 Anforderungen. Zum einen muss die Qualität der Einspritzdüse so verbessert werden, dass möglichst nur Tropfen mit einer Tropfengröße < 30 µm erzeugt werden und/oder es muß ein Mischer vor oder hinter der Einspritzdüse eingebaut werden. Die Aufgabe des Mischers ist es, möglichst turbulente Strömung mit starken Verwirbelungen zu erzeugen, um so große Tropfen „aufzureißen“ und die Wegstrecke im Abgas zu verlängern. Diese Effekte haben einen positiven Einfluss auf die AdBlue Verdampfung und die Harnstoff/Ammoniak Verteilung.

Bei den Mixern unterscheidet man zwischen den beschriebenen reinen Mischstrukturen und Wabenkörpern mit Mischerstruktur. Metallische Wabenkörper-Mischer (MX-Design) funktionieren aufgrund ihrer Beschichtung gleichzeitig als Hydrolysekat um die Umsetzung von Harnstoff in Ammoniak zu vervollständigen. Prinzipiell handelt es sich um radial offene Wabenkörper mit Schaufeln in den einzelnen Kanälen. [9] (Abbildung 2)

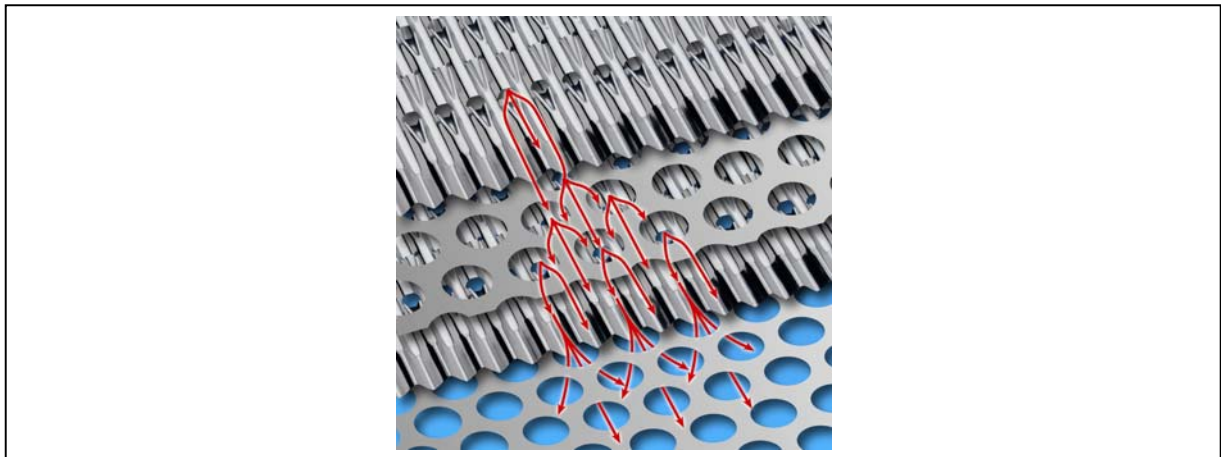


Abbildung 2: Aufbau der MX-Mischerstruktur aus strukturierten Metallfolien

Das MX-Design hat 2 Funktionen: Zum einen arbeitet es als Verdampfer für die noch vorhandenen Tropfen und zum zweiten kann eine Vergleichmäßigung der Ammoniakkonzentration über den gesamten Querschnitt erreicht werden.[10] Die Beschichtung des MX-Katalysators hat neben der Hydrolysefunktion noch die Funktion die Tropfen „aufzusaugen“ und aufgrund der in der thermischen Masse des Trägers gespeicherten Energie wieder zu verdampfen. Bei einer extrem lokalen Anströmung der gesamten Adblue® Menge in flüssiger Form auf den MX-Katalysator kann es zu Abkühlungen unter die Verdampfungstemperatur kommen, womit flüssiger Harnstoff durch den Träger fließt. Um diesen negativen Effekt zu vermeiden, muss bei der Verwendung solcher MX-Mischer auch auf die Qualität der Eindüsung geachtet werden.

Der Querschnitt des MX-Katalysators sollte dem des SCR Katalysators entsprechen und der Mischer ist im Idealfall unmittelbar davor angeordnet (Abbildung 3). Ins Abgasrohr integrierte Mischer haben den Nachteil, dass aufgrund der Wabenstruktur am Ende des Mixers die Rohrströmung vergleichmäßig wird und einen negativen Effekt auf die Strömungsverteilung des SCR Katalysators hat.

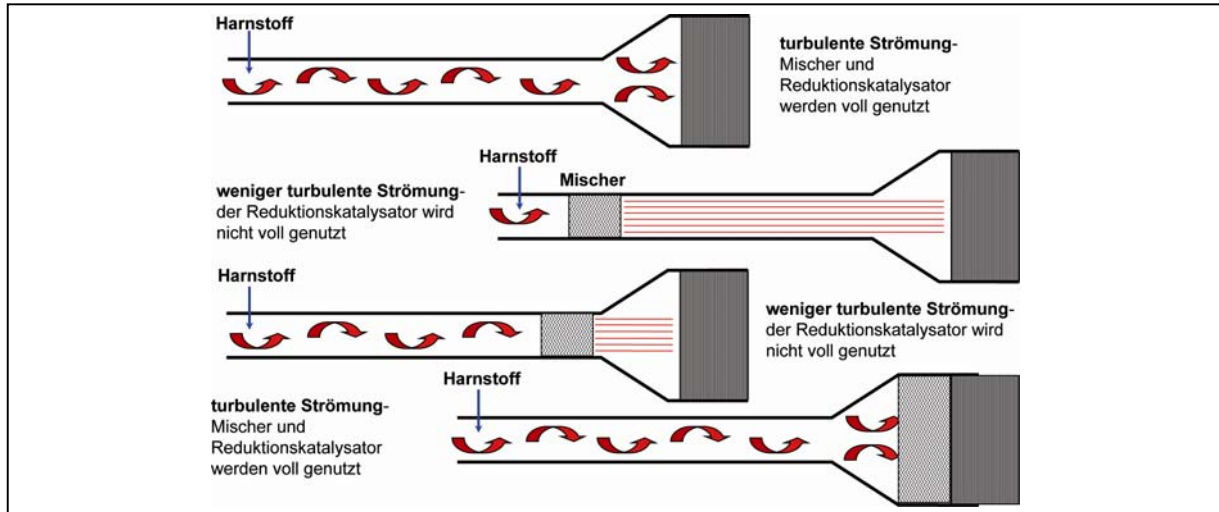
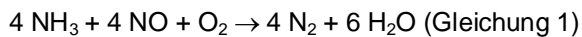


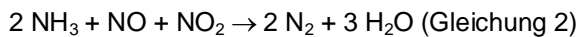
Abbildung 3: Mögliche und bevorzugte Anordnungen eines MX-Trägers im Abgassystem

2.2 Randbedingungen der SCR Katalyse

Bei der SCR Reaktion unterscheidet man zwischen der „Standard“-SCR-Reaktion:



und der der „schnellen“ SCR-Reaktion



Da die NO_x -Emission von Dieselmotoren typischerweise aus nur 2-3 % NO_2 bestehen läuft ohne einen vorgeschalteten Oxidationskatalysator zur Erhöhung des NO_2 Anteils nur die Standardreaktion ab. Für PKW-Systeme und auch zukünftige NFZ-Systeme werden zudem Zeolith-Katalysatoren eingesetzt, bei denen die Standardreaktion unterhalb von 300°C nochmals deutlich langsamer abläuft. Da die PKW Testzyklen bzgl. der Abgastemperaturen sehr kalt sind und auch für die Nutzfahrzeuge neue Testzyklen incl. Kaltstart in der Diskussion sind, kommt dem Oxidationskatalysator hier eine besondere Bedeutung zu. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Abgastemperatur vor SCR Katalysator eines PKW's und die berechneten NO_x Umsatzraten eines Zeolith Katalysatorsystems im amerikanischen FTP Test mit dem NO_2/NO Verhältnis von 0/1 und mit einem Verhältnis von 1/1.

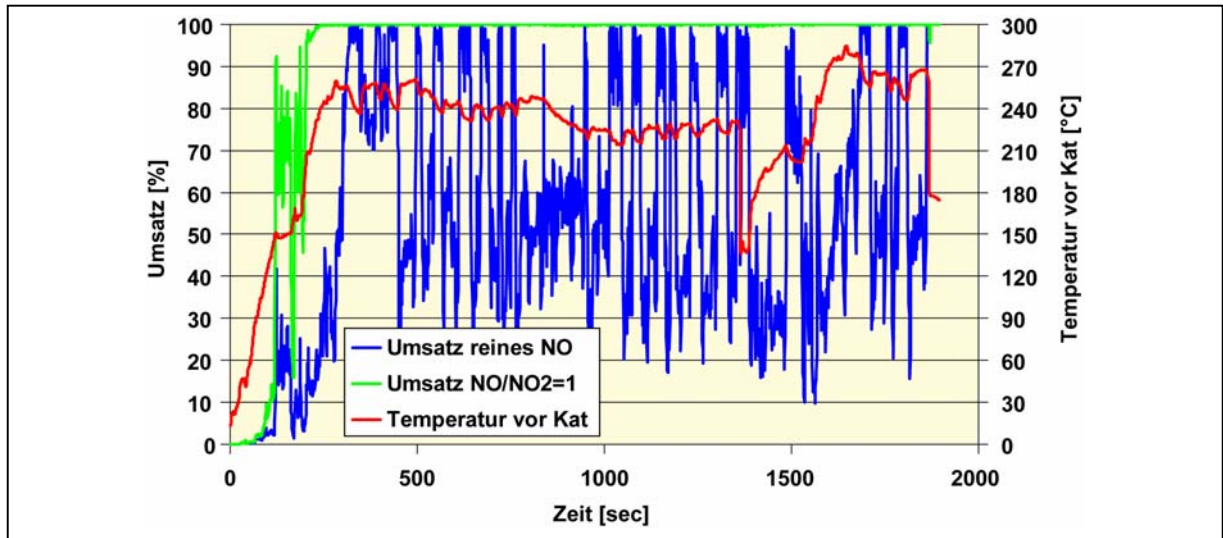


Abbildung 4: Berechnung der möglichen Umsatzraten im FTP-Zyklus mit unterschiedlichen Randbedingungen

Die Berechnungen zeigen deutlich, dass aufgrund der niedrigen Temperaturen ohne ausreichenden NO_2 Anteil nur geringe Umsatzraten erreicht werden können. Zur Verbesserung bietet es sich an die Abgastemperatur anzuheben, wodurch jedoch der Kraftstoffverbrauch verschlechtert wird, oder den NO_2 Anteil zu erhöhen. Durch einen vorgeschalteten Oxidationskatalysator kann der NO_2 Anteil bis auf den Idealwert von 50% angehoben werden, wodurch die schnelle Reaktion bei Temperaturen ab ca. 200°C ermöglicht wird.

Da der Oxidationskatalysator weit vor dem SCR-Träger angeordnet ist, sieht dieser in den genannten Betriebszuständen Temperaturen, die bereits deutlich über 200°C liegen, und arbeitet damit bereits im Stofftransport-limitierten Bereich. Hier zeigen 'turbulente' Katalysatorträger z.B. mit LS-Struktur besondere Vorteile. Durch die Strukturen werden im Kanal turbulenzartige Strömungsverhältnisse erzeugt, wodurch der Stofftransport vom Gas an die Katalysatorwand im Vergleich zur laminaren Strömung deutlich verbessert wird und somit die Umsatzrate signifikant ansteigt.

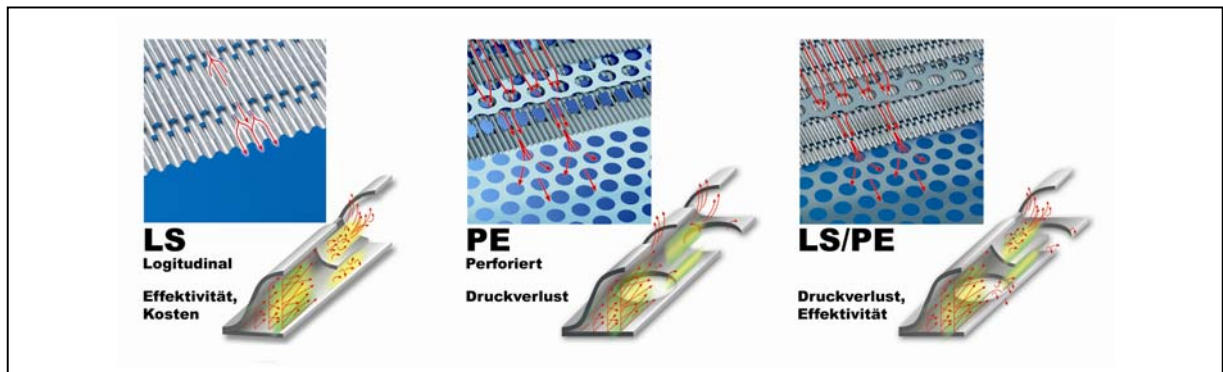


Abbildung 5: Unterschiedliche Strukturen für metallische Katalysatorträger

Abbildung 6 zeigt die CO und NO_2 Effektivität eines 200 cpsi Standardträgers im Vergleich zu einem 100/200 LS (Grundstruktur 100 cpsi; 74 % Fläche im Vergleich zum 200 cpsi Träger) und einem 200/400 LS Träger (Grundstruktur 200 cpsi; identische Fläche zum 200 cpsi Träger). Alle Träger wurden mit der identischen Pt-Beschichtung versehen und haben das gleiche Volumen. Insbesondere bei den höheren Raumgeschwindigkeiten zeigen sich deutliche Vorteile in den Umsatzraten der LS-Katalysatoren. Die

erhöhte spezifische Effektivität ermöglicht es im realen Einsatzfall, das Katalysatorvolumen und damit die eingesetzte Edelmetallmenge zu verringern und Kosten zu sparen.

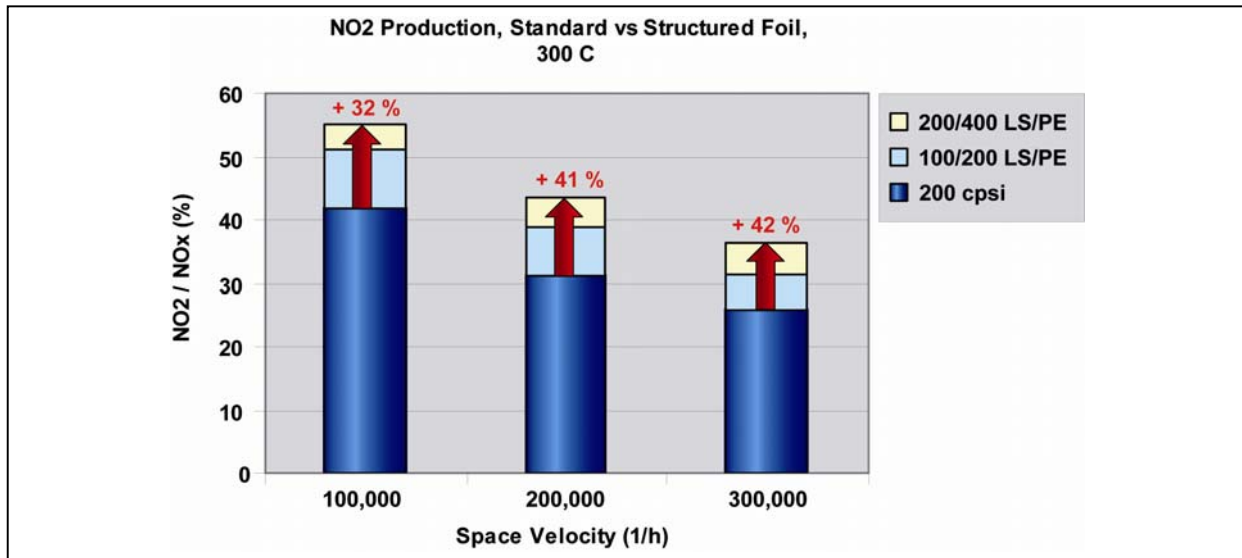


Abbildung 6: NO₂-Effektivität verschiedener Katalysatorträger bei unterschiedlichen Raumgeschwindigkeiten

Nachdem die Harnstoff/Ammoniak Verteilung und die Abgaszusammensetzung optimiert wurden, strömt das Abgas in den SCR Katalysator und wird dort zu N₂ umgesetzt.

3. Auslegung eines optimierten SCR Katalysators

Die effektive Reaktionsgeschwindigkeit an einem SCR Katalysator wird bestimmt durch die nacheinander abfolgenden Schritte [10]:

- Stofftransport der Reaktanden aus der Kernströmung des Katalysatorkanals und Filmdiffusion durch die Grenzschicht an die äußere Katalysatoroberfläche (äußerer Stofftransport),
- Stofftransport der Reaktanden in das Porensystem des Washcoats, an die innere Oberfläche („Porendiffusion“),
- Chemische Reaktion an den aktiven Zentren, dem eigentlichen Katalysator („Reaktionskinetik“),
- Stofftransport der Reaktionsprodukte aus dem Porensystem zur äußeren Oberfläche,
- Stofftransport der Reaktionsprodukte von der Katalysatoroberfläche und Filmdiffusion durch die Grenzschicht in die Gasphase des Katalysatorkanals.

Neben der schon beschriebenen Verfügbarkeit und Gleichverteilung von Ammoniak und der Gaszusammensetzung kann jeder dieser Teilschritte geschwindigkeitsbestimmend für die Umsatzrate sein; bei den typischen Bedingungen eines Automobilkatalysators ist die Reaktionskinetik meist nur bei niedrigen Abgastemperaturen limitierend, während über einen weiten Lastbereich der innere Stofftransport in den Poren und der äußere Stofftransport durch die Grenzschicht für die effektive Reaktionsgeschwindigkeit und damit für die Emissionsminderung ausschlaggebend ist. Durch Erhöhung

der Strömungsgeschwindigkeit und damit der Reynoldszahl kann der Stofftransportkoeffizient gesteigert werden. Eine vielfach höhere Leistung ist mit turbulenter Strömung zu erzielen, die aber nicht durch höhere Strömungsgeschwindigkeit realisiert werden kann, da der Druckverlust zu hoch würde. Hier kommen wiederum die Vorteile der turbulenten Katalysatorstrukturen zur Geltung.

Für die SCR-Technologie sind die Trägerstrukturen MX, LS/PE- und PE im besonderen Maße geeignet, da sie neben der Anregung turbulenter Strömung auch durch ihre radiale Durchlässigkeit einen Konzentrations- und Druckausgleich ermöglichen und zur Homogenisierung des Reduktionsmittels im Abgas beitragen. (Abbildung 7)

3.1 Temperaturmanagement im SCR System

Mit Hilfe von Berechnungen wurde zunächst der Einfluß der Abgastemperatur und der Wärmekapazität der SCR Träger auf die NO_x Effektivität simuliert. Bei der Simulation wurde davon ausgegangen, dass immer eine ausreichende Menge von Ammoniak homogen verteilt zur Verfügung steht, um die Einflüsse des Trägers unabhängig von den Randbedingungen der Harnstoff Eindüsung betrachten zu können.

Die als Input Daten für die Berechnung verwendeten Abgas-Massenströme, -Temperaturen und -Zusammensetzung entsprechen den Emissionen eines Mittelklassefahrzeugs im FTP Test. Die Berechnungen wurden mit dem bei Emitec entwickelten Programm KatProg durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde durch die Verwendung unterschiedlicher Foliendicken die Wärmekapazität des SCR Katalysators variiert. Abbildung 7 zeigt die kumulierten NO_x Emissionen der einzelnen Varianten im Kaltstart.

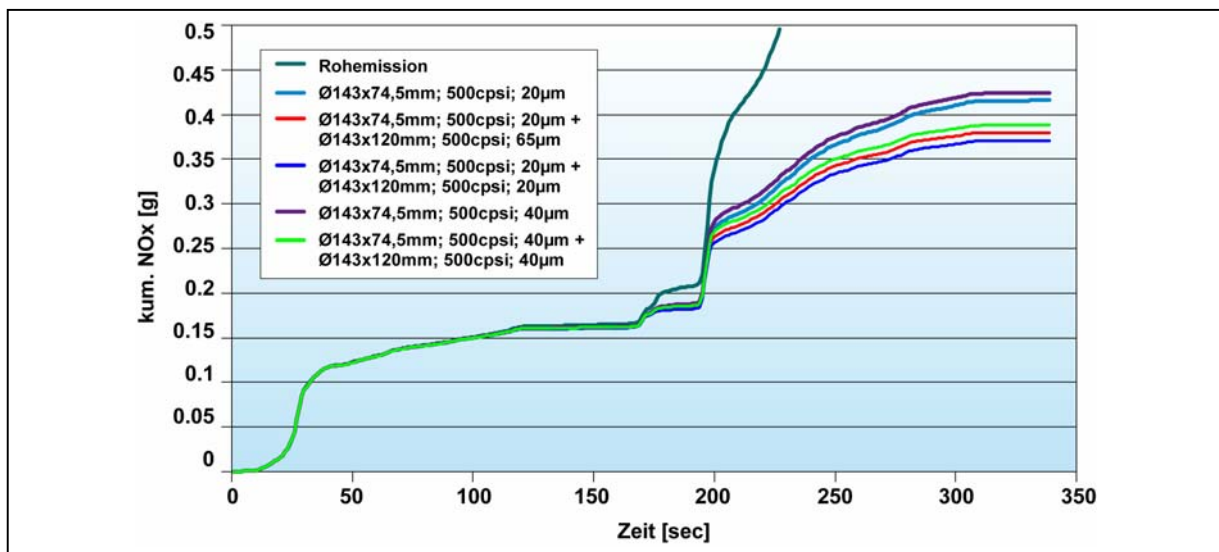


Abbildung 7: Einfluß der Träger-Wärmekapazität auf die NO_x-Konvertierung im Kaltstart (Berechnung)

Man erkennt einen leichten Vorteil im Aufheiz- und somit im Anspringverhalten für die Variante mit niedriger Wärmekapazität, der jedoch aufgrund des insbesondere in den ersten 200 Sekunden sehr niedrigen Temperaturniveaus relativ gering ausfällt.

Eine deutlichere Verbesserung ist offensichtlich nur über eine Erhöhung der Abgastemperatur möglich. Aus der Entwicklung des 3-Wege Katalysators beim Ottomotor sind verschiedene Möglichkeiten bekannt. Heutige Ottomotoren verwenden im Kaltstart kurzzeitig sehr effektive motorische Katalysatorheizmaßnahmen. Da der Ottomotor (im Lambda = 1 Betrieb) von Hause aus Abgastemperaturen oberhalb der katalytischen Light-Off Temperatur erreicht, sind diese Maßnahmen jedoch nur unmittelbar nach Kaltstart erforderlich. Beim Dieselmotor müssten die motorischen Maßnahmen zur Anhebung der Temperatur jedoch über 200 – 300 Sekunden durchgeführt werden, wodurch ein Verbrauchsnaheile entsteht. Bekannte Alternativen sind externe Brennersysteme und elektrisch heizbare Katalysatoren.

Der elektrisch heizbare Katalysator [11, 12] wurde bei Ottomotoren in der Vergangenheit bereits in Serie eingebaut [13] und aus diesem Grund für die weiteren Berechnungen ausgewählt. Es wurde ein Heizkatalysator mit einem Durchmesser von 143 mm und einer Länge von 40 mm verwendet. Der Heizkat ist axial unterteilt in die Heizescheibe (10mm) und den Stützkat (30mm). Die Heizenergie betrug 1800 Watt über einen Zeitraum von 250 Sekunden. Der Heizkatalysator wurde katalytisch inaktiv gerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

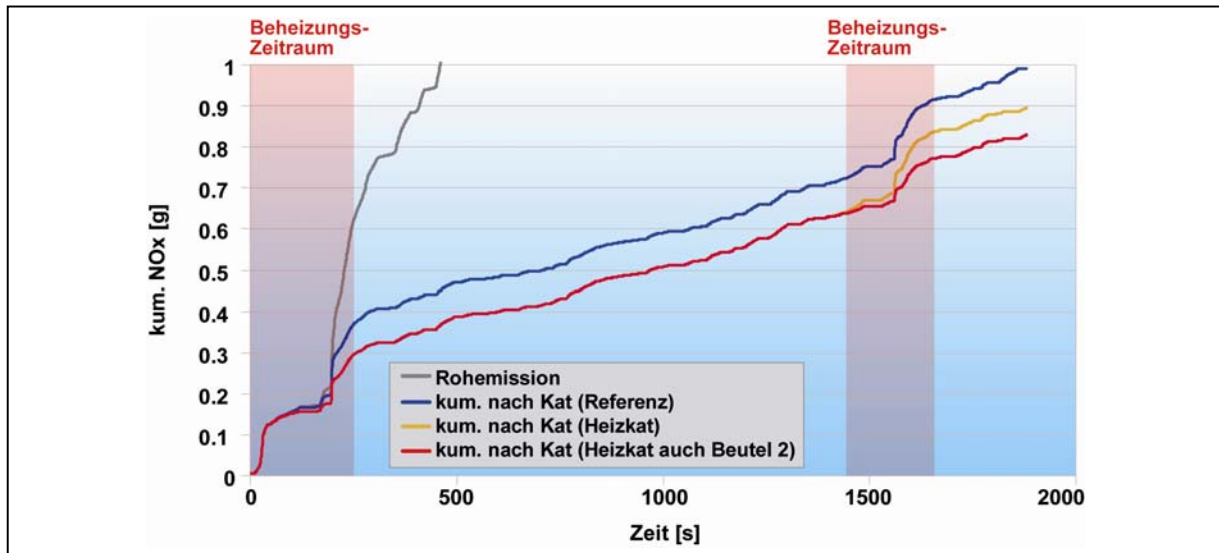


Abbildung 8 : Verminderung der NOx-Emission durch den Einsatz eines elektrisch beheizten Katalysators

Mit Hilfe der elektrischen Heizenergie konnte die Abgastemperatur für den Zeitraum der Beheizung im Mittel um ca. 60 Kelvin angehoben werden, wodurch der Light-Off Zeitpunkt um 25 Sekunden früher erfolgt. Betrachtet man die kumulierten NOx Emissionen stellt man eine Verbesserung im Ergebnis um 10 % fest. In Abhängigkeit des Lastprofils und den daraus resultierenden Temperaturen ist es durchaus denkbar, auch noch nach der eigentlichen Kaltstartphase die Abgastemperatur über elektrische oder motorische Heizmaßnahmen anzuheben. In diesem Fall wären dadurch weitere 10% Reduktion erreichbar. Ein Temperaturmanagement ist insbesondere bei PKW Anwendungen unerlässlich, um ein hocheffektives SCR-System darzustellen. Es wird deutlich, dass eine Temperaturerhöhung des Abgases mit Hilfe eines Heizkatalysators eine mögliche Lösung zur Verbesserung der Emissionen darstellt.

4. „Turbulente“ Träger für den SCR Katalysator

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben ist für die SCR Reaktion neben der Temperatur auch eine möglichst perfekte Verteilung des Reduktionsmittels und ein guter Stofftransport im Katalysator notwendig. Auf Basis der beschriebenen „turbulenten“ Struktur LS/PE wurde ein Versuchsprogramm durchgeführt, um die Vorteile eines solchen radial offenen Trägers zu bestimmen.

4.1 Versuchsaufbau

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 Abgaszusammensetzung 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 Photo-Acoustic-Soot-Sensoren (PASS) die Ruß-Konzentrationen im Abgasstrom ermittelt werden.

Die Reduktionskatalysatoren waren in Modulbauweise in einem Schalldämpfergehäuse der EU3-Größe untergebracht (Abbildung 9). 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 LS/PE Struktur erweist sich als optimaler Kompromiss zwischen aktiver Oberfläche und geringem Gegendruck.

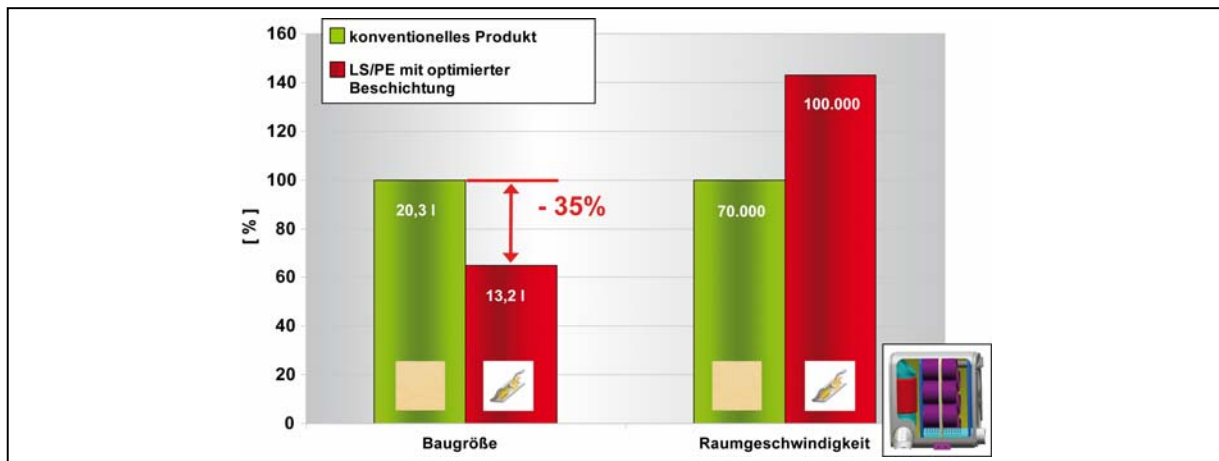


Abbildung 9: Vergleich von Einbaugröße und Raumgeschwindigkeit der gegenübergestellten Reduktions-Katalysatoren

4.2 Ergebnisse

Der um 35% verkleinerte Reduktionskatalysator 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 (Abbildung 10). 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 aufgebraachte Oxikat-Beschichtung den Ammoniak-Schlupf auf maximal 10 ppm begrenzt.

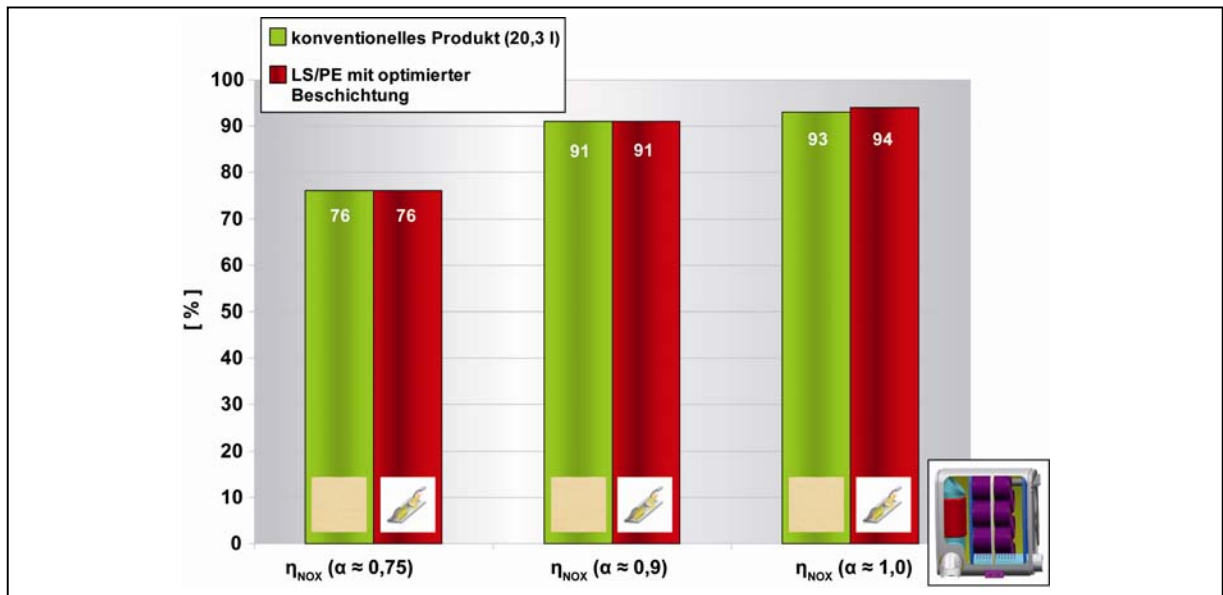


Abbildung 10: Gleiche NO_x-Effektivität für Serien- und gesteigerte Eindüsung trotz Volumenreduktion um 35% mit optimiertem Reduktionskatalysator (ESC-Test)

Aufgrund der überlegenen Eigenschaften der dargestellten Hochleistungskatalysatoren kann neben der Verkleinerung des Katalysatorvolumens auch noch eine Verringerung des Abgasgegendruckes erreicht werden. Der Druckverlust des Schalldämpfers mit LS/PE-Trägern ist um ca. 20% geringer als beim konventionellen Katalysator für gleiche NO_x-Umsatzleistung (Abbildung 11).

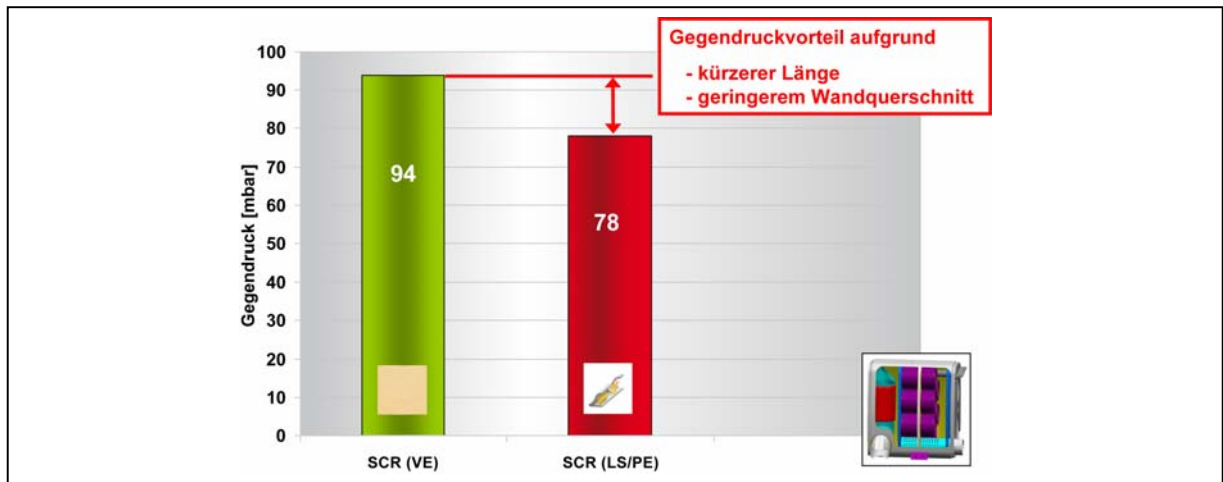


Abbildung 11: Gegendruck-Verhalten der gegenübergestellten R-Schalldämpfer

5. Kombination eines SCR Systems mit einer integrierten kontinuierlichen Partikelreduzierung

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 [14] 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 ein 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-Metalit™ wurde an verschiedenen Stellen schon gezeigt [15, 16, 17]. 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 (Abbildung 12), lässt sich über die Addition dieser beiden Minderungseffekte hinaus die Wirksamkeit des Abgasreinigungssystems steigern.

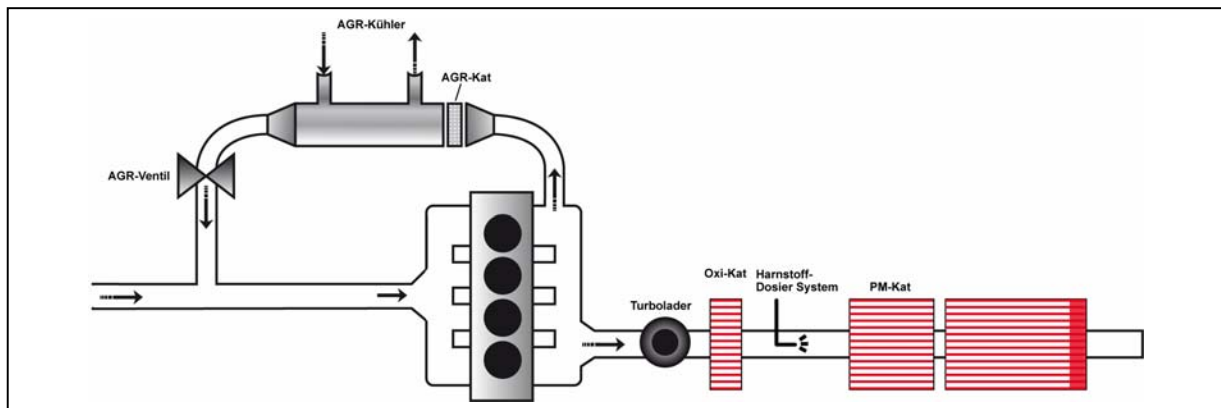


Abbildung 12: Kombinationssystem PM-Metalit™ und SCR zur simultanen Verminderung der NO_x- und Partikelemissionen

In Abbildung 13 ist die Rußemission bei kontinuierlicher Reduktion im Kombinationssystem PM-Metalit™ und SCR-System gegenüber dem SCR-System allein dargestellt. Deutlich erkennt man die bei einer PM-Metalit™-Länge von 145 mm 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 PASS durchgeführt.

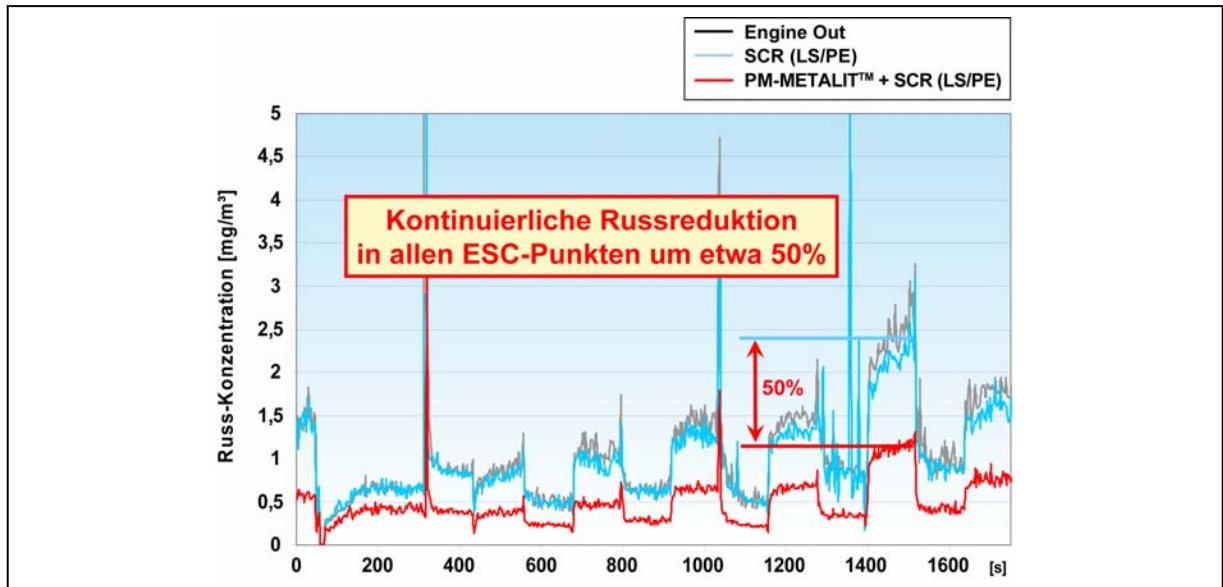


Abbildung 13: Verminderung der Russ-Konzentrationen im ESC durch den PM-Metalit™

Abbildung 14 zeigt die gravimetrisch gemessene Partikelmassen-Emission im transienten Test mit zusätzlicher PM-Reduktion durch Verwendung des Nebenstrom-Filters im PM-Metalit™-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-Metalit™ und SCR liegt bei nur ca. 8 mg/kWh im ETC-Test.

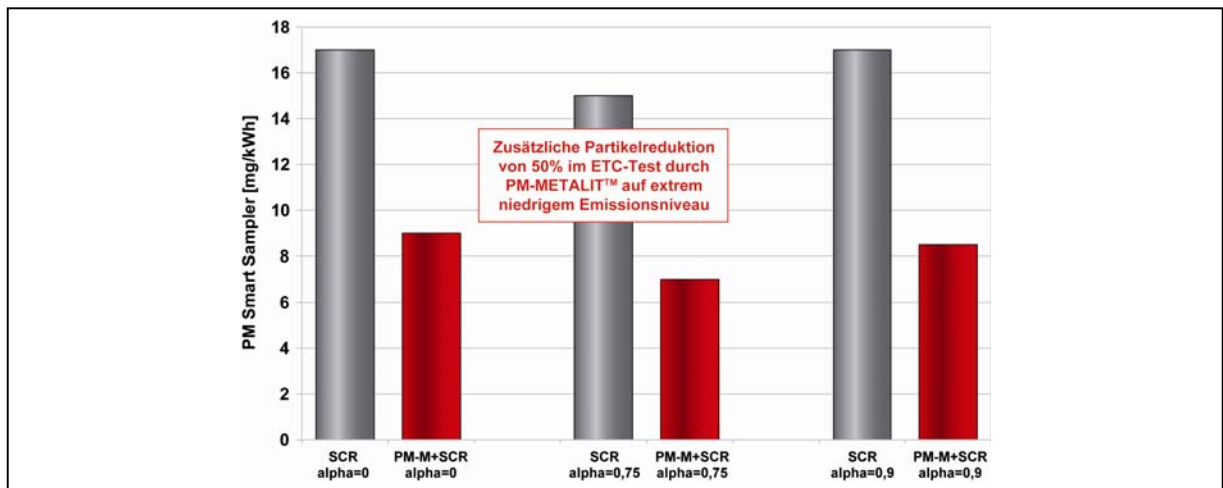


Abbildung 14: Gesamtpartikelemission im ETC-Test für Kombinationssystem und reines SCR-System

6. 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 Bauraum 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.

8. Literatur

- [1] "Legal Framework and Future Requirements"
A.Friedrich, UBA, Dessau,, 3.Internationale CTI-Konferenz, München, 11-12..Juli 2006
- [2] Draft Report PE 376.385v01-00, European Parliament, 11.9.2006
- [3] „Dieseltechnologien für zukünftige Emissionserfüllung“
R.Dorenkamp, Volkswagen AG, 3.FAD-Konferenz Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, Dresden, 9.-10. November 2005
- [4] „Die Harnstoff-SCR Nachbehandlung für den Dieselmotor“
h.Breitbach, C.Enderle, M.Paule, B.Keppeler, Daimler Chrysler AG, HdT Tagung Euro V Diesel Powertrain, 24.-25. November 2005
- [5] „Weltweite Emissionsstrategien mit Bluetec für PKW-Diesel-Antriebe“
J.Schommers, C.Enderle, H.Breitbach, B.Lindemann, M.Stolz, M.Paule, Daimler Chrysler AG, 15.Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006
- [6] „Review of SCR Technologies for Diesel Emission Control : European Experience and worldwide Perspectives“
T.Seguelong, E.Joubert, Aquis&Aquis, 3.FAD-Konferenz Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, Dresden, 9.-10. November 2005
- [7] „NOx-Care Behälterheizung für SCR-Catalyst“
Jop de Beeck, V.Potier, Inergy Automotive Systems, 3.FAD-Konferenz Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren, Dresden, 9.-10. November 2005
- [8] Abschlußbericht an die bayrische Forschungsstiftung, Projekt 52402 „Hochleistungs GD-Kat“, 2006
- [9] „Ammoniakgeneratoren für GD-KAT-Systeme“
E. Jacob, MAN, 2. Emission Control 17.-18. Juni 2004, IVK, Technische Universität Dresden, Tagungsband S. 358-367 (2004)
- [10] „Perspektiven der mobilen SCR-Technik“
E. Jacob, Emitec, 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006
- [11] „Optimization of an Electrically-Heated Catalytic Converter System – Calculations and Application“
F.-W.Kaiser, Porsche AG, W.Maus, H.Swars, R.Brück, Emitec GmbH, SAE 930384
- [12] “The System Development of Electrically Heated Catalyst (EHC) for the LEV and EU-III Legislation”
B.Pfalzgraf, Audi AG, E.Otto, BMW AG, A.Wirth, Mercedes Benz AG, P.F.Küper, Porsche AG, W.Held, A.Donnerstag, Volkswagen AG, SAE 951072
- [13] “Elektrisch heizbarer Katalysator im BMW Alpina B12 5.7 Switch-Tronic“
B.Bovensiepen, Alpina, W.Maus, Emitec GmbH, J.Liebl, BMW AG, MTZ 57 (1996) Heft 7/8, Vieweg Verlag
- [14] „Simultaneous Removal of Soot Particles and Nitrogen Oxides from Diesel Exhaust“

- C.Görsmann, Johnsson Matthey, CTI-Konferenz München, 11.-12. Juli 2006
- [15] „Abgasnachbehandlungssystem zur simultanen Kohlenstoffpartikel-Oxidation und NOx-Reduktion für Euro 4/5 -Nfz-Dieselmotoren“
E. Jacob, A. Döring, MAN 21. Internationales Wiener Motorensymposium, H. P. Lenz (Hrsg.) VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12 Nr.420, Band 2, S.311-329, 2000
- [16] „Abgaspartikelmesstechnik der Zukunft“
D. Rothe, Beiträge 3. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, AVL Deutschland, Sinsheim 2004
- [17] „Nutzfahrzeugmotoren und Abgasnachbehandlung im Zielkonflikt zwischen Kundennutzen und Emissionsgesetzgebung“
R. Lämmermann, W. Held Beiträge 4. Intern. Forum Abgas- und Partikelemissionen 2006, AVL Deutschland, www.abgas-partikel-forum.com, Ludwigsburg 14./15. März 2006