

„Innovative Abgasnachbehandlung als Wegbereiter fortschrittlicher, umweltfreundlicher Otto- und Dieselmotoren“

„Innovative Exhaust Gas Aftertreatment to Enable advanced and Environmentally Friendly Spark Ignition and Diesel Engines“

Rolf Brück

Emitec GmbH

Wolfgang Maus, Peter Hirth

Emitec GmbH

KURZFASSUNG

Die aktuelle und zukünftige Entwicklung der Technologie von Otto- und Dieselmotoren lässt Trends erkennen, die abgasseitig eine gewisse Konvergenz dieser Systeme zeigen. So ist in Zukunft bei beiden Konzepten insbesondere mit steigenden Rohemissionen und sinkenden Abgastemperaturen zu rechnen, wodurch die Anforderung an das Abgasnachbehandlungssystem klar umrissen sind.

Es werden Technologien wie z.B. Niedertemperaturbeschichtungen, Katalysatorträger mit integrierten Funktionen und insbesondere Wärmemanagementsysteme erforderlich werden. Trägerseitig werden zwei Wege zur Lösung der gezeigten Problematik aufgezeigt. Mit Hilfe eines Kompaktkat-Cannings können durch die Nutzung warmen Abgases als Isolator die Wärmeverluste minimiert und somit Emissionen verringert werden. Mit Hilfe des Konzepts des beschichteten Wärmetauschers lässt sich die Strömungs- bzw. Temperaturführung so wählen, dass eine örtliche Verlagerung der exothermen Energie vom Ort ihrer Entstehung hin zum „kalten“ Gaseintrittsbereich erfolgt. Dort wird diese Wärme effektiv zur Erhöhung der Gastemperatur vor Kat eingesetzt.

ABSTRACT

The technological development of gasoline and diesel engines, current and in the future, show certain trends of convergence for the exhaust gas systems of both engine types. Increased engine out emissions and reduced exhaust gas temperatures are expected for both concepts, through which the requirements for the exhaust gas after treatment systems are clearly defined.

Technologies like low temperature coatings, catalysts with additional integrated functionality and especially thermal management systems will be required. From a catalyst substrate side two solutions to the presented problem are shown. Compact-catalyst canning can reduce heat losses by using the hot exhaust gases as insulation and hence reducing the emissions. The concept of the coated heat exchanger allows the gas and heat flow to be directed such that the exothermal energy can be shifted from its place of origin to the "cold" gas inlet area. Here the energy is used to increase the gas temperature in front of the catalyst.

1. Einleitung

Zunehmende Industrialisierung und wachsende Mobilitätsansprüche, die zu steigender Fahrzeugdichte führten, ließen insbesondere in Ballungsgebieten mit klimatisch ungünstigen Bedingungen die Notwendigkeit einer Immissionsverminderung aufkommen. Die katalytische Nachbehandlung der automobilen Abgasemissionen bot sich als Lösung an. Als Vorreiter erzwang Kalifornien mit schärferen Abgasgesetzen den Einsatz zunächst „ungeregelter“- und später über ein optimales Luft/Kraftstoff Verhältnis geregelter Katalysatoren. Die Anforderungen an die Konvertierungsrate bzgl. der limitierten Emissionen von Kohlenwasserstoffen (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxiden (NO_x) waren zunächst niedrig und man nahm den NFZ-Verkehr mit seinen Dieselmotoren aus. Aufgrund der sehr geringen Verbreitung des Dieselmotors im US-amerikanischen PKW-Bestand nahm man bei der Gesetzgebung keine Rücksicht auf das zum Ottomotor unterschiedliche Emissionsverhalten und die damit verbundene aufwendigere Abgasnachbehandlung und führte antriebsneutrale Grenzwerte ein. Mit zunehmender Verbreitung von modernen Motormanagementsystemen mit Kraftstoffeinspritzung konnten die Rohemissionen der Ottomotoren deutlich abgesenkt werden, parallel dazu wurden jedoch die gesetzlichen Anforderungen immer strenger. Da ein Katalysator eine Mindestbetriebstemperatur von 200 – 300°C benötigt und somit die unmittelbar nach Motorstart emittierten Schadstoffe nicht katalytisch umgesetzt werden, kam der Reduktion der Kaltstartemissionen eine besondere Bedeutung zu.

Um eine reproduzierbare Messung der Emissionen zu ermöglichen, wurde in den USA die sogenannte „Federal Test Procedure“ (FTP) und in Europa der „European Driving Cycle“ (EDC) entwickelt. Bild 1 zeigt die Entwicklung der Kohlenwasserstoff-Rohemissionen im Kaltstart im Laufe der letzten Jahre am Beispiel von Otto-Motoren im FTP-Zyklus sowie Diesel-Motoren im europäischen Testzyklus.

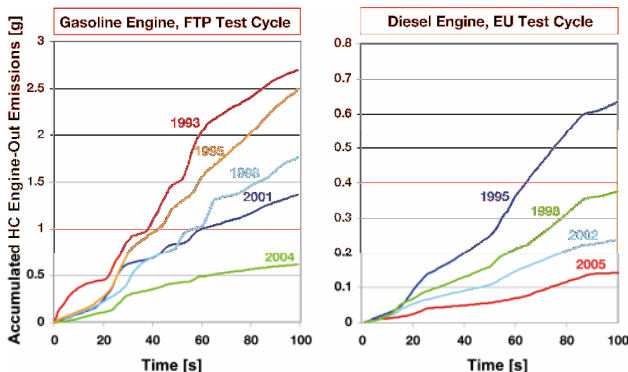


Bild 1: Entwicklung der HC-Rohemissionen von Otto-Motoren in den ersten 100 Sekunden des FTP-Testzyklus und von Dieselmotoren im europäischen Testzyklus im Verlaufe der letzten Jahre.

Die notwendigen Umsatzraten im amerikanischen Testzyklus stiegen seit Beginn der Neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts von anfänglich 87% auf Werte > 99,6% für die SULEV-Gesetzgebung (Annahme: HC-Rohemission von 2 g/Meile). Bild 2 zeigt die historische Entwicklung der Abgasgesetzgebung in Kalifornien und den USA. Basierend auf den steigenden Anforderungen wuchs der Bedarf an modernen und innovativen Ottomotor-katalysatorsystemen, die trotz gesteigerter Konvertierungsleistung nicht wesentlich teurer sein sollten. Bekanntlich holte Europa mit der EU IV Gesetzgebung auf. Dabei nahm man in der EU – anders als in den USA – auf den Diesel Rücksicht und gab die Grenzwerte in Abhängigkeit vom Verbrennungskonzept vor.

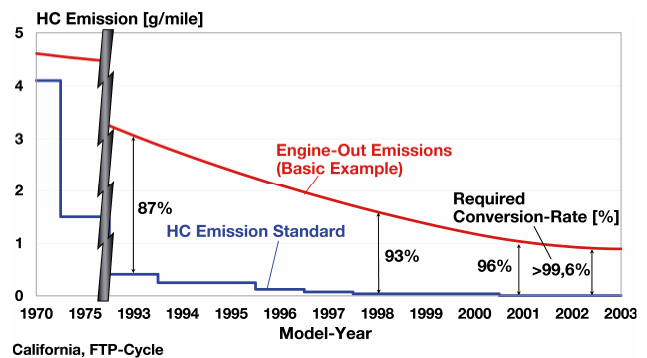


Bild 2: Entwicklung der Abgasgrenzwerte und der benötigten HC-Umsatzraten in Kalifornien während der letzten Jahre

Die Unterschiede zwischen Otto- und Dieselantrieb hinsichtlich ihrer Abgasemissionen und insbesondere bezüglich ihrer Partikel- und NO_x-Emissionen sind der Hauptgrund dafür, weshalb die hochentwickelte Otto-Abgasnachbehandlung nur teilweise für den Diesel übernommen werden konnte. Der hohe europäische Diesel-Fahrzeugbestand, der Entwicklungsrückstand der NO_x-Nachbehandlung unter Sauerstoffüberschuss sowie die zunächst mangelnde Serienfähigkeit der keramischen Partikel-Wandfilter erzwangen in Europa eine zweigleisige Entwicklung der Grenzwerte von Otto- und Dieselmotoren.

Bild 3 veranschaulicht die Entwicklung der Grenzwerte in Europa und die prognostizierten Werte bis 2015. Weitere Anforderungen wie die vom Antriebskonzept unabhängige Festlegung der emittierten Partikelanzahl sowie Abgastests außerhalb des heute vorgeschriebenen Testzyklus sind ebenfalls in Diskussion.

Es wird daher deutlich, dass die zukünftigen Herausforderungen die Reduzierung der Stickoxid- und Partikelemission sein werden. Insbesondere die in Diskussion befindliche Partikelanzahlggesetzgebung wirft neue Fragestellungen auf.

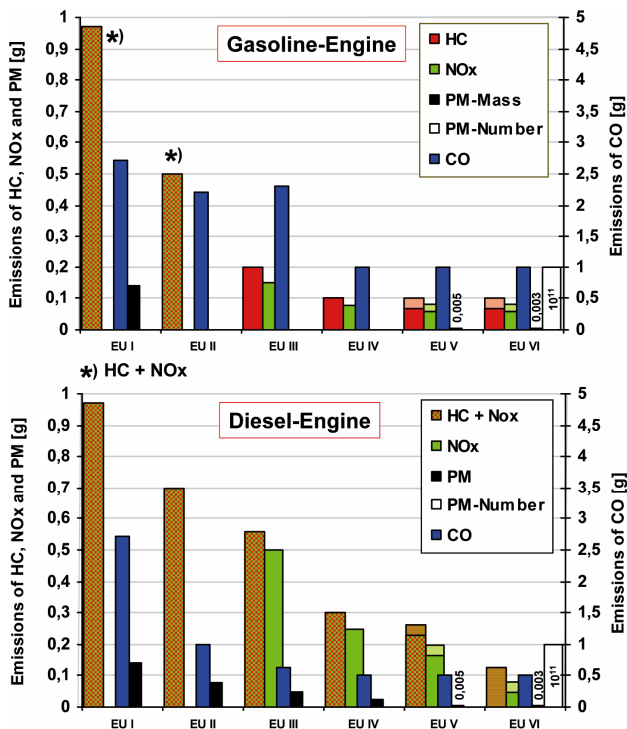


Bild 3: Entwicklung der Abgasgesetzgebung in Europa während der letzten Jahre und Prognosen für die Zukunft [1, 2]

Im stetigen Wirtschaftlichkeitswettbewerb sind Entscheidungen zu treffen, ob Investitionen in die Verringerung der Rohemission der Motoren oder in eine gesteigerte Effektivität der Nachbehandlung fließen. Entsprechend wurden die Motoren weiter hinsichtlich den Marktanforderungen Leistung und Drehmoment optimiert, und auch das Verbrauchs- und Emissionsverhalten wurde verbessert. Technologien wie verbesserte Einspritzsysteme, variable Ventilsteuerungen und weiterentwickelte Brennverfahren markierten Meilensteine in der Motorenentwicklung [3].

2. Die Entwicklung der Motoren und Brennverfahren

Die Entwicklung neuer Motoren ist naturgemäß eng mit der Optimierung des Verbrennungsverfahrens verknüpft und beeinflusst damit insbesondere die Abgasrohmissionen des Motors. Diese wiederum stellen eine zentrale Randbedingung für die Entwicklung von Katalysatorsystemen vor dem Hintergrund zukünftiger gesetzlicher Anforderungen dar.

2.1 Ottomotoren

Zu Beginn des Einsatzes der ersten Katalysatortechnik war der Ottomotor lediglich mit Vergaser ausgestattet. Da jedoch für eine gleichzeitige katalytische Umsetzung von HC, CO

und NO_x ein Luft-/Kraftstoffgemisch von 14,7 : 1 (bei Lambda = 1) vorliegen muss, wurde die Entwicklung von Kraftstoffeinspritzsystemen mit Lambdaregelung forciert. Diese so genannten Saugrohreinspritzer entwickelten sich von den „Single Point“-Einspritzungen mit einem Einspritzventil an der Position des ehemals verwendeten Vergasers hin zu den heute gebräuchlichen „Multi Point“-Einspritzsystemen mit einer Einspritzdüse für jeden Zylinder.

Zusammen mit der variablen Ventilsteuerung war der wichtigste Meilenstein bei der Verringerung der Kaltstartemissionen die jetzt mögliche Erhöhung der Abgastemperatur bei leicht mageren Kaltstart und früh eingeschalteter Lambdaregelung. Damit werden, begleitet durch eine immer motornähere Anordnung des Katalysatorsystems, heute bereits 10 Sekunden nach Motorstart bis zu 500 °C vor Katalysator erreicht [4]. Bild 4 zeigt den Vergleich einiger typischer Abgastemperaturen vor Katalysator aus den Jahren 1993 bis 2004.

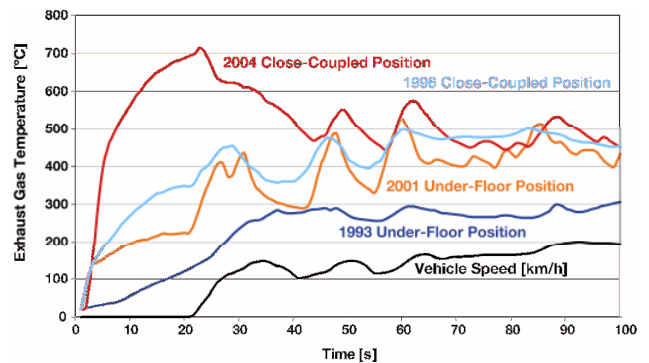


Bild 4: Historische Entwicklung typischer Abgastemperaturen vor Katalysator von Ottomotoren im Kaltstart des FT-75-Zyklus, Einfluss von Katheizmaßnahmen und Katalysatorposition

Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Abgastemperaturen in der Zeit um 1990 und des damit verbundenen sehr späten Katalysator-Light-Offs ging man damals noch von der Notwendigkeit elektrisch geheizter oder mit Zusatzbrennern versehener Katalysatorsysteme [5] aus. Aber schon einige Jahre später waren Temperaturen vor Katalysator erzielbar, die zusammen mit einer nach kürzester Zeit zuschaltbaren Lambdaregelung ein „Anspringen“ des Katalysators nur wenige Sekunden nach Motorstart auch ohne die Zufuhr zusätzlicher Heizenergie zuließen. Dieses Beispiel verdeutlicht die notwendige Zusammenarbeit von Motor- und Katalysatorentwicklung, um Fehlinvestitionen zu verhindern.

Ein nächster wichtiger Schritt war die breite Einführung von Benzin direkt einspritzenden Motoren. Hierbei wird der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingedüst. Bei dieser Technik lassen sich zwei Gruppen unterscheiden:

a) Motoren, die bei $\lambda = 1$ betrieben werden: Hierbei verändert sich für den Katalysator grundsätzlich nichts, von vergleichsweise geringfügig höheren HC- und CO-Rohemissionen abgesehen, die wiederum eine im Vergleich etwas höhere thermische Belastung der Katalysatoren hervorrufen. Zusätzlich fehlen bei den Direkteinspritzern für den Katalysator schädliche HC-Spitzen, die bei Saugrohrkonzepten durch im Schubbetrieb abdampfenden Kraftstoff aus dem Ansaugtrakt hervorgerufen werden.

b) Ein zweiter Entwicklungszweig betrifft die kraftstoffsparende magere Verbrennung. Dies bedeutete für die Katalysatortechnik eine neue Herausforderung, da es nun aus magerem Abgas auch Stickoxide zu entfernen galt. Es setzten sich zwei Lösungskonzepte durch; der NO_x-Adsorber [6] und die „Selective Catalytic Reduction“ (SCR)-Technologie [7]. Aufgrund eines eingeschränkten Temperaturfensters bezüglich des Ablaufens der beteiligten chemischen Reaktionen entstand hier zusätzlicher Bedarf für ein Temperaturmanagement innerhalb des Abgassystems.

Aktuell in Diskussion sind homogen verbrennende und selbstzündende Brennverfahren. Die Einflüsse auf die Betriebsrandbedingungen des Katalysators sind noch nicht vollständig klar.

Bedingt durch die neuen Brennverfahren wird sich jedoch der Bereich der Arbeitstemperatur des Katalysators weiter vergrößern, je nach Last muss hier mit Werten zwischen 200 und 1000°C gerechnet werden. Das Ziel, die Abgastemperatur weiter über die 1000°C-Grenze hinweg zu steigern, wurde ebenfalls schon vereinzelt vorgestellt [8].

2.2 Dieselmotoren

Eine ähnliche Entwicklung wie beim Ottomotor vollzog sich beim Dieselmotor. Ausgehend von den sogenannten Vorkammermotoren verlief der technische Trend hin zum Direkteinspritzer, einer Technologie, die erstmals im Jahre 1989 in Großserie bei PKW Motoren angeboten wurde. Hierdurch konnten bei gleichzeitiger Verbrauchsabsenkung Drehmoment und Leistung in einem Maße gesteigert werden, welches zu Recht die Verwendung des Begriffs „Fahrspaß“ auch beim Dieselfahren zuließ. Eine konsequente Weiterentwicklung der Antriebe vergrößerte fortan stetig die angebotenen spezifischen Leistungsdaten der Dieselmotoren.

Die HC- und CO-Rohemissionen liegen im Vergleich zu Ottomotoren sehr niedrig, so dass in Oxydationskatalysatoren praktisch keine messbare Exothermie festzustellen ist. Als kritisch sind die im Vergleich zum Ottomotor deutlich höheren emittierten Partikelmassen anzusehen.

Sich verschärfende Abgasgrenzwerte (vgl. Bilder 1 und 2) führten im Falle des Diesels zunächst zu der

Notwendigkeit, Oxidationskatalysatoren und später zusätzlich auch Partikelfilter einzusetzen.

Im Vergleich zum Ottomotor ist das Dieselabgas stets „mager“ zusammengesetzt und darüber hinaus auch deutlich kälter. So werden heute erst ca. 100 – 200 Sekunden nach Motorstart Temperaturen erreicht, die eine katalytische Nachbehandlung der Emissionen ermöglichen. Während des Stadtzyklus pendelt die Temperatur um die katalytische Light-Off Temperatur, so dass die Effektivität gering bleibt und vor allen in den Leerlaufphasen der Katalysator unter die für die Konvertierung erforderliche Temperatur auskühlen kann.

Da aktuell eine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte vor allem bei den Stickoxiden geplant ist, entstehen hinsichtlich geringerer Rohemissionen neue Anforderungen für die Motorenentwicklung. Eine sehr genaue Regelung, die Beherrschung des Brennverfahrens und der damit verbundenen Temperatur im Zylinder sowie homogene Anteile der Verbrennung (HCCI) versprechen deutlich niedrigere Rohemissionen von Partikeln und Stickoxiden. Die Literatur zeigt [9], daß sich durch die Verbesserung der Diesel Brennverfahren in erster Linie eine Reduzierung der Partikelmasse, aber auch eine Verringerung der Partikelanzahl ergeben hat. Damit verschiebt sich ein mehr oder weniger großer Anteil der Partikel in den nicht sichtbaren Bereich, was die in Europa dem Gesetzgeber nachgeschalteten Behörden dazu veranlaßt, über die zukünftige Limitierung von Partikelanzahlen nachzudenken. Die oben genannte Literatur belegt die charakteristischen Häufigkeitsbereiche von ca. 10 bis 150 nm mit Maxima bei 70 bis 100 nm [9]. Daher müßte dann die Anzahl der sogenannten Nanopartikel (Partikeldurchmesser kleiner 100 nm oder PM 0,1 weiter reduziert werden. Allerdings steigen auch die Rohemissionen von HC und CO bei gleichzeitig eher niedrigeren Abgastemperaturen. Entsprechend werden ein Temperaturmanagement und neue Katalysator-technologien in der Abgasanlage erforderlich werden.

3. Katalysatortechnologien

Die ottomotorische Entwicklung der Abgasnachbehandlung sei hier im Überblick wiedergegeben. Für die zunächst nur erforderliche Umsetzung der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids beim Diesel wurden die vom Ottomotor bekannten Erkenntnisse, Technologien und Bauteile zunächst übernommen.

Allerdings ist bereits jetzt abzusehen, dass die Abgase beider Motorkonzepte aufgrund gesteigerter Wirkungsgrade kälter werden, so dass zur Erhaltung der katalytischen Aktivität bereits mittelfristig ein verbessertes Wärme-Management – alleine der Kosten wegen – eingeführt werden sollte und

längerfristig sogar über Wärmerückgewinnung nachgedacht werden muß.

3.1 HC, CO und NOx Reduktion am Ottomotor

Wie bereits erwähnt, wurden beim Ottomotor zu Beginn des Einsatzes der Abgasnachbehandlung zunächst unregelmäßige Katalysatoren eingesetzt, die je nach Lage des Verhältnisses zwischen Luft und Kraftstoff im Abgas entweder die Oxidationsreaktionen von HC und CO beschleunigten oder die Entfernung der Stickoxide förderten. Erst mit der Einführung der aktiven Lambdaeinstellung war es möglich, das Abgasgemisch so einzustellen, dass alle drei Reaktionen mit hoher Effektivität parallel ablaufen konnten.

Zu Beginn der 3-Wege-Katalysatorentwicklung waren die Katalysatoren im Unterboden angeordnet, um eine übermäßige thermische Alterung zu verhindern. Aufgrund der vorgeschalteten thermischen Massen wurde der Katalysator im Kaltstart jedoch nur langsam erwärmt, so dass mehr als 80% der in einem Abgaszyklus emittierten Emissionen während dieser frühen Phase im Test emittiert wurden. Die Weiterentwicklung der Temperaturbeständigkeit katalytischer Beschichtungen ermöglichte bald ein Verschieben der Katalysatorposition in Richtung Motor. Zunächst wurden aus Bauraumgründen zusätzlich zum Unterbodenkatalysator kleine Startkatalysatoren eingesetzt. Im zweiten Schritt wurde der Bauraum für motornahe Hauptkatalysatoren geschaffen, die heute mehr oder weniger den Standard darstellen. Aufgrund der höheren Effektivität, die aus dieser Verschiebung resultierte, ließ sich eine Verkleinerung des Katalysatorvolumens ableiten.

Bild 5 zeigt die Entwicklung der Katalysatorsysteme am Beispiel der Fahrzeugplattform Chrysler LH/LX.

Um die volumenspezifische Effektivität der Katalysatoren weiter zu steigern, wurden sowohl Beschichtungen als auch Träger stetig weiterentwickelt. Zusätzlich wurde die Langzeitstabilität verbessert, so dass heute auch über hohe Laufzeiten eine sichere Funktion der Katalysatoren gewährleistet ist.

Nun bedingen die in Kapitel 1 diskutierten zukünftigen Grenzwerte – wie schon erwähnt – sowohl für Ottomotoren als auch für Dieselmotoren im PKW und Nutzfahrzeug weitere Effektivitätssteigerungen der Abgasnachbehandlung insbesondere hinsichtlich der Stickoxidemissionen.

Die Entwicklung der Diesel Oxidationskatalysatoren (DOC) verlief zwar zeitlich verzögert, vollzog sich jedoch in vergleichbarer Weise, indem die DOC oder entsprechend beschichtete Dieselpartikelfilter aus thermischen Gründen motornah angeordnet wurden.

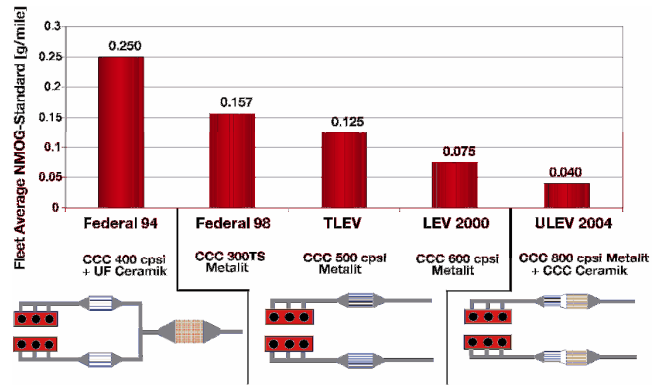


Bild 5: Exemplarische historische Entwicklung eines Katalysatorsystems und der entsprechenden Abgasgrenzwerte am Beispiel der Fahrzeugplattform Chrysler LH/LX

Für die heterogene Katalyse im Automobil werden bislang üblicherweise Wabenkörper mit geradlinigen Kanälen verwendet. Stromabwärts einer turbulenten Einlaufströmung bildet sich wenige Millimeter hinter der Gaseintrittsfläche eine laminare Kanalströmung aus, die nur diffusive Transport der Reaktanden von der Kernströmung (Kanalmitte) zur katalytisch aktiven Wand zulässt. Katalysatoren dieser Bauart sind im betriebswarmen Zustand in Ihrer Effektivität durch den Massentransport begrenzt. Ziel der Katalysatorträgerentwicklungen war es deshalb, die Leistung durch Erhöhung des Stofftransports zu verbessern, entweder durch gezielte Querströmung innerhalb der Kanäle (zum Beispiel durch Einbringen von Strukturen) oder durch Verkürzung der Diffusionslängen.

Eine signifikante Verkürzung der Diffusionslängen konnte durch eine Erhöhung der Zelldichte von ursprünglich 300 – 400 cpsl (cells per Square inch) auf 900 und sogar 1600 cpsl erreicht werden. Bild 6 zeigt den Einfluss der Zelldichte auf die Effektivität der Katalysatoren im FTP-Test. Vor allem im betriebswarmen Bereich (Beutel 2) werden die Vorteile der Träger mit höheren Zelldichten erkennbar. Aber auch in der Kaltstartphase lassen sich Verbesserungen erzielen, da analog zum Stofftransport auch der Wärmeübergang erhöht wird. Durch Reduktion der Wandstärke bei den höheren Zelldichten war es möglich, die thermische Masse konstant zu halten und in Summe ein schnelleres Aufheizen zu erreichen.

Ein aktueller und neuartiger Ansatz ist es, in die Kanalwände Strukturen und / oder Perforationen einzuprägen, um Querströmungen senkrecht zur Hauptströmung innerhalb der Kanäle bzw. zwischen benachbarten Kanälen zu ermöglichen. Dies resultiert nicht nur in einem Vorteil hinsichtlich des Stofftransportkoeffizienten, sondern auch in einer Homogenisierung der Reaktandenkonzentration über den Querschnitt des Katalysators. Somit

konnte zusätzlich noch ein besserer Nutzungsgrad erreicht werden.

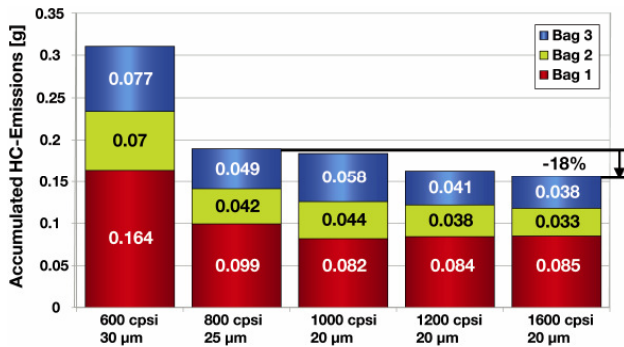


Bild 6: Einfluss der Zelldichte auf die Katalysatoreffektivität, am Beispiel der HC-Emissionen eines Katsystems Ø 118 x 150 mm, gealtert, an einen 2-Liter-Motor im FTP-75-Test

Dieser Effekt kann bei Ottomotoranwendungen dazu genutzt werden, eine Vermischung der Abgasströme der einzelnen Zylinder zu erzielen, wodurch Toleranzen der Einspritzdüsen und damit der Zusammensetzung des Kraftstoff / Luftgemischs im Katalysator selber ausgeglichen werden können. Bild 7 zeigt einige Beispiele von strukturierten Katalysatorträgern.

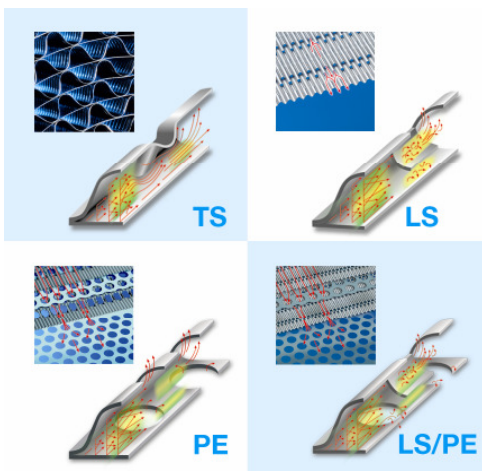


Bild 7: Beispiel strukturierter Metallträgerkatalysatoren, Aufbau der TS, LS, PE und LS/PE-Struktur

Der verbesserte Stofftransport innerhalb der strukturierten oder auch „turbulenten“ Katalysatorträger führt zu einem Anstieg der volumenspezifischen Effektivität. Es wird ermöglicht, das Katalysatorvolumen zu verkleinern und Beschichtungsmasse sowie Edelmetalle einzusparen. [10]

Wie bereits erwähnt, sind die NO_x Grenzwerte in den USA für beide Motorenkonzepte gleich streng. Dabei ist die Erfüllung der BIN 5 Werte hinsichtlich

NO_x und Russpartikel heute auch als Benchmark für Europa anzusehen.

Ein deutscher Automobilhersteller kündigte bereits die Einführung BIN 5 kompatibler Diesel PKW mit SCR und Partikelfilter für 2008 zur Einführung in den USA und Europa an. Möglicherweise werden weitere führende europäische Diesel-PKW-Hersteller diesem Beispiel folgen.

Im Folgenden soll zunächst auf die heute verfügbare De-NO_x Technologie und deren mittelfristiges und langfristiges Entwicklungspotential eingegangen werden. Dabei wird beispielhaft die SCR-Technologie (Selektive Catalytische Reduktion) mit den denkbaren Rückwirkungen auf die Otto- und Dieselmotor Entwicklungen betrachtet. Der NO_x-Adsorber soll hier nur kurz erwähnt werden, da sein Nutzen nach heutigem Stand hinsichtlich der DeNO_x-Effektivität – außerhalb der vorgeschriebenen Testzyklen – begrenzt ist.

3.2 Stickoxidreduktion mit SCR

Die Selektive Katalytische Reduktion von Stickoxiden unter mageren Betriebsbedingungen mit Hilfe von Ammoniak (NH₃) ist seit Jahrzehnten aus der chemischen Industrie bzw. aus der Nachbehandlung der Emissionen von Kraftwerken bekannt. Im automobilen Bereich wurde das SCR System zunächst für Nutzfahrzeuge entwickelt und angewandt. Eine der Gründe für diesen Einsatz war neben schärfer werdenden Grenzwerten eine mögliche Verschiebung des Verhältnisses der Emissionen von NO_x und Partikeln bei der Abstimmung des Motors zu Gunsten eines niedrigeren Kraftstoffverbrauchs. Ziel der damaligen Entwicklung war es, ein zusätzliches wirtschaftliches Verkaufargument für solche Motoren zu bekommen. Da die Motoren parallel permanent weiterentwickelt wurden und vergleichbare Vorteile somit rein motorisch dargestellt werden konnten, wurde der Serieneinsatz von SCR jedoch immer wieder nach hinten verschoben. Diese Verschiebung wurde durch die Notwendigkeit zur Mitführung eines weiteren Betriebsstoffs, einer Harnstoff-Wasser-Lösung (AdBlue), aus der onboard Ammoniak gewonnen werden kann, gefördert, zumal die Logistik für das Reduktionsmittel noch im Aufbau begriffen ist.

Ein typisches SCR-System besteht aus einem Reduktionskatalysator, Apparaten zur Harnstoffeindüsung und -Dosierung, sowie entsprechenden Leitungen und einem Vorratstank.

Als Katalysatoren werden heute noch übliche Vollextrudatkatalysatoren mit Vanadiumpentoxid als katalytisch aktive Komponente eingesetzt. Aufgrund deren begrenzter Temperaturstabilität werden jedoch aktuell katalytische Beschichtungen auf Zeolithbasis entwickelt, die entsprechend der bekannten Beschichtungstechnologie der 3-Wege- oder Oxidationskatalysatoren auf einen Träger aufgebracht werden. Die erhöhte Temperatur-

Stabilität wird insbesondere beim Einsatz eines SCR-Katalysators hinter einem Partikelfilter notwendig, da während der Filterregeneration vergleichsweise hohe Temperaturen entstehen. Eine Problematik aktueller SCR-Systeme besteht in der Eindüsung und der gleichmäßigen Verteilung der Harnstoff/Wasser-Lösung, die im flüssigen Zustand ins Abgas dispergiert wird. Je größer die hierbei erzielte Tropfengröße, um so größer ist die Zeit bis zur Verdampfung des Tropfens im Abgas. Dadurch und durch radial ungleichmäßige Tropfenkonzentrationen in der Gasphase können auf der Katalysatoroberfläche Konzentrationsunterschiede auftreten, die wiederum zu reduzierten Umsatzraten führen. Eine deutliche Verbesserung kann hierbei durch den Einsatz der schon erwähnten „turbulenten“ Katalysatorträger mit radialem Ausgleichsmöglichkeiten erzielt werden. In Bild 8 ist am Beispiel eines SCR-Katalysators auf eine Volumenverkleinerung hingewiesen. Im Vergleich zu einem Standardkatalysator mit geradlinigen Kanälen konnten die Kosten in diesem Fall um 35 % reduziert werden.

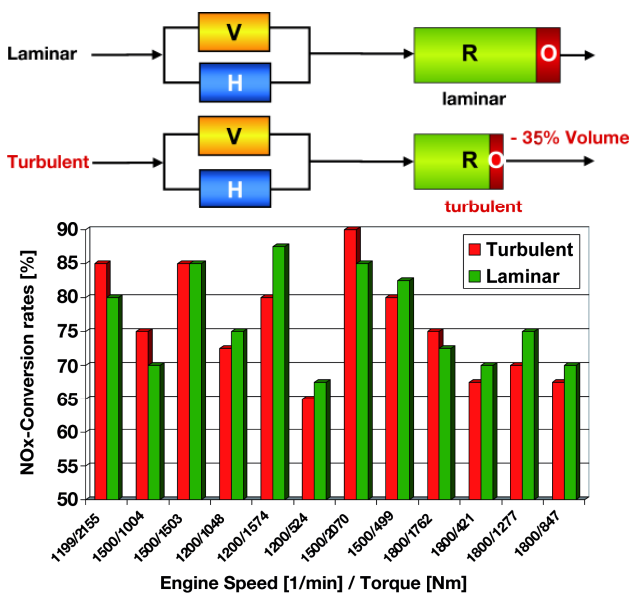


Bild 8: Vergleich der NO_x-Umsatzraten eines SCR-Standardkatalysators (laminar) und eines um 35% verkleinerten „turbulenten“ Katalysators bei den verschiedenen Lastpunkten im ETC-Test eines 10,5 l-Nutzfahrzeugmotors am Motorprüfstand (Standard=V₂O₅-TiO₂-Vollextrudat 300 cps, „turbulenter“ Kat = 200/400LS mit 150g/l V₂O₅-TiO₂ Beschichtung)

Die im Kraftwerksbau und an Nutzfahrzeugen entwickelte SCR-Technologie stellt somit die Basis für die zukünftige NO_x-Abgasnachbehandlung von Diesel PKWs und ggf. auch von mager laufenden Ottomotoren dar.

3.3 Die Partikelreduktion

Eine weitere Herausforderung stellt die Reduktion der Partikelemissionen dar.

Die Partikelfiltertechnik wurde bereits 1986 zum ersten Mal in Gestalt eines keramischen Wandfilters in den USA serienmäßig für Diesel-PKW eingesetzt. Das Filterprinzip bei diesem Typ entspricht während der frühen Beladungsphase einer Tiefenfiltration (vergl. Bild 9). Dabei lagern sich zunächst mit niedrigem Wirkungsgrad Partikel an den Wänden des inneren Porensystems ab.

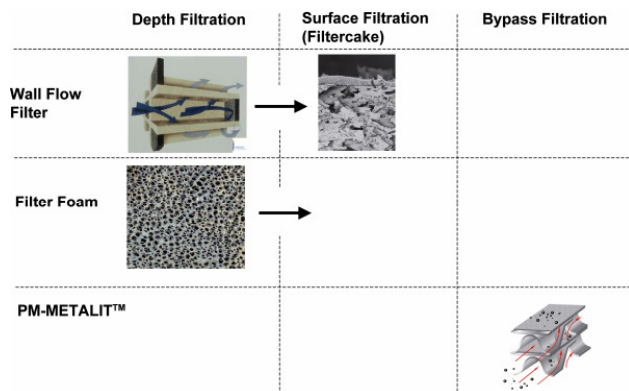


Bild 9: Gebräuchliche Partikelfiltertechnologien und Filterprinzipien [11]

Nach Füllung der oberflächennahen Poren bildet sich ein Filterkuchen in mittleren Schichtdicken von > 10 bis über 20 µm [12] aus.

Hohe Abscheideraten stellen sich somit bei diesen Filtersystemen erst bei beladenen Filteroberflächen ein (Filterkuchen). Die Russbelastung muss diskontinuierlich abgebrannt werden. Für zukünftige Dieselmotoren mit verbesserter Verbrennung wird sich ein deutlich geringerer massebezogener Rußausstoß ergeben. Dabei verlagern sich die Rußemissionen in den nicht sichtbaren Nanopartikelbereich (unter 400 nm). Ggf. wird dadurch eine Anpassung des o.g. Filterkonzepts erforderlich. Eine bekannte und bereits beim Nutzfahrzeug erfolgreich in Serie eingesetzte Lösung stellt der PM-METALITTM als Nebenstromfilter (vergl. Bild 9) dar [13]. Der PM-METALITTM filtert nach dem Funktionsprinzip eines Nebenstrom-Tiefenfilters und ist in der Lage, insbesondere Partikel kleiner 300 Nanometer mit hohem Wirkungsgrad abzuscheiden. Da diese Partikelklasse aber nur einen kleinen Anteil der anfallenden Partikelmasse darstellt, ist erklärlicher Weise der Filterwirkungsgrad bzgl. der Partikelmasse geringer als der Filterwirkungsgrad bzgl. der Partikelanzahl.

Dies sei am Beispiel einer PKW-Anwendung verdeutlicht: Als Testfahrzeug wurde ein Honda Accord 2,2 l eingesetzt. Anstelle des serienmäßigen Unterboden-Oxidationskatalysator wurde eine

Kombination aus einem Oxidationskatalysator und einem nachgeschalteten PM-Metaliten eingesetzt. Der PM-METALIT™ hatte ein relativ kleines Volumen von 1,23 l bei einer Länge von 130 mm. Die gravimetrische Reduktion der Partikelmasse im Vergleich zum Seriensystem betrug 40 %. Die in Bild 10 gezeigten Partikelanzahl Reduktion von 67 bis 80% in Konstantlastpunkten wurden mit Hilfe zweier SMPS Messgeräte mit vorgeschaltetem Rotationsverdünner unmittelbar vor und hinter PM-METALIT™ ermittelt.

Da die Konstruktion des PM-METALIT™ prinzipiell als eine Aneinanderreihung von kleinen Nebenstrom-Tiefenfiltern aufgefasst werden kann, ist es möglich, die Filtereffektivität mit der Trägerlänge zu steigern. Hierzu wurde an einem NFZ Motor ein PM-METALIT™-System mit Längen von 150 mm und 300 mm im modifizierten ESC Test vermessen. Um Einflüsse von Sulfaten oder Tröpfchen zu vermeiden, wurde die Messung mittels zweier PASS-Messgeräten durchgeführt. Dieses photoakustische Messprinzip erlaubt eine ausschließliche Bestimmung der Konzentration von Kohlenstoff. In Bild 11 sind entsprechend ermittelte Kohlenstoffumsatzraten von 35 - 55% beim kurzen Träger bzw. 60 – 80% beim 300 mm langen PM-Kat dargestellt.

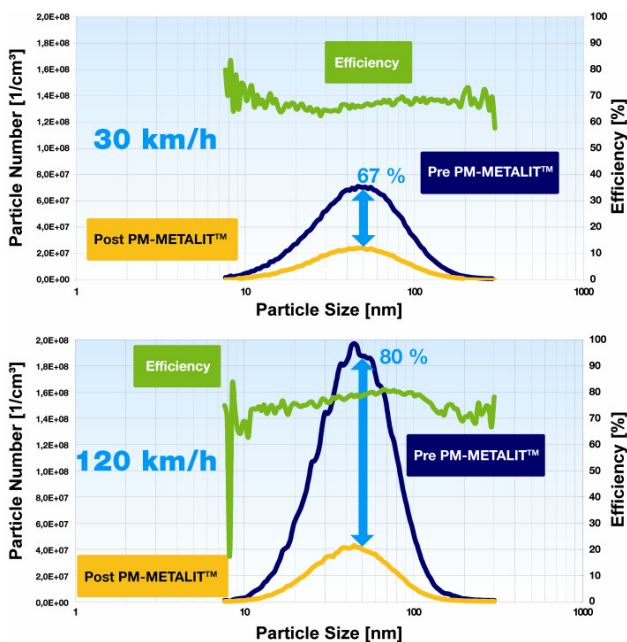


Bild 10: Partikelanzahlreduktion durch einen PM-Metaliten der Größe 110 x 130 mm, 1,23 l, in zwei verschiedenen Konstantpunkten (entsprechend 30 und 120 km/h)

Addiert man die Masse der an Partikel angelagerten Kohlenwasserstoffe und durch den vorgeschalteten Oxidationskat reduzierten Kohlenwasserstoffe hinzu, so können durchaus gravimetrische Reduktionen von 70 – 85% erreicht werden. Partikelanzahl-

messungen mit diesem System stehen noch aus. Allerdings wurden in der Vergangenheit bereits Messungen mit 150 mm langen Systemen an Nutzfahrzeugen durchgeführt, die Partikelanzahlreduktionen von 80 – 90 % ergaben [14].

Der Nebenstromfilter PM-METALIT™ stellt also eine wartungsfreie, passive Lösung zum Erreichen von zukünftigen Grenzwerten für PKW und NFZ dar. Zusätzlich zu den gesetzlich limitierten Emissionen rückte schließlich der Kraftstoffverbrauch in Gestalt über die Jahre steigender Betriebskosten sowie die CO₂-Emissionen stärker in den Vordergrund. Ein deutliches Zeichen dafür ist auch der stark gewachsene Marktanteil moderner Diesel-PKW. Hierdurch – und insbesondere auch aufgrund des aktuellen großen öffentlichen Interesses an den europäischen Feinstaub Immissionsrichtlinien wurde wiederum die Diskussion um neue, noch strengere Gesetzgebungen für Partikel angeregt. Die für 2010 erwarteten strengeren EU NO_x Immissionsrichtlinien werden voraussichtlich ebenfalls das öffentliche Interesse auf eine wirkungsvolle NO_x-Abgasnachbehandlung lenken.

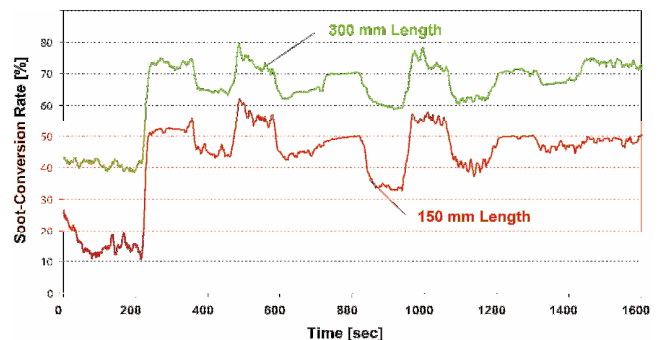


Bild 11: Kohlenstoffreduktion am Nutzfahrzeugmotor mittels PM-METALIT™ im modifizierten ESC-Zyklus (PM Ø 254 x 150 bzw. 300 mm, 10l-NFZ-Motor)

Denn analysiert man die Immissionsmessungen in den Städten, fällt auf, dass abgesehen von NO₂ die Konzentrationen aller Schadstoffe während der letzten Jahre stetig gesunken sind [15]. Daher kann heute schon damit gerechnet werden, dass die verschärfte europäische NO₂ - Richtlinie [15] in den Städten nicht eingehalten werden kann.

Somit ist also weiterhin mit stetig steigenden Anforderungen an Motoren und an die Qualität der Abgasnachbehandlung zu rechnen, um auch in Zukunft die Mobilität in den Industrieländern zu erhalten und der prognostizierten starken Zunahme von Emittenten in den Schwellenländern gerecht zu werden.

4. Anforderungen an die Abgasnachbehandlungstechnologie für neue Motoren und Brennverfahren

Die Anforderungen an das Katalysatorsystem werden zunächst durch die Motorrohmissionen, die angestrebten Abgasgrenzwerte und hieraus resultierend, durch die erforderliche Umsatzrate für die einzelnen Abgasbestandteile definiert. Weitere Faktoren sind wichtige Randbedingungen im Abgas wie Zusammensetzung und Temperatur. Darüber hinaus sind weitere gesetzliche Anforderungen wie Dauerhaltbarkeit und Diagnose zu beachten.

Unabhängig vom Antriebskonzept und der Applikation ist es generell ein übergeordnetes Ziel, ein möglichst kompaktes System mit geringen Bauraumanforderungen und niedrigen Kosten darzustellen.

Da die Entwicklung eines Katalysatorsystems mehrere Jahre in Anspruch nimmt, ist im Vorfeld eine langfristig angelegte Analyse der Anforderungen erforderlich. Eine solche Abschätzung kann nur auf Basis der Planungen von Emissionsgesetzen, Immissionsrichtlinien sowie Informationen aus der Motorenforschung erfolgen.

Als schärfster Emissionsgrenzwert wird auch in Zukunft voraussichtlich die kalifornische SULEV-Gesetzgebung bestehen bleiben, die keinen Unterschied zwischen Otto- und Dieselantrieb macht. Ein solcher Trend ist auch in Europa für EU-VI erkennbar und wird damit zukünftig auch weltweit als Maßstab dienen.

Daraus abgeleitet ergeben sich folgende Trends

Für den Ottomotor:

- In der Zukunft müssen wahrscheinlich auch Grenzwerte außerhalb des heutigen Testbereichs erfüllt werden.
- Aus Verbrauchsgründen werden Magerkonzepte eine größere Rolle spielen, damit wird eine NO_x Nachbehandlung erforderlich werden. Deshalb werden die Rohmissionen von HC und CO relativ ansteigen.
- Begleitet von der Diskussion über Nanopartikel wird unter Umständen eine gesetzlichen Limitierung der Partikelanzahl erfolgen, die dann technisch umgesetzt werden muss.
- Die Abgastemperatur wird vor allem im Magerbetrieb deutlich sinken, damit ergäben sich im Betrieb höhere Temperaturspannen.
- Ggf. wird ein Temperaturmanagement des Katalysatorsystems erforderlich werden.
- Da verstärkt Turbomotoren zum Einsatz kommen werden, wird das Thema Abgasgegendruck an Bedeutung gewinnen.

Für den Dieselmotor:

- Auch langfristig werden wie in den USA alle Antriebskonzepte bzgl. der Abgasgesetzgebung gleichgestellt werden. Aus diesem Grund wird selbst bei stark abgesenkten Rohmissionen eine katalytische Nachbehandlung der Stickoxide notwendig sein.
- Der Abgasrückführung und infolge dessen dem Temperaturmanagement im Brennraum wird eine stärkere Bedeutung zukommen, um die Langzeitstabilität der Rohmissionen zu garantieren.
- Um ein Verstopfen von Ventilen und Kühlern durch flüssige und feste Verbrennungsprodukte bei hohen Rückführraten zu verhindern, werden Katalysatoren im EGR-System notwendig sein.
- Höhere Abgasrückführraten werden zu noch niedrigeren Abgastemperaturen führen, womit ein Temperaturmanagement und/oder spezielle Niedertemperaturkatalysator Konzepte notwendig sein werden.
- Mit Erhöhung der Abgasrückführrate und Einführung von Brennverfahren wie HCCI werden die Rohmissionen von HC und CO ansteigen.
- Die Partikelrohmissionen werden weiter sinken, hierdurch werden (wie oben erwähnt) heutige Wand durchflossene Filtersysteme deutlich längere Zeiten benötigen, um den zur effektiven Abscheidung benötigten Filterkuchen aufzubauen; ggf. werden alternative Partikelfilter zur Reduktion der Partikelmasse und Anzahl notwendig sein.

Aus dieser Liste der Anforderungen lässt sich eine gewisse Konvergenz der Anforderungen an die Katalysatortechnik des Otto- und Dieselmotors ablesen, da beide Konzepte in der Zukunft zumindest in Teilbereichen des Kennfelds „mager“ laufen werden. Bleiben werden jedoch motorisch begründete Unterschiede im Hochlastbetrieb wie zum Beispiel die Spitzentemperaturen und die dadurch resultierenden maximalen Temperaturspannen, aus denen hohe Anforderungen sowohl für die Beschichtungstechnologie, an den Katalysatorträger und an das Canning resultieren.

Für diese Aufgabe stehen heute folgende Katalysatortechnologien zur Verfügung:

- Drei-Wege-Katalysatoren zur Konvertierung von HC, CO und NO_x im Lambda = 1 Betrieb
- Oxidationskatalysatoren zur Reduzierung von HC- und CO- Emissionen im „mageren“ Betriebsbereich.
- NO_x-Adsorber-Katalysatoren mit u.a. oben geschilderten Nachteilen
- SCR-Katalysatoren (Selective Catalytische Reduction) zur Verringerung der Stickoxidemissionen im mageren Betrieb.

- Partikelfilter unterschiedlicher Bauarten und Bauformen zur Reduktion der Partikelmasse

Zusätzlich erforderlich werden:

- katalytische Niedertemperaturbeschichtungen
- kompakte, hocheffektive Katalysatorträger mit integrierten Funktionen
- Wärmemanagementsysteme
- Spezielle Filter zur Filterung von Partikeln auch ohne Filterkuchen
- „Aktivierung“ des Abgas zur Verbesserung der Niedertemperatureffektivitäten

Im folgenden soll am Beispiel des Temperaturmanagements die oben skizzierte Aufgabe aufgegriffen und mögliche Lösungswege dargestellt werden.

5. Temperaturmanagement am Beispiel des Dieselmotors

Temperaturmanagement kann im einfachsten Fall die Reduktion von Wärmeverlusten innerhalb der Abgasanlage bedeuten, mit dem Ziel, die Betriebstemperatur des Katalysators anzuheben. Bild 12 zeigt am Beispiel eines Mittelklasse-Fahrzeugs die Anteile der Energieströme über der Längsachse des Abgassystems.

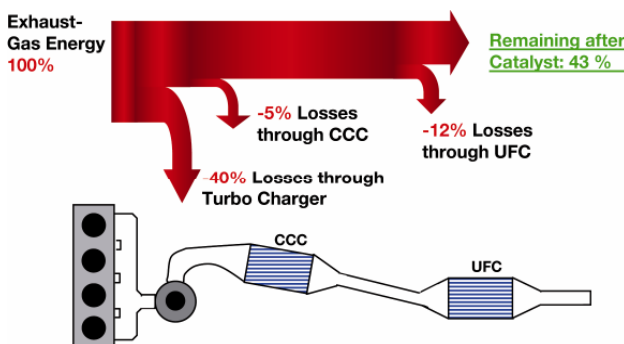


Bild 12: Energieströme bzw. Verluste im axialen Verlauf einer typischen Abgasanlage eines Mittelklassefahrzeugs mit Dieselantrieb [16]

Es ist sofort ersichtlich, dass schon der Turbolader die Temperatur des Abgases dramatisch reduziert. Im weiteren Verlauf ist die Art und Weise der Rohrführung stromabwärts der Turbine entscheidend. Rohrbögen und Umlenkungen verursachen weitere hohe Temperaturverluste durch vergleichsweise gute Wärmeübergänge vom Abgas an die Rohrwand. Um also möglichst hohe Temperaturen am Katalysatoreintritt zu erzielen, wäre es wünschenswert, den Katalysator vor der Turbine zu platzieren. Der Vorteil solcher Konzepte wurde schon von verschiedenen Autoren aufgezeigt

[16, 17]. Limitiert wird der Einsatz dieser sogenannten Vorturbolader-Kats durch den erheblich eingeschränkten Bauraum bei heutigen Konstruktionen von Krümmer und Turbinen, bei denen kein „vollwertiger“ Katalysator untergebracht werden kann. Sollte diese „ideale“ Lösung aus Platzgründen nicht realisierbar sein, bietet sich als nächstbeste Lösung eine Platzierung des Katalysators in gerader Linie unmittelbar hinter der Turbine an. Diese Möglichkeit wird im folgenden diskutiert.

5.1 Der Kompaktkatalysator

Da es bauraumtechnisch schwierig ist, bei einem an die Turbine angeflanschten, konventionell aufgebauten Katalysator die Abgasrohrführung hinab in den Unterboden darzustellen, wurde das Konzept des „Kompaktkatalysators“ entwickelt. Hierbei wird das Abgas nach Durchströmung des Katalysators um 180° umgelenkt und um den Katalysatormantel herum zurückgeführt (vgl. Abb. 13).

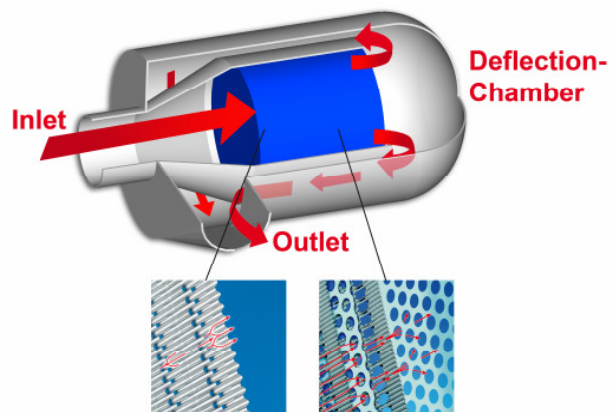


Bild 13: Schematischer Aufbau bzw. Konstruktion des Kompaktkatalysators

Da nun der Katalysator innerhalb des Kompaktkatcannings vom Abgas umspült wird, gibt es praktisch kein radiales Temperaturgefälle vom radialen Katalysatorzentrum zur Außenseite mehr. Die in Bild 14 gezeigten Messwerte bestätigen den Vorteil dieses Konzepts, der hier in Gestalt einer höheren Gastemperatur nach Kat erkennbar wird.

Ein Katalysator in konventionellem Canning ohne Isolation verliert vom Zentrum bis zum Außenmantel hin bis zu 25 K (bei einer Zentrumstemperatur von ca. 200°C). Damit zeigen die Randbezirke eines solchen Katalysators eine geringere katalytische Effektivität, während ein System entsprechend dem Kompaktkatalysator ein solches Gefälle weitestgehend zu verhindern in der Lage ist.

Natürlich muss auch der Druckverlust beachtet werden: Hierzu zeigt Bild 15 die einzelnen Beträge des Druckverlusts der Komponenten des Kompaktkats zu dessen Gesamtgedruck.

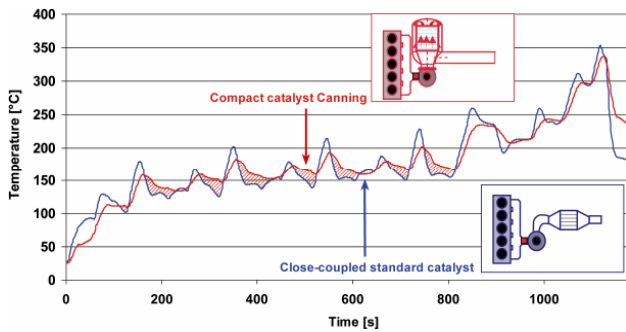


Bild 14: Temperaturmessergebnisse nach Katalysator; Vergleich Kompaktkatalysator / „Standard“-Canning ohne Isolation ($V_{Kat} = 1,02 \text{ l}$)

In der hier untersuchten Variante war eine konische Austrittsgeometrie eingebaut, sie verursacht, wie in Bild 15 zu erkennen ist, mehr als 30% des gesamten Gegendrucks des Systems und damit ähnlich viel wie der Katalysator selbst.

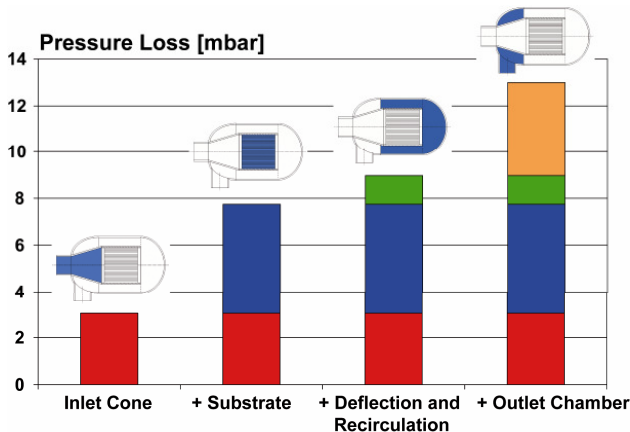


Bild 15: Einzelbeiträge der Komponenten zum Druckverlust des Kompaktkats (Strömungsprüfstand bei $150 \text{ m}^3/\text{h}$ (Norm) und 100°C , Katalysator $\varnothing 98,4 \times 80 \text{ mm}$ / 600 cpsi TS unbeschichtet)

Hier lag also Potential zur Optimierung, in deren Verlauf unterschiedliche Formen der Ausströmungskammer getestet wurden. Die Ergebnisse zeigten überraschenderweise deutliche Druckverlustvorteile für einen einfachen zylindrischen Abschluss mit konischem Rohrabschluss, während konisch geformte Hauben signifikant schlechter abschneiden (vergl. Bild 16). Ursache hierfür ist die bei diesem Design aufgrund des größeren Querschnitts signifikant geringere Strömungsgeschwindigkeit, die bei ausreichender Dimensionierung der Haube zu einer Umlenkung ohne Wandreibungsverluste führt. Abschließend wurden Vergleichsmessungen des Druckverlusts mit einer Serienkatalysatoranlage durchgeführt, deren Ergebnisse ebenfalls in Bild 16 dargestellt sind.

Auch eine noch so starke Verringerung des Wärmeverlusts im Bereich des Katalysators erlaubt es in vielen Fällen nicht, die Abgastemperatur auf Werte anzuheben, die zum Ablauf der katalytischen Umsetzung benötigt werden. Deshalb wird bei „extrem kalten“ Applikationen ein für die katalytische Reaktion benötigtes Temperaturniveau nie oder erst sehr spät im Abgastest erreicht.

In Kapitel 3 wurde ein Trend für Dieselmotoren aufgezeigt, der in Zukunft steigende HC- und CO-Rohemissionen erwarten lässt. Dieser Umstand lässt sich nutzen, um die thermodynamische Limitation durch niedrige Abgastemperaturen aufzuheben oder zu verringern. Wie im folgenden aufgezeigt ist, kann dies durch Nutzung der bei der Schadstoffkonvertierung freiwerdenden exothermen Energie geschehen.

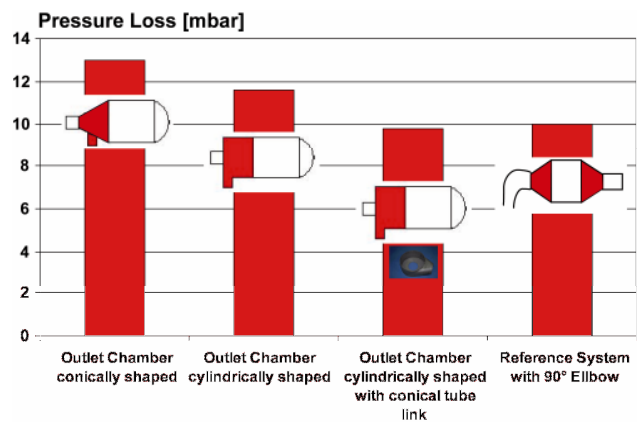


Bild 16: Druckverlustvergleich eines Standardkatalysatorsystems im Vergleich zum Kompaktkatalysator mit verschiedenen Austrittsgeometrien (Strömungsprüfstand bei 100°C , Katalysator $\varnothing 98,4 \times 80 \text{ mm}$ / 600 cpsi TS unbeschichtet)

5.2 Nutzung der exothermen Energie in einem Wärmetauschkatalysator

Das Konzept eines katalytisch beschichteten Wärmetauschers ist schon seit langem aus der chemischen Industrie bekannt. Aber auch in der Automobiltechnik hat man in der Vergangenheit bereits versucht, solche Konzepte zu nutzen [18]. Basis ist ein Gegenstromwärmetauscherprinzip. Die Skizze in Bild 17 verdeutlicht die Funktion.

Zur Veranschaulichung des Konzeptes genügt es vorerst, ein System zu betrachten, bei dem lediglich diejenigen Kanäle katalytisch beschichtet sind, in denen bereits die sogenannte „Rückströmung“ stattfindet. In diesem Fall wird die exotherme Energie, die innerhalb des Rückströmkanals an der katalytisch beschichteten Wand entsteht, durch dessen Wand geleitet und an das Abgas abgegeben, welches - stromaufwärts - vom Motor weggeleitet wird.

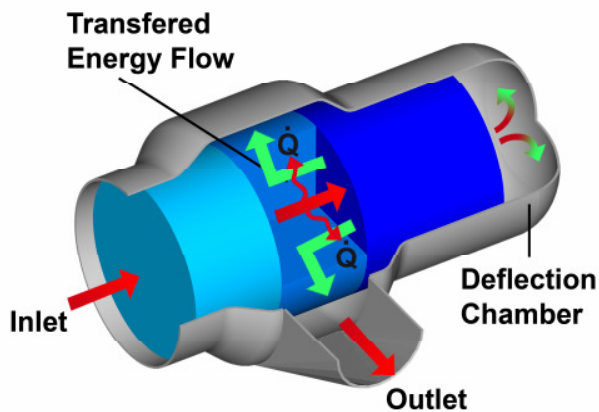


Bild 17: Prinzipieller Aufbau eines Wärmetauscherkatalysators

Damit erhöht sich die Gastemperatur auf der Eintrittsseite und in Folge wiederum die Wandtemperatur, wodurch die katalytische Reaktion beschleunigt wird. Der wesentliche Unterschied zu einem konventionellen Katalysatorträger besteht also hierbei in der Strömungs- bzw. Temperaturführung, die gewissermaßen eine örtliche Verlagerung der exothermen Energie vom Ort ihrer Entstehung hin zum „kalten“ Gaseintrittsbereich gestattet. Nur dort kann diese Wärme „gewinnbringend“ eingesetzt werden, um die Gastemperatur vor der Reaktionsfront zu erhöhen. Beim Standardträger hingegen werden bei der chem. Reaktion entsprechend der linearen Kanal- und Gasführung lediglich Bereiche aufgeheizt, die stromabwärts der Reaktionsfront liegen, wo also keine nennenswerte Umsatzverbesserung mehr zu erwarten ist.

Es ist also eine Frage der Höhe des Massenstroms, der Aktivität der Beschichtung und insbesondere der Höhe der HC- und CO- Konzentrationen sowie auch der Anordnung und Ausdehnung der beschichteten Zone, welches Temperaturniveau in der Reaktionszone erreicht werden kann. Aus diesem Grund erscheint es durchaus sinnvoll, auch Teile der Einströmkanäle zu beschichten.

Zur Verdeutlichung der Funktion sind in Bild 18 die Gastemperaturen vor und nach Katalysator bzw. in der Umlenkammer des Wärmetauschers dargestellt.

Während beim Standardkatalysator eine exotherme Temperaturerhöhung von ca. 48K bei den gegebenen Rohemissionen und Massenströmen errechnet wurde, vermochte ein volumengleiches Wärmetauschersystem eine Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Umlenkammer von ca. 302 K zu erzielen, etwa das sechsfache der Exotherme des Katalysators.

Zudem kann durch eine gezielte kurzfristige Anhebung der Rohemissionen kann die Temperatur aktiv beeinflusst werden. Der Vorteil des Systems liegt in der Erhöhung der Gastemperatur auf ein

Mehrfaches der Eintrittstemperatur mit Hilfe der durch das Abgas eingebrachten chemischen Energie.

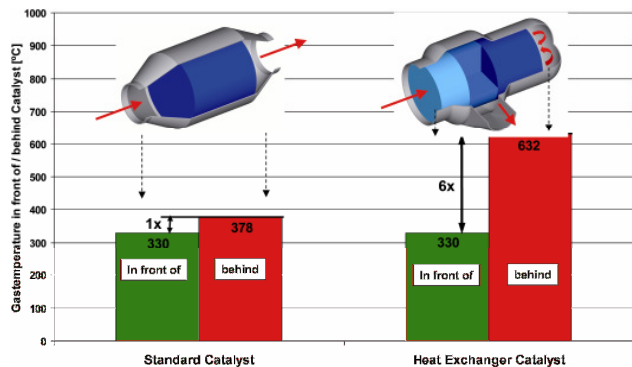


Bild 18: Vergleich des theoretisch machbaren Temperaturanstiegs innerhalb eines Standard-Kats und eines Wärmetauscherkats (HC-Konzentration = 700 ppm, Massenstrom = 375 kg/h, Umsatzrate = 97%)

6. Zusammenfassung

War bis vor wenigen Jahren der stöchiometrisch betriebene Ottomotor mit seiner ausgereiften Abgasnachbehandlung als vorbildlich angesehen, so setzt der PKW Dieselmotor mit den Partikelfiltern neue Maßstäbe. Hierzu tragen auch die US 2007 Heavy Duty Truck Konzepte bei, die voraussichtlich Partikelfilter verwenden werden. Auch MAN hat mit dem PM-Kat schon bei EU4 Maßstäbe bei der Filtration von Feinstpartikeln gesetzt.

Fortschritte sind in ferner Zukunft bei weiter verbesserten Diesel-Verbrennungsverfahren zu erwarten. Die Literatur [9] zeigt, dass das ausgestoßene Partikelgewicht in den vergangenen Jahren deutlich abnahm und gleichzeitig auch die Partikelanzahl sank. Demnach kann erwartet werden, dass Fortschritte in der Entwicklung der Dieselmotoren, den Partikelaußstoß – wie beim Ottomotor – in den nicht sichtbaren Bereich verlagert.

Da die Auswirkungen von Feinstpartikeln als kritisch angesehen werden, kann möglicherweise einer gesetzlichen Limitierung der Partikelanzahl nur dann entgegengewirkt werden, wenn Partikelfiltersysteme für Diesel eingeführt werden, welche die Partikelanzahl konzeptbedingt über den gesamten Größenverteilungsbereich der Nonopartikel wirksam reduzieren. Dass dies mit dem PM-METALIT™ prinzipiell möglich ist, wurde gezeigt. Ggf. kann dies in Kombination mit einem wanddurchströmten Partikelfilter erfolgen.

In jedem Fall wird der Diesel in Europa bei flächendeckender Einführung von Partikelfiltern nach dem Jahr 2010 auch zum Maßstab für Ottomotoren werden.

Die De-NOx-Technologie SCR wird serienmäßig erfolgreich in europäischen NKW eingesetzt. Daraus

technisch abgeleitet, werden erste Diesel PKW mit SCR in den USA für 2008 erwartet und danach in geringer Stückzahl auch in Europa.

Hinsichtlich niedrigster NO_x-Emissionen wird in 2008 der Diesel-NKW und -PKW erneut zum Benchmark für den Ottomotor werden.

Magere Ottomotoren erfordern nach heutigem Kenntnisstand eine NO_x-Nachbehandlung, so dass sich nach erfolgreicher SCR-Einführung bei Diesel-PKW sich eine Adaption für magere Ottomotoren anböte.

Entsprechend kann gesagt werden, dass beide Motorenkonzepte voraussichtlich sämtliche rohemissionsenkende Komponenten in ähnlicher Weise verwenden werden (Hochdruck BD-Einspritzung, ATL, AGR, etc.). Unter der Voraussetzung, dass beide Verbrennungsverfahren aus Kosten- und CO₂-Emissionsgründen mager sein werden, werden sich auch die Abgasnachbehandlungskonzepte stark aneinander annähern.

Zur Kompensation der Zusatzkosten ist bei beiden Motorenkonzepten eine wesentliche Verbesserung der katalytischen Effektivität und der Wirksamkeit des Partikelfilters anzustreben. Dabei werden „turbulente“ Wärme- und Stoffübergänge, Wärmemanagement und optimale Filtrationsmechanismen eine wesentliche Rolle spielen.

Ende der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurden von Emitec Simulationen durchgeführt, die die prinzipielle Fähigkeit von Ottomotoren zur Reinigung der Umgebungsluft bei Verwendung von Katalysatoren mit entsprechend hohen Umsatzraten aufzeigten. Diese Rechnung bestätigten sich viel später mit der Einführung der SULEV-Gesetzgebung und der Existenz entsprechend aktiver Katalysatoren.

In ähnlicher Weise ist es bei den Dieselfahrzeugen zu erwarten, dass zukünftig bei der Anwendung von Technologien wie SCR und Partikelfiltern Wirkungsgrade erreicht werden, die eine Reinigung der Ansaugluft bezüglich der entsprechenden emittierten Komponenten erlauben werden.

7. Literaturverzeichnis

- [1] „Draft Report on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on type approval of motor vehicles with respect to emissions and on access to vehicle repair information, amending Directive 72/306/EEC“; M. Groote; Committee on the Environment, Public Health and Food Safety, 5/2005
- [2] “Particle Measurement Programme, Update and Report on First Results: Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise“; J. Andersson; Ricardo Consulting Engineers; P. Dilara; DG JRC, Ispra; 9th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, 8/2005
- [3] „Homogene dieselmotorische Verbrennung zur Darstellung niedrigster Emissionen“; J.O. Stein, M. Dürnholz, F. Wirbeleit, C. Kopp, C. Benz; Robert Bosch GmbH; 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2004, Aachen
- [4] “Close-coupled Catalytic Converters for Compliance with LEV/ULEV and EGIII Legislation – Influence of Support Material, Cell Density and Mass on Emission Results“; B. Pfalzgraf, M. Rieger, G. Ottowitz; AUDI AG; SAE960261
- [5] „Novel Emission Technologies with Emphasis on Catalyst Cold Start Improvements Status Report on VW-Pierburg Burner/Catalyst Systems“, P. Öser, E. Mueller, G. Härtel; Volkswagen AG; A. Schürfeld; Pierburg GmbH; SAE 940474
- [6] „Innovative Abgasnachbehandlungskonzepte mit NOx-Speicherkatalysatoren für die strahlgeführte Benzindirekteinspritzung“; W. Müller, U. Göbel, T. Kreuzer, J. Leyrer, A. Matutt; Umicore AG & Co. KG; 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 2006, Wien
- [7] „Strategien für Nutzfahrzeugdieselmotoren zur Erfüllung der weltweiten Abgasgesetze“; W. Müller; DaimlerChrysler AG; 4. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, 2006, Ludwigsburg
- [8] „Der weltweit erste doppel aufgeladene Otto-Direkt-Einspritzmotor von Volkswagen“; H. Middendorf, R. Krebs, R. Szengel, E. Pott, M. Fleiß, D. Hagelstein; Volkswagen AG; 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2005, Aachen
- [9] „Zukünftige Anforderungen Abgasemissionen Diesel“; K.-P. Schindler; Volkswagen AG; FAD-Konferenz, 2003, Dresden
- [10] „Hochleistungs-SCR-Katalysatorsystem: Garant für niedrigste NOx-Emission“; E. Jacob, R. Müller, A. Scheeder; Emitec GmbH; T. Cartus, R. Dreisbach; AVL List GmbH; H.-P. Mai; Roth-Technik Austria GmbH; M. Paulus, J. Spengler; Süd-Chemie AG; 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 2006, Wien
- [11] „Discrete Particle Modelling of Diesel Soot Filtration“; M. Stewart; Pacific Northwest Research Laboratory
- [12] „Characterization of High Porosity SiC-DPF“; K. Ohno, N. Taoka, T. Furuta, A. Kudo, T. Komori; IBIDEN Co., LTD; SAE 2002-01-0325
- [13] „Emissionslimits zukünftiger Nfz-Motoren: Balanceakt zwischen Möglichkeit und Nutzen“; E. Jacob; MAN Nutzfahrzeuge; 26. Internationales Wiener Motorensymposium, 2005, Wien
- [14] „Ein Abgasnachbehandlungssystem für Euro IV bei Nutzfahrzeugmotoren“; MAN Nutzfahrzeuge; MTZ 6/2005
- [15] „Legal Framework and Future Requirements“; A. Friedrich; UBA Dessau; 3rd International CTI Conference, 2006, München
- [16] “Pre-Turbocharger Catalyst – Fast catalyst light-off evaluation“; B. Carberry, G. Grasi; Ford Motor Company; S. Guerin; PSA; F. Jayat, R. Konieczny; Emitec GmbH; SAE 2005-01-2142
- [17] „Emission and performance assessment of an advanced diesel pre-turbo catalyst system designed for a passenger car diesel engine application“; A. Sanguedolce, G. Boretto, G. Basso, G. Cipolla; General Motors Powertrain Europe; A. Gioannini, M. Tonetti; Fiat Powertrain Technologies – Research & Technology, Italy; 4. Internationales Forum Abgas- und Partikelemissionen, 2006, Ludwigsburg
- [18] „Cold Start Hydrocarbon Emissions Control“; P.L. Burk, J.K. Hochmuth, D.R. Anderson, S. Sung, S.J. Tauster, C.O. Tolentino, J. Rogalo, G. Miles, M. Niejako; Engelhard Corp.; A. Punke, U. Dahle; Engelhard Technologies GmbH; SAE 950410