

# **Ergebnisse einer optimalen Auslegung von Hardware und Motorsteuerungsfunktion für den Metallkatalysator mit innerem Strömungsausgleich**

## *Results of an optimal Design of Hardware and Engine control functions for Metal-Catalysts with internal flow equalization*

Dr.-Ing. G. **Rösel**, Dr.-Ing. P. **Rodatz**, Dipl.-Ing. (FH) J. **Neugärtner**

Siemens AG, Siemens VDO Automotive, Regensburg

Dipl.-Ing. (FH) R. **Brück**, Dipl.-Ing. (FH) K. **Althöfer**

Emitec, Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH

### **Zusammenfassung**

Ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt auf dem Gebiet der Abgasnachbehandlung für Ottomotoren besteht in der Optimierung vorhandener Drei-Wege-Katalysatorsysteme in Bezug auf Kosten und Leistungsfähigkeit. Dies gilt besonders unter dem Aspekt stetig steigender Anforderungen, wie sie z.B. für die USA mit ULEV LEV II gelten bzw. für Europa mit der EU 5 Einführung und ferner für die in Diskussion befindlichen EU 6 Grenzwerte zu erwarten sind.

Diese Aufgabenstellung ist in technischem und wirtschaftlichem Sinne nur mit Erfolg zu lösen, wenn bei der Auslegung der Katalysatoren sowie der Wahl der Regelungskonzepte ein konsequenter Systemansatz gewählt wird.

Für die Katalysatorauslegung werden hier stellvertretend die Wahl der richtigen Trägertechnologie und Zelldichte sowie die Auswahl einer für Regelung und Diagnose geeigneten Beschichtung als Designkriterien genannt. Im Vergleich zum Keramik-Katalysator ergibt sich für den Metallträgerkatalysator bei einer leicht zu fertigenden Fassung für die Lambdasonde im Katalysator ein signifikanter Emissionsvorteil durch die Schnellstartfähigkeit der Emissions-Regelungen. Hervorgerufen durch die Eigenschaften des inneren Strömungsausgleichs im Metallträgerkatalysator ergibt sich zusätzlich eine Emissionsstabilisierung der NO<sub>x</sub>-Emission, welche vorrangig bei warmem Motor wirksam wird. Diese Vorzüge des Katalysatorsystems lassen sich im Serienbetrieb nur konsequent umsetzen, wenn dafür optimierte Regel- und Diagnose-Funktionen, wie z.B. eine neuartige Funktion zum Ausgleich der Gemischtoleranz bei kaltem Motor, in Verbindung mit optimierten Applikationsdaten zum Einsatz kommen. Neben diesen Ergebnissen werden im Vortrag Vorzüge des Systems dargestellt, die sich aus der vorteilhaften Ausnutzung des inneren Strömungsausgleiches im Katalysator ergeben und somit eine

erhebliche Verbesserung der Sekundärluftdiagnose mittels Systemlambdasonde bedingen können.

## **Summary**

The optimization of the known three-way catalyst technology with regards to costs and performance is an essential trend of further developments in the area of exhaust gas after-treatment for internal combustion engines. This is additionally influenced by the steadily rising legal requirements, like ULEV LEV II for US as well as the introduction of the European legislation EU 5 and those discussed for the EU 6 limits.

This set of objectives is to be solved successfully in technical and economic sense, only if a consequent system approach is applied for the design of the catalyst as well as for the definition of the engine control and diagnostic functions.

The choice of the appropriate substrate technology and cell density and furthermore the selection of the catalyst coating according to control and diagnostic requirements should be mentioned as representatives of the catalyst design criterions. Metal substrate catalysts are advantageous due to easily manufacturable sensor mounting position inside the catalyst which leads to a fast activation of the emission control function with significant emission reductions. The Internal flow equalization in metal substrate catalysts generates furthermore a constructively conditioned stabilization of the NO<sub>x</sub> emissions especially for warm engine operation. These advantages of the catalyst system can only be applied in serial volume production, if the optimized emission control- and diagnostic function, as for example a new function balancing the air-fuel ratio mixture tolerances during cold engine operation, is used in connection with an optimized data set for the application. In addition to these benefits system advantages will be discussed which use the benefits of the catalyst with internal flow equalization for the secondary air diagnosis based on the system oxygen sensor.

## **1 Innerer Strömungsausgleich zur Vergleichmäßigung des Lambdasignals**

Motornahe Anwendungen weisen hinter dem Krümmer meist ungünstige, zylinder-spezifische Anströmung auf, die erst nach längeren Ausgleichsstrecken vollständig homogenisiert sind.

Da sich die Vor-Katalysator Strömungsverteilung bei keramischen oder metallischen Katalysatoren mit geschlossenen Kanälen über die Trägerlänge nicht verändert, kann dies im Extremfall dazu führen, dass eine im Krümmer positionierte Vor-Kat-Sonde (Regelsonde) mit einem idealen Gemisch beaufschlagt wird, während die Nach-Kat-Sonde (Trimmsonde) nur das Abgas eines oder einzelner Zylinder(s) beaufschlagt werden.

Um ein optimales Kraftstoff-Luft-Verhältnis und damit eine optimale Effektivität des Katalysators zu gewährleisten, ist es wünschenswert, dass die Lambdasonde stets ein repräsentatives Abgasgemisch aller Zylinder detektiert.

Bei der Weiterentwicklung der Katalysatorträger von geschlossenen Zellstrukturen mit laminarer Kanalströmung hin zu strukturierten Trägern mit radial offenen Kanälen und „turbulentem“ äußeren Stofftransport konnten bei metallischen Trägern hier entscheidende Fortschritte erzielt werden. Der gewünschte Strömungsausgleich wird bei diesen Trägern mit Hilfe von perforierten Folien realisiert, wodurch die volumen-spezifische Effektivität erhöht wird und – wie nachfolgend erläutert – sich die Systemkosten minimieren [1].

Bei diesem so genannten PE-Design (Abbildung 1) versteht man sowohl die Glatt- als auch die Welllagen mit 8mm großen Löchern.



Abbildung 1: PE-Folien und im Träger gebildete Kavernen

Die unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit und die damit verbundenen Druckdifferenzen benachbarter Kanäle führen dazu, dass sich lokale Ausgleichsströmungen ausbilden. Entscheidender sind jedoch die in der Matrix befindlichen Kavernen, die während des Trägerherstellprozesses entstehen. Kanalströmungen, die in diese offenen Matrixbereiche gelangen, erzeugen beim Ausströmen aus dem Kanal Turbulenzen, die eine Abgasmischung bewirken. Der Einströmwiderstand (Kaverne → abströmende Kanäle) erzeugt außerdem einen Staudruck, der einen Ausgleich der unterschiedlichen Abgaskonzentration weiter positiv verstärkt. Die in den Träger eintretende Strömung durchströmt über die Katalysatorlänge mehrere dieser Kavernen, was eine homogene Strömungs- und Emissionsverteilung zur Folge hat (Abbildung 2). Der Gegendruck des Trägers wird durch diese lokalen Effekte nicht negativ beeinflusst. Im Gegenteil: Die zusätzlichen Aus- und Einströmwiderstände vom Kanal in die Kavernen hinein und aus ihnen heraus, werden durch den bedeutend größeren Kanaldruckverlust im Bereich des Lochs überkompensiert. Die Träger mit PE-Design weisen daher einen geringeren Abgasgegendruck auf, als das entsprechende Standarddesign. Allerdings ist es notwendig, die Beschichtung auf die strukturierten Träger anzupassen. Die Washcoatdicke des PE-Katalysators sollte dem des Standard Katalysators ent-

sprechen. Eine Anpassung der Beschichtungsmenge auf die reduzierte PE-Oberfläche wird erforderlich.

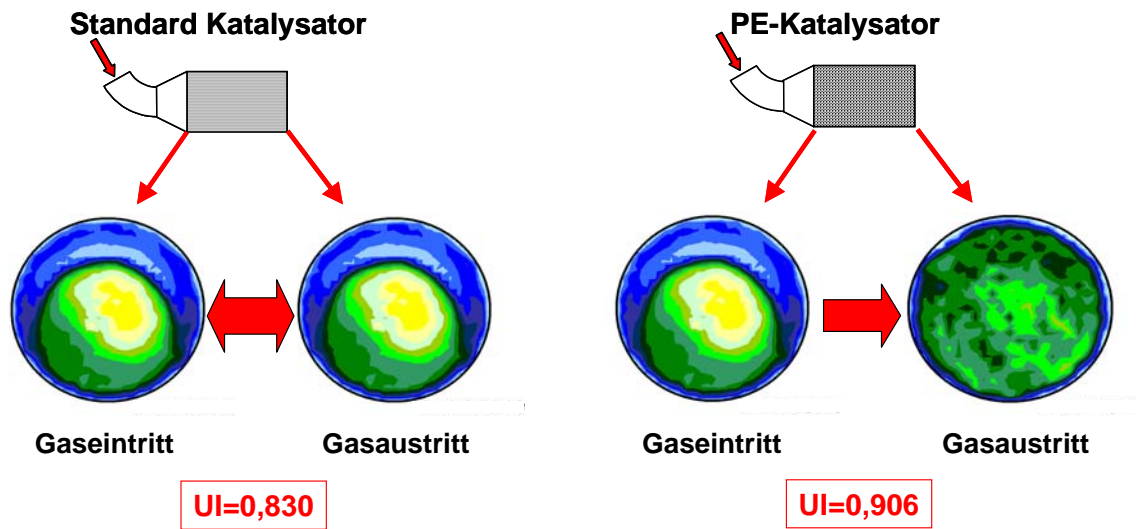


Abbildung 2: Strömungsverteilung Vor-/Nach-Kat mit geschlossenen Kanälen

## 2 Lambdasondenkat™ und PE-Design - Ein optimiertes System

In herkömmlichen Katalysatorsystemen wird die OBD-Sonde hinter dem Katalysator oder zwischen den beiden Monolithen eines 2-Katalysator-Systems positioniert. In dem Spalt zwischen Vor- und Hauptkatalysator kann ein Konzentrationsausgleich stattfinden, der es der Sonde ermöglicht, vom Abgasgemisch aller Zylinder beaufschlagt zu werden.

### 2.1 Bestehende Systemvorteile

Durch den inneren Strömungs- und Konzentrationsausgleich im PE-Design ist es nun nicht mehr erforderlich, das Katalysatorvolumen auf zwei Träger aufzuteilen. Die Lambdasonde kann stattdessen an beliebiger Position in den Katalysator integriert werden. Dafür werden ähnlich wie beim PE-Design Löcher in die Glatt- und Welllage gestanzt, die durch den Wickelprozess eine definierte Aussparung ergeben, in die die Sonde eingeführt werden kann [2].

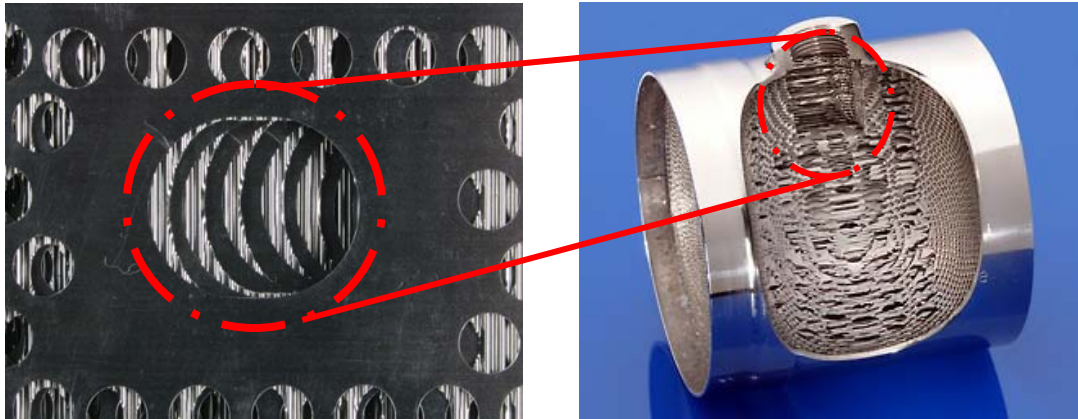


Abbildung 3: Vorgestanzte Folien und im Träger gebildete  
Lambdasondenausparung

Bereits bei Betrachtung der Konstruktion weist die Kombination der beiden Designs mehrere Vorteile auf (Abbildung 7):

- Die Lambdasonde kann an beliebiger Position integriert werden.
- Die Einbaulänge des Katalysatorsystems kann reduziert werden.
- Alternativ kann bei gleichbleibender Einbaulänge das Katalysatorvolumen vergrößert werden.
- Durch reduziertes Handling bei der Trägerherstellung sowie im Beschichtungs- und Canningprozess treten geringere Systemkosten auf.

Vorteile, wie der Schutz der integrierten Sonden vor zerstörenden und/oder alternden äußeren Einflüssen, sind zusätzlich nachweisbar. Das Regelverhalten wird dadurch verbessert und die Schadstoffreduktion erhöht. Die Vorteile sind im Einzelnen:

- Die Matrix schützt die Regelsonde in der Kaltstartphase vor Wassertropfen, die sonst die Schutzummantelung durchdringen und die Sonde zerstören können [2]
- Die Sonde befindet sich in einer sich schnell aufheizenden Umgebung, was die Heizzeit des Sensors verkürzt bzw. die Möglichkeit bietet, den Regelkreis früher zu schließen [3]; [4]
- Die Matrix schützt die Regelsonde vor Vergiftung durch z.B. Öltropfen, die das Alterungsverhalten der Sonde verschlechtern [2]

## 2.2 Einfluss von Trägerdesign und Beschichtung auf die Emissionsergebnisse

Während der Trägerentwicklung wurden Emissionsmessungen an Trägern mit PE-Design durchgeführt und die Ergebnisse mit denen eines Standardträgers verglichen. Bei den ersten Tests wurde die Washcoatmasse konstant gehalten, sodass aufgrund der geringeren Oberfläche des PE-Designs die Washcoatdicke anstieg. Abbildung 4 zeigt die Emissionsergebnisse eines Standardträgers der Größe  $\text{Ø}105 \times 120 \text{mm}$  mit 300cps im Vergleich zu einem gleichgroßen Träger mit PE-Design. Beide Systeme wurden am Motorprüfstand gealtert. Nach Alterung zeigt der Träger mit PE-Design sowohl beim HC und CO als auch beim NOx bessere Konvertierungsraten.

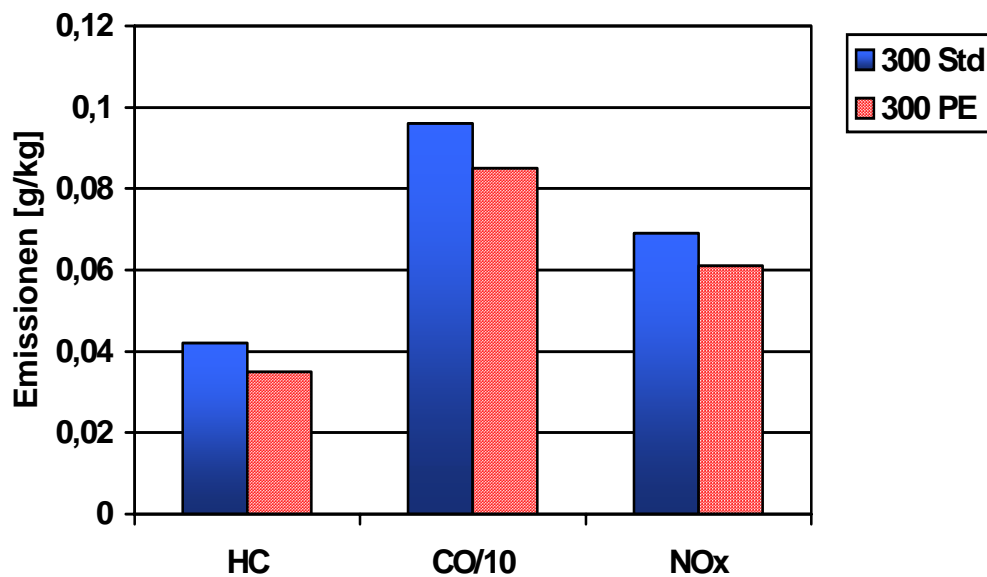


Abbildung 4: Emissionen mit verschiedenen Trägerstrukturen im EUDC-Zyklus ( $\varnothing 105 \times 120 \text{ mm}$ ; 300 cpsi;  $40 \mu\text{m}$ ;  $150 \text{ g/ft}^3$  1:27:2; gealtert)

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass das PE-Design aufgrund der sich im Träger wiederholenden Strömungen in und aus den PE-Kavernen und damit einem erhöhten Stofftransport die geringere katalytische Oberfläche kompensieren kann. Ein zusätzlicher Vorteil wird durch den inneren Strömungsausgleich, der zu einer besseren Ausnutzung des gesamten Volumens führt, erreicht.

Wie zuvor schon angedeutet, kommt der Beschichtung bei Katalysatoren mit PE-Design eine besondere Bedeutung zu. Durch die 8mm-Perforierung reduziert sich die geometrische Oberfläche des Trägers um ca. 40%. Wird auf die Matrixoberfläche eine herkömmliche Beschichtungsmenge (angepasst auf Metallträger mit geschlossenen Kanälen) aufgebracht, verteilt sich das Volumen auf diese kleinere Fläche, was zu erhöhten Schichtdicken und damit zu einem erhöhten Katalysator-Druckverlust führt.

Um den Nachteil im Druckverlust zu verhindern, muss die Washcoatmenge für PE-Träger entsprechend der kleineren Fläche reduziert werden. Abbildung 5 vergleicht die Emissionsergebnisse eines Standardkatalysators mit denen von PE-Katalysatoren mit 80% bzw. 60% der Standard-Washcoatmasse. Die Edelmetallmenge wurde in allen Fällen konstant gehalten. Es zeigt sich, dass der Katalysator mit der um 40% verringerten Washcoatmasse eine verringerte Effektivität aufweist.

Analysiert man die Ursache, stellt man fest, dass bei der Reduktion der Washcoatmasse auch die Sauerstoffspeicherkapazität entsprechend verringert wurde. Treten nun im dynamischen Testbetrieb Lambdaschwankungen auf, ist die Beschichtung nicht mehr in der Lage die notwendigen Sauerstoffmengen zwischen zu speichern und es kommt zu einer Verringerung der Umsatzraten. Auf das PE-Design angepasste Beschichtungen berücksichtigen diese Besonderheit und stellen eine erhöhte washcoatspezifische Sauerstoffspeicherkapazität zur Verfügung.

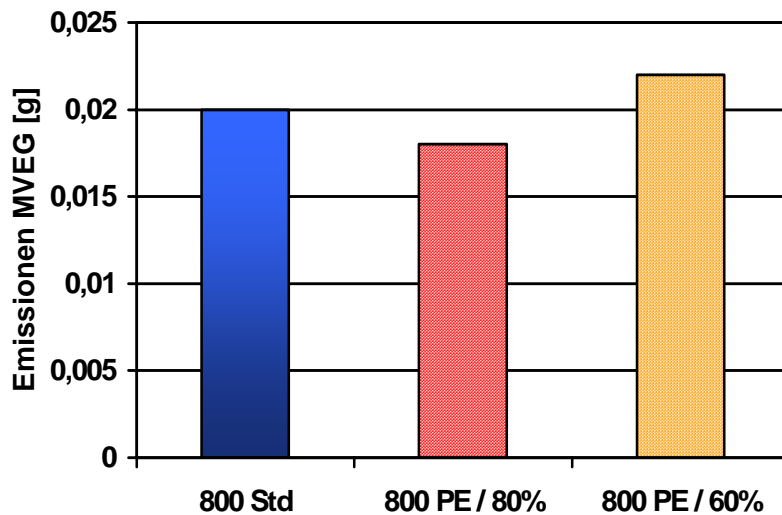
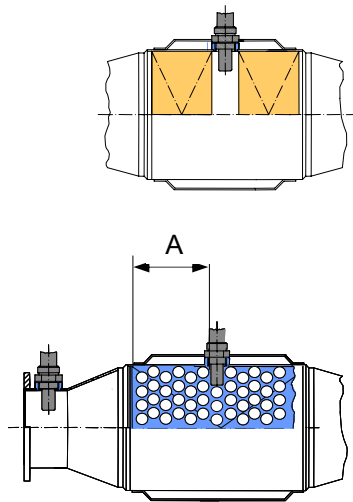


Abbildung 5: HC-Emissionen (Beutel 2) mit reduzierten Washcoatmengen

Das bedeutet faktisch jedoch einen neuen Washcoat mit entsprechend geändertem Verhalten. Beispielhaft soll hier auf die in jeden Katalysator ablaufenden Reaktionen mit Wasserstoff hingewiesen werden. Üblicherweise werden die motorischen Wasserstoffemissionen in einem Katalysator zunächst reduziert und anschließend bildet sich vor allem in den Fettphasen neuer Wasserstoff. Aufgrund der Querempfindlichkeit der Lambdasonde mit Wasserstoff zeigt die Nach-Kat-Sonde je nach Wasserstoffkonzentration einen anderen Lambdamittelwert an. Dieser Wert kann sich nun, abhängig von den Motorsteuerungsparametern und der Wasserstoffproduktion im Katalysator, in Richtung fett oder mager verschieben. Wichtig ist also, dass beim Einsatz von „turbulenten“ Katalysatoren mit neu entwickelten Beschichtungen auch die Applikation im Motorsteuergerät entsprechend angepasst wird. Darüber hinaus kann man sich die Vorteile des internen Strömungs- und Konzentrationsausgleichs zu Nutze machen, um eine bessere Stabilität der Lambdaregelung zu erreichen.

### 3 Beschreibung des Prüfstandsbaus

Um die beschriebenen Vorteile nachzuweisen, wurden FTP-75 Messungen an einem sind Eingänge für NiCrNi und Pt100 Temperaturfühler, verschiedenste Druckmessstellen, analoge Eingänge 0..10VDC sowie serielle Schnittstellen vorhanden. dynamischen Motorprüfstand für Emissionsmessungen durchgeführt. Der vollautomatisierte Prüfstand ist mit einer Drehstrom-Asynchron-Maschine ausgerüstet und erlaubt so einen 4-Quadrantenbetrieb. Um eine hochdynamische Motor- und Bremsenregelung zu gewährleisten, ist in das Prüfstandsautomatisierungssystem CATS<sub>NT</sub> ein Echtzeitsteuer- und Regelsystem auf Basis einer dSpace-/ Matlab-Applikation integriert. Der Prüfstand ist voll klimatisiert und ermöglicht eine Regelung der Verbrennungslufttemperatur, -feuchte, -menge, Raumlufttemperatur, Abluft bzw. Frischluftzufuhr und Kraftstoffkonditionierung. Das Automatisierungssystem CATS<sub>NT</sub> übernimmt alle Aufgaben der Prozesssteuerung, Überwachung, Messung, Visualisierung, Fahrprofilbearbeitung, Grenzwertüberwachung, Betriebsdatenlogbuch, Datenspeicherung, Datenkommunikation und z.T. auch Regelung. Das System arbeitet mit einem Systemtakt von 100Hz. Zur Messdatenerfassung



Trägerdesign	Sondenposition (Maß A)	Beschichtung
2 x Keramik 4x3“, 600cps, 4,3 mil (=2 x Ø101,6 x 76,2mm; 600cps; 110µm)	-	100 g/ft <sup>3</sup> 1:13:1
Ø 98,4 x 150mm; 600cps ; 40µm ; LA-PE	65 mm	PE optimiert 60 g/ft <sup>3</sup> 0:9:1
	90 mm	

Abbildung 6: Katalysatordesigns – Serien- (oben) und Versuchsapplikation (unten)

Für den Versuch wurde ein Otto-Motor mit Direkteinspritzung (V6, 3,2l) verwendet. Die Katalysatoren mit einer angepassten PE-Beschichtung ermöglichen die Aufnahme einer integrierten Sonden an den Positionen 65 und 90mm hinter dem Gaseintritt des Katalysators (Abbildung 6 und 7).

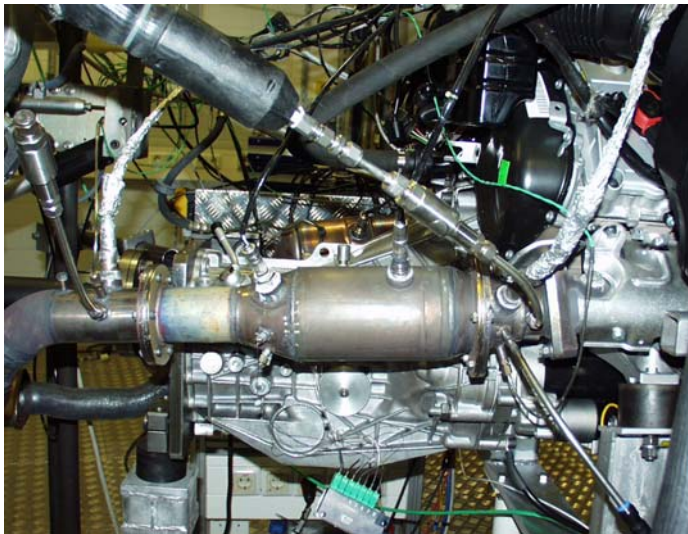


Abbildung 7: Versuchsaufbau – Lambda-PE-Katalysator am DI-V6 Motor 3,2l

#### 4 Ergebnisse des optimierten Systems – Lambdasondenkatalysator™ mit PE Design

##### 4.1 Ergebnisse der Emissionsverbesserung für den warmem Motorbetrieb

Für den warmen Motorbetrieb, d.h. Phase 2 im FTP 75 Test, gibt es bei gegebener Katalysatoralterung drei wesentliche Ursachen, die zu Toleranzen der Nach-Katalysator-Emissionen führen. Diese sind

1. die zylinderindividuellen Unterschiede des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses, die sowohl durch zylinderbezogen unterschiedliche Liefergrade als auch durch die

- Unterschiede der injizierten Kraftstoffmasse bedingt durch die Einzel-Toleranz der Injektoren hervorgerufen werden,
2. die Schädigung des Katalysators im horizontalen Querschnitt (vorrangig NOx-relevant) sowie
  3. Instationär fehlerhafte Gemischanpassung.

Die unter 1. aufgeführte Einflussgröße gewinnt besonders an Gewicht, wenn die für Niedrigst-Emissionskonzepte heute übliche motornahe Position des ersten Katalysators angewandt wird, da hier auf Grund der geringen Strecke keine vollständige Durchmischung der Abgaspakete der einzelnen Zylinder bis zum Erreichen des Katalysators stattfinden kann. Diese wird bei Katalysatoren ohne internen Strömungsausgleich in den Kanälen des Katalysators geführt. Dadurch wird das Messsignal der Trimmsonde negativ beeinflusst. Im Folgenden soll die Auswirkung dieses Verhaltens näher untersucht werden. Die unter Punkt 2 und 3 aufgeführten Themen werden nicht weiter beleuchtet, da sie keine Relevanz für die Aufgabenstellung dieses Berichtes haben.

Zum Nachweis der Auswirkungen der hier betrachteten Einflussgröße auf die Toleranz der Emissionen wurde am Versuchsmotor folgendes Experiment ausgeführt. Eine Bank des Sechszylinder Versuchsmotors wurde mit den Mustern  $\{\lambda_1/\lambda_2/\lambda_3\} = 1.00, 1.00, 1.00$   $\{\lambda_1/\lambda_2/\lambda_3\} = 0.93, 1.07, 1.00$  bzw.  $\{\lambda_1/\lambda_2/\lambda_3\} = 1.07, 0.93, 1.00$  beaufschlagt. Die gewählten Werte der Abweichungen des Kraftstoff-Luftverhältnisses von  $\pm 7\%$  sollen die maximal möglichen Toleranz simulieren, die durch zylinderbezogen unterschiedliche Liefergrade als auch durch die Unterschiede der injizierten Kraftstoffmasse hervorgerufen werden können. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bzgl. der Emissionen der Phase 2 des FTP-Tests sowie der Trimm-Reglerwerte für die Anlage mit Keramik-katalysator ist in Abbildung 8 dargestellt.

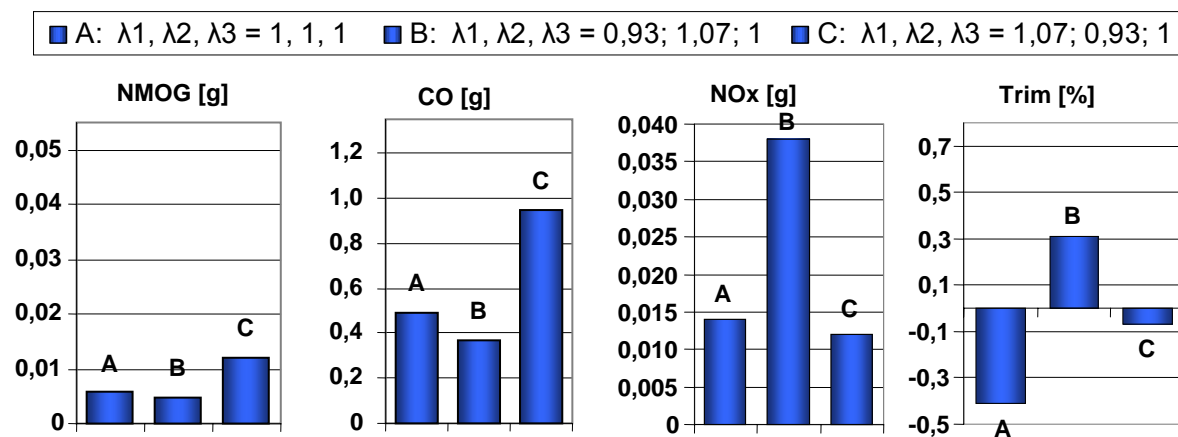


Abbildung 8: Ergebnisse (Beutel 2) für den Keramik-katalysator

Ausgehend von diesen Ergebnissen lassen sich folgende Aussagen ableiten. Bei der gegebenen Konfiguration und ohne Ausgleich der zylinderindividuellen Unterschiede in Abhängigkeit des Störungsmusters der einzelnen Zylinder treten unterschiedliche Auswirkungen auf die Emissionen auf, weil sich dadurch der Zusammenhang zwischen Nach-Kat- $O_2$ -Sondenspannung und Emissionen verschlechtert. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Sensibilität der NOx-Emissionen. Die Unterschiede der Emissionen lassen sich durch die unterschiedlichen Reaktionsmuster des Trimm-reglers begründen, in dessen Folge eine Mittenlagenverschiebung des  $\lambda$ -Wertes zustande kommt.

Im Vergleich zu diesen Untersuchungen wurde das Experiment am Motor mit dem bereits charakterisierten Metallträger-Katalysator mit PE-Struktur erneut durchgeführt. Abbildung 9 stellt die Ergebnisse dar, die mit einem solchen Katalysator mit innerem Strömungsausgleich erzielt wurden.

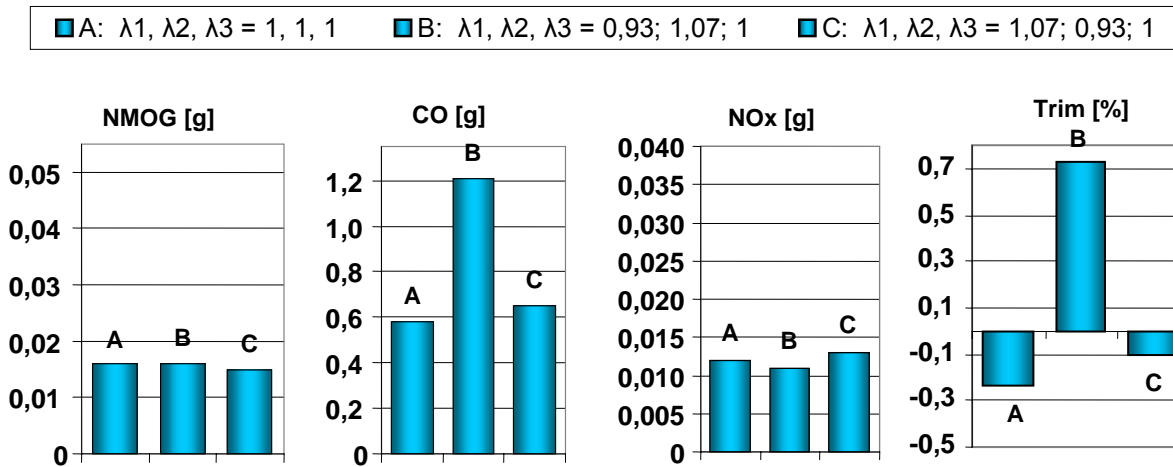


Abbildung 9: Ergebnisse (Beutel 2) für den Lambdasondenkatalysator<sup>TM</sup> mit PE-Design

Aus den vorliegenden Ergebnissen wird ersichtlich, dass der Katalysator mit innerem Strömungsausgleich in der warmen Phase des Emissionszyklus durch die genannte konstruktive Maßnahme eine Verbesserung der NOx-Emissionen bewirkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch eine Strömungshomogenisierung die Korrelation des Ausgangssignals der Trimm-O<sub>2</sub>-Sonde zu den Emissionen des Katalysators verbessert wird. Dieser Emissionsvorteil durch eine Verringerung der Streuungen kann unmittelbar in eine Verringerung der Edelmetallbeladung und somit in Kostenvorteile umgesetzt werden.

Die Toleranz der Emissionsergebnisse der Phase 2 des FTP-Tests wirkt sich bei der NOx-Emission auch deutlich auf das Gesamtergebnis aus. Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass sich für den FTP 75 Test eine Gesamtemissionsreduktion bei NOx von ~ 7 mg/Meile ergibt, welches bei ULEV LEV II Grenzwerten ~ 15 % vom Grenzwert entspricht. Da der Katalysator eher bzgl. der HC Emissionen ein Emissionslimit-Katalysator darstellt, ist zu erwarten, dass bei stärkerer NOx-Alterung die Relevanz steigt.

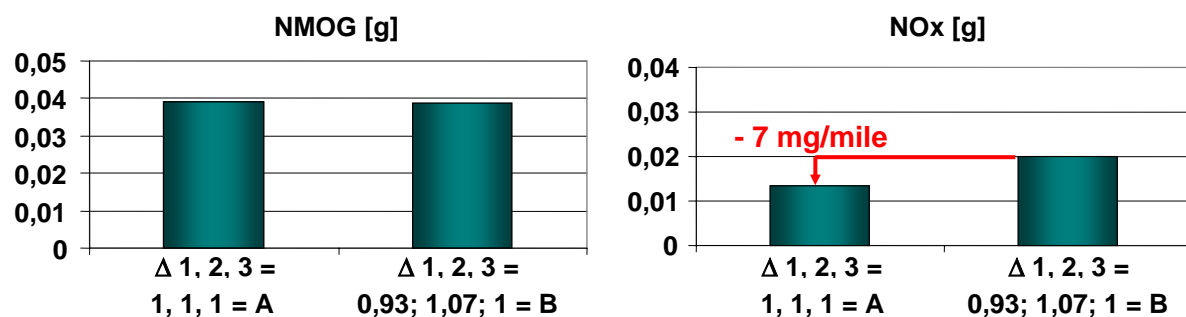


Abbildung 10: Ergebnis der Sensitivitätsmessung zylinderselektiver Störungen als FTP 75 Gesamtergebnis für den Keramik-katalysator

Ferner wurde bei den Versuchen beobachtet, dass die zylinderbezogenen Abweichungen im Kraftstoff-Luft-Verhältnis einen signifikanten Einfluss auf die

Ergebnisse der Katalysatordiagnose beim Keramikkatalysator haben, in dem Werteschwankungen zwischen 0 und 100% des Diagnosewertebereiches auftraten. Durch den Einsatz des Katalysators mit innerem Strömungsausgleich konnten diese Schwankungen massiv reduziert werden.

Durch den Einsatz des PE Katalysators mit innerem Strömungsausgleich ergeben sich für die Standardkonfiguration nach Abbildung 6 folgende funktionale Vorteile.

Diese sind im Einzelnen

- a. Die signifikante Reduktion der Toleranzen der NO<sub>x</sub>-Emission bei warmem Motorbetrieb infolge zylinderindividueller Unterschiede des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses nur durch konstruktive Maßnahmen,
- b. Eine Stabilisierung des Trimm-Reglers auch bei gealtertem Katalysator durch die maximale Ausnutzung der Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators mit der Wirkung einer verbesserten Ausnutzung des Katalysatorvolumens mit erweiterten Laufstrecken oder der Reduktion der notwendigen Edelmetallbelastung,
- c. Die Verbesserung der Korrelation des Nach-Kat-O<sub>2</sub>-Sondensignals zu den Emissionen mit dem Ergebnis dass Diagnosen im Hinblick auf eine Überwachung der HC- und NO<sub>x</sub>-Grenzwerte mit höherer Genauigkeit möglich sind und
- d. Die Verbesserung der Emissionsergebnisse von binäre O<sub>2</sub>-Sonden als Regelsonde für Niedrigstmissionskonzepte.

Demgegenüber steht bei einem Verzicht auf den Ausgleich der Toleranz der zylinderindividuellen Abweichungen bei Einstellung der Maximaltoleranz von  $\pm 7\%$  eine Erhöhung der Exothermie im Katalysator, die bei der gegebenen Konfiguration ca. 30 °C im FTP 75 Test Phase 2 ausmachen.

Diese Aussagen gelten, wenn keine Zusatzfunktionen, wie z.B. die zylinderindividuelle Lambdaregelung eingesetzt werden. Diese Funktion wurde für das Experiment gegenüber dem Serienstand deaktiviert. Mit der Versuchsreihe sollte die Sensibilität der Emissionen an einem Beispiel verdeutlicht werden. Um der geänderten Washcoateigenschaften Rechnung zu tragen wurde der Trimmreglersollwert um 60mV nach Fett verschoben. Für Systeme, die mit einer binären O<sub>2</sub>-Regel-Sonde arbeiten, ergeben sich diese Einschränkungen, da hier die zylinderindividuelle Lambdaregelung nicht oder nur sehr eingeschränkt umsetzbar ist.

#### **4.2 Ergebnisse der Emissionsverbesserung bei Motorstart**

Eine möglichst frühe Aktivierung der Lambdaregelung nach dem Motorstart ist seit Jahren ein Entwicklungsziel zur Steigerung der Effizienz der Abgasnachbehandlung. Hierbei ist das vorrangige Ziel, die Emissionstoleranz während des mageren Warmlaufes ( $\lambda=1.02...1.04$ ) dahingehend zu senken, dass Bauteiltoleranzen durch einen möglichst frühen geregelten Betrieb ausgeglichen werden können. Ferner lassen sich die HC-Emissionen durch eine Aktivierung der Lambdaregelung bei schon durchgewärmtem Katalysator generell senken. Zu diesem Zweck wurde bei Siemens VDO zusätzlich zur bekannten Adaptionfunktion des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses im warmen Motorbetrieb eine Funktion für die Adaption des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses während des Motorwarmlaufes entwickelt. Diese Funktion,

weiterhin als Kaltgemischadaption bezeichnet, wertet das Messsignal der  $O_2$ -Regel-sonde ab Betriebsbereitschaft aus und bestimmt Adaptionswerte in Abhängigkeit der Temperatur des Motors. Um eine derartige Funktion schnellstmöglich aktivieren zu können, bedarf es einerseits einer schnellstartfähigen Lambdasonde mit einer Betriebsbereitschaftszeit von 8-10 s sowie das unverzögerte Erreichen der Sondenbetriebsbereitschaft ohne dass der Sondenschutz bzgl. Wasserschlag aktiviert werden muss. Kommt die Funktion der "Kalt-Gemisch-Adaption" mit den genannten Randbedingungen zum Einsatz, so ergeben sich positive Effekte durch eine Emissionsreduktion sowie eine Fahrbarkeitsverbesserung bei Einsatz von Kraftstoffsorten im Grenzbereich der Spezifikationen. Speziell im Hinblick auf die Emissionsverbesserung ergeben sich zukünftig zusätzliche Anforderungen durch Tieftemperaturtests, wie z.B. den  $-7^\circ\text{C}$  Test für den FTP 75 Zyklus. Heute ist hier Stand der Technik, dass CO-Grenzwerte einzuhalten sind. Für das Modelljahr 2010 wird die zusätzliche Einführung der Überwachung der HC-Emissionen erwartet. Um die Wirkung der Toleranz der Vorsteuerwerte auf die Rohemissionen des Motors nachzuweisen, wurde im Start und Warmlauf des Motors ein Nominalstart mit einem Start verglichen, bei dem eine Anfeuchtung des Kraftstoff-Luftverhältnisse von 5 % durchgeführt wurde. Der Motorstart erfolgte bei  $-7^\circ\text{C}$ . In Abbildung 11 a/b sind die Ergebnisse der Versuchsreihe gezeigt, wobei die Wirkung der Kaltgemischadaption durch ein um 20 s früheres Aktivieren der Lambdaregelung simuliert wurde.

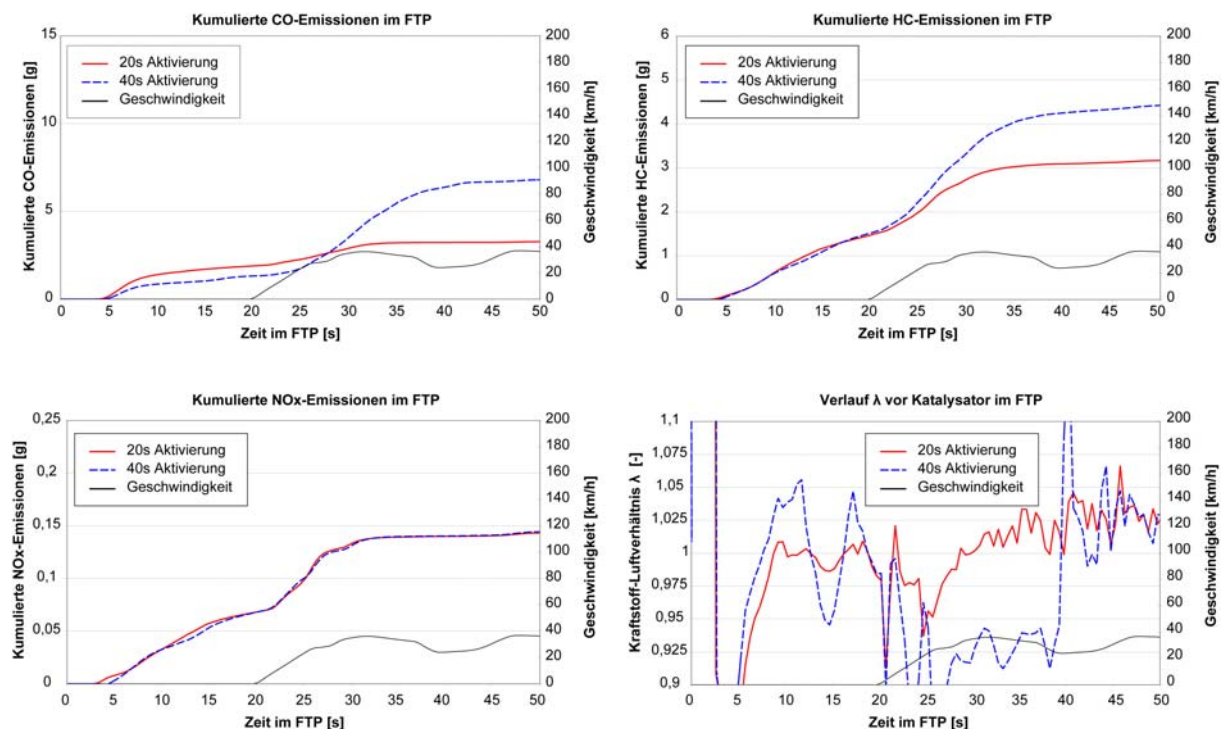


Abbildung 11a: Ergebnis der Emissionsmessung im Kaltstart bei 0% Störung im  $-7^\circ\text{C}$  FTP 75 Test

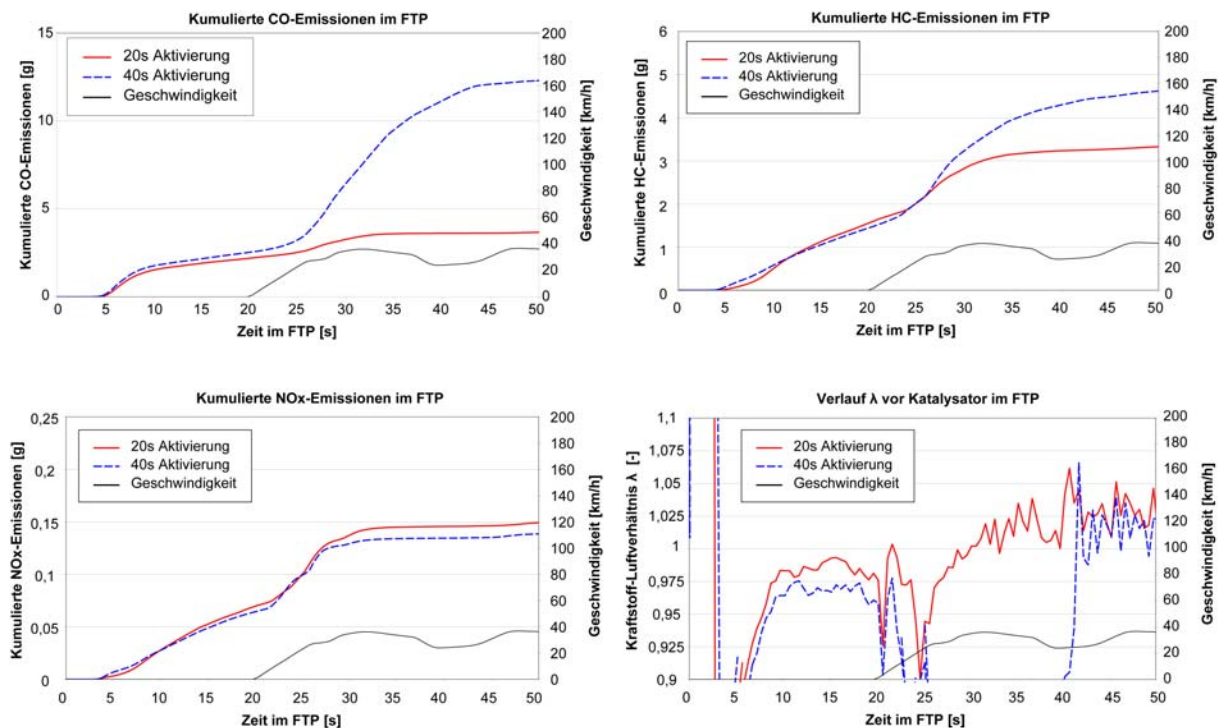


Abbildung 11b: Ergebnis der Emissionsmessung im Kaltstart bei 5% anfettender Störung im -7 °C FTP 75 Test

Aus den Ergebnissen in Abbildung 11a/b ist die Auswirkung der Toleranzen 0% gegenüber 5% Anfettung bei HC ~ 0,2 g, bei CO ~ 7 g bei 40 s Aktivierungszeit der Regelung ersichtlich. Im Fall einer Aktivierung der Regelung nach 20 s sinken die Emissionen auf Grund des geänderten Lambdaverlaufes signifikant, während der Einfluss der Toleranz des Kraftstoff-Luftverhältnisses nahezu vollständig ausgeglichen werden kann. Selbst bei motornaher Position der Lambdasonde ist zum O<sub>2</sub>-Sondenschutz der Regelsonde vor Wasserschlag eine 20 s Verzögerung der Sondenbetriebsbereitschaft erforderlich. Mit der Montage der Sonde im vorderen Drittel des Katalysators kann die Wasserschlagsgefahr deutlich reduziert werden [3]. Um die genannten Vorteile des Lambdasensorkatalysators<sup>TM</sup> durch die schnelle Regelbereitschaft der Lambdaeuerung nutzen zu können, ist auch eine Optimierung des Designs der Lambdasonde erforderlich.

Wird die Regelsonde im Katalysator positioniert, so ergibt sich auf Grund der Sauerstoff-Speicherfähigkeit des Katalysators die Notwendigkeit, die Lambdaeuerung derart zu erweitern, dass ein Verlust in der Regeldynamik kompensiert wird. Diese kann durch geeignete Reglerstrukturen und für bestimmte maximale Werte der O<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit durchgeführt werden und wurde experimentell erprobt.

Für Systeme mit motorferner Kat-Konfiguration ist die verzögerte Lambda-Sensorbetriebsbereitschaft, hervorgerufen durch Wasserschlagsgefahr bereits schon für FTP – Test Bedingungen bei 20°C relevant, so dass diese Vorteile bereits hier zum Tragen kommen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorteile des Lambdasondenkatalysator<sup>TM</sup> mit PE-Design, wie geringerer Druckverlust, Verbesserung der Strömungsverteilung und Erhöhung der Reaktionsfähigkeit, sowie die damit verbundene Kompensation des Flächenverlustes durch das PE-Design wurden bezüglich der Gesamtsystemauswirkungen bewertet.

Es wurde herausgearbeitet das eine Anpassung der Washcoatbeschichtung für den Lambdasondenkatalysator<sup>TM</sup> mit PE-Design gegenüber einem Keramikatalysator erforderlich ist.

In den Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl eine Reduktion der HC-Emissionen im Warmlauf und eine Reduktion der NOx-Emissionen bei betriebswarmem Motor erzielt werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die durch den Lambdasondenkatalysator<sup>TM</sup> mit PE-Design erzielten HC-Emissionspotentiale im Wesentlichen durch eine Verkürzung des Sonden- und damit Regel- Light-Off erreicht werden.

Weitere Emissionspotentiale lassen sich zukünftig durch die Verbesserung bzw. der Anpassung des Lambdasondendesigns an den neuen Einbauort im Katalysator erschließen. Dies könnte z.B. durch die Reduktion der thermischen Zeitkonstante des Wasserschlagschutzrohrs erfolgen.

Für die Funktionsdiagnose der Sekundärlufteinblasung basierend auf dem Lambdasondensignal ergeben sich, durch den zukünftigen Einbau der Lambdasonde in den Katalysator, Emissions- und Kostenpotentiale. Ein sehr früher Sonden Light-Off ermöglicht es hierbei eine Adaption der Sekundärluftmenge durchzuführen. Die ebenfalls erzielte Rohemissionsabsenkung in der Sekundärluftphase und die damit verbundene Reduktion der Edelmetallbeladung im Katalysator lässt weitere Einsparungen erwarten. Weiterhin wird die Vergleichmäßigung der Strömung die Messgenauigkeit der Sekundärluftmengenbestimmung verbessert.

Außerdem lassen sich Kostenpotentiale durch Entfall des heute verbauten Drucksensors zur Regelung und Diagnose im Sekundärluftpfad erschließen.

Durch den Einbau einer Lambdasonde als Regel- und Trimmsonde im Katalysator, welches durch speziell weiterzuentwickelnde Regelsoftwarefunktionen möglich sein wird, eröffnet durch den Entfall der Trimmsonde die Optimierung der Systemkosten. Die Verwendung eines Lambdasensorkatalysators, bietet außerdem die Perspektive der Umsetzung von Abgasanlagenkonfigurationen mit motorfernen Katalysatoren. Motorferne Katalysatoranordnungen werden dann auch für SULEV Emissionsstandards Verwendung finden. Dabei lassen sich z.B. die Systemvorteile der Direkteinspritzung für die schnelle und präzise Katalysatorheizung, mit den Systemvorteilen des Lambdasensorkatalysators auf ideale Weise im System kombinieren.

Das Versuchsprogramm hat gezeigt, dass herausgearbeiteten Vorteile nur erzielt werden können, wenn Katalysatorträgermaterial, Katalysatorbeschichtung und Funktionalität bereits in einer frühen Entwicklungsphase aufeinander abgestimmt werden.

## 6 Literatur

- [1] R. Brück, P. Hirth, W. Maus; Emitec GmbH; Prof. Dr. O. Deutschmann, N. Mladenov; Universität Karlsruhe (TH); "Grundlagen der „laminaren“ und „turbulenten“ Katalyse - „Turbulent“ schlägt „Laminar“"; 27. Internationales Motorensymposium, Wien
- [2] K. Althöfer, R. Brück; Emitec GmbH; M. Laurell, J. Dahlgren, M. Karlflo; Volvo Car Corp.; A Metal Substrate with Integrated Oxygen Sensor; Functionality and Influence on Air/Fuel Ratio Control; SAE 2003-01-0818
- [3] J. Dahlgren, M. Laurell, N. Vollmer; Volvo Car Corporation; R. Brück, P. Hirth, W. Maus; Emitec GmbH; Der „Lambdasondenkatalysator“ - ein neues Konzept für kompakte Hochleistungs-Katalysatorsysteme; Aachener Kolloquium 2005
- [4] K. Althöfer, R. Brück, W. Müller; Emitec GmbH; V. Ulmet; Southwest Research Institute; „Innovative, maßgeschneiderte Katalysatorträgerkonzepte für leichte und schwere Nutzfahrzeuge“; Emission Control 2006, Dresden