

Zukünftige Abgasnachbehandlungs- technologien für Otto-Motoren ; Die nächste Generation Niedrigstemissionsfahrzeuge

Dipl. Ing. W. Maus, Dipl. Ing. R. Brück
Emitec GmbH, Lohmar

Dipl. Ing. G. Holy
AVL

**Motor & Umwelt
Schadstoffemissionen versus CO₂**

Internationaler Kongress Graz
2. & 3. September 1999

Zukünftige Abgasnachbehandlungstechnologien für Otto-Motoren - Die nächste Generation Niedrigstemissionsfahrzeuge

Dipl. Ing. W. Maus Emitec GmbH
Dipl. Ing. R. Brück Emitec GmbH
Dipl. Ing. G. Holy AVL

1) Einleitung

Im Verlauf der letzten Jahre wurden Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge weltweit kontinuierlich weiter verschärft. Die momentan strengsten Werte werden mit der SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) Gesetzgebung in Kalifornien erreicht.

Tabelle 1: Abgasgrenzwerte

	HC	CO	NO _x
ULEV*	0.04 g/m	1.7 g/m	0.2 g/m
SULEV (2003)*	0.01 g/m	1.0 g/m	0.02 g/m
EG III (2000)**	0.2 g/km	2.3 g/km	0.15 g/km
EG IV (2005)**	0.1 g/km	1.0 g/km	0.08 g/km

* FTP-Test; ** EG III Testzyklus

Ursprünglich plante die kalifornische Umweltbehörde CARB den zwingenden Einsatz von Elektrofahrzeugen für das Modelljahr 2003 mit dem Ziel, die Umweltbelastung vor allem im Los Angeles Becken zu reduzieren. Internationale Studien und Flottenversuche mit Elektrofahrzeugen zeigten, daß Elektrofahrzeuge zwar lokal als „Zero Emission Fahrzeuge“ angesehen werden können, global jedoch Emissionen bei der Herstellung und bei der

Stromerzeugung entstehen[1]. Veröffentlichte Abgasergebnisse von modernen Fahrzeugen mit optimierten Abgasnachbehandlungssystemen zeigen zudem immer häufiger im betriebswarmen Zustand negative Abgasergebnisse, selbst bei vergleichsweise geringen Umgebungsimissionen. Das bedeutet daß bei aktivem Katalysatorsystem solche Fahrzeuge in der Lage sind, vor allem im Stadtbereich bei relativ hohen Imissionen, einen positiven sprich reinigenden Effekt zur Emissionsproblematik beizutragen. Die katalytische Beschichtung von Fahrzeugkühlern sorgt parallel zur Reduktion der bodennahen Ozonwerte[2]. Unter der Voraussetzung, daß im Laufe der nächsten 10 - 20 Jahre die gesamte Fahrzeugflotte mit Motoren und Katalysatorsystemen die SULEV oder ähnliche Grenzwerte erfüllen können, ausgerüstet werden, kann das Emissionsproblem hinsichtlich Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Stickoxiden als gelöst betrachtet werden.

Bleibt neben dem Verbrauch von Ressourcen zur Herstellung von Kraftstoff die CO₂ Emissionen als Treibhausgas und damit als mögliche Ursache für den „Green House Effekt“ in der Diskussion. Betrachtet man weltweit die natürlichen und die vom Menschen erzeugten CO₂ Emissionen, so stellt man fest, daß der Anteil des Individualverkehrs lediglich 0.2 % beträgt [3]. Ob die nachweislich steigenden CO₂-Werte der Erdatmosphäre die globale Erwärmung erzeugen oder die Erwärmung zum Beispiel durch Verlängerung der Zyklusdauer der Sonnenflecken verursacht wird und damit höhere CO₂ Emissionen der Meere verursacht, ist zur Zeit noch nicht eindeutig geklärt.

Die von den Gesetzgebern geforderte Verringerung des Flottenverbrauchs wird in Zukunft durch neue Motor- und Getriebetechnologien in Verbindung mit Leichtbau ohne Komforteinbußen realisiert werden können. In diesem Zusammenhang rückt die Diskussion um den optimalen Antrieb weiter in den Vordergrund. Bei dem Vergleich neuer Antriebstechnologien müssen jedoch alle umweltrelevanten Gesichtspunkte mitbetrachtet werden.

2) Antriebstechnologien

Neben den bekannten Otto- und Dieselmotoren sind mager laufende Otto Direkteinspritzer, Hybridfahrzeuge, Brennstoffzellen und nach wie vor der Elektromotor als Antriebskonzepte in der Diskussion.

Im Emissionsvergleich müssen sich alle Antriebe am bereits heute in USA vorgestelltem ZLEV Fahrzeug [4] messen lassen. Dieselmotoren zeigen im Vergleich zum Ottomotor einen eindeutigen Verbrauchsvorteil. Als problematisch müssen die Partikelemissionen und eine weitere Reduzierung der Stickoxide genannt werden. Mager laufende Otto-Direkteinspritzer basieren auf der Überlegung, ähnlich dem Diesel die Drosselverluste vor allem im Niederlastbereich zu minimieren. Zum heutigen Zeitpunkt ist ein kontinuierlicher Magerbetrieb über alle Lastpunkte inklusive Kaltstart aus motortechnischer und Katalysatorsicht jedoch noch nicht darstellbar. Aufgrund des Schwefelgehaltes im Kraftstoff, der Regenerierung und der maximalen Temperaturbelastbarkeit der zur Zeit verwendeten NO_x Adsorber kann es in bestimmten Betriebspunkten sogar zu Verbrauchsnachteilen kommen. Ähnlich dem Dieselmotor stellt die Reduzierung der Stickoxidemissionen das Hauptproblem dar, da es zur Zeit noch keinen „Lean NO_x Katalysator“ mit ausreichender Effektivität gibt.

Hybridfahrzeuge, wie zum Beispiel der Toyota Prius [5], stellen einen Kompromiß zwischen Elektrofahrzeug und Diesel- oder Ottomotor dar. Neben der hohen Komplexität dieses Systems ist das höhere Gewicht eines der Hauptnachteile. Verbrauchsvorteile können nur in Gebieten in denen Fahrzeuge überwiegend im Stau oder Stop-und-Go-Betrieb operieren, erreicht werden. Bei kontinuierlichem Betrieb, vor allem bei höheren Geschwindigkeiten, macht sich das zusätzliche Gewicht nachteilig bemerkbar.

Der Schwachpunkt bei den Elektrofahrzeugen ist nach wie vor die On-Board Energieversorgung. Selbst modernste Batterietechnologien haben keine ausreichende Speicherkapazität, um einen

zum Verbrennungsmotor vergleichbaren Fahrbetrieb zuzulassen. Hinsichtlich der Energiebilanz wirkt sich die Masse der Batterien zusätzlich negativ aus.

Die Brennstoffzelle würde eine Lösung darstellen, mit der man On-Board Strom erzeugen kann. Hierbei muß man zwischen Brennstoffzellen mit direkter Wasserstoffversorgung (Wasserstofftanks im Fahrzeug) und Brennstoffzellen mit vorgeschalteten Reformern unterscheiden. Ein Reformier erzeugt aus Methanol und/oder Benzin Wasserstoff. Mit Hilfe dieses Systems könnte die heutige Benzininfrastruktur genutzt werden. Heutige Reformier und Brennstoffzellenstacks haben jedoch ein respektables Gewicht und benötigen einen sehr großen Bauraum. In der Energiebilanz ist es mit dem heutigen Stand der Technik nur möglich in den Bereich der Dieselmotoren vorzudringen. Da der Endkunde nicht gewillt ist, Komforteinbußen, wie zum Beispiel lange Wartezeiten vor Inbetriebnahme hinzunehmen scheint eine Einführung des Systems in großen Stückzahlen innerhalb der nächsten 10 Jahre fragwürdig.

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Bewertung der Antriebe hinsichtlich Emissionen, Verbrauch (CO₂) und Gewicht/Kosten.

Tabelle 2: Bewertung verschiedener Antriebskonzepte hinsichtlich Emissionen und Gewicht/Kosten

	Ottomotor	Diesel	Otto DI mager	Hybrid	Brennstoffzelle
HC	++	+	+	+	++
NOx	++	- (-)	- (-)	+	++
Partikel	++	--	-	++	++
CO ₂	+	++	+	-	o / -
Gewicht/ Kosten	+	+	+	--	-
Summe	++	+	+	(+)	+

3) Katalysator- und Emissionsbewertung

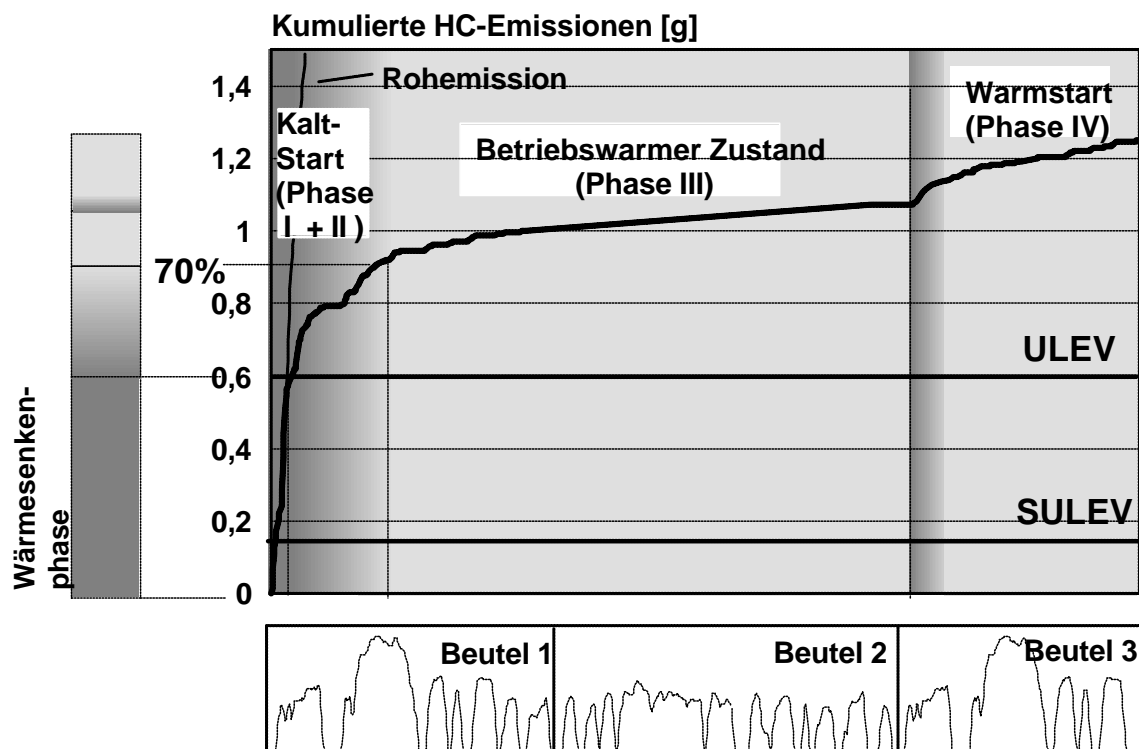
Die dargestellte Bewertung der einzelnen Antriebskonzepte zeigt eindeutig, daß der Ottomotor zumindest für die nächsten 10 - 15 Jahre das bevorzugte Antriebskonzept mit den geringsten Risiken bleiben wird. Der Ottomotor alleine und in Verbindung mit neuen Getriebevarianten zeigt auch heute noch ein großes Verbesserungspotential hinsichtlich Leistung, Emissionen und Verbrauch, sodaß sich die Anforderungen an neue Antriebskonzepte kontinuierlich erhöhen.

Das Ziel muß es nun sein die Fahrzeuge emissionstechnisch so auszustatten, daß es selbst politisch keinen Sinn mehr macht, das Kraftfahrzeug als Umweltsünder Nummer 1 darzustellen, und mehr oder weniger willkürlichen politischen Entscheidungen auszusetzen, wie die aktuelle Diskussion der Dieselsesteuerung in Deutschland zeigt. Als Ziel wird zunächst der kalifornische SULEV-Grenzwert definiert.

In Bild 1 ist der prinzipielle Verlauf der kumulierten HC-Emissionen eines Serienmotors und die geforderten SULEV Werte über den amerikanischen FTP Test dargestellt.

Bild 1: Kumulierte HC-Emissionen im FTP-Test

Neben einer nahezu 100%igen Umsatzrate im betriebswarmen Zustand ist vor allem eine extrem kurze „Anspringzeit“ des Katalysators nach Motorstart erforderlich. Die maximale Anspringdauer ist direkt von den Motorrohmissionen im Kaltstart abhängig und beträgt je nach Motor zwischen 3 und 15 Sekunden [6]. Zur Realisierung dieser Anforderung muß die Gastemperatur vor Katalysator einige Sekunden schneller die Light-Off Temperatur von 200 -



300°C überschreiten. Um unnötige Wärmeverluste in den Vorrohren zum Katalysator zu vermeiden, bietet sich eine möglichst motornahe Katalysatorposition unmittelbar hinter dem Krümmer an.

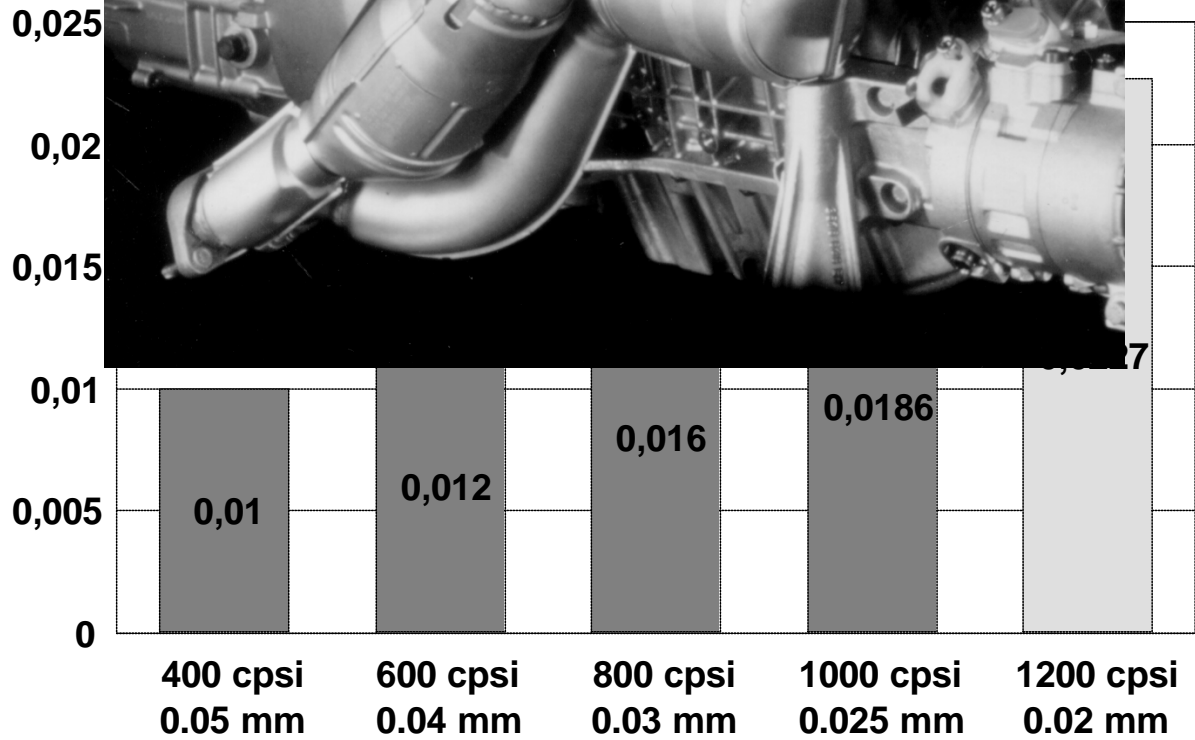
Das Kaltstartverhalten von Katalysatoren wird neben der Gastemperatur und der katalytischen Beschichtung auch von den physikalischen und thermodynamischen Daten des Trägers bestimmt. Während der Kaltstartphase arbeitet der Katalysator zunächst als reiner Wärmetauscher mit katalytischer Aktivität ab Erreichen der Light-Off Temperatur.

Aus diesem Grund ist es das Ziel, eine möglichst große katalytische Oberfläche (GO) mit geringstmöglicher Wärmekapazität (cp) zur Verfügung zu stellen. Zur Bewertung verschiedener Systeme wird der sogenannte Kaltstartfaktor GO / cp benutzt [7].

Bild 2 zeigt den Kaltstartfaktor verschiedener metallischer Katalysatorträger.

Bild
Kaltst
ktor
hiede
metall
r

2 :
artfa
versc
ner
ische
Kata



lysatorträger (400 - 1200)

Es ist zu erkennen, daß sich der Kaltstartfaktor, in Abhängigkeit der Zelldichte, in Verbindung mit einer Reduzierung der Foliendicke vergrößert. Wird die Zelldichte jedoch ohne Verringerung der Foliendicke vergrößert, ist eine Verschlechterung festzustellen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Verwendung einer Wärmekaskade. Durch die Reduzierung des Eintrittsquerschnitts des 1. Trägers wird das Kaltstartverhalten und auch die Strömungsverteilung positiv beeinflusst [8]. Bild 3 zeigt das Beispiel einer motornahen gestuften Katanlage am Beispiel des BMW 6 Zylinder Motors [9].

Bild 3: Motornahe gestufte Katanlage am BMW 6 Zylinder Motor

Durch die kontinuierliche Reduzierung der Wärmekapazität der Katalysatorträger gewinnt der Anteil des Washcoats an der Gesamtwärmekapazität immer mehr an Bedeutung. Washcoatmengen von 200 - 250 g/l sind für moderne 3 Wege Katalysatoren durchaus üblich. Eine Reduktion dieser Masse auf 150 bzw 100 g bedeutet bei einem 400 cpsi Katalysator mit einer Foliendicke von 0.05 mm eine Verringerung des Washcoatanteils von 63 % auf 25 %. Bei einem 1000 cpsi Träger mit einer Foliendicke von 0.025 mm beträgt die Verbesserung 53 %. Die nachfolgende Darstellung verdeutlicht die Abhängigkeit der Washcoatmasse von der Gesamtwärmekapazität.

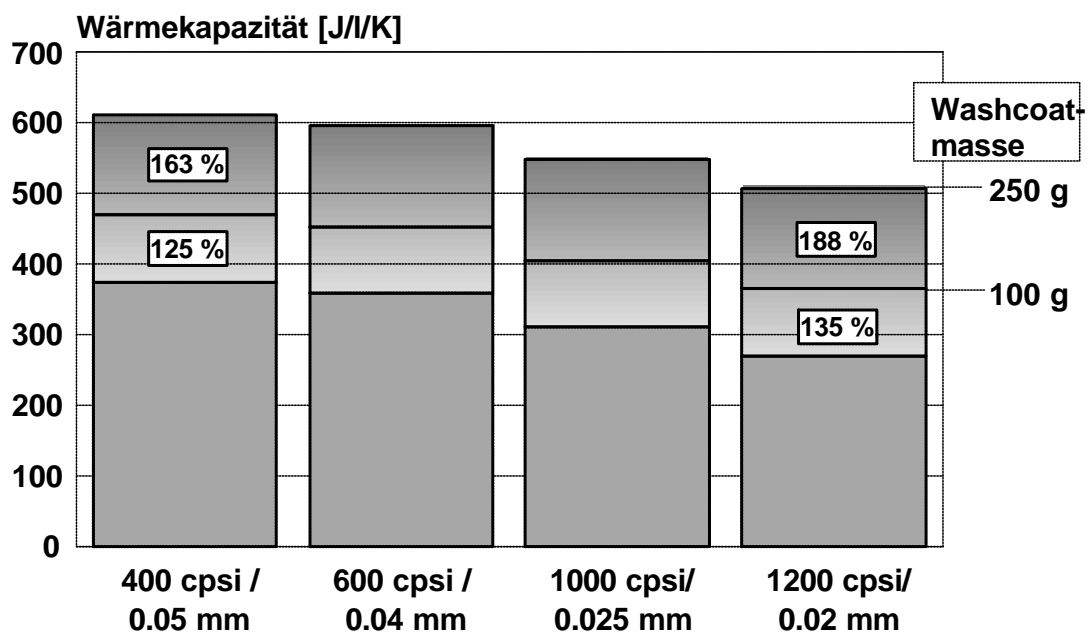
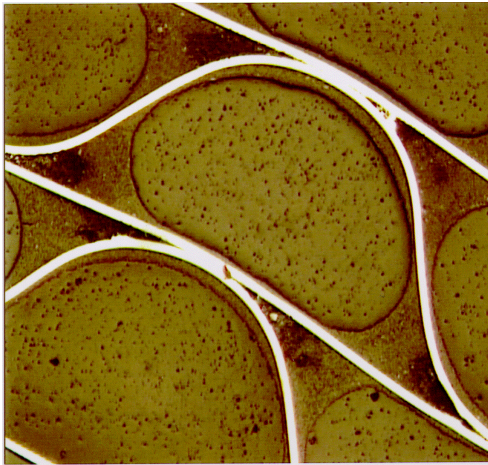


Bild 4: Einfluss der Washcoatmasse auf die Gesamtwärmekapazität des Katalysators

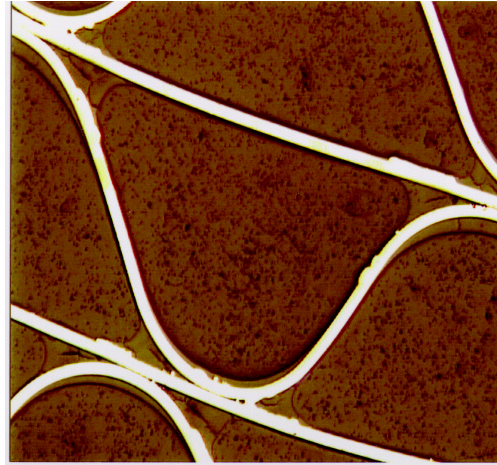
diagramm

Zur optimalen Ausnutzung des Trägers und der in der Beschichtung enthaltenen Edelmetalle ist eine gleichmäßige Verteilung des Washcoats entlang des Zellenumfangs und der

K
a
t
a
l
y
s
a
t
o
r
a
c
h
s
e
z
w
i
n
g
e
n
d
e
r
f
o
r
d



Hohe Washcoatbeladung



Niedrige Washcoatbeladung

erlich. Bild 5 zeigt das Beispiel eines dicken und eines dünnen Washcoats innerhalb des Zellquerschnitts.

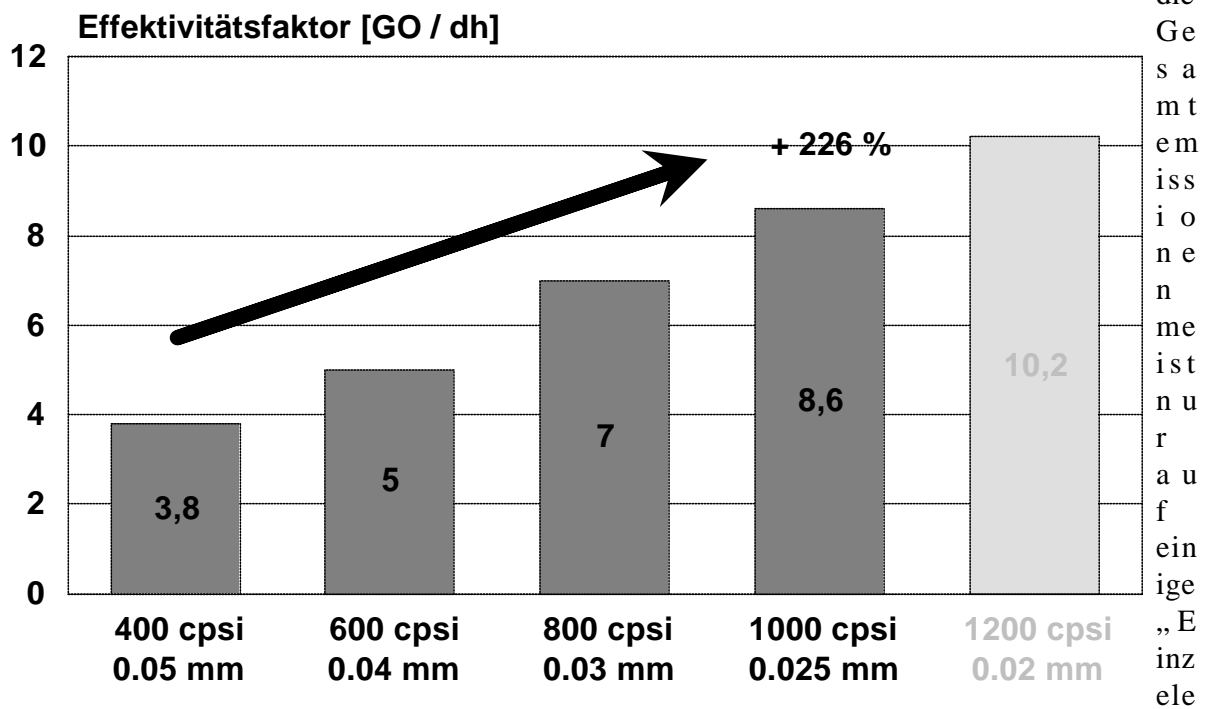
Bild 5: Washcoatverteilung in Abhängigkeit der Washcoatmasse im Zellquerschnitt

Im betriebswarmen Zustand wird die katalytische Effektivität unter der Voraussetzung einer optimalen Lambdaregelung nur vom Stofftransport limitiert. Der Stofftransport innerhalb der laminaren Strömung in den Zellkanälen wird primär durch den hydraulischen Durchmesser (dh) des Kanals beeinflusst. Als Effektivitätsfaktor gilt GO/dh [10]. Abbildung 6 zeigt den Effektivitätsfaktor GO/dh verschiedener Zelldichten.

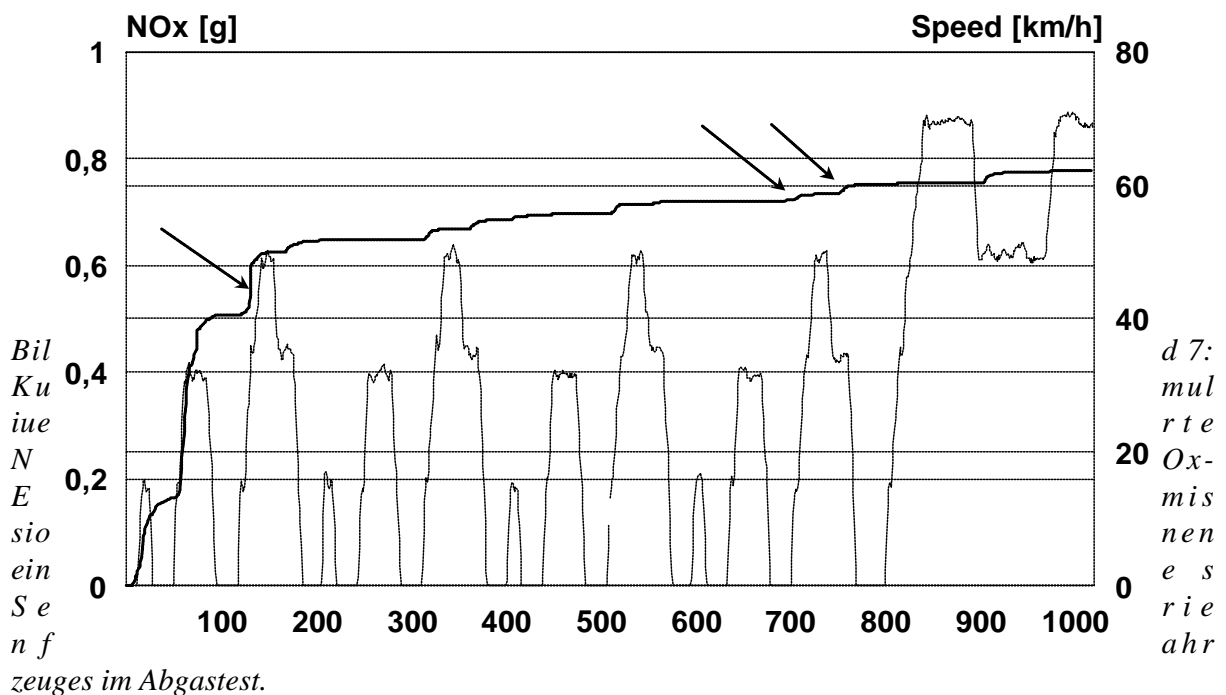
Bild 6: Effektivitätsfaktor GO/dh verschiedener Zelldichten

Höhere Zelldichten bedeuten eine verbesserte Effektivität für alle Schadstoffe [6,11,12]. Hierdurch wird es möglich sogar bei größerer katalytischer Effektivität das Katalysatorvolumen zu verkleinern, sodaß man auf zusätzliche Unterbodenkatalysatoren verzichten kann. In diesem Zusammenhang reagiert NO_x bei nicht optimaler Motorregelung am kritischsten auf eine Verkleinerung des Katvolumens.

Analysiert man die kumulierten NO_x Emissionen innerhalb eines Abgastests, stellt man fest, daß



nicht optimierte Lambdaregelung im Instationärbereich ausgelöst. E-Gas und schnellere Motorsteuergeräte, mit denen es möglich ist, auch gezielt die Einzelzylinder zu regeln, werden eine deutliche Verbesserung gewährleisten.



4) SULEV Katalysatorkonzept

Zur Darstellung eines SULEV-Fahrzeuges ist ein Motor mit geringer Rohemission und optimierter Lambdaregelung zwingend erforderlich. Aus diesem Grund gehen alle weiteren Betrachtungen von einem im Markt befindlichen ULEV Fahrzeug mit SULEV Potential aus. Die Rohemissionen dieses Fahrzeuges im FTP-Test liegen bei 1,6 g/m.

Die Abgastemperatur und die kumulierten HC Emissionen während der ersten 100 Sekunden im FTP Test sind in Bild 8 dargestellt.

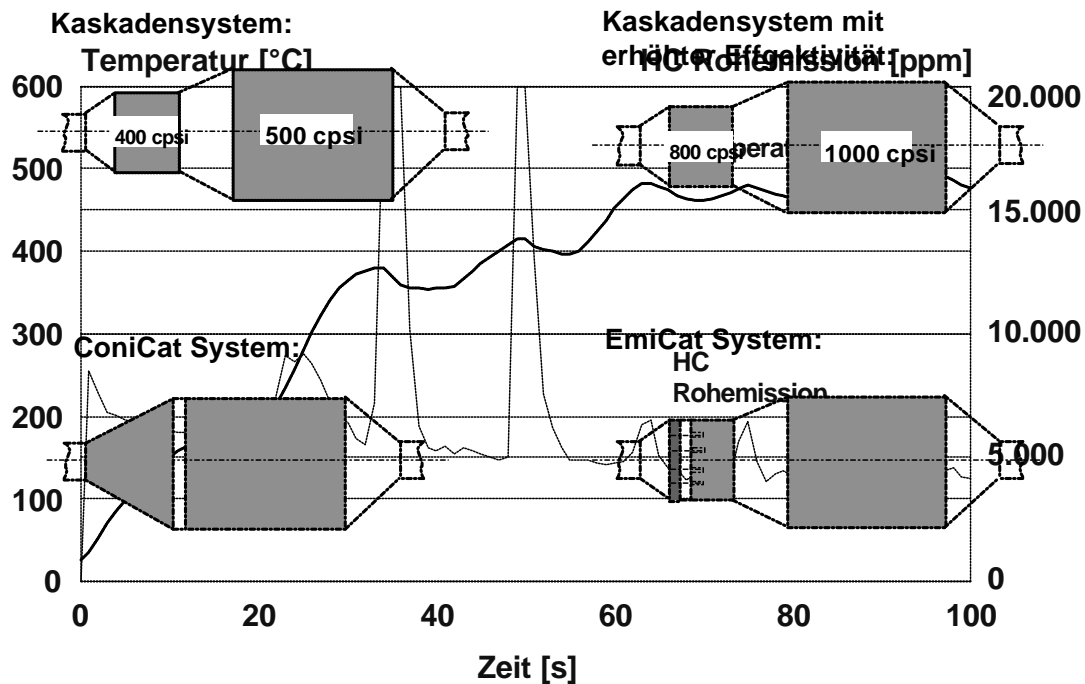


Bild 8: Gastemperatur vor Katalysator und HC Rohemissionen während der ersten 100 Sekunden des FTP-Tests

Die Auslegung des Katsystems erfolgt gemäß den in Kapitel 3 dargestellten Bewertungsfaktoren. Das Gesamtvolumen sollte etwa dem 0,6 - 0,8 fachen des Hubraums entsprechen. Zur Unterstützung wurde das Katalysatorsimulationsprogramm KatProg herangezogen.

Als Grundgedanke dient die Idee ein Katalysatorsystem zu entwickeln, daß modular an neue Gesetzgebungen bis hin zu SULEV modifiziert werden kann. Aufgrund der OBD Anforderungen soll das System eine „2 Brick“ Lösung sein, wobei die Möglichkeit besteht, den ersten Träger separat zu überwachen. Im Hinblick auf eine gute Strömungsverteilung und die verbesserte Kaltstarteffektivität wird das Katalysatorsystem als Kaskade ausgeführt. Bei bauraumbedingter, sehr schlechter Anströmung wird der erste Träger durch einen konischen Katalysator ersetzt. Die Zelldichte und Folienstärke kann den jeweiligen Effektivitätsanforderungen entsprechend variiert werden. Für Applikationen mit höheren Rohemissionen bzw. niedrigen Gastemperaturen ist es möglich, den 1. Träger bauraumneutral durch einen elektrisch heizbaren Katalysator, bestehend aus einer Heizscheibe und einem Stützkatalysator, zu ersetzen. Abbildung 9 zeigt das prinzipielle System in verschiedenen Ausführungsvarianten.

Bild 9: Ausführungsvarianten eines modular aufgebauten Katalysatorsystems

5) Emissions- und Berechnungsergebnisse

Das modular aufgebaute Katalysatorsystem gibt die Möglichkeit eine Applikation ohne Änderung des Cannings an verschiedene Abgasgrenzwerte anzupassen. Dies ist natürlich nur mit einer parallelen Weiterentwicklung des Motors und des Motormanagements möglich. Hochzelldichte Katalysatoren mit ultradünnen Folien sind nur in Verbindung mit einem optimal wirkenden Motormanagement ohne HC Spitzen im transienten Fahrbetrieb einsetzbar. HC Spitzen führen bei diesen sehr aktiven Katalysatoren mit geringer Wärmekapazität im Vergleich zu Trägern mit dickeren Folien zu extremen Temperaturerhöhungen und damit zur Katalysatoralterung. In Tabelle 4 sind Variationen des Kaskadensystems in Abhängigkeit der Gesetzgebung dargestellt. Das Gesamtkatalysatorvolumen beträgt 1,4 l und damit 70 % des Hubraumvolumens des Versuchsfahrzeuges.

Tabelle 4: Variationen eines modular aufgebauten Katalysatorsystems

	1. Träger Ø 80 x 74.5 mm			2. Träger Ø 110 x 110 mm	
	Zelldichte / Foliendicke		Kaltstart- faktor	Zelldichte / Foliendicke	Effektivitäts- faktor
LEV / EG III	300cpsi / 0,05		0.01	500cpsi / 0,05	4.6
ULEV / EG IV	600cpsi / 0,04		0.12	800cpsi/0,03	7.0
SULEV	800cpsi / 0,03		0.16	1000cpsi / 0,025	8.6
EZEV	Heizscheibe: 600cpsi / 0.04	Stützkatalysator 800cpsi / 0,03	0.12 / 0.16	1200 cpsi / 0,025	10.1

Die folgende Darstellung zeigt die HC Umsatzraten und die berechneten kumulierten HC-Emissionen während der ersten 100 Sekunden des FTP-Tests. Zur Absicherung des Programms und der Katalysatoreffektivität wurden vorlaufend, mit Abweichungen < 5%, Vergleichsrechnungen mit Abgasmeßergebnissen des Originalkatalysatorsystems durchgeführt.

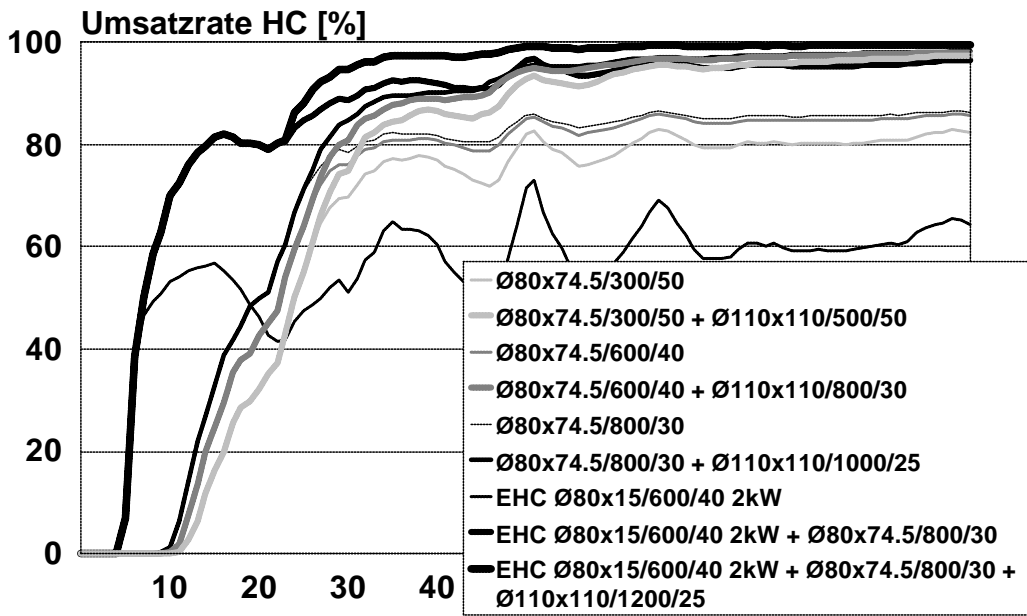


Bild
HC
Umsatzrate
versc

ner Katalysatoranlagen während der ersten 100 Sekunden des FTP-Tests

10 :
Umsa
n
hiede

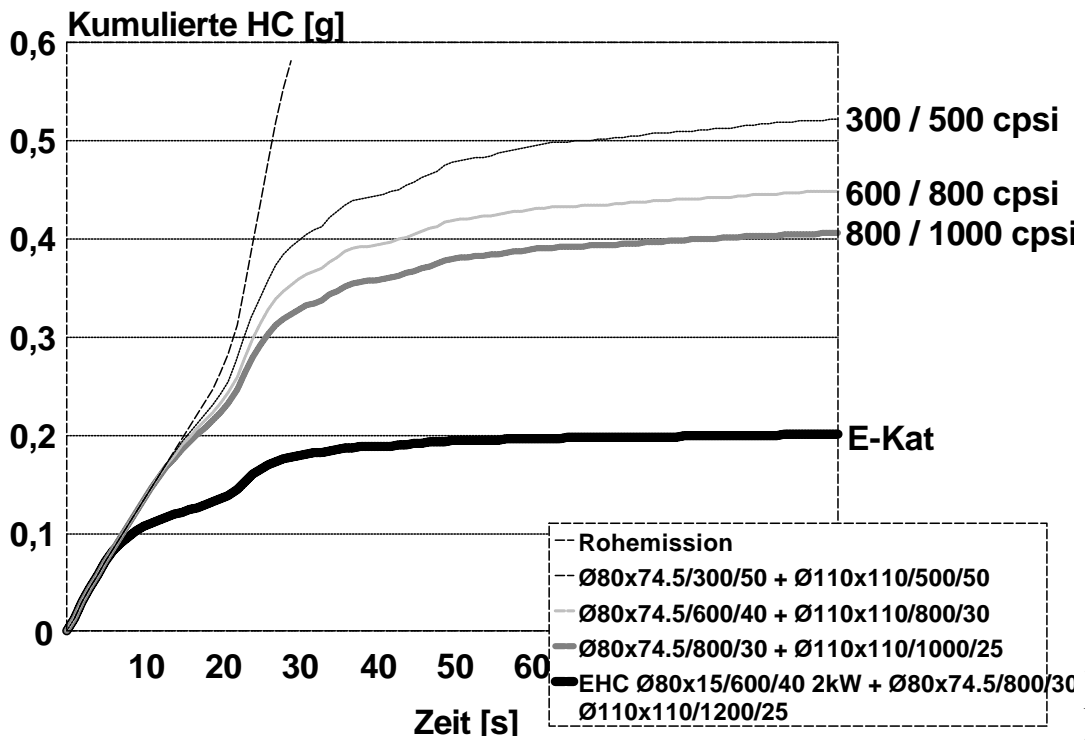


Bild
l :
umuli

te HC Emissionen verschiedener Katalysatorvarianten während der ersten 100 Sekunden des FTP-Tests

l
K
er

Die Berechnungsergebnisse zeigen den Vorteil der höheren Zelldichten in Verbindung mit den dünneren Folienstärken. Im identischen Canning können die Kaltstartemissionen beim Wechsel von 300 cpsi / 0,05 mm auf 800 cpsi / 0,03 mm um 23% reduziert werden. Der zusätzliche Einsatz eines elektrisch heizbaren Katalysators bedeutet ein Verbesserungspotential von 60% im Kaltstart. Im betriebswarmen Zustand bedeutet die Erhöhung der Zelldichte erfahrungsgemäß ebenfalls eine deutliche Verbesserung der Katalysatoreffektivität durch besseren Stofftransport in den Kanälen.

Die Möglichkeit, die Katalysatoreffektivität in einem identischen Canning zu realisieren, bietet sich als kostenoptimale Lösung für Fahrzeuge an, die über den Produktionszeitraum unterschiedliche Abgasgrenzwerte einhalten müssen.

6) Zusammenfassung

Die erreichten Emissionsgrenzwerte von in Amerika als Prototypen veröffentlichten Fahrzeugen machen deutlich, daß es bezüglich der limitierten Emissionen in Zukunft möglich sein wird, Fahrzeuge zu bauen, deren Abgas im Stadtbereich sauberer ist als die angesaugte Luft. Das Auto reinigt also die Umwelt.

Ein Vergleich unterschiedlicher in Diskussion befindlicher Antriebskonzepte unterstützt, abgesehen von den CO₂ Emissionen, die führende Rolle des Ottomotors für die nächsten 10 bis 15 Jahre. Die Wichtung des CO₂ in diesem Zusammenhang hängt sicherlich von der Frage ab, inwieweit das vom Individualverkehr emittierte Kohlendioxid Mitschuld an der globalen Erwärmung hat oder nur als politisches Druckmittel eingesetzt wird.

Zur Einhaltung zukünftiger Abgasgrenzwerte mit dem Ottomotor ist es zwingend notwendig, neben dem Katalysator auch den Motor und das Motormanagement zu optimieren. Das Gesamtsystem Motor, Management, Katalysatorträger und katalytische Beschichtung muß aufeinander abgestimmt werden. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, Katalysatorsysteme entsprechend den zukünftigen Anforderungen modular aufzubauen.

Modulare Katalysatorsysteme ermöglichen die kostengünstige Anpassung der Katalysatoreffektivität durch Erhöhung der Zelldichte bei gleichzeitiger Verringerung der Foliendicke (Wärmekapazität), oder durch Einsatz von konischen oder elektrisch geheizten Katalysatoren. Zusätzliches Katalysatorvolumen ist so, bei gleichzeitiger Verbesserung des Gesamtsystems, nicht notwendig.

Die Absicherung der berechneten Emissionsergebnisse und eine Überprüfung der mechanischen und thermischen Dauerhaltbarkeit ist zur Zeit in Arbeit.

7. Quellennachweis

1. Eden, T.-U.; Heber, C.; Höpfner, U.; Voy, C.: „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997) 9
2. Volvo Presseinformationen
3. Dr.-Ing. N. Metz, BMW AG, München:
„Verteilung der weltweiten CO₂-Emissionen von 1980 - 2010“, „ Worldwide CO₂-Distribution from 1980 - 2010“
20. Wiener Motorensymposium 5/1999
4. Noriyuki Kishi, Shinichi Kikuchi, Norio Suzukim Tadayoshi Hayashi, Honda R&D Co., Ltd., Tochigi R&D Center; Technology for Reducing Exhaust Gas Emissions in Zero Level Emission Vehicles (ZLEV)“
SAE 1999-01-0772
5. K. Hirose M.Sc., T. Ueda M Sc., T. Takaoka, TOYOTA Motor Corporation, Susono, Japan: „ Ein neues Antriebssystem für den Toyota-Hybrid-PKW mit einem hoch effizienten Ottomotor“, The New High Efficient Spark-Ignition Engine and System for the Toyota Hybrid Passenger Car“,
19. Internationales Wiener Motorensymposium 07. - 08. Mai 1998
6. Dipl.-Ing. Wolfgang Maus, Dipl. Ing. Rolf Brück, Dipl.-Ing. Peter Hirth, Dipl.-Ing. Jan Hodgson, Dr. Ing. Manuel Presti, Emitec GmbH, Lohmar: „Potential von Katalysator Konzepten zum Erreichen der SULEV Emissionsgrenzwerte“,
„Potential of Catalyst Concepts for Achieving the SULEV Emission Legislation“,
20. Wiener Motorensymposium, 06. - 07. Mai 1999
7. Faltermeier, G.; Pfalzgraf, B.; Donnerstag, A.; Maus, W.; Brück, R.; Kruse, C.: „Katalysatorkonzepte für zukünftige Abgasgesetzgebungen am Beispiel eines 1,8 l 5V-Motors“, 17. Internationales Motorensymposium, Wien 25. - 26. April 1996
8. Brück, R.; Diewald, R.; Hirth, P.; Kaiser, F. W.: „Design Criteria for Metallic Substrates for Catalytic Converters“; SAE-Paper 950407, 1995
9. Wolf Kiefer, Bernd Plodek, Peter Ehmman, Rupert Feldwisch-Drentrup, Dr. Joachim Diring: „BMW 750i mit elektrisch beheiztem Katalysator“, MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 / 1998
10. Leveroni, E., Saroglia, G., Rossi, R.: „Catalyst Concepts for Small Volume SI-Engines: The Example of the 1,2 l Punto“, Tagung „Zukünftige Abgasgesetzgebung in Europa und den USA“, Haus der Technik, Essen 1996
11. Shinichi Kikuchi, Seiji Hatcho, Tatsuya Okayama, Shyoji Inose; Honda R&D Co., Ltd, Tochigi R&D Center; Kouichi Ikeshima; NGK Insulators; Ltd.: „High Cell Density and Thin Wall Substrate for Higher Conversion Ratio Catalyst“, SAE-Paper 1999-01-0268, 1999