

Dipl.-Ing. Wolfgang Maus  
Dipl.-Ing. Rolf Brück

EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar

## **Die Zukunft der heterogenen Katalyse im Automobil; „Turbulente“ Katalysatoren für Otto- und Dieselanwendungen**

### **The Future of Heterogeneous Catalysis in Automotive Applications; “Turbulent” Catalysts for Spark- and Compression Ignition Engines**

#### **Kurzfassung**

Die Entwicklung der Katalysatortechnologie für den automobilen Bereich begann in den 60er Jahren. Aus der chemischen Industrie wurden zunächst die als hocheffektiv bekannten Schüttgutkatalysatoren mit sehr gutem, einer turbulenten Strömung vergleichbarem, Stofftransport übernommen. Mechanische Schwingungen und Gas-pulsationen führten zu Abrasion. Daher wurde dieser Weg aus Gründen der Dauerhaltbarkeit verlassen und zunächst metallische Wabenkörper, die in Raffinerieprozessen eingesetzt wurden, verwendet. Diese Folien-Substrate waren ebenfalls nicht dauerhaft, da die Verbindungsverfahren zur Herstellung monolithischer Strukturen noch nicht zur Verfügung standen. Keramische, monolithische Wabenkörper wurden später entwickelt, die ebenfalls mit katalytisch aktiver Beschichtung versehen waren. Der Nachteil monolithischer Wabenkörper besteht allerdings in der laminaren Kanalströmung, die den Stofftransport und damit die volumenspezifische katalytische Wirksamkeit begrenzt. Neuartige Katalysatorträger-Entwicklungen für Otto- und Dieselmotoren nutzen den Effekt der „Turbulenz“ gezielt aus. Die Konvertierung der limitierten Abgaskomponenten basiert auf Mechanismen des turbulenten Stofftransports. Im Folgenden werden die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten für den Einsatz im automobilen Katalysator hergeleitet und mit Testergebnissen untermauert.

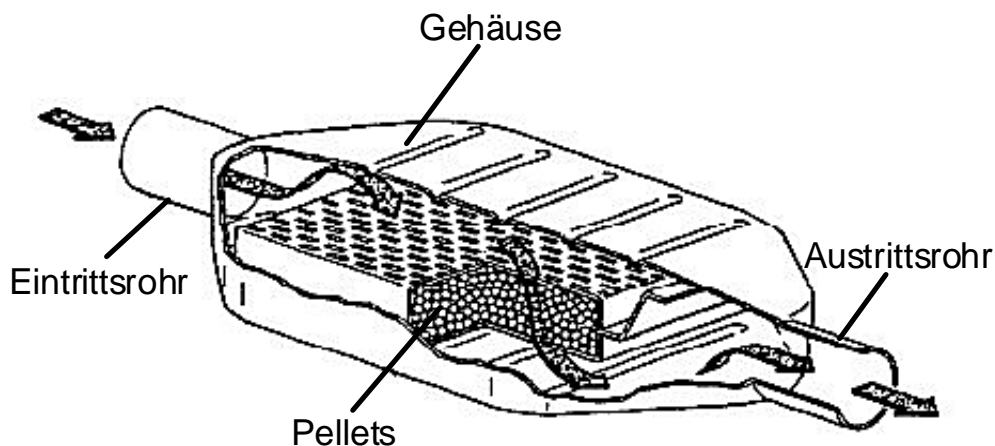
#### **Abstract**

*The development of catalyst technology for automotive application started in the early sixties with the adoption of highly efficient pellet catalysts from chemical engineering techniques. This catalyst type showed very high mass transfer rates, which were comparable to those of turbulent flow conditions. Nevertheless, catalyst beds made of pellets like these, were condemned to fail due to abrasion caused by mechanical vibration and gas pulsation. In order to increase durability, metallic substrates have been used which were common in the oil refinery industry. Those also failed because they disassembled due to the lack of foil joint technologies in order to provide a monolithical honeycomb structure. Ceramic honeycomb structures have been developed later, whose straight channels also were coated with the catalytic material. Due to their smooth channels the chemical reaction was limited by the poor mass transfer rate to the channel wall. Actual developments have resulted now in substrate constructions, which make use of turbulence effects in the channel flow. Hereby the conversion of regulated pollutants is improved due to higher mass transfer rates*

equivalent to turbulent flow conditions. In the subsequent chapters the basic steps of car application will be described and test results will be presented.

## 1. Einleitung

Wachsender Wohlstand und das damit verbundene Bedürfnis nach mehr Mobilität ließ den Fahrzeugbestand in den 60er und 70er Jahren schnell ansteigen. Zunächst in den USA und später auch in Europa machten sich vor allen in den Städten die negativen Auswirkungen in Form von Smog bemerkbar. Der öffentliche und politische Druck, umweltgerechte Fahrzeuge zu produzieren, stand dem weiter wachsenden Mobilitätsbedarf und steigender Kraftfahrzeugnachfrage gegenüber. Als Lösung bot sich die Verwendung der aus der Chemieindustrie bekannten Pellet- / Schüttgut-Festbettreaktoren an (Abbildung 1). Diese Technologie wird seit langer Zeit in der chemischen Industrie erfolgreich eingesetzt. Im Vergleich zum laminar durchströmten Kanal werden ähnlich wie bei turbulenten Strömungen hohe Nusselt- bzw. Sherwood-Zahlen erreicht, mit deren Hilfe eine hohe katalytische Gesamteffektivität erzielt wird [1, 2]. Erste Versuche mit solchen Katalysatorsystemen – seinerzeit noch unregelt – zeigten wirksame Verringerungen der gasförmigen Emissionen.



**Abbildung 1:** Pellet-Katalysator für den automobilen Einsatz  
*Pellet catalyst for automotive application*

Im Unterschied zu den stationären Betriebsbedingungen der chemischen Industrie wurden die Pellet-Katalysatoren im Automobil jedoch erheblich höheren Belastungen ausgesetzt. Gaspulsationen, mechanische Schwingungen sowie thermomechanische Belastungen unter dynamischen Betriebsbedingungen stellten sich in den Automobilreaktoren ein. Aufgrund der thermischen Wechselbelastung ergeben sich Relativdehnungen zwischen Gehäuse und den keramischen Pellets. Die im Fahrzeug auftretenden Schwingungen und Vibrationen führten zu Relativbewegungen der Pellets zueinander und zum Gehäuse. Die Folge war Katalysatorabrieb. Die keramischen Pellets lösten sich daher in Staub auf [3]. Dem katalytischen Vorteil dieses Katalysatortyps stand also ein gravierender Nachteil bzgl. der mechanischen - und damit auch der chemischen Dauerhaltbarkeit gegenüber.

Als Lösung boten sich die ebenfalls in einigen Anwendungen der chemischen Industrie eingesetzten metallischen Wabenkörper aus beschichteten glatten und gewellten Stahlfolien an. Auch diese Systeme scheiterten zunächst an den

Belastungen im Automobil, da die einzelnen Folien seiner Zeit noch nicht miteinander zur monolithischen Struktur verbunden werden konnten. In Konkurrenz dazu wurden strangextrudierte keramische Wabenkörper entwickelt. Diese Katalysatorträger - zunächst mit 300 Zellen pro Quadrat-Inch (cpsi) und Wandstärken von 0,2 mm – besaßen den Vorteil, dass die thermomechanischen Belastungen von der in sich stabilen Matrix ertragen wurden und die Dehnungsdifferenzen zum Gehäuse mit Hilfe von „Einbettungen“ flexibel aufgenommen werden konnten [4]. Dies geschah zunächst mit Hilfe von Drahtgestrieken und dann später durch sogenannte keramische Quell-Fasermatten, die die Relativdehnung zwischen metallischem Gehäuse und keramischem Wabenkörper kompensierten. Bis heute wird über diverse Ausfallrisiken keramischer Systeme berichtet. Metallische METALIT<sup>®</sup> Trägerkatalysatoren haben ihre technische Zuverlässigkeit seit Einführung 1986 bewiesen.

Katalytisch wirkt sich aber bei beiden Trägersystemen der Einsatz von geraden, glatten Kanälen mit laminaren - d.h. achsenparallelen Strömungsvektoren- und -profilen - nachteilig aus. Wie später ausgeführt, erfolgt dadurch der Transport der Schadstoffe vom Kanalzentrum zur katalytisch aktiven Wand nur durch Diffusion. Die Erlangung der mechanischen Haltbarkeit war jedoch ausschlaggebend. Zudem war die Effektivität der zunächst „ungeregelten“ Katalysatoren mehr von der Gemischbildung als vom Stofftransport abhängig.

Mit weiter ansteigendem Fahrzeugverkehr konnten die unregelmäßigen und damit in der Effektivität auf 50-70 % begrenzten Katalysatorsysteme den Anstieg der Umweltbelastungen nicht verhindern. Wiederum zunächst in den USA und dann folgend in der ganzen Welt wurden stufenweise Abgasgrenzwerte verabschiedet, die heute eine Effektivität von über 99 % erfordern. Damit stieg auch der Anspruch an die Abgasnachbehandlung.

Im ersten Schritt wurde der „3-Wege Katalysator“ im Jahre 1976 [5] eingeführt. Der Einsatz einer sogenannten Lambdasonde ermöglichte den Betrieb im stöchiometrischen Bereich und damit den gleichzeitigen optimalen Umsatz von Kohlenwasserstoffen (HC), Kohlenmonoxid (CO) über Oxidation und die Reduktion der Stickoxide (NO<sub>x</sub>).

Die steigenden, notwendigen Umsatzraten erforderten sowohl auf der Motorenseite als auch auf der Katalysatorseite hohen Aufwand. Neue Motoren generationen mit abgesenkten Rohemissionen und optimierter, schneller Lambdaregelung wurden genauso zum Standard wie motornahe, sehr dünnwandige Katalysatorträger (30 µm) mit hoher Zelldichte und hochtemperaturfesten Beschichtungen, die Emitec mit Toyota 1997 zum ersten Mal einführte.

Mit den steigenden gesetzlichen Anforderungen bzgl. Effektivität und Dauerhaltbarkeit, nahmen technischer Aufwand und damit auch der Kostendruck zu. Entsprechend optimierte Katalysatorträger und -anordnungen (motornah, Wärme-kaskade) trugen mit verbesserten katalytischen Beschichtungen zu relativen Kostenreduzierungen bei.

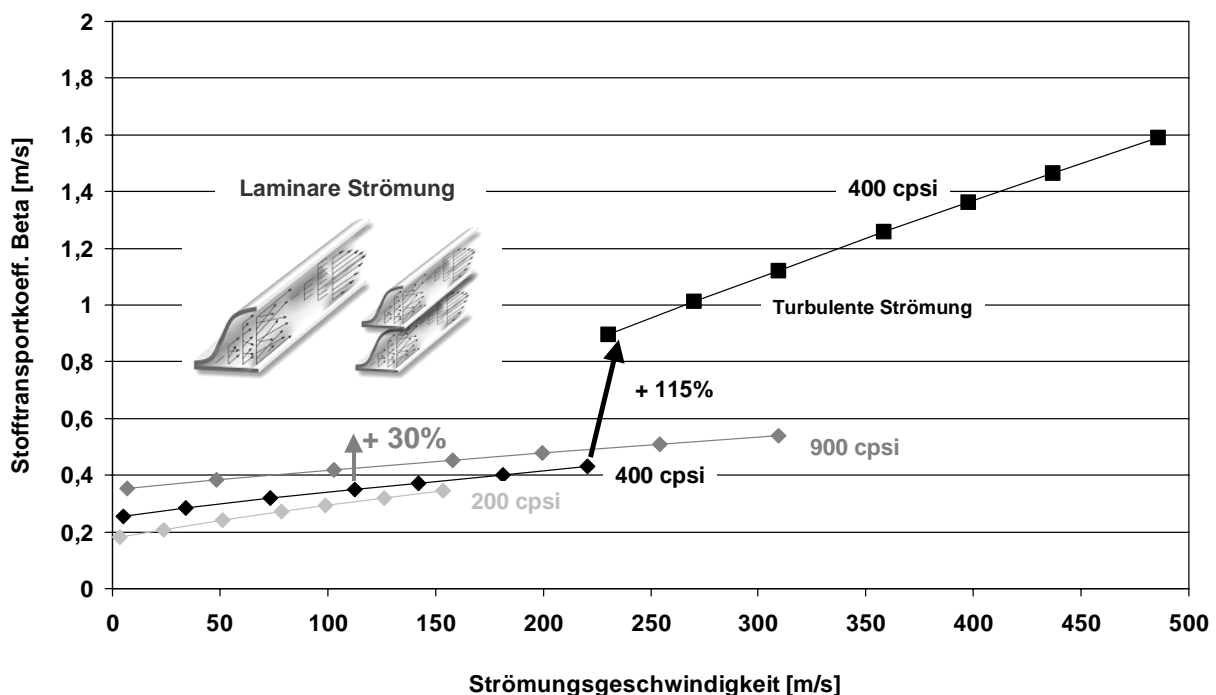
Die Bauweise der Monolithen mit geradlinigen glatten Kanälen konnte jedoch zunächst nicht verlassen werden. Versuche, auf die positiven Eigenschaften der Pellet- / Schüttgut-Systeme zurückzukommen und „turbulente“ Katalysatoren einzuführen, scheiterten an der seinerzeit unzureichenden Fertigungstechnik der Metallfolienherstellung sowie an ungeeigneter Beschichtungstechnologie [6, 7].

Wurden noch höhere volumenspezifische Effektivitäten benötigt, kamen Katalysatorträger mit 900 cpsi zum Einsatz. Sogar Träger mit 1200 bis 1600 cpsi wurden bis zur Serienreife entwickelt, um den Stofftransport zu verbessern [8, 9, 10, 11]. Ein weiterer Vorteil höherer Zelldichten liegt in der damit verbundenen Erhöhung der volumenspezifischen geometrischen Oberfläche, die direkte Auswirkungen auf die Katalyse hat.

Emitec propagierte seit Gründung bereits die Bedeutung der katalytischen Oberfläche pro Volumeneinheit zur Erzielung einer guten Konvertierungsrate. Die zugehörige, möglichst niedrige, querschnittsbezogene aufzuheizende Masse war wiederum ein Kriterium für das Anspringen des Katalysators.

Immer dünner ausgewalzte und gleichzeitig korrosionsbeständigere Metallfolien erlaubten es, die Zelldichten von 400 cpsi (s. o.) um mehr als einen Faktor 3 zu erhöhen, ohne den Kaltstart-Emissionsanteil zu vergrößern. Die Verkleinerung des hydraulischen Durchmessers bewirkt einen besseren Wärmeübergang (verbessertes „Anspringen“) und infolge der Verkürzung der Diffusionswege eine Steigerung der Konvertierungsleistung.

Die Hersteller von keramischen Substraten folgten diesem technologischen Trend nach langjährigem Zögern. Das Potential von „turbulenten“ Reaktoren konnte jedoch nicht erreicht werden (Abbildung 2).



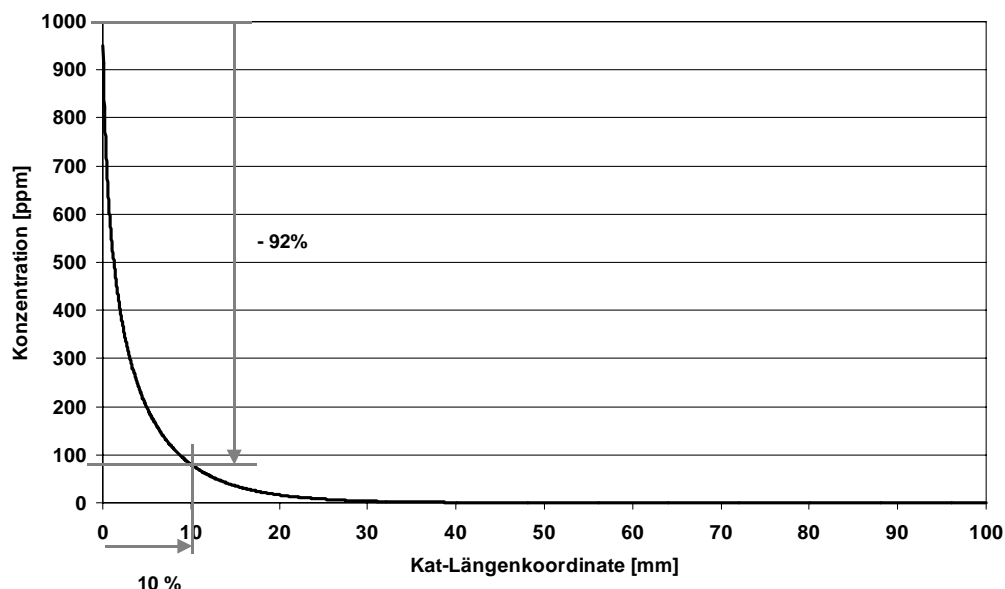
**Abbildung 2:** Stofftransportkoeffizient  $\beta$  als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Zelldichten und Strömungsformen ( $T = 600\text{ °C}$ )  
*Mass transfer coefficient  $\beta$  as a function of flow velocity at various cell densities and laminar/turbulent flow ( $T = 600\text{ °C}$ )*

Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten und damit der Reynoldszahlen im Katalysator (Verkleinerung des Anströmquerschnitts) kann eine turbulente Strömung erreicht werden. Aus Druckverlustgründen kann dies für übliche Katalysatoren nicht realisiert werden. Einzig mittels Abgasturbolader aufgeladene Motoren bieten an der Position vor der Turbine diese Möglichkeit, da der Turbolader selbst einen sehr großen Druckverlust verursacht und ein vorgeschalteter Katalysator

demgegenüber einen geringeren Einfluss hat. Ein solcher Vorturbolader-Katalysator wirkt als Pulsationsdämpfer und Strömungsgleichrichter für die Strömung in die Turbine und hat seine deutlich höhere turbulente katalytische Wirksamkeit bewiesen. Erst der wachsende Druck der Automobilindustrie, kostengünstigere Katalysatoren mit geringeren Volumina und noch höheren Effektivitäten einzusetzen, gab der Entwicklung von „turbulenten“ Katalysatoren neuen Auftrieb. Aber nicht nur die Herstellung solcher Katalysatorträger, sondern auch angepasste katalytische Beschichtungen und Beschichtungsprozesse mussten realisiert werden. Dabei war das zusätzliche Ziel, den Druckverlust abzusenken, um höhere Motorleistungen und niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermöglichen.

## 2. Heterogene Katalyse

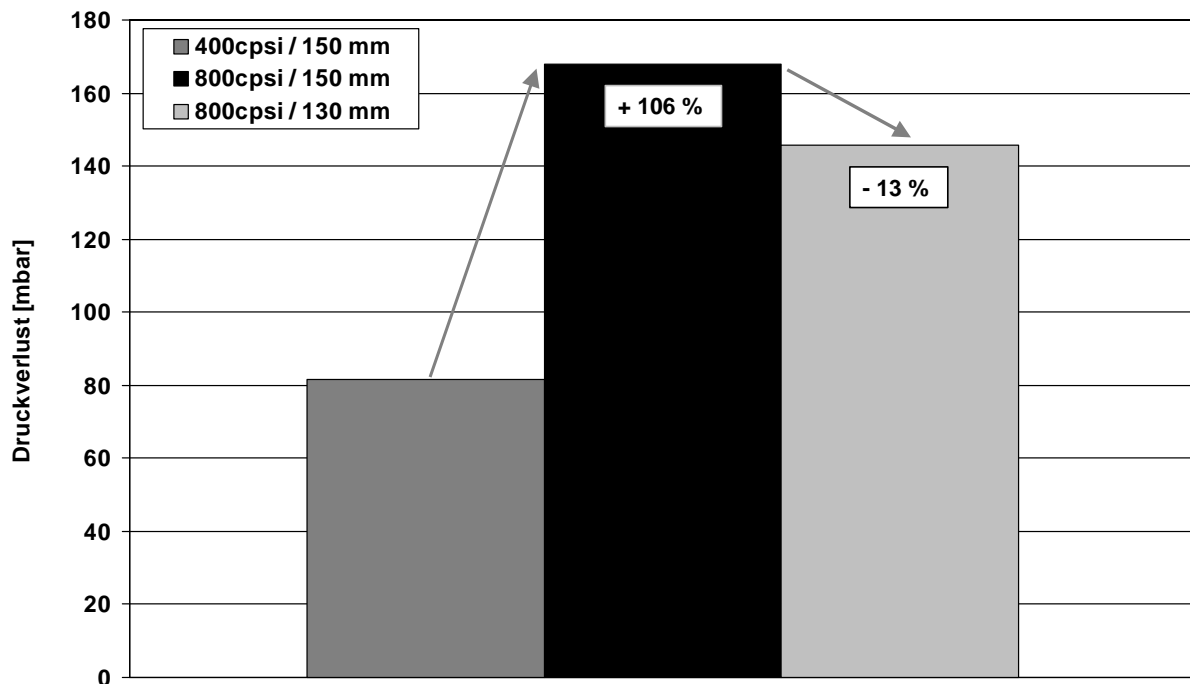
Die Geschwindigkeit der im Fahrzeugkatalysator ablaufenden, heterogen katalysierten Umwandlungsprozesse ist neben der Temperatur und der optimalen Gemischaufbereitung insbesondere vom Stofftransport der beteiligten Substanzen abhängig. Als Stofftransport bezeichnet man den Transport der gasförmigen Emissionen aus dem Gasphasenkern an die katalytisch aktive Wand des Kanals im Katalysatorkörper. Da schon wenige Millimeter hinter der Gaseintrittsseite im Katalysator aufgrund der geringen Kanalgröße (kleiner hydraulischer Durchmesser) eine laminare Strömung mit relativ schlechten Übergangsbedingungen vorliegt, erfolgt der Stofftransport in Form von Diffusion. Das bedeutet nach dem Fick'schen Gesetz, dass die übergehende Stoffmenge zum einen vom Stofftransportkoeffizienten, zum anderen aber direkt vom vorliegenden Konzentrationsgefälle zwischen Gasphasenkern und Kanalwand abhängt. Daraus folgt, dass bei einem betriebswarmen Katalysator ca. 90 % der Emissionen schon nach ca. 10 % der Länge des Katalysators umgesetzt sind (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Abnahme der Emissionen über Katalysatorlänge (exemplarische Berechnung auf Basis einer stofftransportlimitierten Umsetzung)

*Emission reduction vs. catalyst length (calculated on the assumption of mass transfer limitation)*

Aus Abbildung 3 ist zu erkennen, dass ein Großteil des Katalysators und damit auch der Edelmetalle nur einen relativ geringen Anteil der Emissionen umsetzt, weil der Transport aus dem Gasphasenkern (Zellkanal im laminaren Strömungsregime) an die Wand die Geschwindigkeit des Gesamtprozesses limitiert. Einer möglichen Lösung, die Zelldichten weiter zu erhöhen und damit die Kanalgrößen und Diffusionswege zu verkleinern, steht ein überproportional ansteigender Druckverlust entgegen. Auch eine dadurch mögliche Reduzierung der Katalysatorlänge, die linear in den Druckverlust eingeht, kann diesen Nachteil nicht kompensieren (vgl. Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Druckverlust als Funktion der Zelldichte und der Katalysatorlänge (Berechnung, Kat-Ø 105 mm, 400 bzw. 800 cps, 50 µm, 400 kg/h, T = 100 °C, unbeschichtet)  
 Pressure loss as a function of cell density and substrate length (calculation, Cat-Ø 105 mm, 400 resp. 800 cps, 50 µm, 400 kg/h, T = 100 °C, uncoated)

Ein weiterer Trend erfordert neue Wege der Katalysatortechnik: Moderne Motoren zeichnen sich durch immer geringere Rohemissionen aus. Wie oben ausgeführt, verringert sich mit geringeren Schadstoffkonzentrationen jedoch auch der Stofftransport durch Diffusion. Es muss also nach Mitteln zu Erhöhung des Stofftransports gesucht werden.

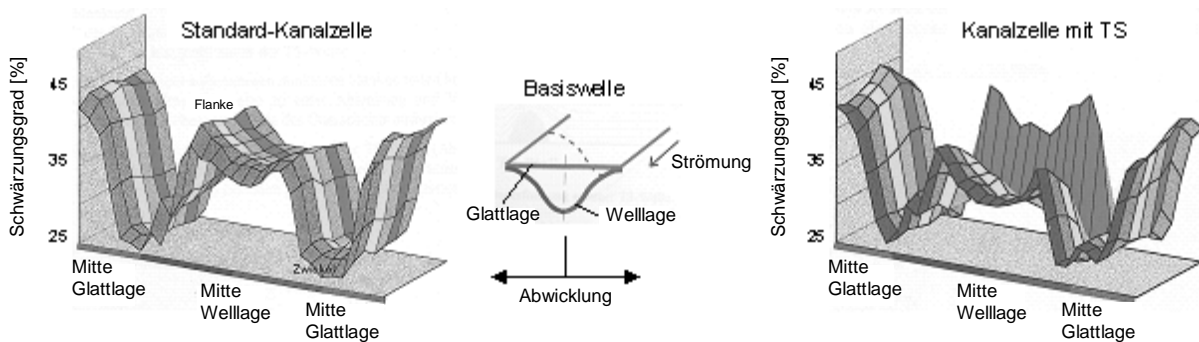
Es bieten sich grundsätzlich folgende Lösungswege an:

- A. Radiale wandnahe Strömungen in den Kanälen (TS-Design)
- B. Verkürzung der Diffusionswege, Verringerung des hydraulischen Durchmessers sowie Wiederholung der Anlaufströmung (LS-Design)
- C. Radial offene, perforierte Strukturen (PE-Design)

### 3. Strukturen mit radialen Strömungsanteilen (TS-Design)

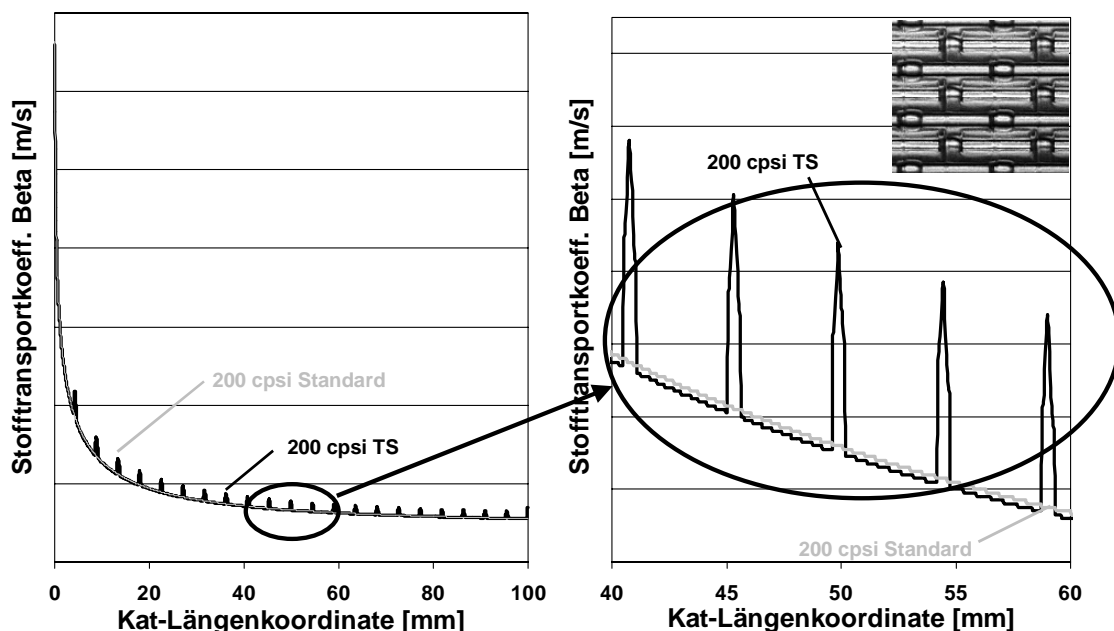
Im Jahre 1990 gelang es, radiale Strömungsanteile durch die so genannte Transversale Struktur (TS-Design) zu realisieren [12, 13].

Versuche an einem Strömungsmodell, bei denen die an die Trägerwand gelangende Stoffmenge einer gasförmigen Substanz (Ammoniak) qualitativ bzw. halb-quantitativ mittels einer chemischen Reaktion mit der Wand durch Farbänderung sichtbar gemacht wurden, zeigten den Vorteil der TS Struktur [14], siehe Abbildung 5.



**Abbildung 5:** Genutzte Kanalwandung (Abwicklung über Zellumfang) in einem glatten Kanal (links) und einem Kanal mit transversal strukturierter Folie (TS, rechts), dargestellt als Schwärzungsgrad in Abhängigkeit von der Position auf der glatten bzw. gewellten Lage  
Intensity of contact between gas and channel walls (flat and corrugated layer), shown by adsorption of ammonia; smooth channel (left) compared to a TS-structured channel (right)

Die Erhöhung des Stofftransportkoeffizienten Beta durch die TS-Einprägungen ist qualitativ in Bild 6 gezeigt.



**Abbildung 6:** Aufbau der TS-Struktur und Vergleich des Stofftransportkoeffizienten Beta eines glatten Kanals mit einem Kanal mit transversaler Struktur (berechnet,  $T = 700\text{ °C}$ ,  $w = 50\text{ m/s}$ , Zelldichte = 200 cpsi)

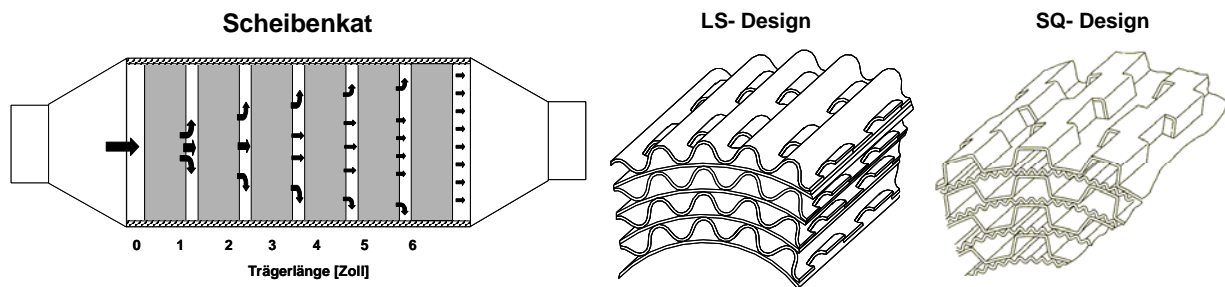
Design of TS-structure, comparison of mass transfer coefficients between a smooth channel and a TS-structured channel (calculated,  $T = 700\text{ °C}$ ,  $w = 50\text{ m/s}$ , cell density = 200 cpsi)

Die in den Abbildungen 5 und 6 ersichtliche, bessere Ausnutzung der Katalysatorwand wurde zum einen zur Verringerung der Zelldichte bei gleicher Effektivität und damit auch einer Verringerung des Gegendrucks, und zum anderen zur Katalysatorverkleinerung verwendet. Da diese Technologie mit serienmäßig zur Verfügung stehenden Prozessen zu beschichten war, wurde sie im Bereich niedriger Zelldichten von 200 bis 500 cpsi in breitem Umfang in Serie eingesetzt. Hierbei wurde eine signifikante Marktdurchdringung erzielt.

#### 4. Strukturen zur Verkürzung der Diffusionswege (LS-Design)

Bereits in den 70er Jahren sind Entwicklungen veröffentlicht worden, die sich mit ungünstigen laminaren Stofftransport-Verhältnissen und Maßnahmen zu dessen Erhöhung beschäftigen. Als sehr wirksam wurde beschrieben, dass z. B. die turbulente und damit effektivere Einlaufströmung wiederholt werden kann, wenn der Wabenkörper in geeignete, kurze Kreisringscheiben mit axialen Zwischenräumen aufgeteilt wird (vgl. Abbildung 7a). Später veröffentlichte Ergebnisse zeigten die Möglichkeit auf, mit Hilfe der durch dieses Scheiben-Kat-Design erhöhten Effektivität das Katalysatorvolumen zu verringern [15]. Diese positiven Erkenntnisse konnten aus Kosten- und Herstellungsgründen für die Serie nicht realisiert werden. Versuche zeigten jedoch eindrucksvoll das Potential „turbulenter“ Strömungsführung auf.

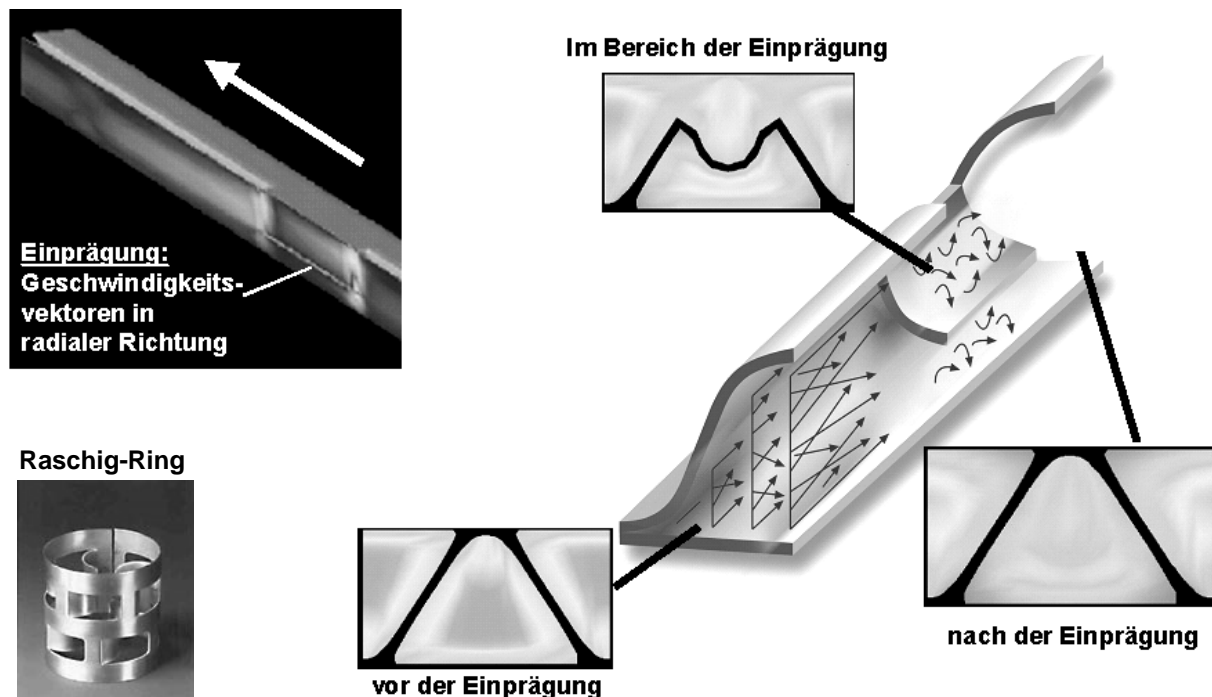
Bereits 1989 wurden zunächst von der Firma Behr und kurze Zeit später von Emitec Trägerstrukturen vorgestellt, bei denen periodisch unterbrochene, längs in der Strömung stehende Wände die herkömmlichen, glatten Kanalwandungen ersetzen. Diese sogenannten Behr-SQ- und Emitec-LS-Technologien sind in [16] und [17] beschrieben (vgl. Abbildung 7b und 7c). Beide Trägerkonzepte bewirkten sowohl eine Wiederholung der Anlaufströmung, als auch eine Verkürzung der Diffusionswege (s.o).



**Abbildung 7:** a) Scheiben-Kat-Technologie (links)  
 b) SQ-Technologie (Mitte)  
 c) LS-Technologie (rechts)

Die erste Hürde bestand in der Bereitstellung geeigneter Herstellungsverfahren für Metallträger, da die Folienprofile über das Wellen hinaus ein Prägen und Schneiden der Struktur erforderten. Da aber auch – wie bereits erwähnt – ein geeigneter Beschichtungsprozess nicht zur Verfügung stand, waren selbst reproduzierbare Forschungsarbeiten zum Scheitern verurteilt. Neue Fertigungstechnologien, Prozesstechniken und Werkstoffe erlauben heute die Realisierung früherer Überlegungen. Neuartige Beschichtungsprozesse – abgestimmt auf strukturierte Metallträger-Technologien – sind inzwischen in Serie.

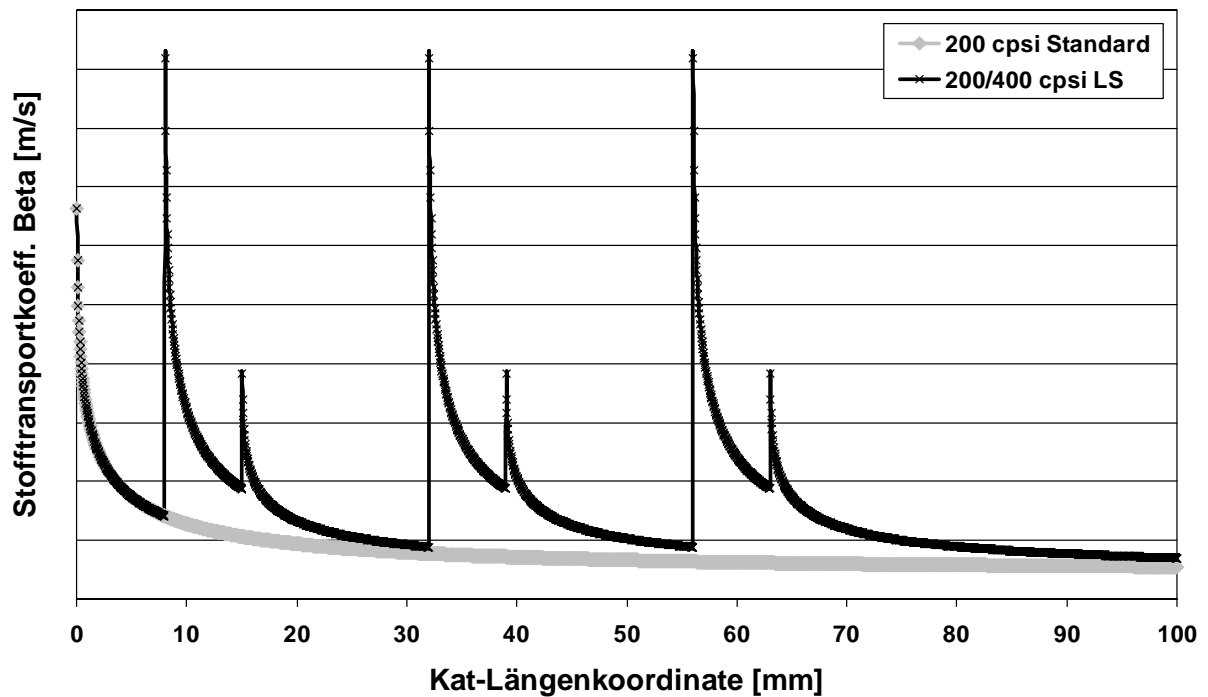
Sowohl das SQ- als auch das LS-Design haben gemeinsam, dass die Schadstoffteilchen aus der Kanal-Kernströmung nicht alleine durch Diffusion zur Wand gelangen müssen, sondern die neue, in den Kanal ragende Wand mitten in den Strömungskern eingebracht wird. Tatsächlich schiebt sich eine LS-Finne in einen Kanal, bevor sich eine laminare Strömung und damit ein entsprechendes Konzentrationsprofil ausbilden kann (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Radiale Strömungen und Konzentrationsprofile in einem LS-Kanal  
*Radial flow profiles and concentration profiles within a LS-structured channel*

Berechnungen verdeutlichen diesen Effekt. Die mehrfach hintereinander liegende Anordnung des normalen Strömungskanals und der LS-Finne ist vom Prinzip her vergleichbar mit Schüttungen von Raschig-Ringen (Abbildung 8), bei denen Katalysator-Hohlzylinder als Schüttgut durchströmt werden. Dieser Effekt des mehrfachen Strömungs-Anlaufs ähnelt außerdem der in Abb. 7a gezeigten vielfachen Hintereinanderreihung von kurzen Katalysatorscheiben mit geeigneten Zwischenräumen. Das LS-Design repräsentiert damit zum ersten Mal die schon aus der chemischen Industrie bekannten, „turbulenten“ Katalysatorsysteme auch für instationäre automobile Anwendungen. Abbildung 9 verdeutlicht den Einfluss auf den Stofftransports entlang eines Kanals im Vergleich zu einem Standardkanal.

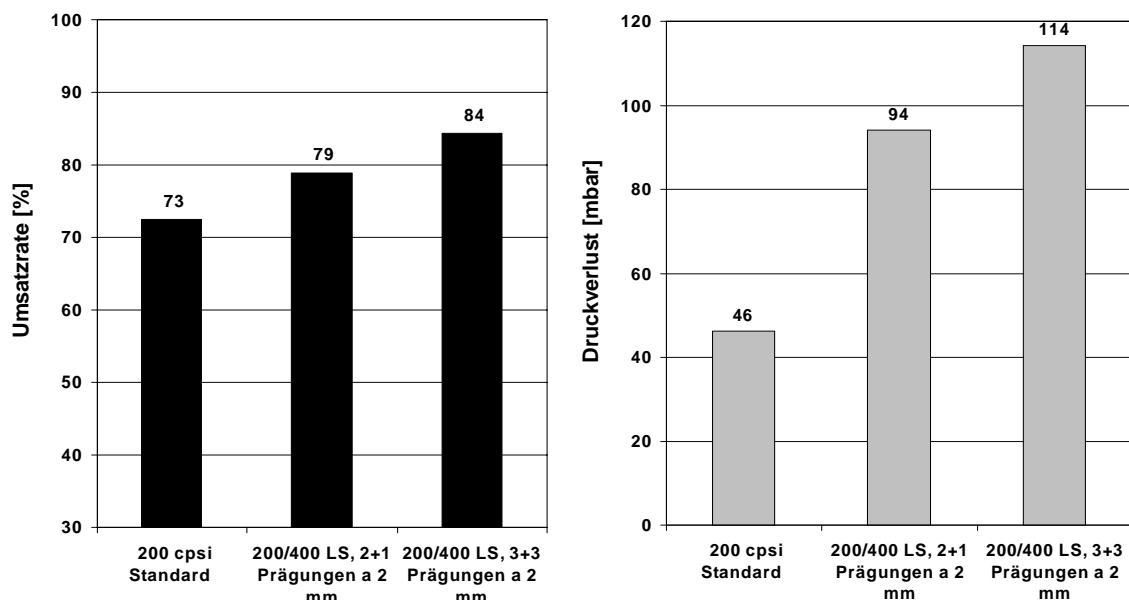
Die Bezeichnung der LS-Zelldichten erfordert eine neue Nomenklatur. Die Grundzellstruktur, die den Materialeinsatz bestimmt, wird der Bezeichnung vorangestellt. Die wirksame Zellstruktur – einschließlich der LS-Finnen – die in der Durchsicht erkennbar ist, bildet die zweite angegebene Zelldichte. Die Wirkung der LS-Struktur ist von einer optimalen Auslegung der LS-Einprägung abhängig.



**Abbildung 9:** Stofftransportkoeff. Beta in einem Standard- und einem LS-Kanal (berechnet,  $T = 700\text{ °C}$ ,  $w = 50\text{ m/s}$ , Zelldichte = 200/400 cpsi, Schaufellänge = 7 mm, Abstand = 17 mm)

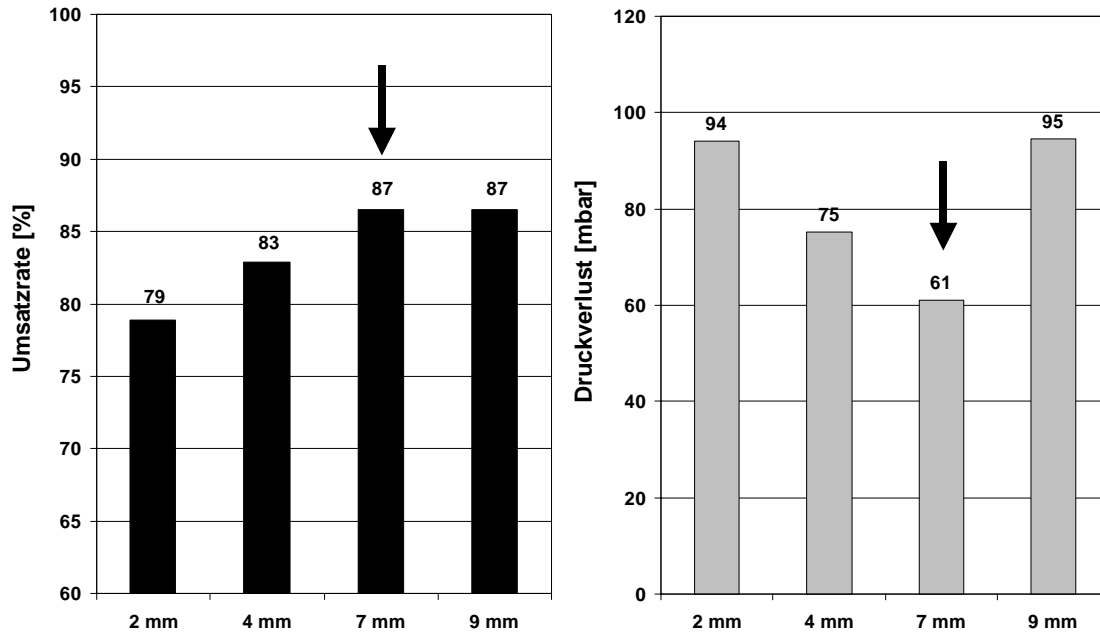
Mass transfer coefficient Beta along a standard channel and a channel with LS-structure (calculated,  $T = 700\text{ °C}$ ,  $w = 50\text{ m/s}$ , cell density = 200/400 cpsi, shovel length = 7 mm, distance of shovels = 17 mm)

In den Abbildungen 10a, 10b und 10c sind die Ergebnisse unterschiedlicher Prägungslängen, -anzahlen und Eindrücktiefen der LS-Zelldichte 200/400 cpsi dargestellt.



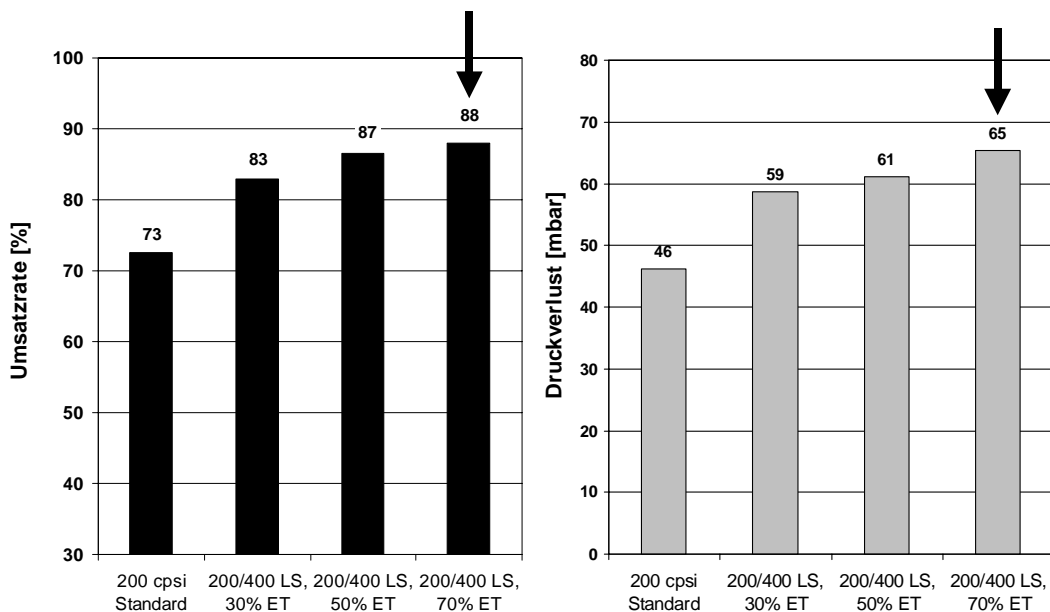
**Abbildung 10a:** Einfluss Einprägungsanzahl (Schaufellänge 2mm, Einpresstiefe 50 %): Effizienzen / Druckverluste div. LS-Geometrien (Messung, Eff.:  $T = 600\text{ °C}$ ,  $w = 10\text{ m/s}$ , Propen  $7\text{ mM/m}^3$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $V_{\text{kat}} = 3,2\text{ cm}^3$ ,  $PM = 30\text{ g/ft}$ ,  $Pd:Rh=5:1$ ; Gegendruck:  $m = 10\text{ kg/h}$ ,  $T = 100\text{ °C}$ )

Influence of shovel number (Shovel length 2mm, Shovel depth 50 %): Efficiency / pressure loss of various LS-Designs (Measurement, Eff.:  $T = 600\text{ °C}$ ,  $w = 10\text{ m/s}$ , Propene  $7\text{ mM/m}^3$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $V_{\text{kat}} = 3,2\text{ cm}^3$ ,  $PM = 30\text{ g/ft}$ ,  $Pd:Rh=5:1$ ; Pressure loss:  $m = 10\text{ kg/h}$ ,  $T = 100\text{ °C}$ )



**Abbildung 10b:** Einfluss Einprägungslänge (Schaufelanzahl 2 +1, Einpresstiefe 50 %, 200/400 LS): Effizienzen und Druckverluste div. LS-Geometrien (Messung, Eff.:  $T = 600\text{ °C}$ ,  $w = 10\text{ m/s}$ , Propene  $7\text{ mM/m}^3$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $V_{kat} = 3,2\text{ cm}^3$ ,  $PM = 30\text{g/ft}$ ,  $Pd:Rh=5:1$ ; Gegendruck:  $m = 10\text{ kg/h}$ ,  $T = 100\text{ °C}$ )

Influence of shovel length (Shovel number 2 +1, Shovel depth 50 %): Efficiency and pressure loss of various LS-Designs (Measurement, Eff.:  $T = 600\text{ °C}$ ,  $w = 10\text{ m/s}$ , Propene  $7\text{ mM/m}^3$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $V_{kat} = 3,2\text{ cm}^3$ ,  $PM = 30\text{g/ft}$ ,  $Pd:Rh=5:1$ ; Pressure loss:  $m = 10\text{ kg/h}$ ,  $T = 100\text{ °C}$ )



**Abbildung 10c:** Einfluss Einprägungstiefe ET (Schaufelanzahl 2 +1, Schauffellänge 7 mm): Effizienzen und Druckverluste div. LS-Geometrien (Messung, Eff.:  $T = 600\text{ °C}$ ,  $w = 10\text{ m/s}$ , Propene  $7\text{ mM/m}^3$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $V_{kat} = 3,2\text{ cm}^3$ ,  $PM = 30\text{g/ft}$ ,  $Pd:Rh=5:1$ ; Gegendruck:  $m = 10\text{ kg/h}$ ,  $T = 100\text{ °C}$ )

Influence of shovel depth ET (Shovel number 2 +1, Shovel length 7 mm): Efficiency and pressure loss of various LS-Designs (Measurement, Eff.:  $T = 600\text{ °C}$ ,  $w = 10\text{ m/s}$ , Propene  $7\text{ mM/m}^3$ ,  $\Lambda = 1$ ,  $V_{kat} = 3,2\text{ cm}^3$ ,  $PM = 30\text{g/ft}$ ,  $Pd:Rh=5:1$ ; Pressure loss:  $m = 10\text{ kg/h}$ ,  $T = 100\text{ °C}$ )

Bei den gezeigten Trägervarianten wurde die Prägungslänge unabhängig von der Anzahl der Einprägungen (LS-Strukturen) variiert, die Kanallänge war in allen Fällen identisch. Aus Abbildung 10 a geht hervor, dass eine zu hohe Schaufelzahl einen überproportional hohen Druckverlust hervorruft. Daher wurde in den nächsten Schritten die Länge sowie die Tiefe der Einprägung variiert (Abb. 10 b und c). Das hieraus abgeleitete, mit Pfeilen gekennzeichnete Design wurde für die Serie festgelegt (7 mm Länge bei 70% ET). Diese Bauart, bei einer Zelldichte von 200/400 cpsi LS angewandt, weist einen Druckverlust auf, der einem Standardsubstrat mit 400 cpsi äquivalent ist. Generell lassen sich die Einflüsse des Schaufeldesigns auch auf höhere Zelldichten übertragen.

Aufgrund der in motornaher Lage meist schlechten Strömungsverteilung bei angemessener Einzelzylinderbeaufschlagung ist ein radialer Ausgleich zwischen den einzelnen Beaufschlagungsschwerpunkten der Kat-Stirnfläche wünschenswert. Zum einen wird der Ausnutzungsgrad des Katalysators verbessert, und zum anderen werden die im realen Betrieb leicht unterschiedlichen Lambdawerte der einzelnen Zylinder zu einem für die katalytische Effektivität idealen stöchiometrischen Gemisch vermengt.

Durch die nicht strukturierte Glattlage bei der LS-Struktur ist ein radialer Strömungsausgleich im Katalysator jedoch nur sehr begrenzt innerhalb einzelner Ebenen der LS-Struktur möglich.

## 5. Radial offene Strukturen (PE-Design)

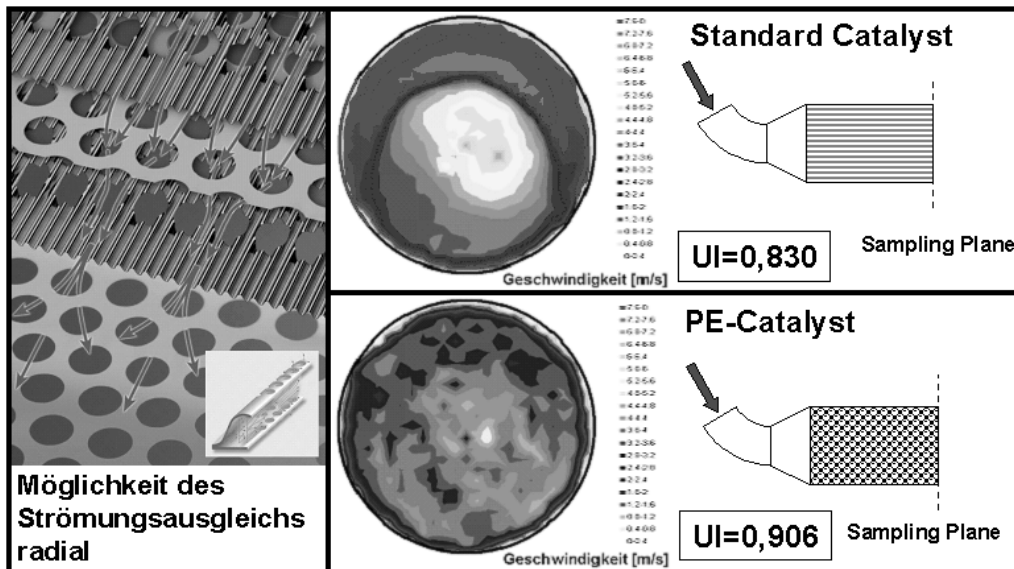
Ein wirksamer radialer Strömungsausgleich innerhalb eines METALIT<sup>®</sup>-Katalysatorträgers lässt sich durch geeignete Perforation der Folien erreichen.

Als Auslegungskriterium für die Größe der Ausnehmung und die Lochdichte gilt es, zumindest die verringerte geometrische Fläche durch verbesserten Stofftransport und Strömungsvergleichmäßigung zu kompensieren. Die katalytische Beschichtung ist hier von besonderem Interesse, da der Verlust an Fläche bei einer konstanten Washcoatmenge pro Volumen zu einem dickeren Washcoat führt, der wiederum verschlechterte Porendiffusionseigenschaften der Reaktanten innerhalb des Washcoats und höhere Druckverluste zur Folge hat. Auch hier wurden von Seiten der Beschichtungshersteller erfolgreiche Anstrengungen unternommen, um neue Washcoats mit verringerter Washcoatmenge, aber gleicher Sauerstoffspeicherfähigkeit zu entwickeln.

Perforierte Folien wirken in zweierlei Hinsicht: Zum einen „erlauben“ die Löcher einer Ebene der Strömung, aufgrund von Druckverlustunterschieden von einem in den anderen Kanal zu wechseln, wodurch ein Strömungsausgleich stattfinden kann (Abbildung 11).

Die zweite Wirkung beruht auf dem geometrischen Aufbau des Wickelkörpers mit gelochten Folien. Die Folienlöcher werden so angeordnet, dass sie in Achsrichtung auf hintereinander liegenden Querschnittsabschnitten liegen. Dabei bilden sich aufgrund der Wickeltechnik in axialer Richtung hintereinander versetzt angeordnete Hohlräume (Kavernen, siehe Abbildung 12).

Das bewirkt eine „Zick-Zack“ Strömung aus den Kanälen in die Kavernen und am Ende der Kavernen wieder in die Kanäle. Die Richtung der Strömung in den Kavernen ist sowohl von der Druckdifferenz wie auch vom Druckabfall benachbarter



**Abbildung 11:** Schematisch dargestellter Strömungsausgleich und Strömungsverteilungsergebnisse  
 Diversion of channel flow (schematic) and results of flow distribution measurements

Kanäle abhängig. Beim Kavernen- Kanal-Übergang erreicht man den gleichen „Turbulenz“-Effekt wie bei der Anlaufströmung eines Katalysators.

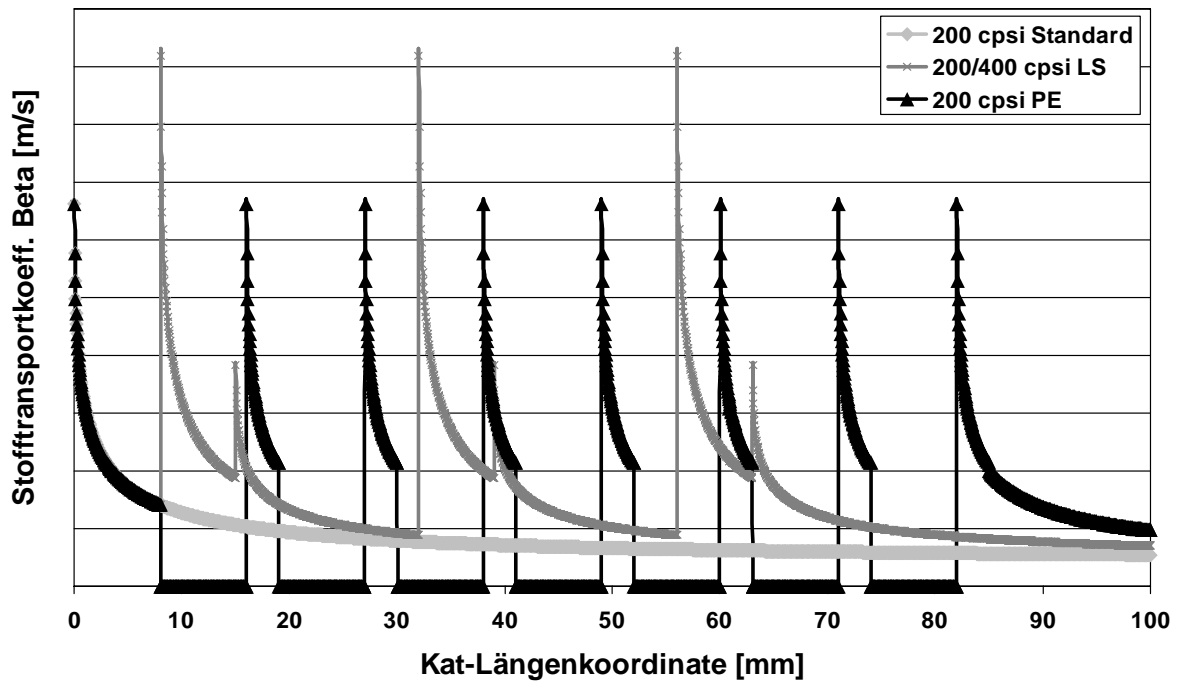


**Abbildung 12:** PE-Struktur mit Kavernenbildung  
 PE structure with “caves”

Dies ist zum einen begründet durch die ständige Wiedererholung der Einlaufströmung, und zum anderen durch den verringerten hydraulischen Durchmesser im Bereich der Einprägung.

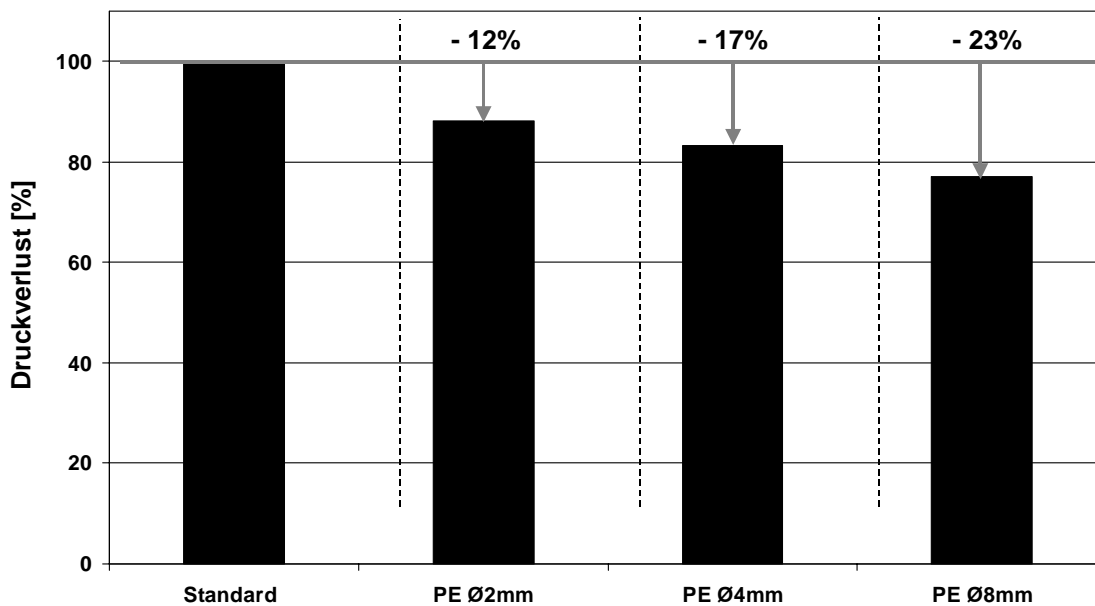
Der Druckverlust der PE-Struktur ist in den Kavernen aufgrund des deutlich größeren hydraulischen Durchmessers und der damit reduzierten Wandreibung drastisch reduziert, so dass der wiederholte Einströmdruckverlust bei der Ausbildung der Strömung aus den Kavernen heraus in die Zellkanäle hinein überkompensiert wird.

In Abbildung 14 sind die Druckverluste als Funktion der Lochgröße dargestellt, von der diese Funktion abhängt. Für den Serieneinsatz wurde der Lochdurchmesser auf 8 mm und eine Porosität von ~40% festgelegt.



**Abbildung 13:** Stofftransportkoeffizient Beta über Kanallänge eines Standardträgers / LS-Trägers / PE-Trägers (berechnet,  $T = 700\text{ °C}$ ,  $w = 50\text{ m/s}$ , Zelldichte = 200/400 cpsi, Einprägungslänge = 7 mm, Abstand = 17 mm, Lochdurchmesser = 8 mm, Lochabstand = 3 mm)

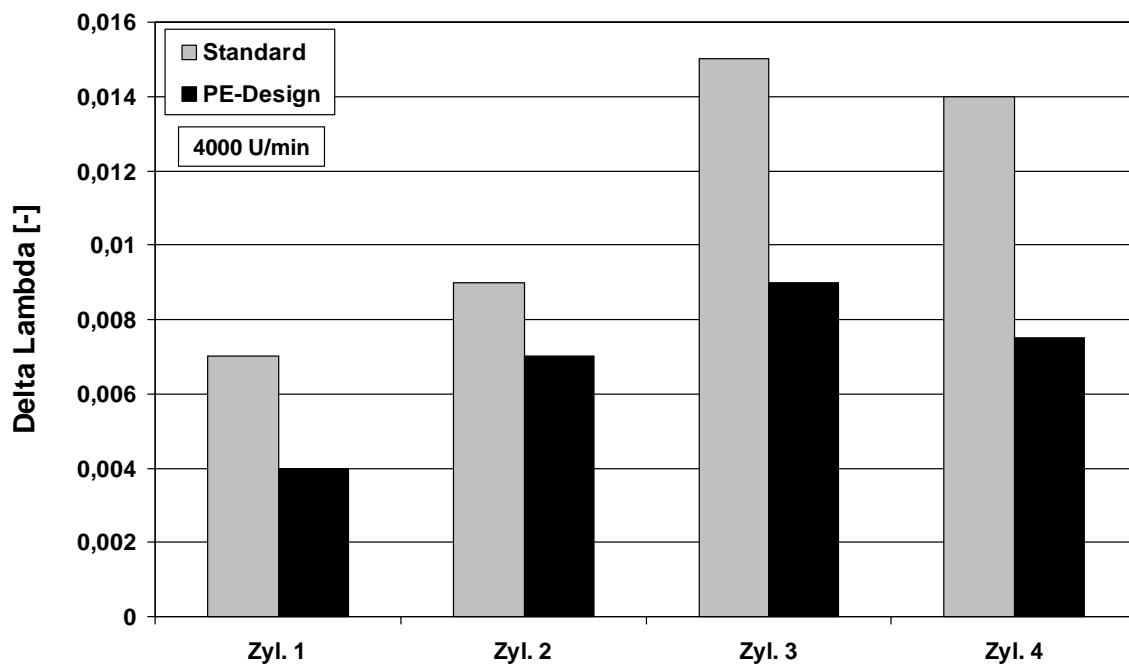
Mass transfer coefficient Beta along a standard structure / LS-structure / PE-structure (calculated,  $T = 700\text{ °C}$ ,  $w = 50\text{ m/s}$ , cell density = 200/400 cpsi, shovel length = 7 mm, distance of shovels = 17 mm, hole diameter = 8 mm, hole distance = 3 mm)



**Abbildung 14:** Druckverluste von Substraten mit diversen PE-Lochgrößen (Messung,  $T = 100\text{ °C}$ ,  $m = 300\text{ kg/h}$ , Träger  $\text{Ø} 118 \times 74,5\text{ mm}$  / 400 cpsi /  $50\text{ }\mu\text{m}$ , unbesch., Porosität = 37 %)

Pressure loss of substrates with various PE-hole sizes (Measurement,  $T = 100\text{ °C}$ ,  $m = 300\text{ kg/h}$ , Substrate  $\text{Ø} 118 \times 74,5\text{ mm}$  / 400 cpsi /  $50\text{ }\mu\text{m}$ , uncoated, porosity = 37 %)

Wie schon kurz erwähnt, kommt neben der Strömungsverteilung vor allem dem Ausgleich der zylinderabhängigen Gaskonzentrationen eine besondere Bedeutung zu. Vor allem bei motornahen Katalysatoren, die lediglich aus einem Träger bestehen, kann es je nach Lage der Lambdasonden zu unterschiedlichen Messergebnissen der Vor-Kat- und Nach-Kat-Lambdasonde kommen. Im Extremfall detektiert die Vor-Kat-Sonde (z. B. im Krümmer integriert) ein ideales Gemisch aller Zylinder, während die Nach-Kat-Sonde primär vom Abgas nur eines Zylinders beaufschlagt wird. Eine Verschmutzung der Einspritzdüsen kann dann zu einer falschen Gemischbildung oder sogar zum Aktivieren der OBD-Lampe führen. Abbildung 15 zeigt die Auswirkung der PE-Struktur schon bei relativ kurzen Trägerlängen von 50,8 mm auf die Vergleichmäßigung der Lambdasignale vor und nach Katalysator bei einer zylinderselektiven Abmagerung von 20 %.



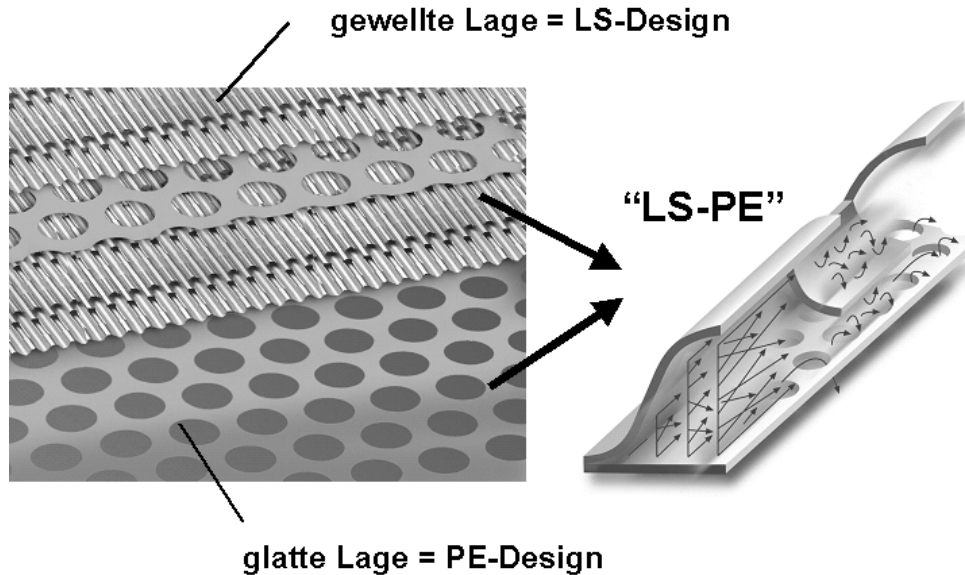
**Abbildung 15:** Vergleichmäßigung der Lambdasignale vor und hinter Kat durch die PE-Struktur bei schrittweiser Abmagerung eines Zylinders (Messung am Motorprüfstand, Katalysator  $\varnothing$  110 x 50,8 mm/600 cps/40  $\mu$ m),  $\Delta \text{Lambda} = \text{Lambda nach Kat} - \text{Lambda vor Kat}$

*Equalisation of lambda signals in front of / behind catalyst by using a PE-structured substrate; Step-wise increasing of the A/F ratio of one cylinder (Measurement on roller test bench, Catalyst  $\varnothing$  110 x 50,8 mm/600 cps/40  $\mu$ m),  $\Delta \text{Lambda} = \text{Lambda behind catalvst} - \text{Lambda in front of catalvst}$*

Frühere Überlegungen [18], eine gelochte Metallträger-Struktur im vorderen Teil des Trägers zur Verbesserung des Ansprungsverhaltens (durch die Verringerung der aufzuheizenden Masse) einzubringen, werden durch diese Forschungsergebnisse vollständig bestätigt. Die strömungsmechanischen und stoffübergangsrelevanten Vorteile konnten zu jener Zeit noch nicht theoretisch oder gar praktisch ermittelt werden. Die hier präsentierten Ergebnisse belegen eindeutig, dass erst eine axial vollständig strukturierte Matrix das gesamte strömungsmechanische, thermodynamische und chemische Leistungspotential entfalten kann [19].

## Kombination der Strukturen PE und LS

Hierbei ist die gewellte Lage des METALITEN mit der LS-Struktur versehen, die glatte Lage wird entsprechend des PE-Designs gelocht (Abbildung 16).



**Abbildung 16:** Kombination der LS- und PE-Strukturen in einem Träger als LS/PE-Struktur  
*Combination of LS- and PE-structures within one substrate as a so-called LS/PE-structure*

Im folgenden Kapitel werden nun beispielhaft die Anwendungsmöglichkeiten der „turbulenten“ Katalysatoren mit radialem Strömungsausgleich aufgezeigt.

## 6. Einsatzbeispiele

Die vorher beschriebenen strukturierten Folien können so eingesetzt werden, dass sie völlig neue applikationsabhängige Vorteile generieren können:

- I. Druckverlustabsenkung
- II. Ausgleichsfunktion der Konzentrationen
- III. Strömungsverteilung
- IV. Verbessertes Stofftransport

Die PE-Struktur wird heute schon in sportlichen Applikationen mit hohen Anforderungen an den Druckverlust eingesetzt. Im Verlauf der Trägerentwicklungen für EU4-, ULEV- und SULEV-Ottomotoren haben sich heute Träger mit hohen Zelldichten (s.o.) aufgrund ihrer Effektivität, Baugröße und minimalen Systemkosten etabliert. Entsprechend wurden auch leistungsstarke Sportfahrzeuge mit Trägern von bis zu 600 cpsi und entsprechenden Druckverlustnachteilen ausgerüstet. Das PE-Design eröffnet nun die Möglichkeit, beispielsweise einen Träger mit 600 cpsi und PE-Technik einzusetzen, der bei gleichem Volumen einen Standardträger mit 600 cpsi bzgl. seiner Effektivität ersetzen kann, jedoch nur den Druckabfall eines Trägers mit 400 cpsi ausweist. Bereits vor einem Jahr ging der Audi RS6 [20] als Weltpremiere damit in Serie. Weitere Fahrzeuge – wie der Maserati V8 – folgten. Seit Beginn des Katalysatoreinsatzes im automobilen Rennsport waren Metallträger wegen des Druckverlustvorteils erste Wahl.

2004 erprobte Volvo mit einem äußerst erfolgreichen S60-Fahrzeug die PE-Struktur im Rennsport. 2005 werden bereits die meisten Rennserien auf PE umgestellt. Dieser METALIT<sup>®</sup>-Typ erneuert damit den Ruf der Metallträger für sportliche Automobile.

## 6.1. Anwendung für Ottomotoren

Die Abgasnachbehandlung der Ottomotoren wurde fälschlicher Weise bereits als „fertig entwickelt“ bezeichnet, da sich mit den vorhandenen Technologien das Ziel des die Umwelt reinigenden Automobils verwirklichen lassen konnte. Da also mit heutigen Standardkatalysatoren die notwendigen Effektivitäten erreicht werden können, liegt das Ziel beim Einsatz der neuartigen „turbulenten“ Träger, in der Reduzierung der Katalysator- und Systemkosten. Hierbei müssen vor allem die Funktionen zur Lambdaregelung und zur Katalysatordiagnose mit betrachtet werden.

Ein heutiges Standardkatalysatorsystem besteht zumeist aus zwei Trägern, die in einem Gehäuse hintereinander angeordnet sind. Zur Verbesserung des Kaltstarts wird der Durchmesser des ersten Trägers gegenüber dem des zweiten reduziert; man spricht von sogenannten Kaskadensystemen [21]. Der Spalt zwischen den beiden Trägern wird meist verwendet, um die zweite Lambdasonde unterzubringen. Zusätzlich bewirkt der Spalt eine Vermischung und eine Vergleichmäßigung der Strömung.

Bei solchen heute üblichen, sehr wirksamen Systemen kann sowohl der Einsatz des LS-, als auch des PE-Designs deutliche Funktions- und Kostenvorteile erzeugen. Beide Struktur-Typen offerieren eine geringere thermische Masse, womit der erste kleinere Träger der Kaskade vermieden werden kann.

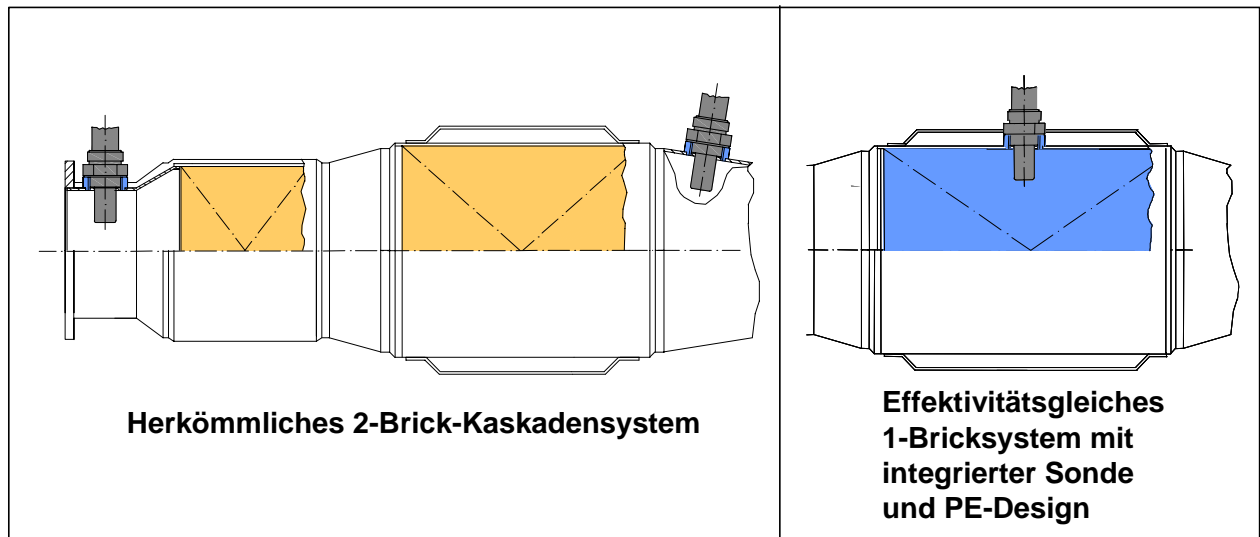
Kommt neben diesem Aufbau noch eine weitere Innovation zum Einsatz, der sogenannte Lambda-Sondenkatalysator [22], wird der Spalt zwischen den Trägern überflüssig, denn dieser Trägertyp erlaubt die Positionierung einer oder mehrerer Lambdasonden direkt im Träger. Die radiale „Durchlässigkeit“ im Träger erlaubt nun auch einen Diffusionsausgleich der Schadstoffkonzentrationen, was die Regelgüte der Gemischbildung begünstigt.

Durch die Herstellmethode von metallischen Katalysatorträgern ist es möglich, während der Fertigung mittels eines einfachen Stanzprozesses ein Lambda-sondenloch an beinahe jeder beliebigen axialen Position einzubringen. Die in die Metallfolien gestanzten Löcher vereinigen sich beim Zusammenbau des Trägers zum Lambdasondenloch. In Verbindung mit der PE-Struktur entsteht dadurch ein Einzelträgersystem mit der Funktion eines Zwei-Trägersystems.

Ein weiterer Vorteil der LS/PE-Struktur ist die reduzierte thermische Masse, wodurch das Kaltstartverhalten verbessert und damit die Kaskadierung der Träger unnötig wird.

Abbildung 17 zeigt den Vergleich einer klassischen Kaskade mit einem Einträgersystem, das eine integrierte Lambdasonde und PE-Struktur besitzt.

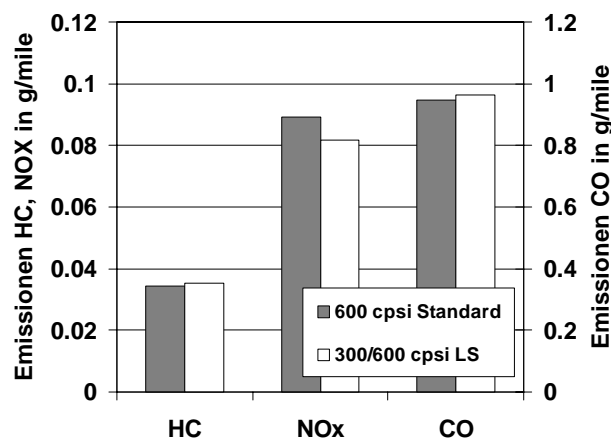
Es wird deutlich, dass durch die Kombination der LS-/PE-Struktur mit integrierter Lambdasonde die Systemkosten deutlich reduziert werden können.



**Abbildung 17:** Vergleich von Kaskadensystem und Einzelträgersystem mit integrierter Sonde und PE-Design

*Comparison of a catalyst cascade design and a single brick catalyst with integrated lambda sensor and PE-design*

In Abbildung 18 sind die gasförmigen Emissionen eines Katalysatorsystems mit LS-Technik im Vergleich zu einem Standardsubstrat in einer ottomotorischen Anwendung dargestellt. Man erkennt, dass ein System mit 600cps durch einen Träger mit 300/600cps LS ersetzt werden kann.



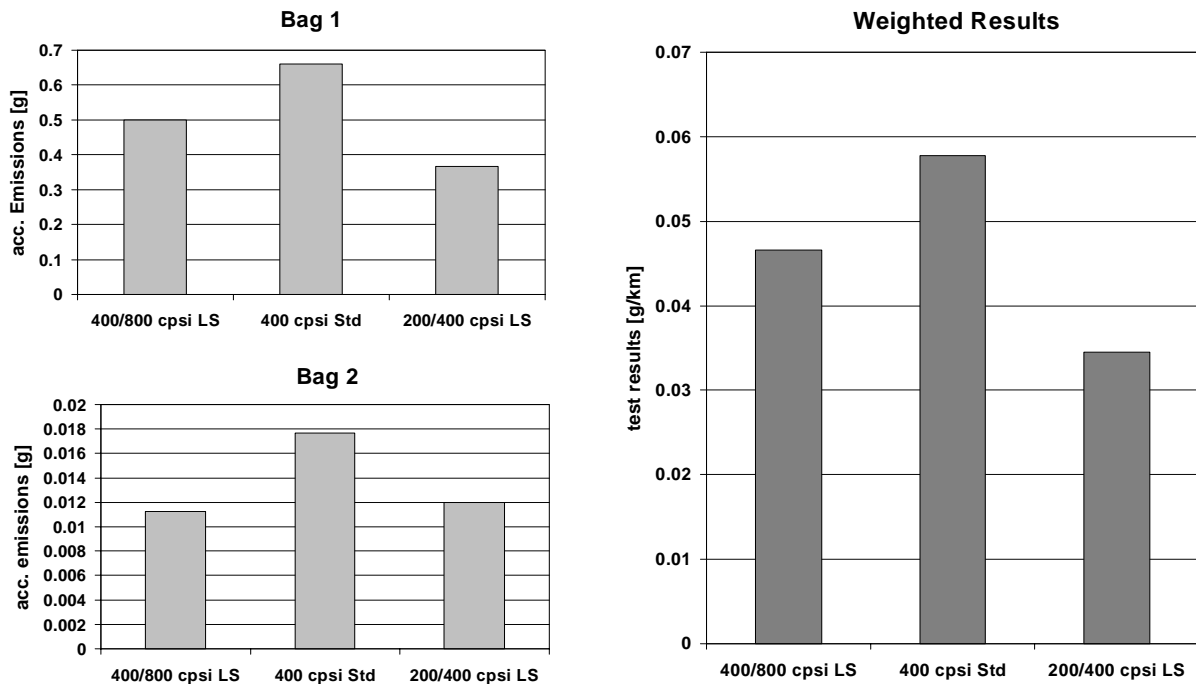
**Abbildung 18:** Emissionen eines Katalysators  $\varnothing 105 \times 135 \text{ mm}$  ( $70 \text{ g/ft}^3$ ; 1:7:1) im FTP-75 Test gemessen an einem 1,8l-Turbo-Motor

*Emissions of a Substrate  $\varnothing 105 \times 135 \text{ mm}$  ( $70 \text{ g/ft}^3$ ; 1:7:1) in an FTP-75 test cycle using an 1,8l-engine with turbocharger*

## 6.2. Anwendungen für Dieselmotoren

### 6.2.1. Oxidationskatalysatoren; Einsatz der LS-Struktur:

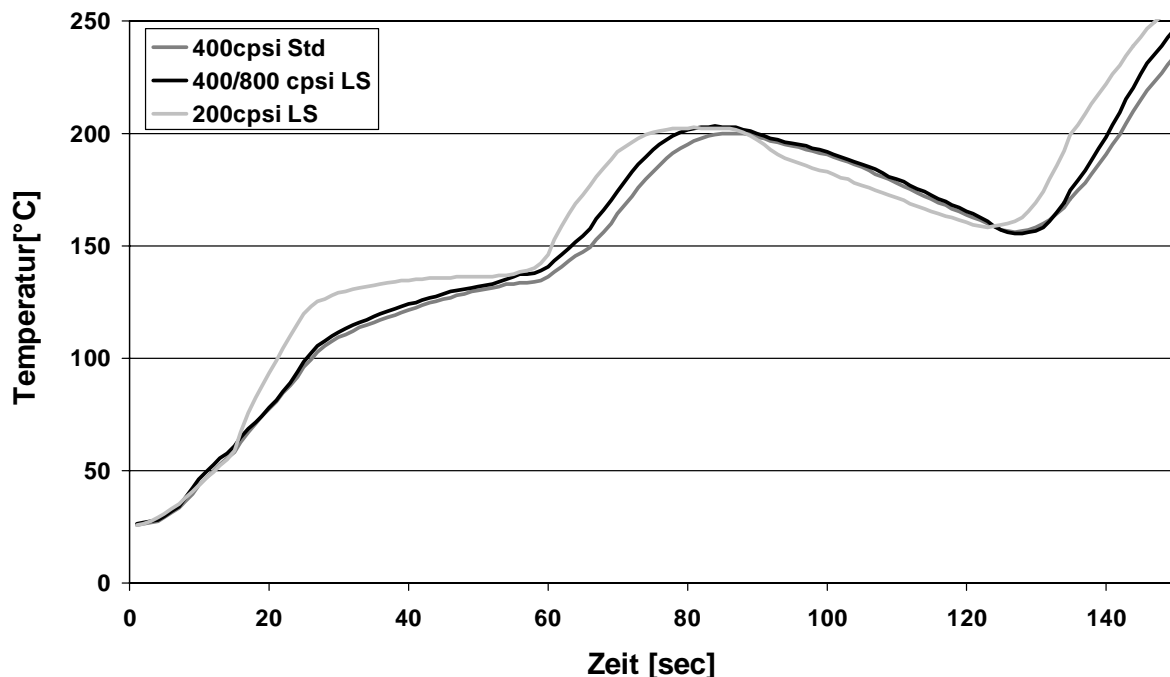
An einem Mittelklassefahrzeug mit 2,2l Turbodiesel-Motor wurde ein Vergleichsprogramm durchgeführt. Zum Einsatz kamen ein 200/400 cpsi LS- und ein im Volumen verkleinerter 400/800 cpsi LS-Träger im Vergleich zu einem 400cpsi-Standardsubstrat. Alle Katalysatoren wurden im NEFZ-Zyklus gefahren.



**Abbildung 19:** CO-Emissionsergebnisse bei einem Trägervergleich an einem 2,2 l Dieselmotor (Messung am Rollenprüfstand, Träger  $\varnothing$  118mm, Länge 150 mm ( $V=1,64$  l) bei 400 cpsi und 200/400 LS bzw. Länge 110 mm ( $V=1,20$ l) bei 400/800LS, alle  $50 \mu\text{m}$ ,  $\text{PM} = 90 \text{ g/ft}^3$  Pt:Pd:Rh = 1:0:0) ECE, EUDC und Gesamttest

CO Emission result on a 2,2 l Diesel engine (Roller test bench, substrate  $\varnothing$  118 mm, Length 150 mm ( $V=1,64$  l) with 400 cpsi and 200/400LS, resp. Length 110 mm ( $V=1,20$  l), all  $50 \mu\text{m}$ ,  $\text{PM} = 90 \text{ g/ft}^3$  Pt:Pd:Rh = 1:0:0) ECE-, EUDC- and total test result

Der Vorteil der 200/400-LS-Struktur im ECE-Teil des EU-Testzyklus (vgl. Abbildung 19) ist bei dieser speziellen Anwendung zum einen auf die geringere Wärmekapazität und damit auf das schnellere Aufheizverhalten zurückzuführen (Abbildung 20), zum anderen spielt im Vergleich zum Träger mit 400/800-LS bei niedrigen Temperaturen (Diesel) – aufgrund der limitierten Reaktionsgeschwindigkeit – das Katalysatorvolumen eine Rolle. Im betriebswarmen Zustand (EUDC-Teil) zeigt sich deutlich der Stofftransportvorteil der LS-Strukturen, der den Kaltstartnachteil überkompensieren kann (Abbildung 19).



**Abbildung 20:** Strukturtemperaturen der einzelnen Katalysatoren 50 mm hinter der Gaseintrittsseite

*Structure temperatures of various substrate designs 50 mm downstream from gas inlet side*

Der 400/800-LS-Katalysator erreicht trotz eines um 27 % kleineren Volumens (1,2 statt 1,64 l) die gleiche Effektivität wie der Träger mit 200/400 cpsl und LS. Insgesamt liegt die Effektivität der LS-Strukturen im EUDC-Teil des Zyklus um gut 30 % über der der Normalstruktur.

Im Gesamtergebnis spiegeln sich die einzelnen Testteile wieder, wobei der Kaltstartvorteil des 200/400-LS-Trägers den größten Einfluss hat. Das HC-Testergebnis der einzelnen Varianten entspricht den CO-Ergebnissen.

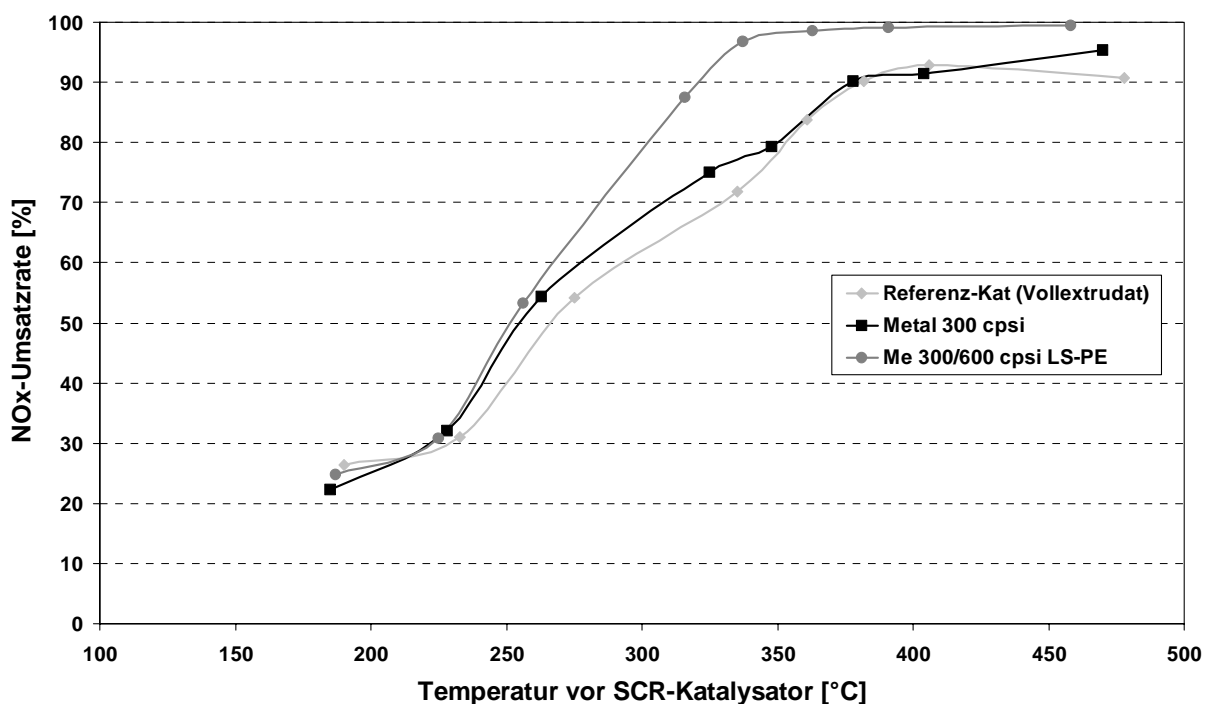
Die LS-Struktur eröffnet entweder die Möglichkeit der Materialeinsparung bei der Verwendung von 200/400-LS statt 400 cpsl-Standard bei gleichem Volumen, wobei Kosten und Gewicht reduziert werden können, und/oder die Möglichkeit der Verkleinerung des Katalysatorvolumens bei gleicher Zelldichte, wobei Edelmetalle eingespart werden können.

Ist zudem die Strömungsverteilung aufgrund der Einbausituation schlecht, kann das optimale Ergebnis (s.o.) durch die Kombination von LS/PE erreicht werden.

So gelang der LS-/PE-Struktur im September 2004 eine Weltpremiere als Oxidationskatalysator, der vor einem Partikelfilter eingesetzt wird.

## 6.2.2. Reduktionskatalysatoren; Einsatz der LS/PE-Struktur:

Ein weiteres Einsatzgebiet für die LS/PE-Struktur stellen Träger für sogenannte SCR-Katalysatoren dar. Hier steht neben dem Stofftransport vor allem die trägerinterne Verteilung des Harnstoffs bzw. des Ammoniaks im Vordergrund, um eine optimale Dosierung über den gesamten Träger ohne Durchbrüche zu gewährleisten. In Abbildung 21 sind die NO<sub>x</sub>-Reduktionsraten unterschiedlicher Trägertypen (Vollextrudat, Standardmetallträger gleicher Zelldichte, LS/PE-Träger) bei verschiedenen Temperaturen dargestellt. Die Raumgeschwindigkeit betrug bei allen Katalysatoren 100.000 h<sup>-1</sup>. Die Regelung der Ammoniak einspeisung erfolgte über einen auf 5 ppm eingestellten Ammoniak-Schlupf. Man erkennt deutlich den ansteigenden maximalen Umsatz, der mit einer optimalen Verteilung des Ammoniaks und dem verbesserten Stofftransport zu erklären ist.



**Abbildung 21:** NO<sub>x</sub>-Reduktion mit SCR-Katalysatoren als Funktion der Temperatur auf Basis verschiedener Strukturen (Raumgeschwindigkeit 100 000 1/h)

*NO<sub>x</sub>-Reduction with SCR-catalysts as a function of temperature based on various substrate structures (GHSV 100 000 1/h)*

## 7. Zusammenfassung

Die neuen „turbulenten“ Katalysatorträger stellen die konsequente Weiterentwicklung der früher vielfach stationär genutzten Vorteile „turbulenter“ Katalysator-Systeme dar. Es gelang jedoch seit Beginn des Einsatzes der Katalysatortechnik in Kraftfahrzeugen über mehr als drei Jahrzehnte nicht, diese Trägersysteme für den in-stationären Einsatz zu qualifizieren. Aus diesem Grund haben sich seinerzeit die heute üblichen Wabenkörper mit laminarem Strömungsregime durchgesetzt. Aufgrund der Vorteile hinsichtlich Stofftransport, Konzentrationsausgleich, Strömungsverteilung und Druckverlust bieten sich bei Otto- und Dieselanwendungen vielfältige Einsatzmöglichkeiten an.

Das Hauptentwicklungsziel, für ottomotorische Anwendung neue Wege in Richtung kompakter, kostengünstiger Katalysatorsysteme darzustellen, wurde somit erreicht.

Für die noch in der Entwicklung befindlichen Dieselmotorkatalysatoren bieten die „turbulenten“ METALIT<sup>®</sup>-Typen funktional spezialisierte Lösungen sowohl für Oxidations-, Hydrolyse-, Mischer- als auch Reduktionskatalysatoren an.

In Verbindung mit der integrierten Lambdasonde oder auch integrierten Gassonden, zum Beispiel beim NO<sub>x</sub>-Adsorber, können neue Regelstrategien realisiert werden, die eine verbesserte katalytische Effektivität und ein stabileres Langzeitverhalten gewährleisten.

## Literatur

- [1] VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag, 1997; A12-A13
- [2] E. Koberstein, J. Hensel; Degussa AG; "Katalytische Abgasreinigung – Neuere Entwicklung"; Vortragsreihe Abgas, Abwasser, Abfall und Recycling; Dechema-Monographien; Band 80, Teil 2; 1976, Seite 523-525
- [3] W. M. Weigert, E. Koberstein; Degussa AG; "Autoabgasreinigung mit multifunktionellen Katalysatoren"; Angew. Chemie 88 (1976) 20, S. 661
- [4] E. Koberstein; Degussa AG; "Katalytische Abgasreinigung 1975 – 1988"; AVL-Tagungsbericht, Motor und Umwelt, 8/1988
- [5] I. Gottberg; "Principles of the heterogeneous Catalysis as in the example of the 3-way Catalytic Converter for SI-Engines"; Haus der Technik, Essen, 1996
- [6] Friedrich-W. Kaiser, S. Pelters; Porsche AG; "Comparison of Metal-Supported Catalysts with Different Cell Geometries"; SAE 910837
- [7] M. Nonnemann; Süddeutsche Kühlerfabrik; "New High Performance Gas Flow Equalizing Metal Supports for Automotive Exhaust Gas Catalysts"; SAE 900270
- [8] R. Lylykangas, P. Lappi; Kemira Oy Finland; "How to Achieve Optimum Physical Properties in the Metal Catalyst"; SAE 910614
- [9] Brück, Diewald, Hirth, Kaiser; Emitec GmbH; "Design Criteria for Metallic Substrates for Catalytic Converters"; SAE 950789
- [10] H. Yamamoto, F. Kato; Nissan Motor Co., Ltd.; J. Kitagawa, M. Machida; NGK Insulators, Ltd.; "Warm-Up Characteristics of Thin Wall Honeycomb Catalysts"; SAE 910611
- [11] P. Day, L. Socha; Corning Glass Works; "Impact of Catalyst Support Design Parameters on Automotive Emissions"; SAE 881590
- [12] EU-Patent EP 0 454 712 B1
- [13] W. Maus, H. Swars, R. Brück, Friedrich-W. Kaiser; Emitec GmbH; W. Held, M. Rohlf; Volkswagen AG; "Improved Cell Design for Increased Catalytic Conversion"; SAE 940932
- [14] A. Bergmann, R. Brück, C. Kruse; Emitec GmbH; A. Schindler; University of Nürnberg; "Design Criteria of Metallic Substrates for Future Catalyst Applications; Part III"; SAE 971027
- [15] H. Bressler, H. Weltens, F. Terres; Heinrich Gillet GmbH; "Multiple Disc Catalytic Converters – An Innovative Approach for Improved Conversion at Lower Cost"; SAE 940936

- [16] Behr GmbH; "Schlitze für mehr Leistung – Katalysatorträger METALIT-S"; Automobil-Produktion, 1989, 3, Seite 166
- [17] R. Brück, J. Diringer, U. Martin, W. Maus; Emitec GmbH; "Flow Improved Efficiency by New Cell Structures in Metallic Substrates"; SAE 950788
- [18] EU-Patent EP 0 705 962 B1
- [19] Internationales Patent WO 2004/022937 A1
- [20] M. Ganz, S. Hackmayer; Quattro GmbH; C. Kruse, A. Reck; Emitec GmbH; "Advanced Catalyst System for the Audi RS6, 8 Zyl, 4,2 ltr, 331 hp with LEV Certification"; Wiener Motoren-Symposium 30.04.2004
- [21] United States Patent 54 03 559, 1995
- [22] Mats Laurell, Jan Dahlgren, Mats Karlflo; Volvo Car Corp.; Kait Althöfer, Rolf Brück; Emitec GmbH; "A Metal Substrate with Integrated Oxygen Sensor; Functionality and Influence on Air/Fuel Ratio Control"; SAE 2003-01-0818