

# **Metallträger mit strukturierten Folien sind hocheffektiv und minimieren den Druckverlust**

Wolfgang Maus	Emitec
Joachim Diringer	Emitec
Axel Schatz	Emitec

## **1. Einleitung**

Die Automobilindustrie hat in den vergangenen Jahren die EU IV und US-amerikanischen Grenzwertstufen mit innovativen Motorenkonzepten, Optimierung von Verbrennungsprozessen sowie einer verbesserten Abgasnachbehandlung gemeistert. Doch die nächsten Herausforderungen stehen an. Zum einen müssen die Katalysatorsysteme weiter kostenoptimiert werden, zum anderen muss schon die nächste Gesetzgebungsstufe vorbereitet werden, die eine weitere Reduzierung der schädlichen Abgaskomponenten verlangen wird. In beide Entwicklungsrichtungen muss auf Seiten der Abgasnachbehandlung die vorhandene Katalysatoroberfläche effektiver genutzt werden. Die Möglichkeiten, dies über die Erhöhung der Zelldichten, den Einsatz dünnerer Wände und motornaher Positionierung zu erreichen, sind ausgeschöpft.

Es existieren zwei weitere strömungsmechanische Möglichkeiten, wie dieses Ziel erreicht werden kann. Zum einen ist es notwendig, die durch einen geringen Wärmetransport gekennzeichnete laminare Strömung durch die Bildung von turbulenzartigen Verwirbelungen innerhalb der Kanäle zu ersetzen, um den Wärmeübergang und Stofftransport an die Kanalwände entscheidend zu erhöhen. Zum anderen sollte eine Interaktion zwischen den einzelnen Kanälen über einen radialen Queraustausch möglich werden, damit die üblicherweise ungenügende Verteilung der Strömung vor dem Katalysator innerhalb des Monolithen verbessert werden kann. Der Einsatz von neuartigen Folienstrukturen soll diesen Anforderungen gerecht werden [1-3]. Turbulent und queraustauschende Folienstrukturen wurden zwar schon Ende der 80er untersucht und vorgestellt, allerdings waren die Entwicklungen weder serienfähig herstellbar noch beschichtbar.

Die vorliegende Abhandlung beschreibt die technische Umsetzung neuer Entwicklungsansätze und stellt aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse in verschiedenen Einsatzgebieten vor. Das Potential, durch die Strukturierung von Folien das Katalysatorvolumen oder die Edelmetallbeladung zu reduzieren sowie den durch den Katalysator entstehenden Druckverlust zu optimieren wird aufgezeigt. Des Weiteren wird die Möglichkeit, Katalysatoren in Kaskadenbauweise durch kostengünstigere 1-Trägervarianten zu ersetzen, diskutiert.

## 2. Perforierte Metallfolien

### 2.1 Einleitung

Um die Konvertierungsfähigkeit der Katalysatoren zu verbessern, leitete Emitec in den vergangenen Jahren die Entwicklungsrichtung ein, Katalysatorsubstrate mit hohen Zelldichten bis zu 1600 cps (cells per square inch) herzustellen und bis 1200 cps in die Serie einzuführen [4-7]. Durch die damit einhergehende Erhöhung der angebotenen Oberfläche und vor allem der kleineren Zelldurchmessern, die den Diffusionsweg der Schadstoffmoleküle zu den katalytisch beschichteten Zellwänden verringerte, konnte der Stofftransport im betriebswarmen Zustand deutlich erhöht und somit die Leistungsfähigkeit verbessert werden. Kompaktere, mit geringerer Edelmetallbeladung versehene Konverter konnten realisiert werden. Auslöser für diesen Entwicklungstrend waren die erheblich verschärften Grenzwerte und angestiegenen Edelmetallpreise. Diese Entwicklungsrichtung ist jedoch an ihre Grenzen gekommen. Nach einer Beruhigung der Edelmetallmärkte zeichnet sich durch den Bedarf für die Diesel-Abgasnachbehandlung und die Nachfrage aus China wieder eine deutliche Belebung ab. Um den geforderten Leistungssteigerungen und Kraftstoffverbrauchszielen bei den nächsten Motorengenerationen gerecht zu werden, dürfen Katalysatoren der zukünftigen Generation keine weitere Erhöhung des Gegendrucks erzeugen.

Die Forderung nach effektiven Stofftransport mit optimiertem Gegendruck kann somit nur durch die Beeinflussung von Strömungsmechanismen innerhalb des Katalysators erreicht werden. Die Strömung muss daher turbulent werden. Eine Zunahme der Zelldichte bei ausgebildeten laminaren Strömungen (also die Strömungen, die in einem Katalysator mit Standard-Design herrschen) führt zu einer deutlichen Erhöhung des Stoffüberganges und zeigt, dass dieser Entwicklungstrend richtig war. Die Steigerung liegt immerhin im Bereich des Faktor 2 [8]. Die Ausbildung turbulenter Strömungen hingegen erreicht Stofftransportkoeffizienten, die sich um eine ganze Größenordnung verbessern ( Abb. 1 ).

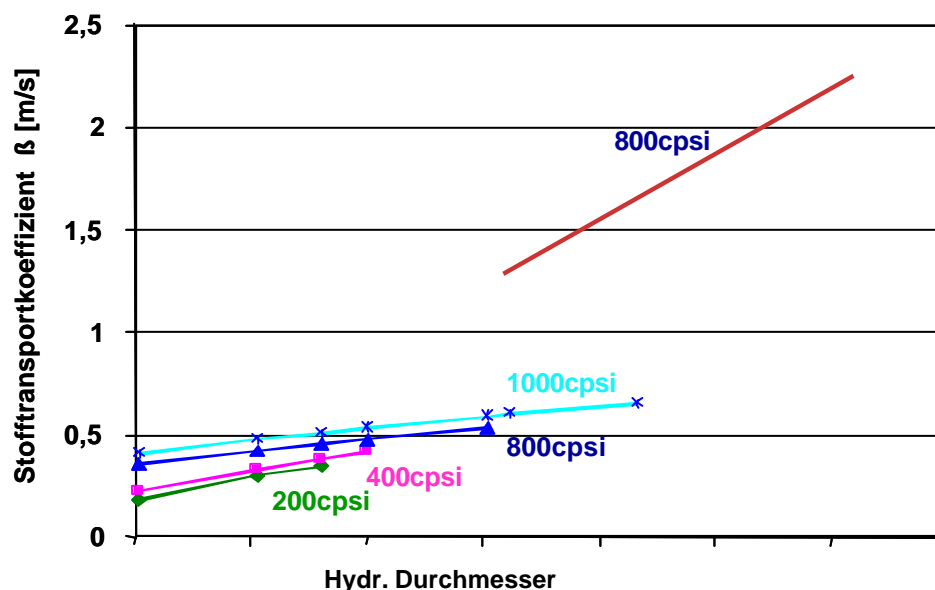
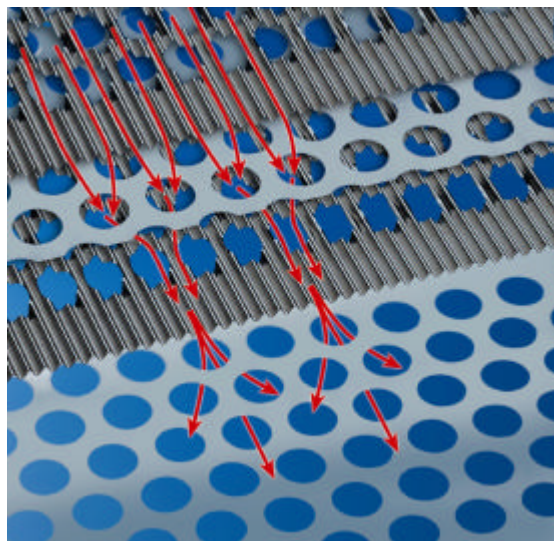


Abb. 1: Theoretische Betrachtung des Strömungseinflusses auf den Stofftransportkoeffizienten  $\beta$ .

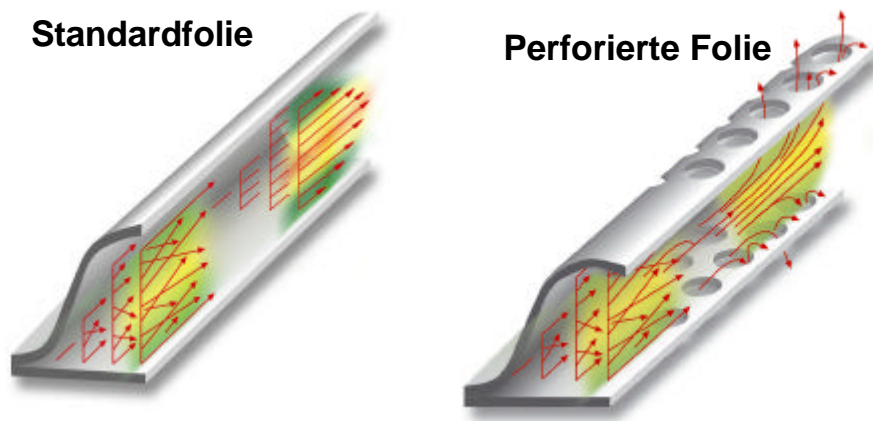
## 2.2 Der Einfluss der Perforierung auf die Strömungseigenschaften im Katalysator

Wie oben schon erwähnt, konnte in früheren Jahren der Stofftransport im betriebswarmen Zustand nur durch die Vergrößerung der angebotenen Oberfläche deutlich erhöht und somit eine verbesserte Konvertierungsfähigkeit der Katalysatoren erzielt werden. Eine Schwäche solcher Systeme ist jedoch der Fakt, dass die Strömungsverteilung nur in wenigen Fällen optimal realisiert werden kann und daher die angebotene Oberfläche in Teilen des Katalysatorträgers nicht effektiv genug genutzt werden kann. Kaskadensysteme wurden entwickelt, die durch einen kleinen, vorteilhaften Eintrittsquerschnitt zumindest einmal einen Strömungsausgleich zwischen den Ausgang des ersten und Eingang des zweiten Katalysators ermöglichen.

Um weitere Effektivitätssteigerungen in der Abgasnachbehandlung zu erreichen, soll eine Möglichkeit geboten werden, einen radialen Queraustausch der Strömung von Zellkanal zu Zellkanal im Katalysator zu ermöglichen und somit die bislang ungenutzten Oberflächen effektiv auszunutzen. Diesen Strömungsausgleich lassen perforierte Metallfolien zu. Bei diesen Folien werden sowohl die glatten als auch die gewellten Folien mit Löchern mit einem Durchmesser von 8 mm versehen (Abb. 2). Durch die Perforation wird die Kanalwand unterbrochen; die gewünschte Wechselwirkung zwischen den einzelnen Kanalströmungen wird geschaffen (Abb. 3)



**Abb. 2: Glatte und gewellte Metallfolien mit Perforation**



**Abb. 3: Schematische Darstellung der Strömungsprofile innerhalb eines Kanals mit unterschiedlichen Folien**

Die Perforation der Kanäle zieht eine Vielzahl von physikalischen Veränderungen mit sich, die einen starken Einfluss auf die Wirkungsweise eines Katalysator mit sich bringen. Diese sind:

### I.) Reduzierung der Wärmekapazität

Durch die Perforation wird Masse aus dem Katalysatorträger entfernt und somit die Wärmekapazität des Systems reduziert. Dies führt bei einem Kaltstart bei gleichem Energieeintrag zu einer schnelleren Erwärmung des Trägers. Die Light-Off Temperatur kann früher erreicht werden.

	300 cpsi, 40µm Standard	300cpsi, 40 µm perforiert	600 cpsi, 40 µm perforiert
Wärmekapazität [J/K]	458	326	398

**Tabelle 1: Wärmekapazitäten der getesteten Substrate**

### II.) Oberfläche

Eine weitere Kenngröße für die Katalysatoreffektivität ist die geometrische Oberfläche. Die Perforation reduziert die Oberfläche im Mittel um ~35 % (bei dem vorgegeben Design mit 8 mm Lochdurchmesser). Dadurch ergibt sich beispielsweise für den perforierten Metaliten mit 600 cpsi eine ähnlich geometrische Oberfläche wie bei dem Referenzträger ( Tab. 2 ).

	300 cpsi, 40µm Standard	300cpsi, 40 µm perforiert	600 cpsi, 40 µm perforiert
Geometrische Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	2.55	1.81	2.46

**Tabelle 2: Geometrische Oberfläche (GSA) der getesteten Substrate**

### III.) Stofftransport im betriebswarmen Zustand

Der Stofftransport an die Katalysatoroberfläche ist im betriebswarmen Zustand der entscheidende Faktor für eine effektive Arbeitsweise. Im nicht perforierten Standardträger bildet sich im Kanal schon nach einer kurzen Eindringtiefe, deren Länge von dem hydraulischen Durchmesser des Kanals abhängig ist, eine laminare Strömung aus. Während im Eintrittsbereich aufgrund der Einlaufströmung ein turbulenzartiger Zustand herrscht und somit für einen guten Stofftransport zur Kanalwand sorgen, können in tieferen Katalysatorregionen nur aufgrund von Diffusionsvorgängen Gasmoleküle an die Katalysatoroberfläche gelangen.

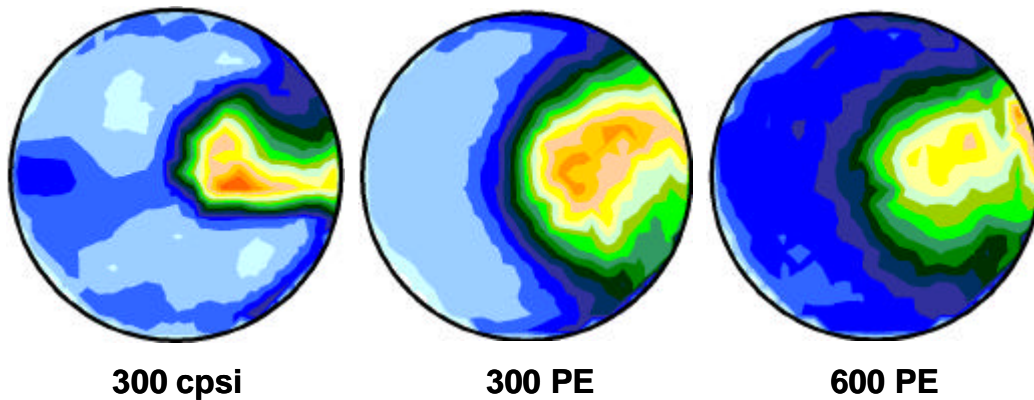
Im Gegensatz dazu führt die perforierte Oberfläche zu einer Kanalerweiterung und damit zu einer Störung des sich ansonsten ausbildenden laminar fließenden Gasstroms. Die oben beschriebene an der Perforation entstehende radiale Strömungskomponente führt zu einer Interaktion der benachbarten Kanäle. Beim darauffolgenden Wiedereintritt in den geschlossenen Kanal entsteht wiederholt eine turbulente Eingangsströmung, die zu einer deutlichen Erhöhung des Stofftransportes im Vergleich zum üblicher Weise laminar fließenden Gasstroms führt.

### IV.) Homogenisierung der Strömungs- und Konzentrationsverteilung

Aufgrund der im allgemeinen lokal unterschiedlichen Gasbeaufschlagungen am Gaseintritt des Katalysators entstehen in den einzelnen Kanälen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Druckabfälle. Durch die Perforierung wird die Kanalwand unterbrochen, so dass das Abgas, angetrieben durch die Druckunterschiede, auch innerhalb des Substrates in die jeweils benachbarten Kanäle überströmen kann. Sind die Geschwindigkeiten also nicht gleich, entsteht an der Perforation eine radiale Strömungskomponente. Die Druckdifferenz beider Kanäle wird reduziert und führt zu einer Abnahme (Zunahme) der hohen (geringen) Kanalgeschwindigkeit.

Den Einfluss der durch die Perforation entstehende Strömungsverteilung im Metaliten zeigt der Vergleich der Qualität der Durchströmung an Katalysatoren ( $\varnothing 105 \times 120 \text{ mm}$ ) mit jeweils einer Zelldichte von 300 cpsi und einer Folienstärke von  $40 \mu\text{m}$ , mit und ohne Perforierung. Zusätzlich wurde ein perforiertes Substrat mit gleichen Ausmaßen, jedoch mit einer erhöhten Zelldichte von 600 cpsi getestet.

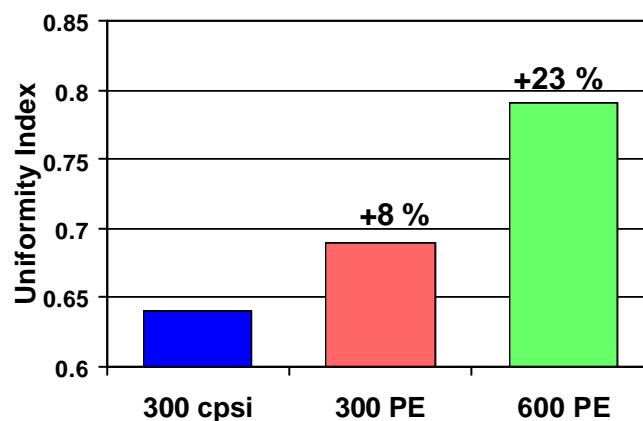
Die Untersuchungen wurden mittels eines 4-Zylinder-Krümmers an einem Strömungsprüfstand durchgeführt. Der dort erzeugte Luftstrom wird mit einer Rate von  $350 \text{ kg/h}$  und einer Temperatur von  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durch den Krümmer zum Katalysator geführt und am Austritt des Trägers mittels Hitzedraht gemessen. Die Strömungsverteilung wird durch den Krümmer derart beeinflusst, dass nur eine kleine Region des Katalysators am Eintrittsbereich mit Gas beaufschlagt wird. Bei einem Standardträger ohne Möglichkeit des radialen Queraustauschs kann sich diese Verteilung nicht verändern, d.h. Abb. 4 links spiegelt die Verteilung innerhalb des gesamten Substrates wieder.



**Abb. 4: Vergleich der Strömungsverteilungen verschiedener Folien**

Ein Vergleich mit der Verteilung am Austritt des 300 PE Substrates zeigt somit den Einfluss der Perforierung auf das Strömungsverhalten. Es findet eine deutliche Homogenisierung innerhalb des Katalysators statt. Sowohl die ‚toten‘ Gebiete des Katalysators als auch die Bereiche mit sehr hohen Gasbeaufschlagungen sind reduziert.

Eine Erhöhung der Zelldichte auf 600 PE zeigt einen weiteren positiven Einfluss auf die Verteilung. Die aufgrund der erhöhten Zelldichte angestiegene Anzahl an Turbulenz-Keimen (Perforationen) kann der Massenaustausch durch radialen Queraustausch noch effektiver erfolgen und führt so zu einer weiteren Homogenisierung der Strömung innerhalb des Katalysators.

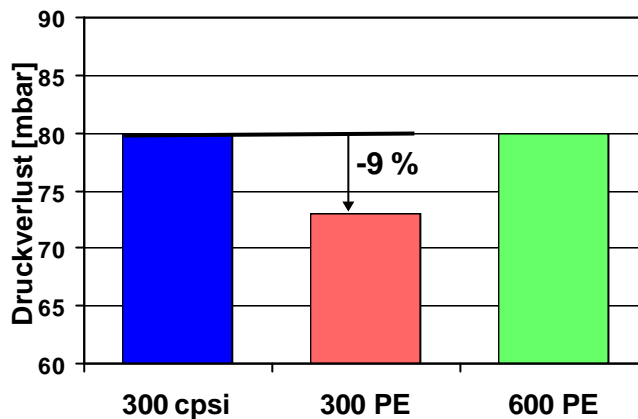


**Abb. 5: Einfluss der PE-Struktur auf den Uniformity Index**

Ein Maß für die Gleichverteilung von Strömungen ist der Uniformity Index. Mit seiner Hilfe lassen sich die durch die verschiedenen Katalysatoren entstandenen Strömungsverteilungen vergleichen (Abb 5). Dabei zeigt sich, dass der Uniformity Index im Falle des 300 cpsi Standardsubstrates aufgrund der ungünstigen Anströmung gering ist. Die Anwendung von PE-Trägern führt zu einer Homogeni-

sierung der Strömungen, d.h. die Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeiten werden geringer und führen zu einem Anstieg des Index.

Die Verringerung der Katalysatoroberfläche reduziert die Reibungskräfte innerhalb des Kanals und beeinflusst somit den Druckverlust positiv. Abbildung 6 zeigt, dass der Einsatz eines 300 PE Substrates gegenüber dem Metaliten mit 300 cpsi Standard eine Reduktion des Druckverlustes um ~ 10% erzielt.



**Abb. 6 Einfluss der PE-Struktur auf den Druckverlust**

Die Gegendruckmessungen des 600 PE-Trägers zeigt weiterhin, dass die durch die erhöhte Zelldichte angestiegene Anzahl an Turbulenz-Keimen (Perforationen) ein Strömungsausgleich noch effektiver erfolgen kann und den üblichen zellichten-abhängigen Druckanstieg derart kompensiert, dass er auf demselben Niveau liegt wie der 300 cpsi Referenzträger. Dies bedeutet aber, dass ein Standardsubstrat bei ungenügender Anströmung durch ein 600 PE Substrat ersetzt werden kann, ohne einen negativen Einfluss auf den Gegendruck zu erhalten und somit die Leistung des Motors zu reduzieren.

### 2.3 Einfluss der Perforierung auf die Effektivität des Katalysators

Die Forderung an einen Träger mit perforierter Folie muss nun sein, die im Vergleich zum Standardträger geringere Oberfläche effektiver zu nutzen, d.h. dass der Massentransport durch radialen Queraustausch in die ‚toten‘ Regionen des Trägers als auch die Erhöhung des Stofftransportes im Kanal durch die Bildung von turbulenter Strömung den Nachteil der geringeren Oberfläche überkompensieren muss. Nur in einem solchen Fall kann die Konvertierungsfähigkeit des Katalysators verbessert werden.

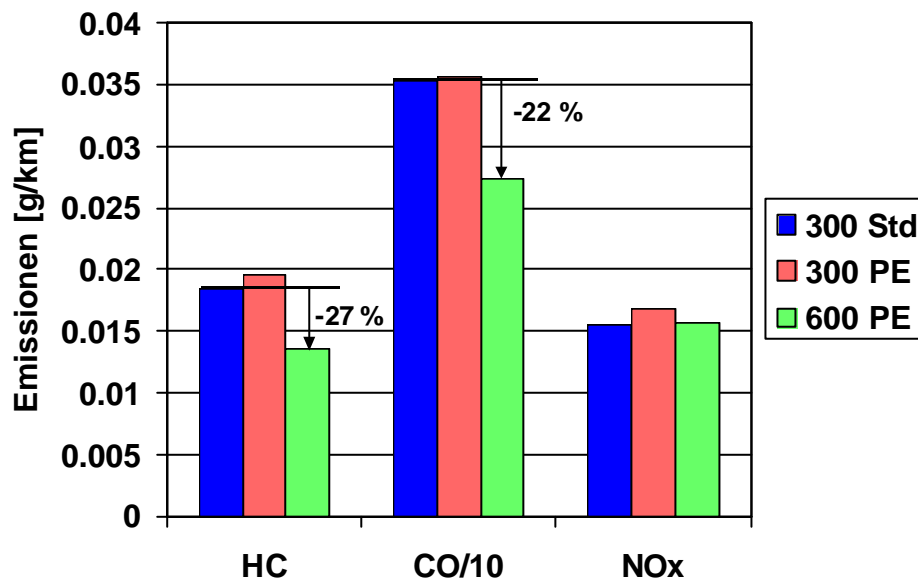
Der Einfluss der Perforierung wurde anhand von Emissionsuntersuchungen an einem 4-Zyl.-, 1.8l-Motor mit Turbolader (Abb.7) und Euro 3 Applikation im EU Fahrzyklus überprüft. Alle Träger waren mit einer Trimetallbeschichtung mit 150 g/ft<sup>3</sup> 1-27-2 beladen. Die Washcoatdicke war konstant für die Metaliten mit 300 cpsi, entsprechend dünner für 600 cpsi. Die weiter oben schon beschriebenen Trägersysteme wurden vor und nach einer Alterung gemäß des Arbeitskreises der

deutschen Automobilhersteller [9] vermessen. Als Vorkonditionierung wurden mit allen Trägern der EUDC-Test dreimal durchfahren.



**Abb.7: Aufbau des Abgassystems nach Turbolader**

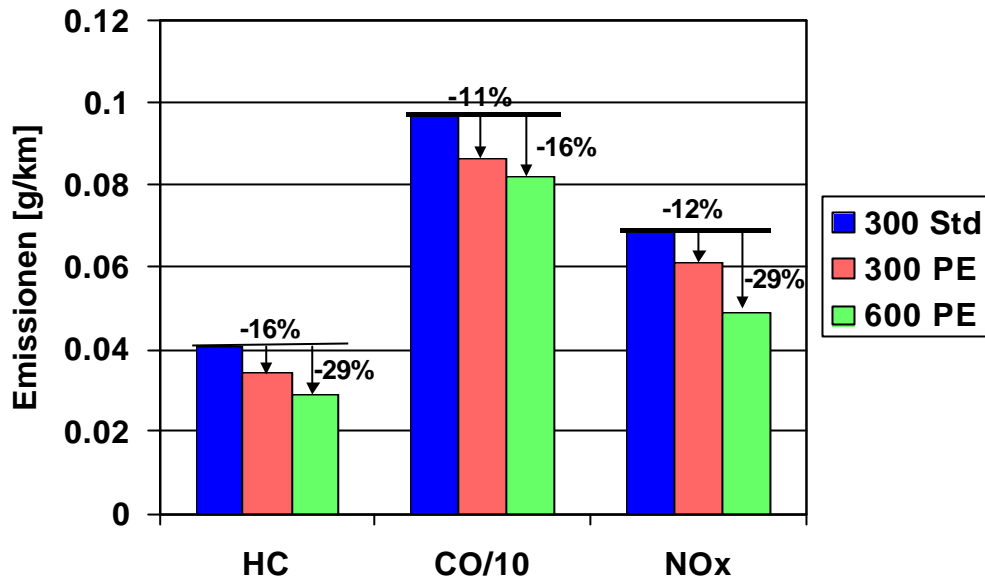
In Abb. 8 sind die Emissionsergebnisse (Mittelwerte aus 6 Messungen) der frischen Trägersysteme dargestellt. Es wird deutlich, dass die Limitierung des Stofftransportes im betriebswarmen Zustand die bestimmende Größe darstellt. Ein Vergleich der 300 cpsi Träger mit und ohne Perforation zeigt, dass bei den frischen Trägern die Konvertierungsfähigkeit in allen drei untersuchten Abgaskomponenten konstant gehalten werden konnte, obwohl der perforierte Träger eine um ~ 30 % geringere Oberfläche besitzt.



**Abb. 8: Abgasergebnisse im EUDC – Zyklus mit frischen Katalysatoren**

Die Steigerung der Zelldichte auf 600 cpsi mit perforierter Folie erzielt durch seine geringe Wärmekapazität und dem höheren Stofftransport aufgrund des kleineren Kanaldurchmessers deutlich niedrigere HC- und CO-Emissionen.

Den Einfluss des internen Strömungsausgleiches wird vor allem durch den Vergleich der gealterten Trägersysteme deutlich (Abb.9). Das Alterungsverhalten wird durch die Perforation so deutlich verbessert, dass jetzt auch ein Vorteil des Trägers mit 300 cpsi PE trotz geringerer Oberfläche erzielt werden kann.



**Abb. 9: Abgasemissionen mit verschiedenen Trägerstrukturen im EUDC-Zyklus (gealterte Metaliten)**

Im Falle des 600 cpsi perforierten Trägers ist die verbesserte Konversionsfähigkeit sowohl im ungealterten als auch im gealterten Zustand deutlich verbessert. Analog zu den klassischen Katalysatorsystemen hat auch bei perforierten Trägern die erhöhte Zelldichte eine Effektivitätsverbesserung zur Folge. Im Vergleich zum nicht perforierten 300 cpsi System konnte somit eine Verbesserung der Emissionen um fast 16 % bei CO realisiert werden. Bei den NO<sub>x</sub>- und HC-Emissionen können sogar Verbesserungen bis zu 30 % erreicht werden.

Die Ergebnisse zeigen das große Potential auf, welches sich durch die Perforierung der Kanäle im Katalysator ergibt. Durch den möglichen radialen Strömungsausgleich und die zusätzliche Bildung von Turbulenzen erhöht sich der Stofftransport innerhalb des Substrates so deutlich, dass der Verlust an Oberfläche überkompensiert wird. Die Effektivität der Konvertierung wird dadurch erhöht. Diese Möglichkeit war der Anlass, dass der Metalit mit perforierter Folie im März diesen Jahres im Audi RS 6 in Serie eingeführt wurde.[3]

#### **2.4 Vergleich eines Katalysators in Kaskadenbauweise mit einem Einzelträger mit PE**

Bei einigen Motorapplikationen werden seit einigen Jahren Katalysatoren als Kaskadensysteme eingesetzt. Bei diesen Systemen handelt es sich um 2-Träger-Systeme, bei denen der erste Träger einen an den Massestrom angepassten Durchmesser und ein geringes Volumen (0.25 –0.5 l) zur Optimierung des Kaltstarts besitzt.

Das im Anschluss folgende zweite Substrat besitzt sowohl einen größeren Durchmesser als auch ein größeres Volumen, das zur optimierten NO<sub>x</sub>-Konvertierung ausgelegt ist. Solch ein Kaskadensystem hat außerdem den Vorteil, dass der Abstand zwischen dem vorderen und hinteren Substrat eine Querströmung

zwischen den Regionen mit hoher Gasbeaufschlagung zu den weniger durchströmenden Regionen des Katalysators erlaubt.

Üblicherweise wird hierbei auch durch die unterschiedliche Wahl der Zelldichten die Wärmekapazitäten und damit letztendlich die Effektivität des Systems beeinflusst.

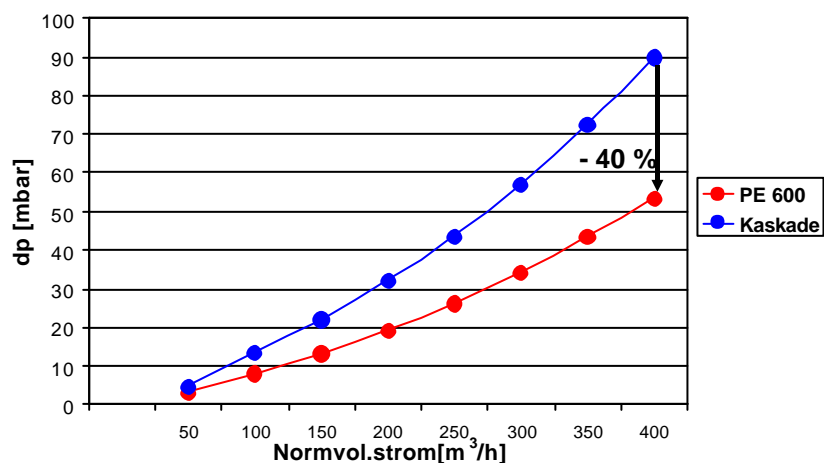
	Volumen [l]	Wärmekapazität [J/K]	Geometrische Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Beladung [g/ft <sup>3</sup> ]
Ø80 * 50.8mm, 500TS/ 50µm + Ø98.4*101.5 mm, 600 cps / 30 µm	1.03	503.5	3.37	160 / 70
Ø95*140 mm, 600 cps / 40 µm	0.99	378.3	2.33	150

**Tabelle 3: Wärmekapazität und geometrische Oberfläche des getesteten Kaskadensystems und des PE-Einzelträgers**

Ziel dieser Untersuchung war zu überprüfen, ob die Katalysatoren in Kaskadenbauweise durch eine kostengünstigere Monovariante mit perforierter Folie ersetzt werden können. Dazu wurde eine Kaskade mit einem 1-Trägerkat mit perforierter Folie verglichen. Beide Katalysatorsysteme besitzen jeweils ein Volumen von 1,0 l, jedoch unterschiedliche Wärmekapazitäten bzw. geometrische Oberflächen (Tab. 3)

Beide Systeme wurden ebenfalls unter ZDAKW – Bedingungen gealtert.

Die Druckverlustuntersuchungen zeigen (Abb. 10) den Vorteil des einteiligen Trägersystems. Der größere Eintrittsdurchmesser und die Perforierung senken den Gegendruck um ~ 40%.



**Abb. 10: Vergleich des Druckverlusts unterschiedlicher Katalysatorsysteme**

Die Emissionsmessungen wurden mit beiden Trägersystemen wiederum im europäischen Fahrzyklus an einem Motorprüfstand mit einem 4-Zylinder 1.8l Turbo mit Euro 3 Applikation durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 11 dargestellt.

Es zeigt sich, dass beide Systeme eine vergleichbare Konvertierungsleistung besitzen. Während die Kaskade leichte Vorteile bei der CO-Konvertierung besitzt, kann der Monokat mit perforierter Folie bei den Kohlenwasserstoffen (HC) geringere Emissionen erzielen.

Der Einsatz der Perforation kann folglich zum Ersatz von Kaskadensystemen verwendet werden. Hierbei ist sicher zu beachten, dass das erzielbare Ergebnis streng von der vorliegenden Strömungsverteilung abhängt. Der Vorteil des Mono-Systems liegt dabei neben dem geringeren Druckverlust hauptsächlich sowohl in den geringeren Anforderungen an den Bauraum, als auch in den günstigeren Systemkosten.

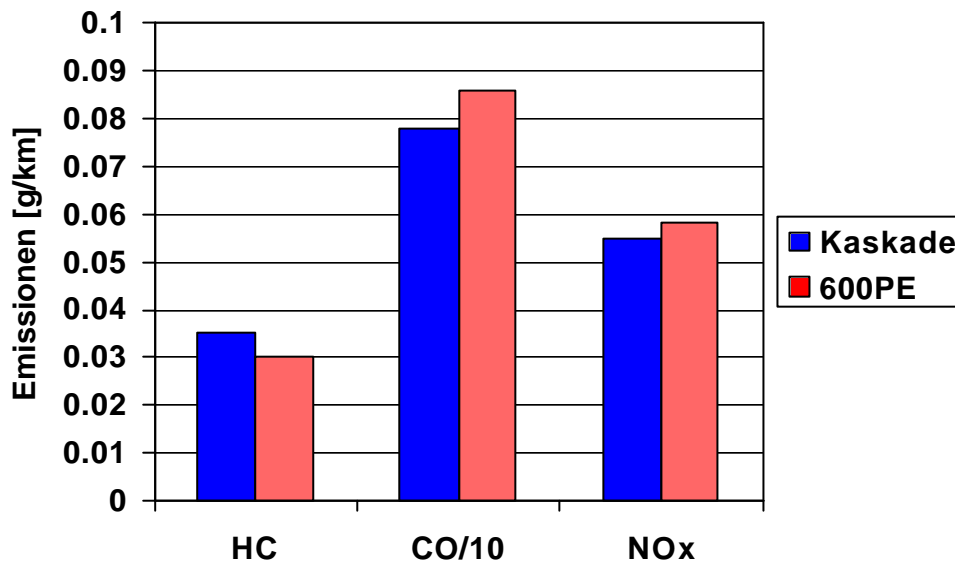


Abb. 11: Emissionsergebnisse mit unterschiedlichen gealterten Katalysatorsystemen

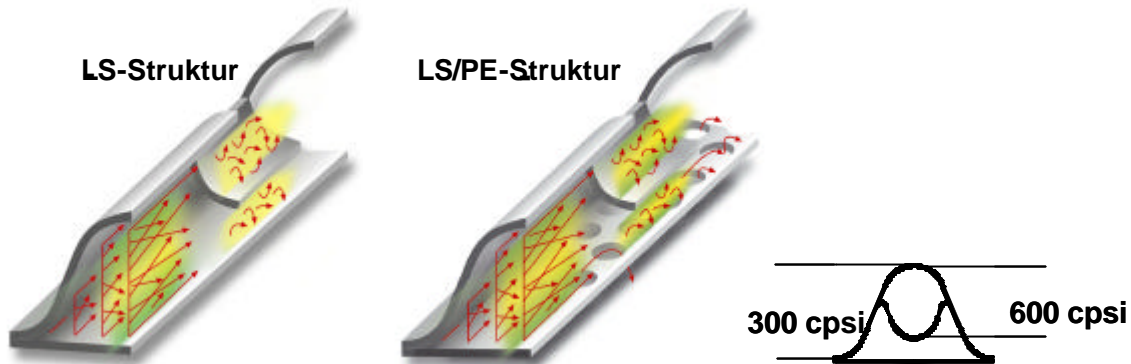
### 3 Metaliten mit Longitudinalen Strukturen (LS)

#### 3.1 Einfluss der LS-Strukturen auf die Strömungseigenschaften im Katalysator

Durch die Entwicklung der perforierten Folie konnte gezeigt werden, dass die Interaktion der Nachbarkanäle über Queraustausch zusammen mit der Bildung von turbulenzartiger Strömung ein sehr durchgreifendes Mittel darstellt, eine deutliche Erhöhung des Stofftransportes zu erreichen. Wie oben gezeigt, hat die Turbulenz einen entscheidenden Einfluss auf die Effektivität des Katalysators.

Das daraufhin folgende Entwicklungsziel war, weitere Strukturen im Katalysator zu schaffen, die noch effektiver als Turbulenzkeime dienen können. Das Ziel dabei ist, die beim Standard-Kanal über die ganze Kanallänge vorhandenen Symmetrien zu

reduzieren. Eine Möglichkeit diese Symmetrien zu stören besteht darin, dass die kontinuierliche Wellung der Folie durch eine periodische Gegenwellung gebrochen wird, wie es anschaulich in Abb. 12 dargestellt wird.



**Abb. 12: Schematische Darstellung der Longitudinalen Struktur**

Beim Einlauf der Abgasströmung in den Katalysator bildet sich, analog wie bei einem Standardkanal eine turbulenzartige Einlaufströmung aus, die für einen guten Stofftransport sorgt. Die sich in der Tiefe durch die Zunahme der Grenzschichtströmung ausbildende laminare Strömung wird durch eine geeignete Positionierung der LS-Schaukel unterbunden. Es bilden sich erneut spontane, schnell variierende, radiale Strömungskomponenten aus; Turbulenz wird erzeugt. Die Folge ist, dass der Stofftransport an die Kanalwand im Bereich der LS-Schaukel deutlich gesteigert wird. Durch die wiederkehrende Anwendung der LS-Schaukeln wird im ganzen Katalysator systematisch die Ausbildung der laminaren Strömung unterbunden und dadurch die Effektivität des Katalysators erhöht.

Der Einsatz von LS-Strukturen erlaubt einen Strömungsausgleich nur zwischen zwei benachbarten Kanälen. Der radiale Queraustausch zwischen allen Kanälen kann im Vergleich zur PE-Struktur nicht stattfinden. Der zusätzliche Einsatz von perforierten Glattlagen unterstützt jedoch diesen radialen Strömungsausgleich.

Bei der Ansicht auf die Gaseintrittsseite eines LS- bzw. eines LS/PE-Katalysators mit 300 cpsi erhält man aufgrund seiner Gegenwellung optisch den Eindruck, dass es sich um ein Substrat mit einer Zelldichte von 600 cpsi handelt. Aus diesem Grunde wird für den LS/PE strukturierten Träger der Begriff 300/600 LS/PE verwendet, um sein Potential mit einem 600 cpsi Standardsubstrat aufzuzeigen.

Es wurden analog zu Kapitel 2 Substrate mit den Dimensionen  $\text{Ø}105 \times 120$  und einer Folienstärke von  $40 \mu\text{m}$  verwendet.

### 3.2 Physikalische Daten der untersuchten Systeme

#### I.) Wärmekapazität

Durch das Einbringen der LS-Schaufeln allein bleibt die Zelldichte konstant. Somit besitzt ein 300 cpsi Standard-Metalit und ein Substrat mit 300/600 LS keinen Unterschied in der Wärmekapazität. In einer LS/PE-Struktur reduziert sich aufgrund der Perforierung der Glattlagen dieser Anteil um ca. 9 %. (siehe Tabelle 4). Somit muss sich hier ein kleiner Vorteil in der Erwärmung des Trägers beim Kaltstart ergeben. Ein Vergleich des LS/PE-Trägers mit dem 600 cpsi Standardsubstrat zeigt eine deutlich geringere Wärmekapazität.

	300 cpsi, 40µm Standard	600cpsi, 40 µm Standard	300/600 LS/PE, 40 µm
Wärmekapazität [J/K]	458	559	417

**Tabelle 4: Wärmekapazitäten der getesteten Substrate**

#### II.) Oberfläche

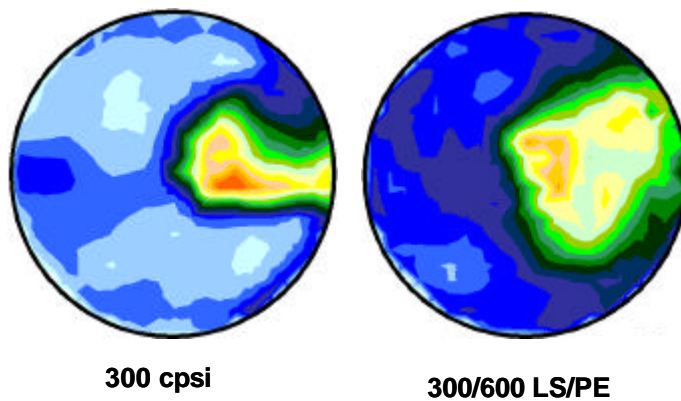
Durch die Perforation reduziert sich die Oberfläche des 300/600 LS/PE-Trägers um ca. 9% gegenüber dem 300 cpsi Standardsubstrats (Tabelle 5). Im Vergleich zu einem 600 cpsi Standard Träger liegt der Unterschied bei ca. 33%.

	300 cpsi, 40µm Standard	600cpsi, 40 µm Standard	300/600 LS/PE, 40 µm
Geometrische Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	2.55	3.45	2.30

**Tabelle 5: geometrische Oberflächen der getesteten Substrate**

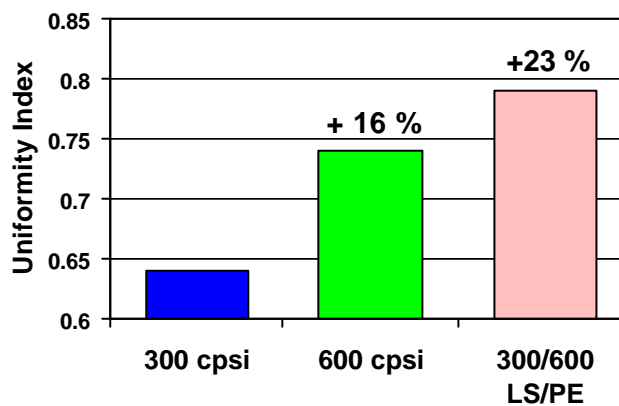
#### III.) Homogenisierung der Strömungs- und Konzentrationsverteilung

Um den Einfluss der kombinierten LS/PE Struktur auf das Strömungsprofil zu überprüfen, wurde analog zu Kapitel 2, der Referenzträger Ø 105\*120 mm, 300 cpsi /40 µm mit einem 300/600 LS/PE Träger der gleichen Größe an einem Strömungsprüfstand verglichen. Der ausströmende Luftstrom wurde wiederum durch einen 4-Zyl. Krümmer zur Ausbildung einer ungleichmäßigen Strömungsverteilung genutzt.



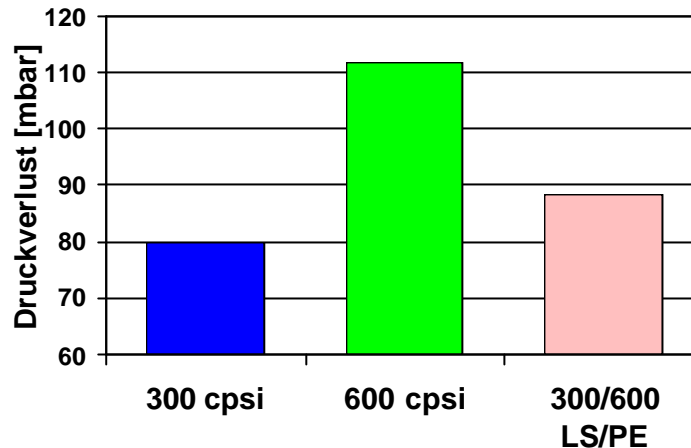
**Abb. 13: Vergleich der Strömungsverteilung zwischen einem Träger mit unterschiedlichem Design**

Wie erfolgreich der Strömungsausgleich bei einer kombinierten LS/PE Struktur stattfindet, zeigt Abb.13. Auch ein LS/PE-Substrat kann die beim Standardträger vorhandenen Gebiete mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten (hellblaue Bereiche) deutlich verringern und somit die Spitzengeschwindigkeiten (rot) abbauen. Der Uniformity Index als Maß für die Verteilung der Strömung wird deutlich erhöht ( Abb.14 ) und ist auch gegenüber dem 600 cpsi Metaliten verbessert.



**Abb. 14: Vergleich des Gütegrads der Strömung anhand des Uniformity Indizes**

In Folge der verbesserten Verteilung findet die durch die Turbulenzerzeugung erwartete Erhöhung des Druckverlusts bei Einsatz der LS/PE-Struktur nicht statt (Abb. 15). Im Gegenteil dazu wird eine erhebliche Reduzierung des Gegendrucks im Vergleich zu einem Standard 600 cpsi Metalit deutlich.



**Abb. 15: Vergleich des Strömungswiderstands eines Metaliten mit 300 cpsi beim Einsatz einer LS-Struktur**

### 3.3 Emissionsuntersuchungen mit LS/PE-Strukturen

Aufgrund der Vielzahl von Motorenkonzepten und Fahrzeugen können die Zielvorstellungen über den Einsatz von strukturierten Katalysatoren ganz unterschiedlichster Natur sein. So stehen sehr häufig neben dem Wunsch einer weiteren Reduktion von Abgasemissionen auch die Verringerung des Katalysatorvolumens oder die Kostenminimierung im Vordergrund. Aus diesem Grunde wurde die Einsatzfähigkeit von LS/PE Strukturen auf diese Randbedingungen überprüft.

Ziel der Untersuchungen war zu überprüfen, ob aufgrund der erhöhten turbulenzartigen Strömung im Kanal sowie der Strömungsausgleich zwischen den Kanälen, die LS/PE Struktur eine Effektivitätssteigerung ermöglicht

Die Emissionsmessungen wurden ebenso wie in Kapitel 2 an einem 4.-Zyl. 1.8l Motor mit Turbolader und Euro 3 Applikation im EU-Fahrzyklus überprüft. Alle Träger waren mit einer Trimetallbeschichtung mit  $150 \text{ g/ft}^3$  1-27-2 beladen und wurden nach Durchführung der ZDAKW-Alterung vermessen.

Die Ergebnisse zeigen als Mittelwert aus 6 Messungen, dass trotz der deutlich geringeren Oberfläche des 300/600 LS/PE Trägers die Turbulenzerzeugung so dominant ist, dass die Konvertierbarkeit des Systems mit der eines 600 cpsi Trägers vergleichbar ist. In keiner der drei Abgaskomponenten wurde eine signifikante Verschlechterung beobachtet.

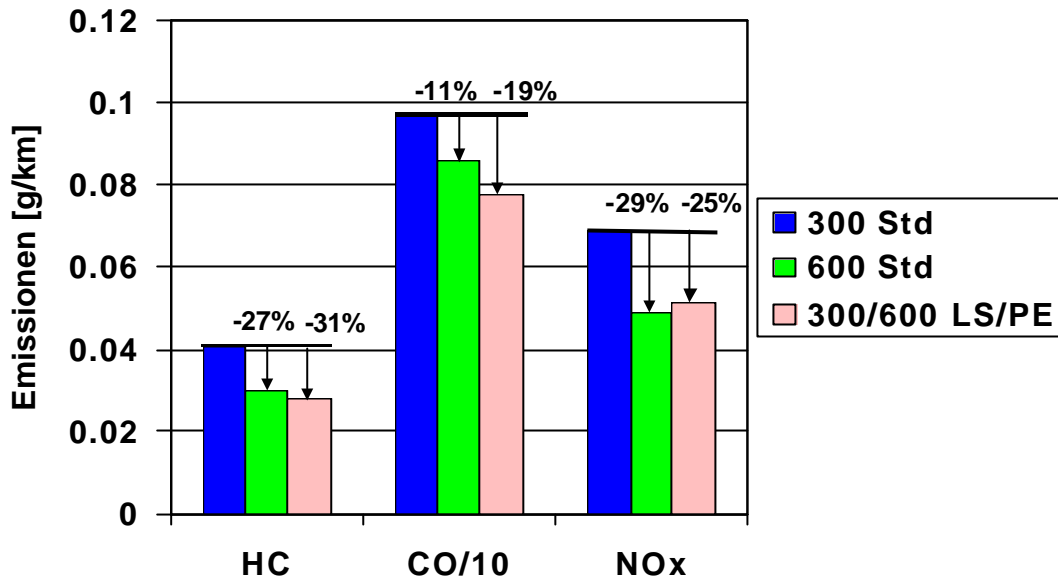


Abb. 16: Abgasemissionen mit verschiedenen Trägerstrukturen im EUDC-Zyklus

#### 4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen verschiedenster Katalysatorsystemen in den vergangenen Jahren zeigen, dass wegen der Ausbildung von laminaren Kanalströmungen eine effektivere Nutzung durch Maßnahmen wie der Einsatz von hochzelldichten Trägern mit dünnen Wänden erfolgreich war. Der Grund hierfür liegt in der Limitierung des Stofftransports durch die Laminarität.

Mit der TS-Struktur und der heute herstell- und beschichtbaren Perforierung der Folien konnte ein weiterer Schritt realisiert werden, turbulenzartige Verhältnisse in den Kanälen zu erzeugen. Jeder einzelne Ausschnitt dient als Turbulenzkeim, so dass sich durch die Wiederholung eine Erhöhung des Stofftransportes einstellt und die Effektivität des Katalysators entscheidend verbessert.

Des Weiteren ermöglicht das Einbringen von Löchern in die Metallfolie eine Interaktion der einzelnen Kanäle über einen radialen Queraustausch, d.h. ein Strömungs- und Konzentrationsausgleich von stark beaufschlagten Regionen des Katalysators in die nicht durchströmten Bereiche kann erfolgen. Dadurch wird die Effektivität des Substrates erhöht bei gleichzeitiger, deutlicher Verringerung des Gegendrucks. Im Bezug auf ein Standard-Substrat ergibt sich jetzt die Möglichkeit das System nach den Zielvorstellungen zu optimieren. Durch die Perforierung kann beispielsweise die Zelldichte erhöht werden, um die Konvertierungsfähigkeit weiter zu verbessern, ohne jedoch in einen erhöhten Gegendruck zu resultieren.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass durch die perforierte Folie die Möglichkeit geschaffen wird, bei ungünstiger Anströmung Kaskadensysteme durch einteilige Träger zu ersetzen, die damit sowohl leichter als auch kostengünstiger sind und einen kleineren Bauraum ausfüllen.

Ein noch deutlicheren Einfluss auf das Strömungsverhalten lässt sich durch die LS Struktur erreichen, bei der die Ausbildung der laminaren Strömung durch das Einbringen der Kanalwand in das Strömungszentrum gestört wird. In Kombination mit der perforierten Folie erhöht sich die Effektivität der Konversion so deutlich, dass auf hohe Zelldichten verzichtet werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz von strukturierten Folien in Metallkatalysatoren ein notwendiger Schritt ist, um noch effektiver die Emissionen zu reduzieren, den Druckverlust zu minimieren und kostengünstigere Abgassysteme zu entwickeln.

- [1] "Next generation catalysts are turbulent: development of support and coating"  
SAE – Paper 2004-01-1488  
M. Bollig, J. Liebl, R. Zimmer, BMW AG / M. Kraum, O. Seel, S. Siemund,  
Engelhard Technologies GmbH / R. Brück, J. Diring, W. Maus, Emitec  
GmbH
  
- [2] „Niedrigstemissions-Fahrzeuge sind heute realisierbar – Neue  
Innovationsschwerpunkte für metallische Katalysatorträger: Kostenreduzierung  
und Dauerhaltbarkeit“, TAE Esslingen 2002  
W. Maus, R. Brück, J. Diring, Emitec GmbH
  
- [3] Innovatives Katalysatorsystem für den Audi RS 6, 8Zyl. 4.2l, 331 kW mit LEV  
Zertifizierung  
M. Ganz, S. Hackmayer, quattro GmbH / C. Kruse, A. Reck, Emitec GmbH
  
- [4] „Application Guideline to define a Catalyst Layout for maximum Catalytic  
Efficiency“, SAE – Paper # 2001-01-0929  
P. Marsch, F. Acke, Volvo/ R. Konieczny, R. Brück, P. Hirth, Emitec GmbH
  
- [5] "Das BMW SULEV (PZEV) Konzept – Emissionsreduzierung ohne  
Kompromisse“, Wien Motorensymposium 2002  
J. Liebl, R. Hofmann, Th. Melcher, BMW AG
  
- [6] „Design Criteria for Metallic Substrates for Catalytic Converters“, SAE – Paper  
950789  
R. Brück, R. Diewald, P. Hirth, F.-W. Kaiser, Emitec GmbH
  
- [7] „Product Design and Development of Ultra Thin Wall Ceramic Catalytic  
Substrate“ SAE – Paper 2002-01-0350  
Yoichi Aoki, Yukio Miyairi, Yukihiro Ichikawa, Fumio Abe NGK Insulators Ltd.
  
- [8] "New High Performance Gas Flow Equalizing Metal Supports for Automotive  
Exhaust Catalysts" SAE – Paper 900270  
M. Nonnenmann, Südd. Kühlerfabrik
  
- [9] „Gemeinsames Katalysatorprüfverfahren von Audi, BMW, Mercedes, Porsche  
und VW“ MTZ Motorentechnische Zeitschrift 55 (1994) Heft 4