

Einsatz hocheffektiver, turbulenter Metallträger unter den begrenzten Bauraumverhältnissen heutiger EU V Großserien-Diesel PKW

Thomas Nagel¹, Carsten Kruse²

EMITEC, Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH
Hauptstr. 128, 53797 Lohmar, Germany

Kurzfassung:

Die heutigen und zukünftigen Anforderungen an das Emissionsverhalten von Dieselmotoren verlangen einen hohen Aufwand hinsichtlich der einzusetzenden Abgasnachbehandlungskomponenten. Da aber aufgrund des zunehmenden Platzbedarfs für komfortrelevante Bauteile das Platzangebot kleiner wird, ergibt sich hieraus ein Zielkonflikt.

Der folgende Beitrag beschreibt ein System, bei dem die Integration des Dieseloxydationskatalysators auf der Basis eines hocheffektiven, turbulenten Metaliten mit LS-Struktur zur Verminderung des Problems beiträgt.

Es wird dargestellt, wie durch die Kombination verschiedener Einzeloptimierungen eine signifikante Effektivitätssteigerung erreicht wird.

In Summe wurde ein System entwickelt, welches im Hinblick auf Performance, Robustheit, Bauraum und Kosten ein Optimum darstellt.

Abstract:

The demands on both today's and future emission behaviour of diesel engines requires a high effort on exhaust gas aftertreatment. But the higher amount of comfort related elements leads to a lower space and therefore gives a package conflict.

The following paper describes a system using an integrated diesel oxidation catalyst together with a highly effective, turbulent METALIT[®] to minimize this problem.

It will be shown that the combination of single optimizations leads to a significant improvement of efficiency and gives an optimum solution in view of performance, durability, package and cost.

Schlagworte: Hocheffektiv; turbulent; LS-Struktur; Robustheit

¹ E-mail: thomas.nagel@emitec.com, URL: www.emitec.com

² E-mail: carsten.kruse@emitec.com, URL: www.emitec.com

1 Einleitung

Im Zuge der weiteren Verschärfung der Abgasgrenzwerte für Euro V und VI, gerade im Hinblick auf die HC und NO_x-Emissionen, sind weitere Anstrengungen und Optimierungen notwendig. Diese werden sowohl auf der Brennverfahrensseite als auch auf der Seite der Abgasnachbehandlungssysteme erfolgen.

Zur Einhaltung heutiger und künftiger Partikelgrenzwerte haben sich beschichtete DPF-Vollstromsysteme aus Siliziumkarbid und Aluminiumtitanat weitestgehend etabliert. [1] Hiermit sind die geforderten massebezogenen Grenzwerte in Verbindung mit einer geeigneten Regenerationsstrategie mühelos erreichbar und stellen heute den Stand der Technik dar.

Mit Blick auf die HC und NO_x-Emissionen stellt sich die Sache nicht mehr ganz so einfach dar. Gerade durch die immer weiter zunehmende Effizienz heutiger direkteinspritzender, hoch aufgeladener Dieselmotoren werden die Anforderungen an das Thermomanagement und die Tieftemperaturaktivität der Katalysatoren durch weiter sinkende Abgastemperaturen immer größer.

Eine wichtige Maßnahme hierbei, die bereits bei den Ottomotoren und vielen Diesel-Anwendungen auf breiter Linie Einzug gehalten hat, ist die Verlagerung des Katalysator- und DPF-Volumens möglichst nah an den Motor, um weiteren Temperaturverlusten vorzubeugen. [2]



Abbildung 1: Modernes Großserienfahrzeug

Bei der Einführung solcher Maßnahmen besteht jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen längs- und quer eingebauten Motoren hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums. Während bei Längseinbauten der größte Teil des Abgasnachbehandlungssystems neben dem Motor platziert werden kann, ergeben sich bei quer eingebauten Motoren häufig Konflikte mit der Lenkung, den Antriebswellen, dem Wasserkasten oder der Stirnwand des Fahrzeugs, Abbildung 2.

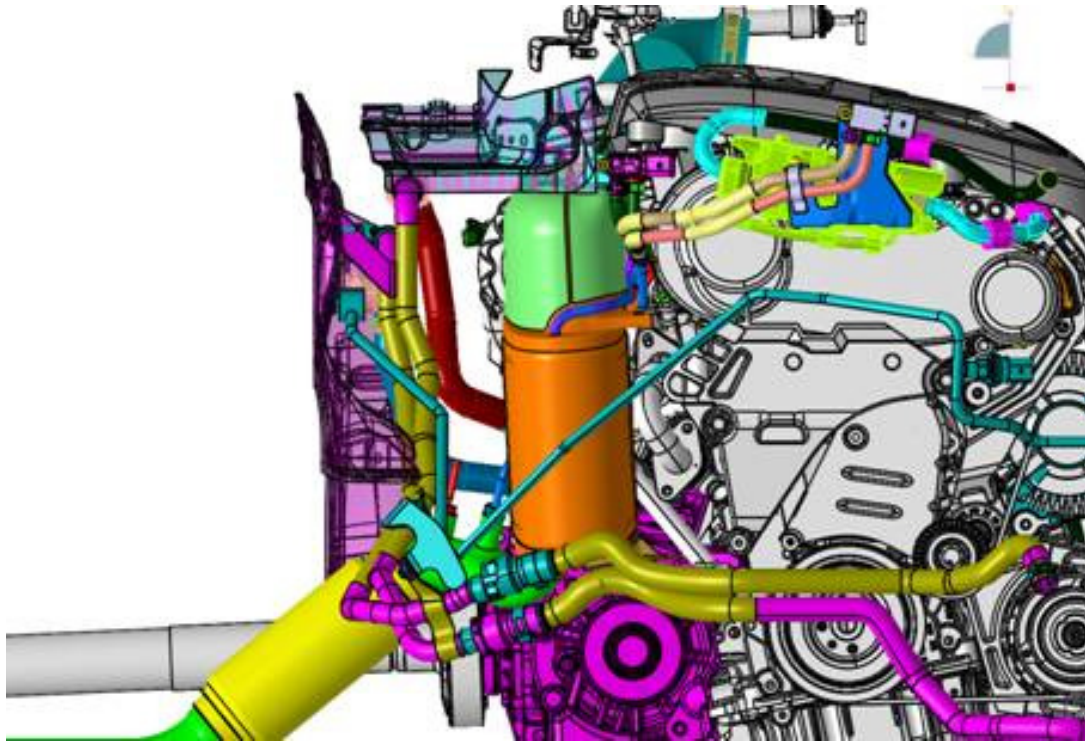


Abbildung 2: Bauraumverhältnisse eines modernen Großserienfahrzeuges mit quer eingebautem Motor

Insofern sind Quereinbaukonzepte hinsichtlich möglicher Abgasnachbehandlungskomponenten deutlich kritischer zu bewerten.

Im nachfolgenden Beitrag wird ein System vorgestellt, welches durch die Integration von hocheffektiven, „turbulenten“ Metallträgern Bauraum nutzt, der bisher in dieser Form nicht zur Verfügung stand. Es werden Optimierungen aufgezeigt, die in Summe zu einer günstigeren Kostenstruktur führen, aber trotzdem den spezifischen Bauraumproblemen quer eingebauter Motoren Rechnung tragen.

2 Anforderungen an moderne Abgasnachbehandlungssysteme

Die Hauptanforderung ist sicherlich die dauerhafte Einhaltung der Abgasgrenzwerte. Dennoch müssen sich Entwickler und Konstrukteure auch den Anforderungen an Gewicht, Leistung, Verbrauch und nicht zuletzt den Kosten stellen.

Heutige Systemkonfigurationen zur Erreichung der Euro V Grenzwerte sind weitestgehend vergleichbar und bestehen aus einem DOC (Diesel Oxidation Catalyst) mit einem nachgeschalteten cDPF (coated Diesel Partikel Filter). Die Edelmetallbeschichtung des Partikelfilters wird zum einen zur Absenkung der Rußabbrenntemperatur benötigt, zum

anderen aber zur vollständigen Umwandlung der im DOC nicht konvertierten HC und CO Emissionen des Motors.

Bei Systemen für EU VI, bei denen aktive Systeme zur NO_x -Nachbehandlung eingesetzt werden, ist eine erhöhte NO_2 -Bildung am cDPF wünschenswert, da bei dem günstigen Verhältnis NO_x/NO_2 von ca. 1:1 die so genannte Fast SCR – Reaktion zu einer deutlichen Effektivitätssteigerung im Tieftemperaturbereich führt. [3] Abbildung 3 (Einfluss des NO_x/NO_2 -Verhältnis auf SCR Aktivität, BASF).

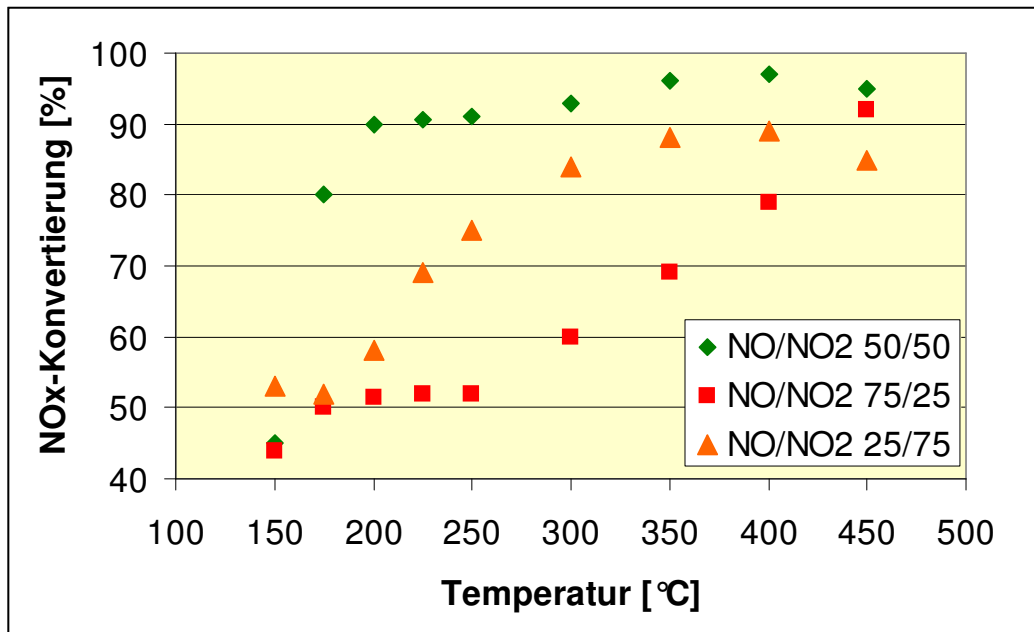


Abbildung 3: Einfluss von NO_2 - und Temperatur auf die SCR-Aktivität

Die Herausforderung dieser Systemkonfiguration bei quer eingebauten Motoren ist, neben dem Mindestvolumen für den DPF noch ausreichend Bauraum für einen entsprechenden DOC zur Verfügung zu stellen.

Bei der Auslegung des DPF's ist besonderes Augenmerk auf die Aschespeicherkapazität zu legen. Die Aschemenge, die unter anderem durch die Verbrennung von Motoröl entsteht, ist entscheidend für die minimale DPF-Größe. [4] Während man bei reduzierter DPF-Größe die Regenerationshäufigkeit mit entsprechenden Verbrauchsnachteilen erhöhen könnte, um ein Überladen des DPF zu verhindern, steht diese Option im Hinblick auf die Ascheeinlagerung nicht zur Verfügung. Das heißt, in den dann noch verfügbaren Bauraum ist ein geeigneter DOC unterzubringen, der neben einer ausreichenden Effektivität auch alle Anforderungen bzgl. Druckverlust, Gewicht und Dauerfestigkeit mitbringt und in die sensible Kostenstruktur heutiger Großserienanwendungen hineinpasst. Alternativ stünde nur ein zweiteiliges System zur Verfügung, bei dem eine deutliche räumliche Trennung zwischen der DOC-Position motornah und der DPF-Position im Unterboden des Fahrzeuges vorhanden wäre. Dies ist aber im Hinblick auf ein geeignetes, verbrauchsminderndes Thermomanagement nicht zielführend. Zudem blockiert sie die Option für eine ggfs. für EU VI notwendige NO_x -Nachbehandlung durch Belegung des Bauraums.

Ferner ist in der Automobilindustrie der Trend zu einer modularen Bauweise erkennbar. Dies hat im Vergleich zur Plattformstrategie den Vorteil, dass einzelne Module über verschiedene Fahrzeugklassen hinweg Verwendung finden. Der daraus resultierende Stückzahleffekt führt zu deutlich günstigeren Herstellkosten, setzt aber voraus, dass man eine Systemkonfiguration findet, die im Hinblick auf die katalytische Effektivität, die PM-Abscheideleistung und den benötigten Bauraum kompatibel ist.

Ist eine solche Konfiguration konstruktiv darstellbar, müssen noch die Anforderungen an die mechanische Dauerhaltbarkeit erfüllt werden. Fahrzeuge für den amerikanischen Markt müssen über einen Zeitraum von 10 Jahren oder eine Laufleistung von 150.000 Meilen ohne den Austausch einzelner Komponenten fehlerfrei funktionieren. Hieraus leitet sich ab, dass nur äußerst robuste Systeme für eine derart integrierte Lösung infrage kommen.

Insofern sind die nachfolgend vorgestellten Lösungen ideale Voraussetzungen zur Unterstützung der Modul-Strategie.

3 Konstruktiver Lösungsansatz

Vergleicht man die NO_x -Rohemissionen eines 2,0 l Diesel Motors einer EU IV und EU V Applikation, fällt auf, dass diese beim EU V Motor signifikant niedriger sind. Dies wird durch höhere Abgasrückführungsraten erreicht. Zwar nehmen die Abgastemperaturen durch die verschleppte Verbrennung geringfügig zu, jedoch sinkt gleichzeitig der Massenstrom, so dass insgesamt die Energiedichte kleiner wird.

Der Zielkonflikt zwischen effizienten Motoren und niedrigen Emissionen am Endrohr wird somit größer. Abbildung 4 zeigt den Vergleich der NO_x -Rohemissionen zwischen einer EU IV und EU V Applikation und den deutlich niedrigeren NO_x -Emissionen beim EU V Konzept.

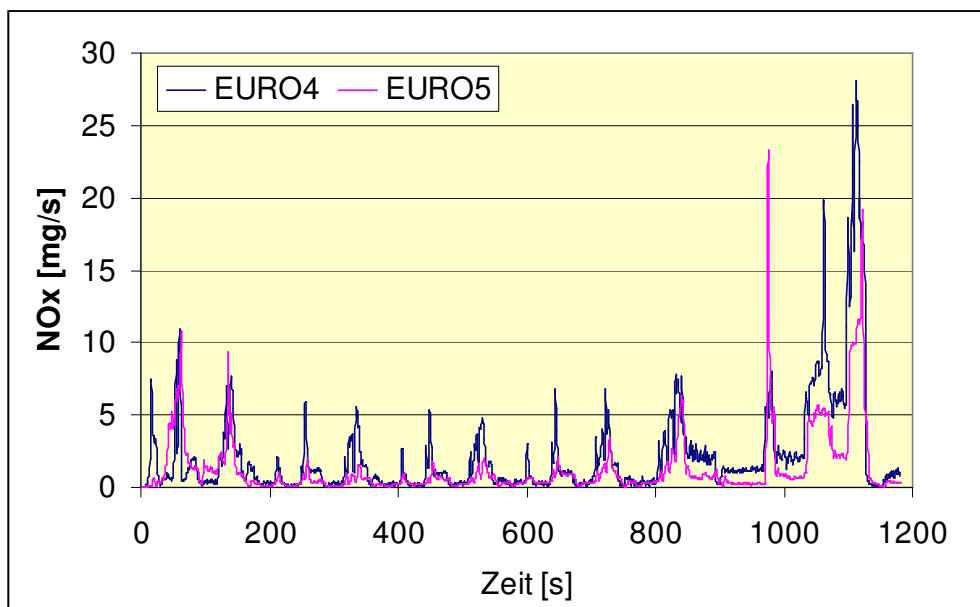


Abbildung 4: NO_x -Rohemissionen der unterschiedlichen Abgasgesetzstufen

Betrachtet man das Temperatur- und Aufheizverhalten einer typischen cDPF-Applikation zur Erfüllung der EU IV Grenzwerte, erkennt man, dass sich das Temperaturniveau für ein Light-Off der Beschichtung je nach Beschichtungstyp und Alterung erst relativ spät zwischen Sekunde 300 und 350 einstellt.

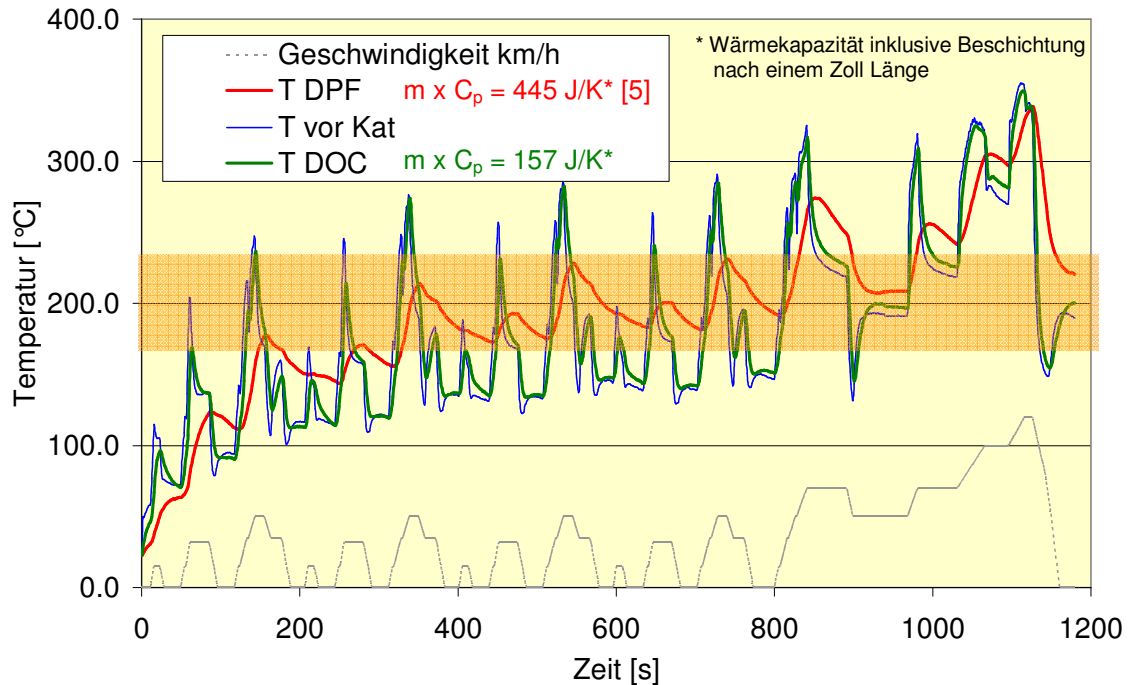


Abbildung 5: Strukturtemperaturen eines cDPF vs DOC bei gleicher Zulauftemperatur

Dieses späte Light-Off ist in erster Linie durch die hohe Wärmekapazität des DPF begründet und lässt sich in einer so gestalteten Konfiguration ohne signifikante Verbrauchserhöhung durch aktive Heizmaßnahmen wie Nacheinspritzung nicht nennenswert verbessern. Verschärfend kommt hinzu, dass sich der Energieinhalt - wie bereits zuvor erwähnt - aufgrund der erhöhten AGR-Raten weiter verringert.

Der Ansatz zur Lösung dieser Problematik besteht in der Trennung zwischen DOC- und DPF-Funktionalität. Dies erfolgt durch Installation eines separaten DOC's vor DPF. Eine solche zweiteilige Lösung kann, je nach Platzverhältnissen im Motorraum, zu einer Lösung mit dem DPF im Unterboden führen. Dieser Ansatz hat den bereits zuvor erwähnten Nachteil, Bauraum zu belegen, der für spätere NO_x -Nachbehandlung benötigt wird und gleichzeitig eine verbrauchsgünstige DPF-Regeneration unmöglich macht. Demnach verbleibt nur die Möglichkeit, den DOC als separates Bauteil vor dem DPF in dem vorhandenen Bauraum zu integrieren.

Abbildung 6 zeigt schematisch eine mögliche konstruktive Ausführung zur Integration des DOCs.

Diese hier im speziellen gezeigte Variante wird beim neuen VW 2,0 l CR Motor eingesetzt und findet derzeit bereits im Tiguan in großer Stückzahl Anwendung.

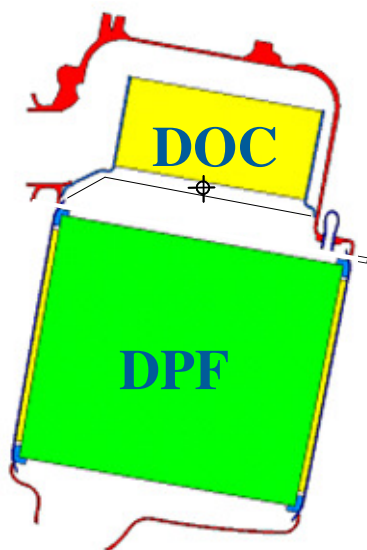


Abbildung 6: Konstruktiver Lösungsansatz zur Integration des DOC's

Alle weiteren Quereinbaukonzepte im VW-Konzern werden mit Einsatz des neuen Motors auf diese Technologie umgestellt.

Die obenstehende Anordnung erlaubt die Nutzung des Bauraums zwischen Zylinderkopf und Wasserkasten bzw. Spritzwand, der bisher nicht zur Verfügung stand, da es kein vergleichbares Integrationskonzept für den DOC gab.

Dennoch ist das zur Verfügung stehende DOC-Volumen mit 0,5 l für einen 2,0 l Motor relativ klein, sodass an den verwendeten Träger sowie an die Beschichtung besondere Anforderungen hinsichtlich Light-Off-Verhalten, Effektivität, Strömungsverteilung, max. Druckverlust, Robustheit und letztendlich Kosten gestellt werden.

a. Light-Off Verhalten und Effektivität

Wie bereits erwähnt, ist das Temperaturmanagement die „Mutter der Abgasnachbehandlung“. Eine nahezu 100 %ige Konvertierung ist mit den heutigen DOC-Beschichtungen auch schon mit relativ geringen Edelmetallgehalten möglich, sofern das System ausreichend warm ist. Das heißt, hierzu sind je nach verwendetem Beschichtungstyp und Alterungszustand Temperaturen von deutlich über 250 °C notwendig. In diesem Temperaturbereich ist im Gegensatz zum porediffusionslimitierten Niedertemperaturbereich die Katalysatoraktivität ausschließlich durch die Qualität des äußeren Stofftransports bestimmt. Abbildung 7 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen der Temperatur und den jeweils korrelierenden Wirkmechanismen bei der Katalyse. [6,7]

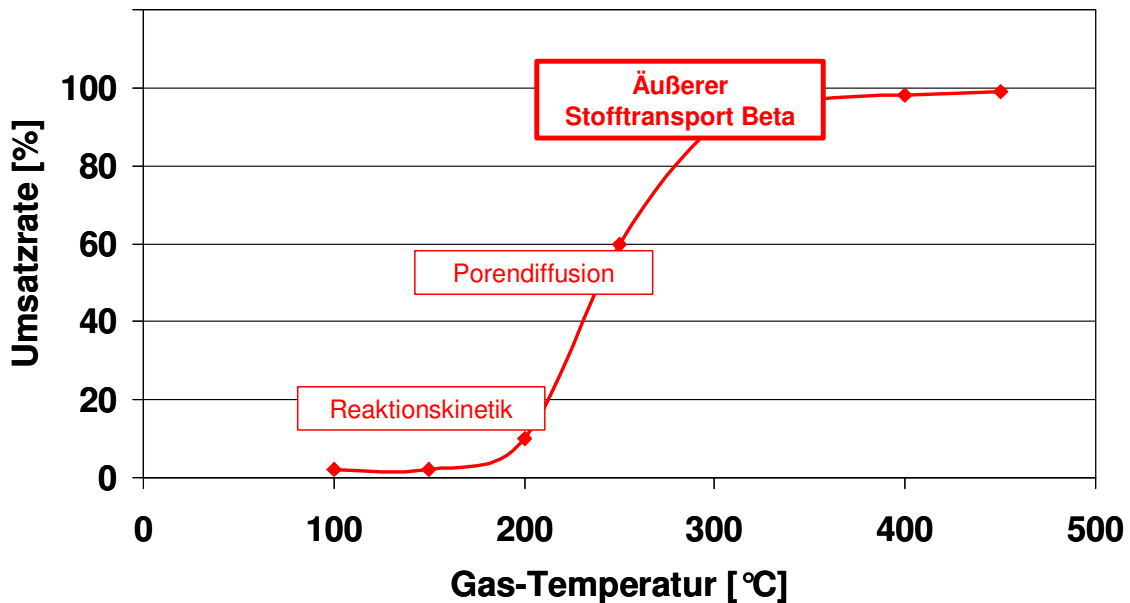


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Temperatur und Wirkmechanismus bei der Katalyse

Dieser Zusammenhang macht deutlich, dass bei niedrigen Temperaturen zwei wesentliche Punkte effektivitätsbestimmend sind:

1. hohe Edelmetallbeladung erhöht die Reaktionsgeschwindigkeit
2. dünner Washcoat verbessert die Zugänglichkeit der Edelmetallteilchen in unteren Washcoat-Schichten; Voraussetzung ist eine homogene Verteilung der Edelmetalle in der Washcoat-Tiefe

Wenn das zur Verfügung stehende Katalysatorvolumen gering ist, ist ein hocheffektives System erforderlich, um auch bei höheren Durchsätzen, wie im außerstädtischen Teil (EUDC) des NEDC, ein Maximum an Konvertierungsleistung zu erreichen. Aus diesem Grund wurden Träger mit der sogenannten Longitudinalen Struktur LS-Design[®] eingesetzt. Bei dieser Trägerart sind in regelmäßigen Abständen Schaufeln in die Welllage gedrückt. Dies hat zur Folge, dass sich die nach kurzer Zeit bildende laminare Rohrströmung im Kanal wieder in eine turbulente Einlaufströmung wandelt und somit einen signifikant besseren Stofftransport β erzeugt, Abbildung 8.

In diesem Diagramm ist der Stofftransport über der Kanallänge für einen Standard- sowie für einen Träger mit LS-Struktur im Vergleich dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich im Falle einer Standardstruktur die Höhe des Stofftransports nach ca. 10 -15 mm Kanallänge auf ein relativ niedriges Niveau eingestellt hat. Dies wird durch den Übergang von einer turbulenten Einlaufströmung auf eine laminare Rohrströmung bewirkt. Im Unterschied hierzu wird bei der LS-Struktur jedes Mal beim Auftreffen auf eine der Schaufeln der Stofftransport signifikant erhöht, da sich an der Schaufel wieder eine Turbulenz ausbildet. Betrachtet man die integralen Flächenanteile unter den beiden Kurven, erhält man den quantitativen Unterschied zwischen Standard und LS-Struktur in Bezug auf die Qualität des Stofftransports. [8]

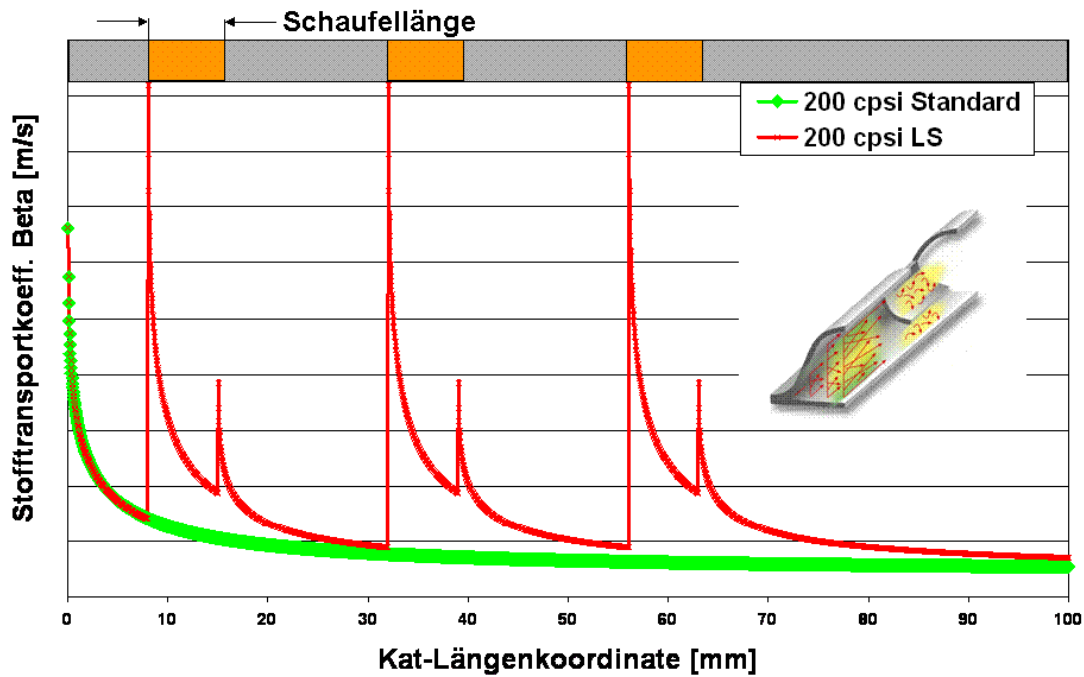


Abbildung 8: Vergleich des Stofftransports Standard vs. LS-Struktur

Aufgrund der Korrelation zwischen Stoff- und Wärmetransport wirkt sich der verbesserte Stofftransport ebenfalls auf das thermodynamische Verhalten der Matrixstruktur aus. Grundsätzlich ist festzustellen, dass bei höherem Stofftransport der Wärmetransport verbessert wird.

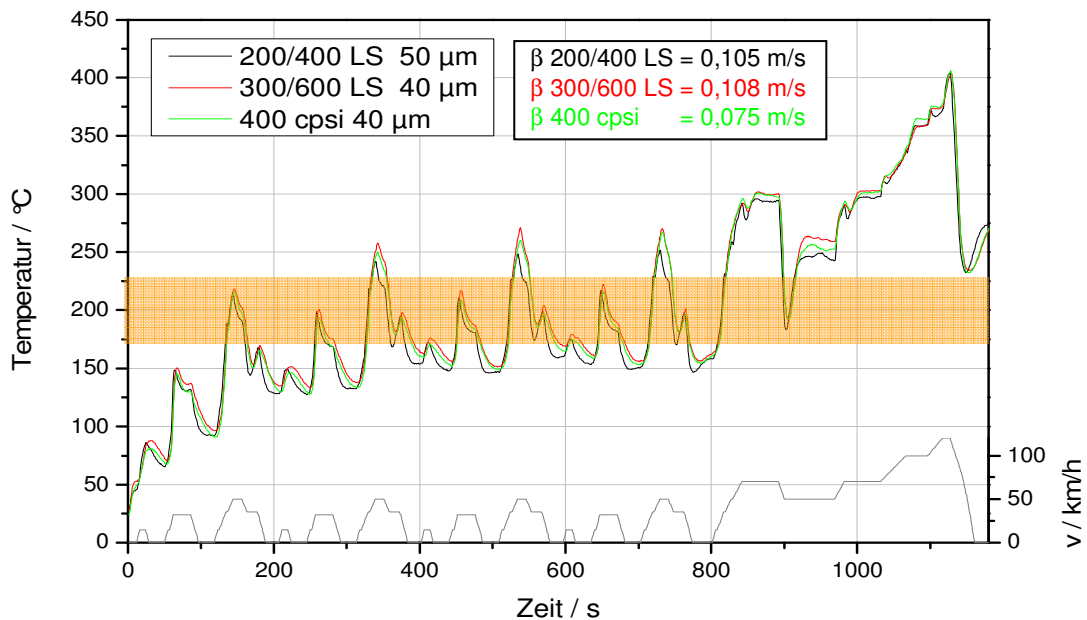


Abbildung 9: Einfluss der Matrixstruktur auf das Temperaturverhalten, Messstelle axiale Matrixmitte

Abbildung 9 zeigt, wie sich die Strukturtemperaturen in Abhängigkeit von der Matrixstruktur und somit dem Stofftransport verhalten. Die physikalischen Daten der untersuchten Matrixstrukturen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Physikalische Daten der untersuchten Metalite

| | Ø 135 x 71 x 63 mm 200/400 LS | Ø 135 x 71 x 63 mm 300/600 LS | Ø 135 x 71 x 63 mm 400 Standard |
|-------|---|---|---|
| 30 µm | $C_p = 144 \text{ J/K}$ $\beta = 0,101 \text{ m/s}$ $GSA = 1,089 \text{ m}^2$ | | |
| 40 µm | | $C_p = 189 \text{ J/K}$ $\beta = 0,108 \text{ m/s}$ $GSA = 1,296 \text{ m}^2$ | $C_p = 208 \text{ J/K}$ $\beta = 0,075 \text{ m/s}$ $GSA = 1,475 \text{ m}^2$ |
| 50 µm | $C_p = 190 \text{ J/K}$ $\beta = 0,105 \text{ m/s}$ $GSA = 1,073 \text{ m}^2$ | | |
| 80 µm | $C_p = 258 \text{ J/K}$ $\beta = 0,109 \text{ m/s}$ $GSA = 1,049 \text{ m}^2$ | | |

Es zeigt sich, dass die Struktur mit dem höchsten Stofftransportkoeffizienten das günstigste Temperaturverhalten aufweist. Das heißt, bei diesem System ergeben sich die höchsten Matrixtemperaturen, was sich besonders vorteilhaft in den ersten 300 Sekunden des Abgastests bemerkbar macht.

Einen wesentlichen Anteil an der Performance des DOC's hat die Beschichtung, an die folgende Anforderungen gestellt werden:

- Niedrige Light-Off Temperatur
- Hohes HC-Speichervermögen
- Spät einsetzende HC-Desorption
- Hohe Alterungstabilität

Abbildung 10 zeigt die HC und CO Light-Off Kurven einer aktuellen Serien-DOC-Beschichtung nach einer Alterung bei 700 °C, 10 % H₂O über 16 h.

Bei dieser Beschichtungstechnologie ergibt sich eine CO Light-Off Temperatur (50 % Umsatz) bei 170 °C, während HC erst bei 185 °C die 50 % Umsatz erreicht.

Werden bei nicht optimaler Regenerationsstrategie höhere Temperaturen im DOC erzeugt, verschieben sich die Light-Off Temperaturen zu höheren Werten, was letztendlich zu einer schlechteren Kaltstartaktivität führt.

Betrachtet man nun die Zulauf- und Strukturtemperaturen des DOC's im NEDC-Test, ist festzustellen, dass sich die Temperaturen nur zu einem relativ geringen zeitlichen Anteil oberhalb des zuvor genannten Temperaturbereichs bewegen, Abbildung 11.

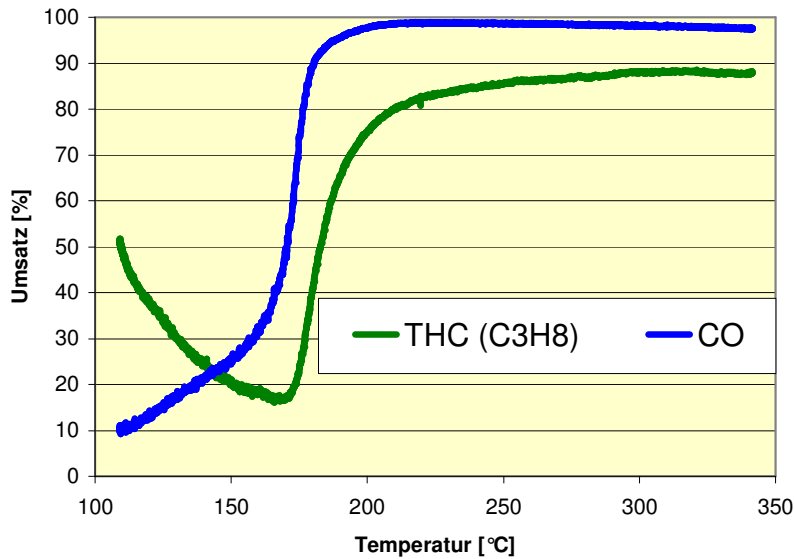


Abbildung 10: HC/CO Light-Off Kurven einer aktuellen DOC Beschichtung

Es stellt sich nun die Frage, ob sich durch ein aggressives Absenken der Wärmekapazität der Matrix eine Verbesserung erzielen lässt oder ob die Vorteile des schnelleren Aufheizens durch das schnellere Abkühlen im Schubbetrieb und dem damit verbundenen, so genannten Light-Down wieder kompensiert werden.

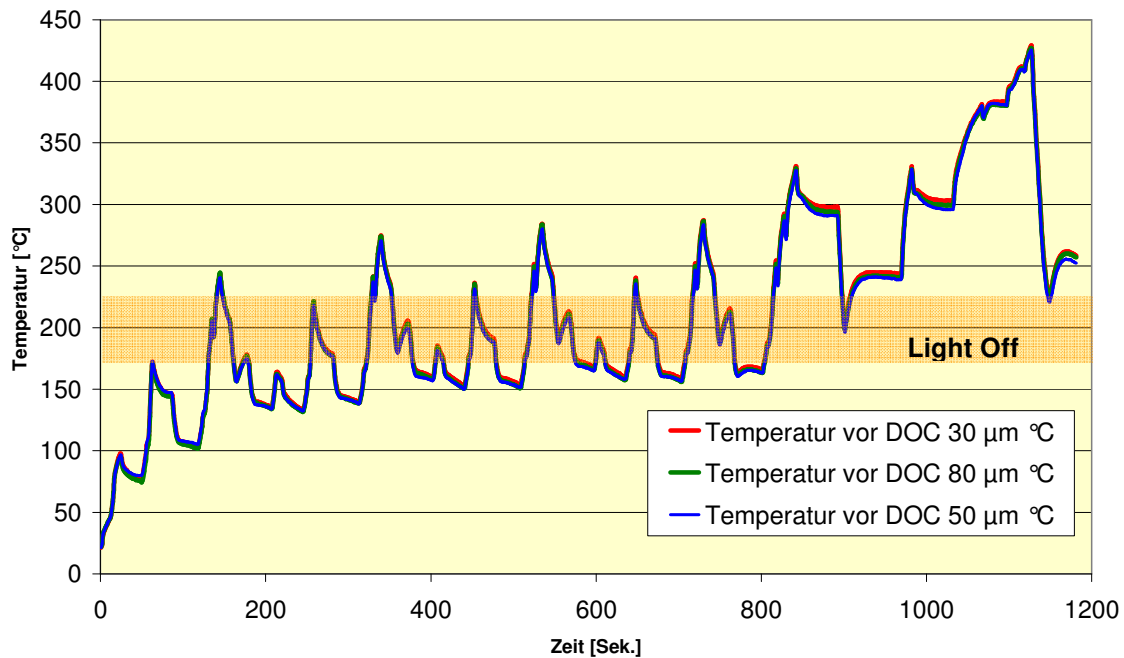


Abbildung 11: Zulauftemperaturen im NEDC Test bei verschiedenen Zellstrukturen

Ziel ist es daher, die Balance zwischen Light-Off in den Beschleunigungsphasen und Light-Down in den Schubphasen zu finden.

Vergleicht man unterschiedliche Wärmekapazitäten bei identischem hydraulischem Durchmesser, zeigt sich, dass der Träger mit der hohen Wärmekapazität zwar in den Spitzentemperaturen etwas zurück bleibt, im Schub aber deutlich weniger auskühlt, Abbildung 12.

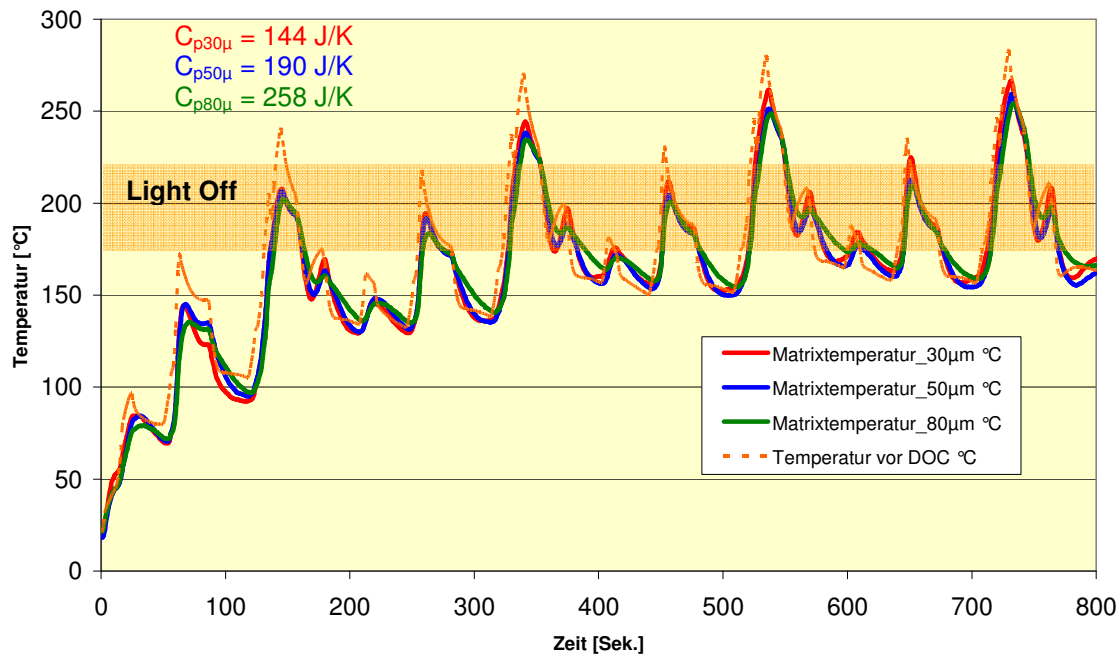


Abbildung 12: Einfluss der Wärmekapazität auf das thermodynamische Verhalten der Matrix im innerstädtischen Teil des NEDCs

In den Betriebszuständen hoher Last und somit hoher Raumgeschwindigkeit ist kein Unterschied mehr erkennbar.

Welche Konsequenz sich aus dem thermodynamischen Verhalten nun für die Emissionen nach DOC ergeben, ist in Abbildung 13 dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl bei der Erhöhung als auch bei der Reduzierung der integralen Wärmekapazität ein Nachteil im Endergebnis der Tests zu verzeichnen ist. Das heißt, wie bereits vermutet, dass die Vorteile beim Aufheizen durch Nachteile beim Abkühlen kompensiert werden.

Die Frage stellt sich nun, ob grundsätzlich durch die Variation der Wärmekapazität kein positiver Einfluss generierbar ist. In der Vergangenheit wurden positive Erfahrungen mit thermodynamischen Hybridsystemen gemacht, bei denen auf der Gaseintrittseite eine Matrix mit geringer und auf der Gasaustrittseite mit hoher Wärmekapazität eingesetzt wurde. [9,10] Dies setzt aber voraus, dass eine ausreichende Baulänge zur Verfügung steht. In der hier betrachteten Anwendung steht diese Baulänge nicht zur Verfügung, sodass alternativ ein Makrohybridsystem untersucht wurde, bei dem eine einzelne Zelle am Umfang

unterschiedliche Wärmekapazitäten aufweist. Dies wird erreicht, indem unterschiedliche Folienstärken für Well- und Glattlage eingesetzt werden. Insgesamt ist das System so ausgelegt, dass die integrale Wärmekapazität ungefähr der Wärmekapazität des Standardsystems entspricht.

Die hier verwendeten Varianten haben eine Foliendickenkombination aus 30/50 μm und 25/65 μm .

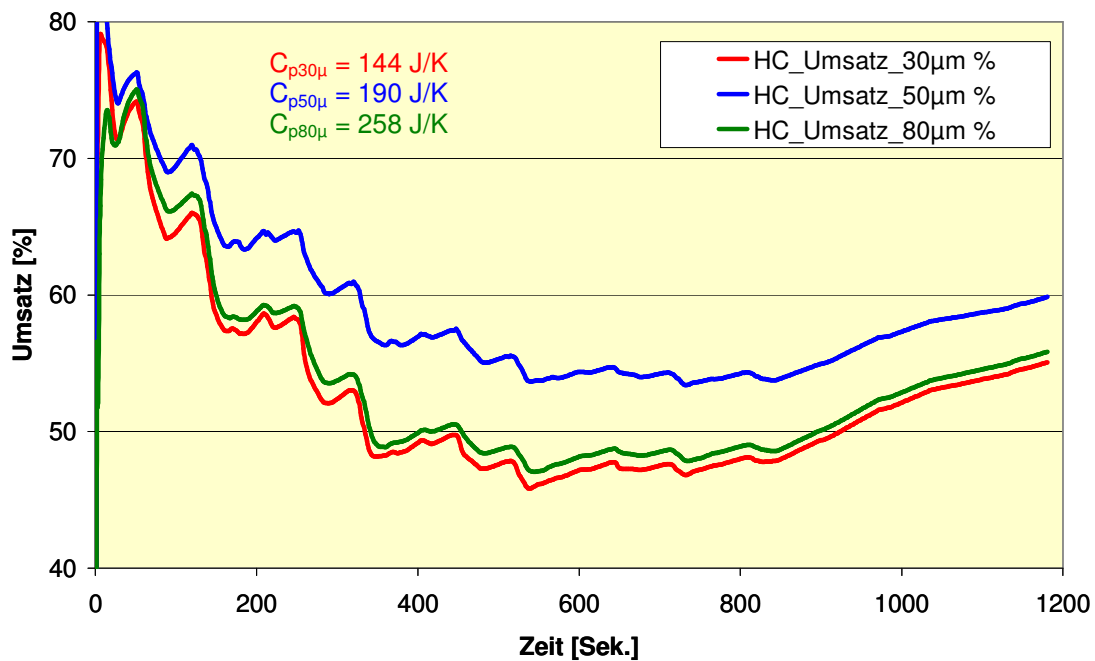
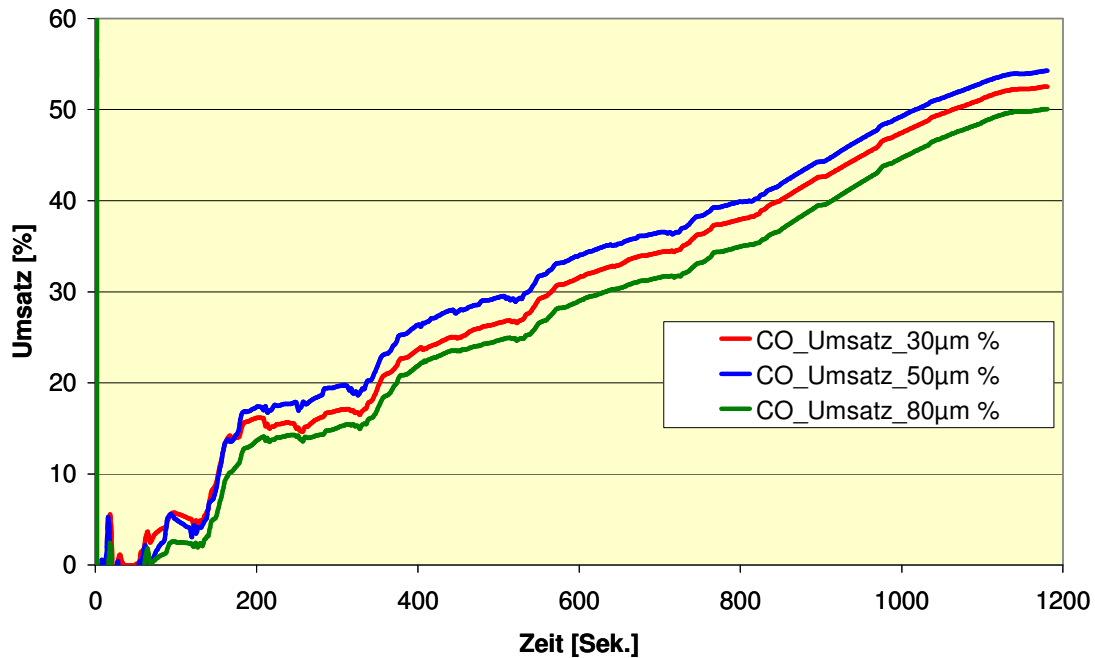


Abbildung 13: Einfluss der Wärmekapazität auf die CO/HC-Umsatzraten
 Beschichter I: W/C Formulierung A, 120 g/ft³, Pt:Pd 2:1; 800 °C, 16 h, 10 % H₂O

Ziel dieser Systeme ist, die Matrix bzw. die darauf befindliche Beschichtung über einen erweiterten Lastbereich aktiv zu halten.

Abbildung 14 zeigt, wie sich Makrohybride im Vergleich zu homogenen Strukturen hinsichtlich ihrer Konvertierungsleistung verhalten.

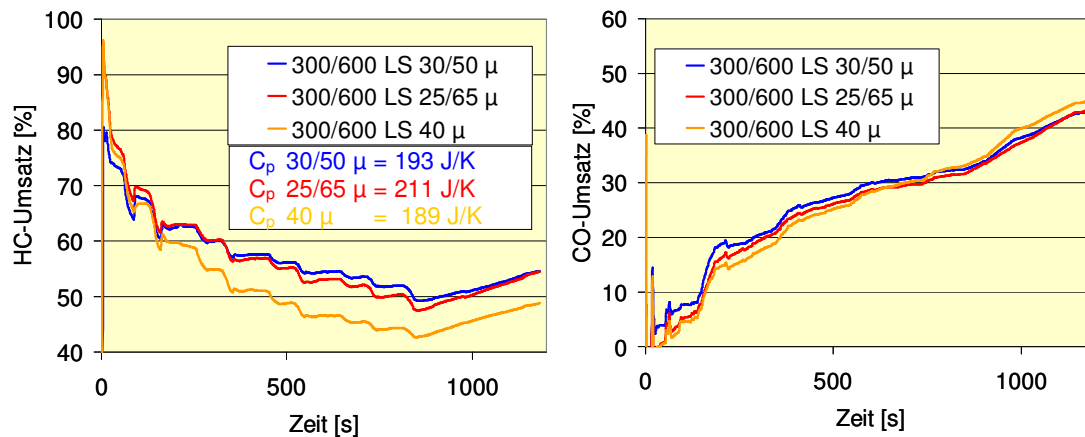


Abbildung 14: Konvertierungsverhalten von Makrohybriden im Vergleich zu homogenen Systemen
Beschichter I: W/C Formulierung: B, 120 g/ft³, Pt:Pd 2:1; 800 °C, 16 h, 10 % H₂O

Sowohl bei der HC- als auch bei der CO-Konvertierung ist im Endergebnis kein Unterschied zwischen den unterschiedlich kombinierten Wärmekapazitäten festzustellen. Beim HC findet man aber im Vergleich zur homogenen Struktur eine Effektivitätssteigerung von ca. 10 %. Wahrscheinlich ist dies auf das unterschiedliche temperaturabhängige HC-Desorptionsverhalten zurückzuführen.

Aus der Erfahrung heraus ist bekannt, dass sich Träger thermodynamisch günstiger verhalten, die ein kleines Verhältnis zwischen Durchmesser und Länge haben. Zum einen erhöht sich im Falle des Kaltstarts die Energiedichte pro Flächeneinheit, wodurch sich das Light-Off beschleunigt. Zum anderen ist gerade beim Einsatz strukturierter Katalysatoren die Anzahl turbulenz erzeugender Schaufeln bei größeren Matrixlängen höher.

Lassen sich aber aus den Bauraumbedingungen heraus größere Längen nicht realisieren, so ist durch geeignete Maßnahmen die Effektivität der Katalysatoren den kurzen Baulängen anzupassen.

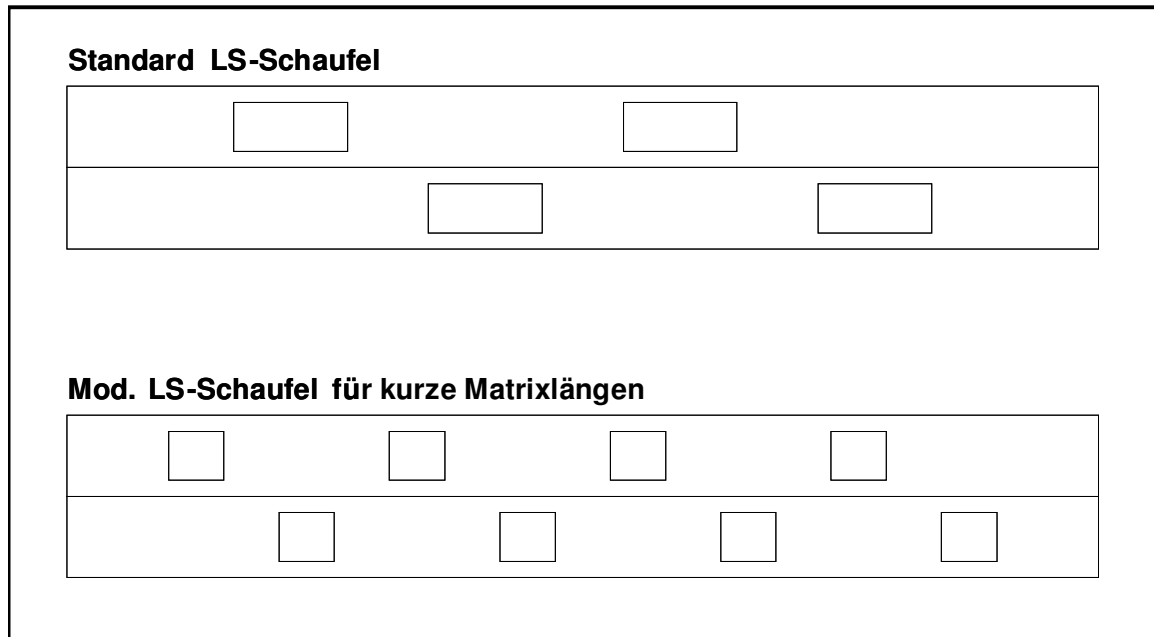


Abbildung 15: Modifizierte LS-Schaufel zum Einsatz bei kurzen Matrixlängen

Im vorliegenden Fall war lediglich eine Matrixlänge von 63,5 mm realisierbar, sodass hier eine modifizierte LS-Struktur zur Verbesserung der Effektivität untersucht wurde. Abbildung 15 zeigt die konstruktiven Unterschiede zwischen Standard- und modifizierter LS-Schaufel.

Bewertet man nun lediglich den Einfluss der modifizierten Schaufelgeometrie, so wurde im HC eine Effektivitätsverbesserung von 10 % und im CO von 7 % erzielt; Abbildung 16.

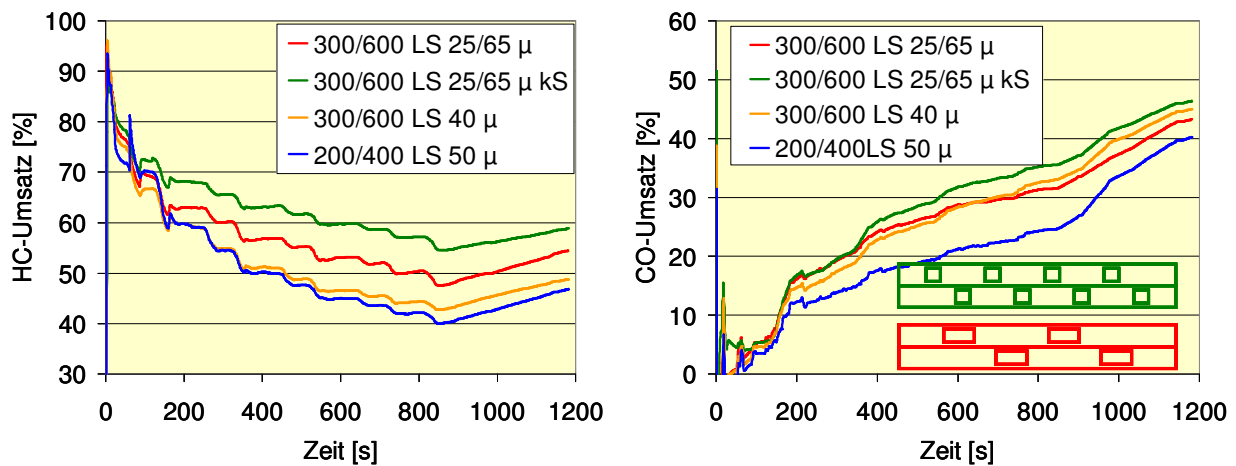


Abbildung 16: Vergleich der Standard LS-Schaufel mit einer modifizierten Variante für kurze Träger.
Beschichter I: W/C Formulierung: B, 120 g/ft³, Pt:Pd 2:1; 800 °C, 16 h, 10 % H₂O

Strömungsgleichverteilung

Um eine möglichst vollständige Ausnutzung des eingesetzten DOC-Volumens zu erreichen und damit verbunden eine möglichst gleichmäßige Alterung über den gesamten Querschnitt zu erzielen, ist eine gleichmäßige Verteilung der Abgase über den Eintrittsquerschnitt anzustreben.

Es wurden sowohl CFD-Berechnungen als auch Messungen auf dem Strömungsprüfstand zur qualitativen und quantitativen Bewertung des Strömungsverhaltens durchgeführt. Hierbei war entscheidend, dass möglichst die realen Bedingungen während der Messung simuliert werden. Diese Forderungen machte die Einbeziehung des Turboladers in den Messaufbau unumgänglich.

Abbildung 17 zeigt den verwendeten Messaufbau unter Einbeziehung des serienmäßig verbauten Abgasturboladers.

Die Randbedingungen dieser Messung sind im Folgenden dokumentiert:

- Reynoldszahl im Anströmrohr: 59000
- Massenstrom: 156 kg/h
- Mittlere Lufttemperatur: 32,6 °C

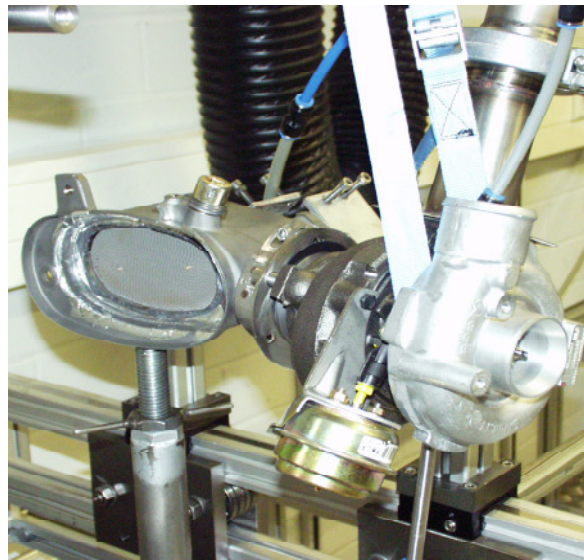


Abbildung 17: Versuchsaufbau zur Messung der Strömungsverteilung im Original Canning

Diese Randbedingungen entsprechen einem oberen Teillastpunkt und stellen eine gute Basis für eine Bewertung der Strömungsverteilung dar.

Abbildung 18 zeigt das Ergebnis der Messung unter Verwendung des Referenzträgers mit einer 200/400 LS Zellstruktur.

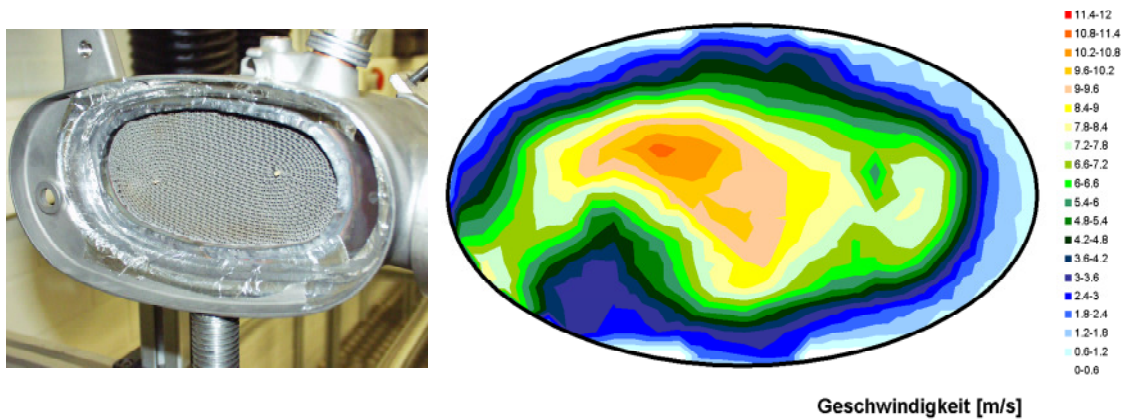


Abbildung 18: Strömungsverteilung am DOC in einem oberen Teillastpunkt

Es ist zu erkennen, dass eine Zentrierung der Strömung auftritt. Diese führt zwar durch die hohe Energiedichte zu einem relativ schnellen Light-Off, bewirkt aber bei höheren Lasten eine nicht vollständige Ausnutzung des eingesetzten Katalysatorvolumens bzw. der eingesetzten Edelmetalle.

Zur Verbesserung wurden weitere Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Zum einen ist durch die Wahl eines geeigneten Träger-Designs und zum anderen durch konstruktive Modifikationen an der Anströmhaube eine Verbesserung zu erzielen. Im Rahmen dieses Beitrags soll lediglich der Einfluss des Trägerdesigns aufgezeigt werden.

Um unabhängig vom konstruktiven Umfeld den Einfluss der Matrixstruktur bewerten zu können, wurde ein Versuchsaufbau gewählt, wie er in Abbildung 19 dargestellt ist.

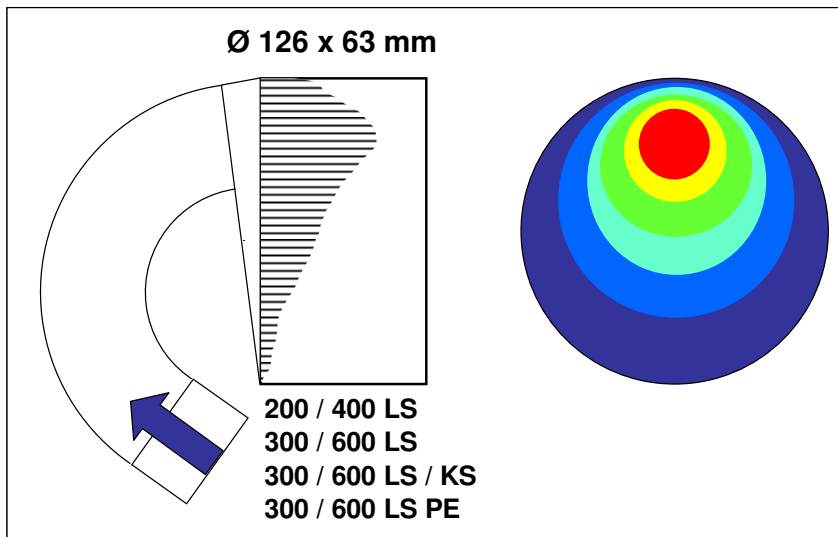


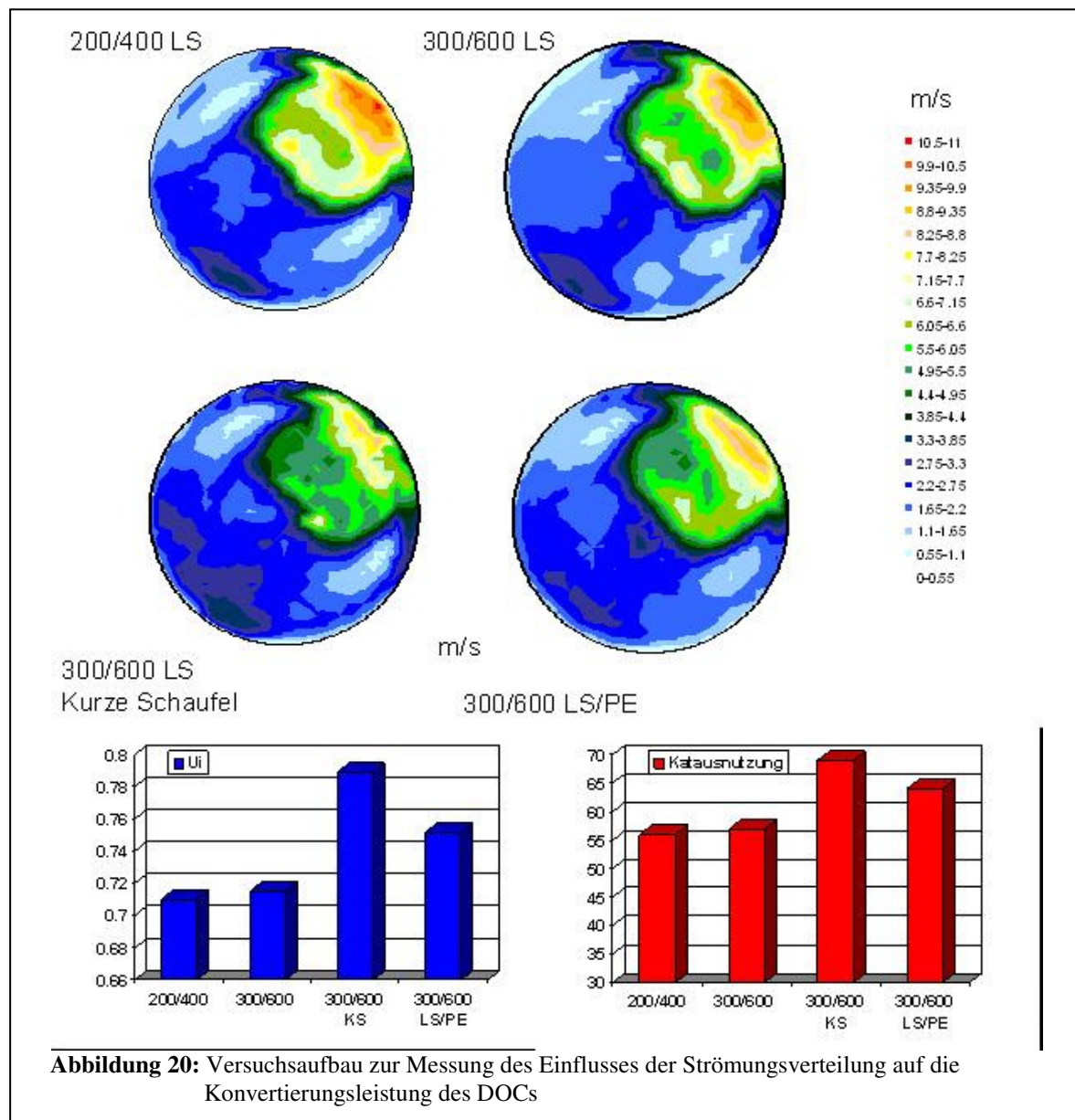
Abbildung 19: Versuchsaufbau zur Messung des Einflusses der Strömungsverteilung auf die Konvertierungsleistung des DOCs

Bei der Wahl dieses Aufbaus wurde darauf geachtet, dass die Länge der Matrix der realen Applikation entspricht, um hier keine unzulässigen Abweichungen zu erzeugen.

Folgende Matrixvarianten wurden untersucht:

- Struktur 1: 200 / 400 LS
- Struktur 2: 300 / 600 LS
- Struktur 3: 300 / 600 LS mit kurzer Schaufel
- Struktur 4: 300 / 600 LS / PE

Abbildung 20 zeigt, wie sich die einzelnen Matrixstrukturen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Strömungsverteilung verhalten.



Im Vergleich zum Referenzträger mit einer 200/400 LS Struktur weisen die Varianten mit einer höheren Zelldichte bzw. mit perforierter Struktur eine bessere Verteilung auf. Dies ist zum einen auf den erhöhten Druckverlust zurückzuführen, zum anderen speziell beim LS/PE Träger auf die gewünschten Querströmungen.

c Druckverlust

Vor dem Hintergrund, der zur Zeit in der Öffentlichkeit intensiv diskutierten CO₂-Emissionen, ist eine Optimierung in Richtung sinkender Druckverluste aller Komponenten anzustreben. Bei der hier beschriebenen konstruktiven Lösung addiert sich der Gesamtdruckverlust des ZSB's DPF aus den folgenden Einzeldruckverlusten der Bauteilkomponenten:

- a. Dp-Umlenkung
- b. Dp-Träger
- c. Dp-Beschichtung
- d. Dp- DPF

Im nachfolgenden Diagramm sind die Anteile der einzelnen Bauteilkomponenten am Gesamtdruckverlust aufgetragen; Abbildung 21.

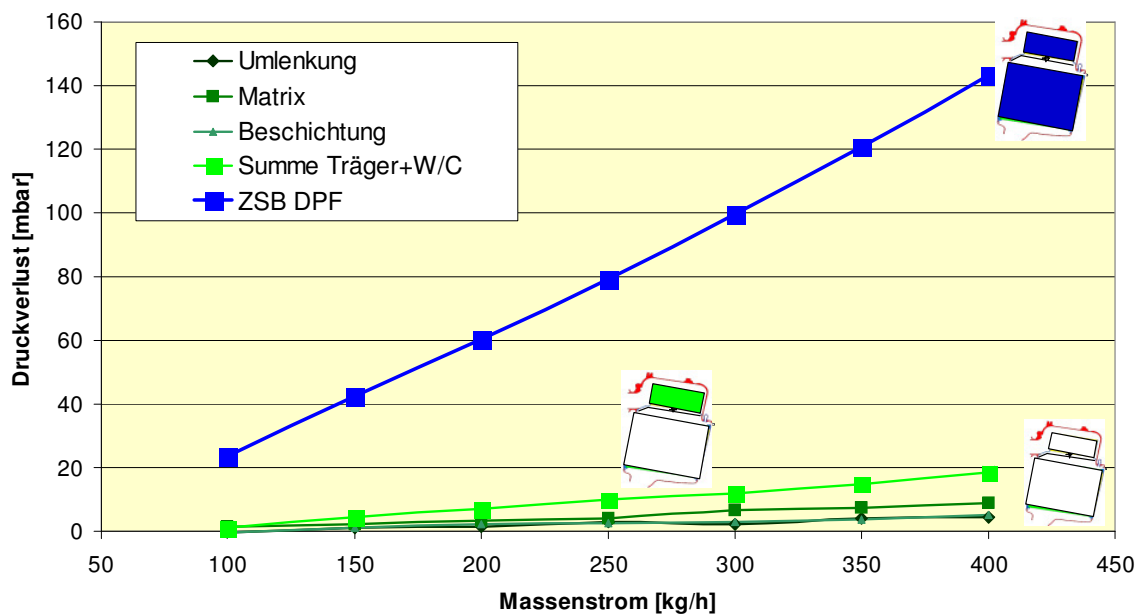


Abbildung 21: Druckverluste der Einzelkomponenten des ZSB's DPF

Das Diagramm in Abbildung 21 zeigt, dass der Druckverlust des Katalysatorträgers einen relativ geringen Anteil am Gesamtdruckverlust hat. Eine Reduzierung des Gesamtdruckverlustes ist daher nur durch eine Optimierung aller Bauteilkomponenten einschließlich der konstruktiven

Umfänge möglich. Insbesondere ist im Hinblick auf den beschichteten Träger eine Optimierung des Zusammenwirkens zwischen Washcoat und Trägerstruktur erforderlich.

4 Optimiertes System

Führt man nun alle oben genannten Optimierungsschritte wie

- Stoffübergang
- Wärmekapazität
- Schaufelgeometrie und
- Strömungsverteilung

zusammen, ergibt sich eine Effektivitätssteigerung in Abhängigkeit der betrachteten Komponente von zwischen 15 und ca. 25 %. Aufgrund des doch kleinen zur Verfügung stehenden Volumens sind Verbesserungspotenziale der Einzelkomponenten im Bereich zwischen 7 und 11 % relativ gering, jedoch ergibt ihre Kombination eine Effektivitätsverbesserung bis zu 26 %.

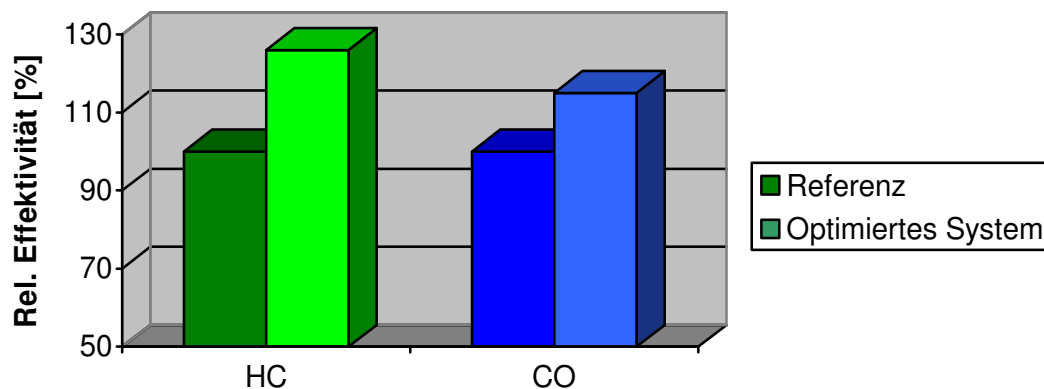


Abbildung 22: Verbesserungspotenzial durch Kombination aller untersuchten Einflüsse

5 Konstruktion und Dauerhaltbarkeit

Bei der Konstruktion wurden völlig neue Wege in der Fertigung des Katalysatorträgers beschritten. In vielen Dieselanwendungen werden heute mattengelagerte Keramiksysteme eingesetzt. Dies war in dem hier beschriebenen Lösungsansatz aus zwei Gründen nicht möglich.

- Maximale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums/Querschnitts
- Zu hohe thermische Dehnung im Mantel durch Umströmung mit Abgas und dadurch ggfs. Verlust an Vorspannung zum sicheren Halten des Keramiksubstrats

Bei mattengelagerten Systemen geht ein nennenswerter Anteil der Querschnittsfläche für die Verpackung des Keramiksubstrats verloren. Folglich wird dadurch das Volumen reduziert. Da das eingesetzte Trägervolumen von 0,5 l bereits die untere Grenze für einen 2,0 l Motor darstellt und auch hier schon effizienzsteigernde Maßnahmen eingeführt werden mussten, wäre ein weiterer Volumenverlust nicht vertretbar gewesen.

Ergänzend kommt hinzu, dass die äußere Umströmung des Mantels mit heißem Abgas zu einer thermischen Dehnung des Mantels führt. Dies kann unter kritischen Randbedingungen zu einem Verlust an Vorspannung der Mattenlagerung führen und folglich die Systemintegrität zerstören.

Aus diesen zuvor genannten Gründen wurde der Einsatz einer Metallträgermatrix favorisiert. Um auch hier vor dem Hintergrund der Kosten und der Bauteilzuverlässigkeit ein Optimum zu erreichen, wurde erstmalig für die Produktion des Katalysatorträgers ein tiefgezogener Mantel eingesetzt, bei dem bereits der Zwischentrichter für den Übergang auf die DPF-Kontur integriert ist. Dies hat gegenüber einer zweiteiligen Lösung den Vorteil, dass auf die zusätzliche Schweißnaht zwischen DOC und Zwischentrichter verzichtet werden kann. Damit wird eine potenzielle Fehlerquelle im Herstellungsprozess des Bauteils, aber auch im späteren Kundeneinsatz, eliminiert.

Abbildung 23 zeigt einen solchen Trägermantel und die Einzelschritte seiner Herstellung.



Abbildung 23: Katalysatorträger mit integriertem Zwischentrichter
Quelle: Fiuka GmbH

Daraus leitet sich ab, dass für die Integration des DOC's in das Gesamt-Bauteil lediglich eine Schweißnaht notwendig ist.

6 Kosten

Das einfache Design, die geringe Anzahl an Bauteilen sowie die motornaher Installation führen in Summe zu einer kostenextensiven Lösung, die einen Vergleich mit einem mattengelagerten System, sofern es denn verbaubar wäre, nicht zu scheuen braucht.

Hierbei sind eventuelle Kosten wegen statistisch bedingter Keramikträger / Lagerungsproblemen noch nicht eingerechnet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass auch bei bauraumkritischen Quereinbaukonzepten die Integration des Abgasnachbehandlungssystems in motornaher Position möglich ist.

Hierzu bedurfte es neuer Lösungsansätze, um ein hohes Maß an Integration zu erzielen. Dies wurde erreicht durch den Einsatz hocheffektiver turbulenter Metallträger, die durch die Verwendung tiefgezogener Mäntel mit integriertem Trichter die Anzahl benötigter Bauteile reduziert und damit eine Kosteneinsparung bewirkt.

Es wurde aufgezeigt, wie durch eine Reihe gezielter Verbesserungsmaßnahmen die Gesamtperformance um bis zu 25 % im Vergleich zum Referenzsystem gesteigert werden und somit weiteres Potenzial erschlossen werden kann.

Im Ergebnis wurde ein System entwickelt, welches in einem extrem beschränkten Bauraum ein maximales Katalysatorvolumen ermöglicht und hinsichtlich Robustheit und Kosteneffizienz ein Optimum darstellt.

Literatur

- [1] Dorenkamp, R. „Dieseltechnologien für zukünftige Emissionserfüllung“ 3. FAD-Konferenz; Dresden 9. - 10.11.2005
- [2] Maus, W., Brück, R.: „Motornahe Katalysatorkonzepte; Neue technische Herausforderungen“, 18. Internationales Motorensymposium, Wien, 24.-25. April 1997
- [3] Hammer, T., Bröer, S.: „Plasma Enhanced Selective Catalytic Reduction of NO_x for Diesel Cars“, SAE 982428
- [4] Konstandopoulos, A.G. et al: “Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration and Aging”, SAE 2000-01-1016
- [5] Cutler, W. A., Merkel, G. A.: “A New High Temperature Ceramic Material for Diesel Particulate Filter Applications”, SAE 2000-01-2844
- [6] Brück, R., Diewald, R., Maus, W., Wieres, L., Kaiser, F.W.: „New Ultra Thin Wall Metal Catalysts for Close-Coupled Applications“, SAE 980420
- [7] Brück, R. , Kaiser, F.W., Kruse, C.: „Anforderungen an zukünftige Katalysatoren – Entwicklungspotential am Beispiel des metallischen Katalysatorträgers“, Haus der Technik, Essen, November 1996

- [8] Brück, R., Hirth, P., Maus, W., Deutschmann, O., Mladenov, N.: Grundlagen der „laminaren“ und „turbulenten“ Katalyse; „Turbulent“ schlägt „Laminar“, Wiener Motorensymposium 2006
- [9] Schaper, K., Konieczny, R., Brück, R.: „Diesel-Katalysator mit Hybrid-Trägerstruktur“, Haus der Technik, Essen Juni 1999
- [10] Hosogai, S., Komatsu, K., Unno, Y.: „The Hybrid Catalyst, a New Catalyst Concept to Improve Utilization of Exhaust Gas Energy and Increase the Efficiency of Diesel Catalyst Systems“, 24. Internationales Wiener Motorensymposium, 15.- 16. May 2003