

Metallkatalysatoren – Bauteil- und Schadensanalyse im Fokus innovativer Designentwicklung

Dipl.-Ing. Kait Althöfer, Dipl.-Ing. Thomas Nagel, Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar

Kurzfassung

Für die Entwicklung und Herstellung von Metallkatalysatorträgern (Metalit®) kommt auch den Informationen aus der Schadensanalyse eine besondere Bedeutung zu.

Durch die zunehmend wachsenden motorspezifischen Belastungen nehmen die Kenntnisse über die Schadensmechanismen an dünnen Metallträgerfolien sowie die Einflüsse unterschiedlicher thermo-mechanischer Belastungsarten auf das Verhalten der Metallträger eine zentrale Rolle ein.

Es wird gezeigt, dass mit Hilfe der Schadenanalyse die Balance zwischen Belastung und Belastbarkeit auch unter ökonomischen Gesichtspunkten sowie, daraus resultierend, innovative Design-Gestaltungen möglich sind.

Gleichzeitig stellen Bauteil- und Schadenanalyse Werkzeuge zur Entwicklung praxisrelevanter Test- bzw. Simulationsbedingungen dar, mit deren Hilfe sich Korrelationen der Schadensmechanismen zu Fahrzeug- und Komponententest aufzeigen lassen.

Abstract

The data gained by failure analysis is of large importance in development and production of metal substrates for catalytic converters (Metalit®).

The increasing stress, mainly from the engine, the knowledge regarding mechanism of damage on thin metal foils as well as the influences of different thermo-mechanical load types on the behaviour of the metal substrate, play a central role.

It will be shown that innovative design is possible by utilizing failure analysis in the balance of load and load capability even in light of economic considerations.

Concurrently component- and failure analysis are tools to develop test conditions with practical relevance by means of which correlations between the failure mode in vehicle and component tests can be shown.

1 Einleitung

Mit dem Einsatz von Katalysatoren in der Abgasreinigung bei Otto-Motoren in den frühen 70er Jahren in den USA wurden in erster Linie keramisch basierte Träger verwendet. Zwar wurden bereits in den 60er Jahren Versuche mit Trägern aus dünnen gewickelten oder gestapelten Stahlfolien durchgeführt, jedoch konnte aufgrund mangelnder thermo-mechanischer Dauerhaltbarkeit ein Einsatz in der Großserie nicht erfolgen.

Erst Mitte der 80er Jahre wurde mit Unterstützung der damaligen KWU-Tochter Interatom bei Emitec ein Fertigungsverfahren entwickelt, das die Lebensdauer der Träger um mehrere hundert Prozent verlängerte. Hierbei handelt es sich um ein spezielles Fertigungsverfahren bei dem abwechselnd glatte und gewellte Edelstahlfolien aus einem modifiziertem Heizleiterwerkstoff gestapelt und anschließend in die entsprechende Form gewickelt werden, Abbildung 1.

Im Anschluss daran wird das Matrixpaket in ein mit Lot präpariertes Rohr eingeschoben. Um auch die erforderliche Festigkeit gegen hochfrequente mechanische Schwingungen und Gaspulsationen zu erzielen, werden die Ein- und Austrittsflächen des Trägers ebenfalls mit Lot präpariert und der Träger in einem Hochtemperatur-Vakuumlötofen gelötet.

Nur durch den Einsatz dieser Technologien konnten die Vorteile des Metallträgerkatalysators in der Großserie genutzt werden.

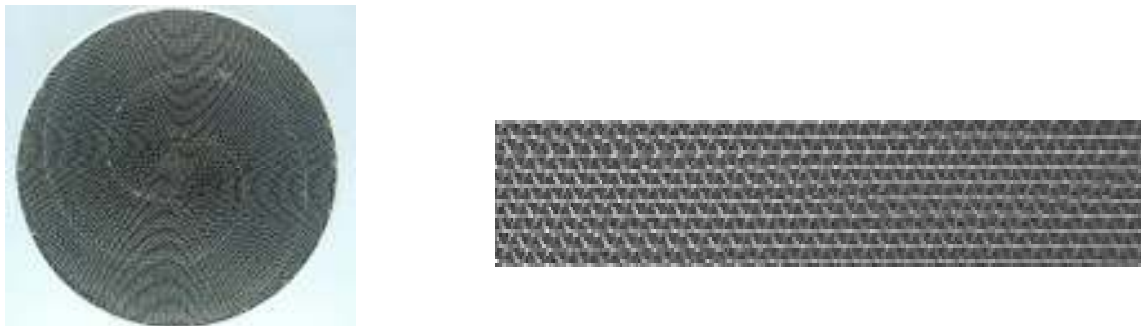


Abbildung 1. Frontalansicht und Lagenpaket eines S-Form-Trägers

Zu den wesentlichen Vorteilen gegenüber einem keramisch basierten Träger zählten unter anderem der geringere Druckverlust sowie die höhere geometrische Oberfläche des Trägers. Dies war auch der Grund, warum diese Träger zunächst bei Hochleistungsfahrzeugen der Firmen Porsche, Jaguar, Mercedes und BMW Alpina eingesetzt wurden. Heute sind Metallträger Katalysatoren in allen Fahrzeugklassen vertreten.

Der wesentliche Unterschied zwischen keramischen und metallischen Trägersubstraten besteht in den physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe.

Die Keramikträger bestehen aus Cordierit einer Mischung aus Aluminiumoxid und anderen keramischen Bestandteilen. Hierbei handelt es sich um Material, das eine sehr geringe Zugfestigkeit besitzt und folglich im Unterschied zu Metall eine relativ geringe Duktilität aufweist.

Der Verbau in einer Abgasanlage kann deswegen im Unterschied zum Metalit[®] auch nur mittelbar durch Einsatz keramischer Fasermatten erfolgen, da die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Cordierit und dem Metall der Abgasanlage stark unterschiedlich sind.

Beim Metalit[®] hingegen ist das Canning, also das Einbinden des Trägers in die Abgasanlage, relativ einfach, da lediglich die Konen an den Trägermantel angeschweißt werden müssen.

Dieser signifikante Unterschied führt in der Praxis zu Unterschieden in den spezifischen Belastungs- und somit Schädigungsmechanismen, denen durch angepasstes Design entsprechend Rechnung zu tragen ist. Gerade auch, weil in der Vergangenheit die Einbauposition der Katalysatoren vom Unterboden immer näher an den Motor geschoben wurde, um dadurch ein möglichst schnelles Aufheizen des Katalysators zu erreichen. Gleichzeitig bedeutet diese neue Positionierung eine Zunahme des Belastungskollektivs speziell beim Otto-Motor in der oberen Teillast bzw. Volllast.

Die erwähnten Canningvorteile des metallischen Trägers, die sich aus dessen Materialeigenschaften ergeben, finden sich zusätzlich in dessen Belastbarkeit im Fahrzeug wieder. Während keramisch basierte Katalysatoren empfindlich auf mechanische Belastungen reagieren und sich aus diesem Grund keine Übergangsbereiche einstellen, weist ein Metalit[®] duktile metallische Eigenschaften auf, die auf einzelne Belastungsspitzen ausweichend reagiert, und somit einem vorzeitigen Ausfall entgegenwirkt.

Metallische Katalysatoren lassen sich daher nach einer entsprechenden Erprobung aufgrund ihres Erscheinungsbildes in drei verschiedene Kategorien einteilen:

1. Einwandfreie Trägerstruktur

Sind alle einwirkenden Belastungen bekannt und im Lastenheft beschrieben, kann auf Basis der Spezifikation eine sehr genaue Designauswahl stattfinden, die die Grenzbelastung des Trägers mit all seinen bestimmenden Merkmalen hinsichtlich Effektivität und Dauerhaltbarkeit berücksichtigt, aber auch Herstellkosten und damit Verkaufspreise einbezieht. Auf dieser Basis wird ein zugeschnittenes Trägerdesign gewählt, das sowohl technischen wie auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten genügt und somit „auf den Punkt“ ausgelegt ist.

2. Beeinträchtigte Trägerstruktur (End-of-Useful-Life)

Können die Belastungen vom Kunden nicht vollständig beschrieben werden, weil diese bei Entwicklungsbeginn nicht ausreichend bekannt sind oder werden durch Fehleinschätzungen bzw. Fehlfunktionen zusätzliche Belastungen im System generiert, ist es möglich, dass ein gewähltes Design nicht die gewünschte Belastbarkeit aufweist, aber durch sein duktil verformendes Verhalten moderate Schäden zeigt, die die Emissionssicherheit des Katalysators aber nicht gefährden.

3. End-of-Life

Eine End-Of-Life Charakterisierung liegt dann vor, wenn die Integrität der beschichteten Matrixstruktur nicht mehr vorhanden ist. Solche Zustände treten dann auf, wenn die im Lastenheft beschriebenen Belastungen signifikant überschritten wurden. Dies kann zum einen durch Motorfehlfunktionen wie z.B. Verbrennungs- oder Zündungsaussetzer der Fall sein oder aber auch durch unzureichende Kenntnis der realen regulären Belastungen.

2 Belastung und Belastbarkeit

Grundsätzlich ist bei der lebensdauerbezogenen Designentwicklung der Unterschied zwischen Belastung und Belastbarkeit zu berücksichtigen. Gerade vor dem Hintergrund einer kostenoptimalen Designentwicklung sollte die Belastbarkeit der Belastung angepasst werden. Dies kann durch ein entsprechendes Lastenheft im Vorfeld des Entwicklungsprozesses berücksichtigt werden.

Hierbei ist die Superposition aller wirkenden Belastungen zu berücksichtigen, die im Einzelnen nachfolgend aufgeführt sind.

- Thermische Belastung
 - Maximale Temperaturbelastung: $\sigma_{T_{\max}}$
 - Maximale Temperaturdifferenz innerhalb eines Zyklus': $\sigma_{\Delta T}$
 - Maximale Temperaturänderungsgeschwindigkeit beim Aufheizen und Abkühlen: $\sigma_{dT/dt}$
 - Grad der Gleichverteilung des Abgases auf der Frontfläche: σ_{γ}
- Mechanische Belastung
 - Maximaler Beschleunigungspegel (pk/ RMS): σ_a
 - Frequenzbereich der Anregung im Hinblick auf System-Eigenfrequenzen: σ_f
 - Gasdynamische Belastung durch Gaspulsation: σ_{dyn} .

In einer vereinfachten Schreibweise ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{\text{Vergl.}} = \sqrt{\sigma_{T_{\max}}^2 + \sigma_{\Delta T}^2 + \sigma_{dT/dt}^2 + \sigma_{\mu}^2 + \sigma_a^2 + \sigma_f^2 + \sigma_{\text{dyn}}^2} \quad (\text{Gleichung 1})$$

In der Regel sind die Auswirkungen der verschiedenen Belastungsarten anhand des Schadenshabitus' differenzierbar. Aufgrund dessen werden die Ergebnisse aus der Bauteilanalyse zu gezielten Designmodifikationen herangezogen.

In einigen Fällen ist eine eindeutige Differenzierung nicht möglich. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn charakteristische Schadensformen verschiedener Ursachen nebeneinander vorkommen. Hier gilt es, durch Plausibilitätsprüfungen Primär- von Sekundärschaden zu unterscheiden.

3 Schadensanalyse als Partner der Designentwicklung

Entscheidend für die Dauerhaltbarkeit des Trägers ist einerseits die Verbindung der Matrix zum Mantel, andererseits die Verbindung von Glatt- und Welllagen untereinander. In Ihrer einfachsten Form ist die Matrix dabei an beiden Stirnflächen und die Matrix selbst über 2-3 Lötstreifen an den Mantel gelötet (Abbildung 2). Ein solches Lötdesign weist zwar nur wenige Freiheitsgrade auf, ist aber in sich sehr stabil und für viele Standardanwendungen bestens geeignet.

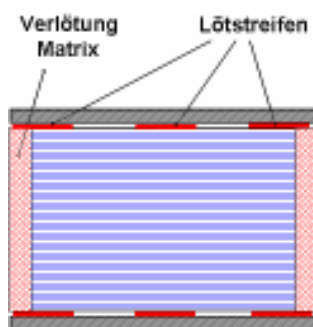


Abbildung 2. Standard Träger mit beidseitiger Matrixlötung und 3 Mantellotbereichen

Für die Effektivität des Katalysators sind neben der Beschichtung die durch das Trägerdesign festgelegten thermodynamischen Eigenschaften von entscheidender Bedeutung. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Volumen des Trägers sowie der Zelldichte. Gemeinsam stellen diese die für die Katalyse erforderliche geometrische Oberfläche zur Verfügung. Da 80 % der Abgasemissionen im Kaltstart emittiert werden, ist es erforderlich den Katalysator so früh wie möglich zu aktivieren. Die Reduzierung der Wärmekapazität durch Einsatz immer dünnerer Folien führt hier zwar zu einem schnelleren Aufheizen, aber auch zu einer Reduzierung der mechanischen Belastbarkeit.

Effizienzsteigerung und Dauerhaltbarkeitserhöhung stehen somit im Zielkonflikt zueinander, den es durch intelligente Designauslegung zu lösen gilt.

Die Effektivität eines Katalysators kann schon seit längerem mit guter Näherung berechnet werden, was die Designparameter Matrix-Durchmesser, Matrix-Länge, Zelldichte und Folienstärke in weiten Teilen bereits festlegt.

4 Überlagerte Bauteilbelastung

Während der Endkunde an dem in der Einleitung beschriebenen Design der „einwandfreien Trägerstruktur“ ein verständliches Interesse besitzt, ist dieses für Versuch und Schadensanalyse ein eher unergiebiges Aufgabenfeld. Treten maximal die im Lastenheft definierten Belastungen auf, sodass die Trägerauslegung spezifikationskonform erfolgen konnte, zeigen sich zum Ende der ausgelegten Fahrzeuglebensdauer keine nennenswerten Schäden. Allerdings lassen sich aus solchen Teile keine Erkenntnisse für die Maximalbelastung des Bauteils ableiten und sind daher für eine weitere Design-Entwicklung nicht unbedingt hilfreich.

Für die Bauteilanalyse sind vielmehr Trägerstrukturen interessant, die einzelne Beeinträchtigungen (End-of-Useful-Life) aufweisen, da sich dadurch die Möglichkeit ergibt potentielle Belastungen zu lokalisieren und in der zukünftigen Designentwicklung darauf zu reagieren. Dies gilt sowohl für die Entwicklung von Katalysatorträgern, wie auch für die Weiterentwicklung von Motoren, Canning und/oder Beschichtung die durch die Bauteilanalyse am Katalysator wertvolle Unterstützung erhält.

Während sich die Herstellkosten eines Trägers sehr genau kalkulieren lassen und sich auch die Effektivität eines Katalysators unter Einbeziehung der eigentlichen katalytischen Beschichtung in guter Näherung abschätzen lässt, ist für die Kenntnis um die Zusammenhänge von Belastung und Belastbarkeit Erfahrung nötig, die sich aus Versuchen ableiten lassen, bei denen eine gezielte Überlastung des Trägers erfolgt; einerseits durch Aufbringung definierter Einzellasten, andererseits aber auch durch definierte Überlagerung von Belastungen. Die Beaufschlagung der Komponente mit Einzelbelastungen wie einem reinen Thermoschock oder einer reinen Schwingungsbelastung des kalten Trägers zeigte in der Vergangenheit Schäden, die in Fahrzeugdauerläufen so nicht auftreten. Diese experimentellen Analysen der einzelnen Belastungskomponenten, wie auch der Zusammenhang gemäß Gleichung 1, zeigen, dass für die Beurteilung der Dauerhaltbarkeit eine isolierte Betrachtung jeder einzelnen Belastungsart nicht zielführend ist, da keine vergleichbaren Schadensbilder auftreten. Eine Überlagerung aller einwirkenden Belastungen muss daher in Betracht gezogen werden, um Aussagen über die Dauerhaltbarkeit eines Katalysators treffen zu können. Die bewusste Überlastung von Versuchsträgern, mit dem Ziel, sichtbare Schäden bereits nach kurzer Laufzeit zu erzeugen, eröffnet die Möglichkeit,

durch deren Analyse Schadensmechanismen zu verstehen und durch angepasste Designs darauf zu reagieren. Auf Basis der Kenntnis der realer Belastungsbedingungen kann ein „Überlastungskollektiv“ definiert werden, das die Belastungen, die während der Fahrzeuglebensdauer auftreten, auf wenigen Tage komprimiert und dadurch schnell Erkenntnisse über mögliche Problemfelder des Gesamtsystems gewonnen werden können. Typische Belastungsprofile bei Otto-Motoren–Anwendungen sind in Abbildung 3 dargestellt.

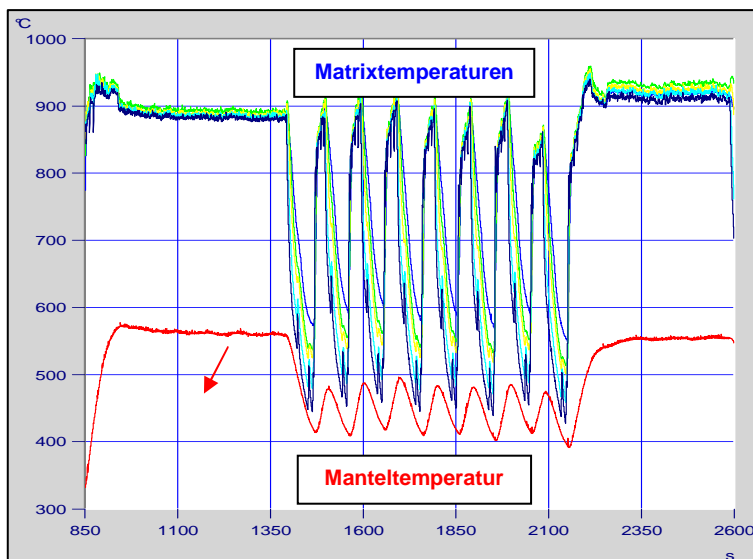


Abbildung 3. Katalysortemperaturen an verschiedenen Positionen während eines typischen OEM Erprobungszyklus'

Die Temperaturverläufe zeigen speziell im Bereich der Dynamik starke Unterschiede zwischen Mantel und Matrix. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften begründet. Wirkt die Matrix aufgrund ihres geringen Gewichts aber sehr großen Oberfläche wie ein exzellenter Wärmetauscher, so verhält sich der Trägermantel genau anders herum und kann der sich ändernden Gastemperatur nur langsam folgen. Hieraus resultieren behinderte Wärmedehnungen, denen mit einem geeigneten Träger-Design Rechnung getragen werden muss.

Ähnlich verhält es sich mit den mechanischen Belastungsgrößen. In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass der Verlauf zwischen der roten und der schwarzen Linie sich zu hohen Frequenzen hin deutlich unterscheidet. In dem vorliegenden Fall führt die mechanische Anbindung des Katalysators zu einer Dämpfung der Schwingungsamplituden bei hohen Frequenzen. Das liegt im Übertragungsverhalten der Abgasanlage begründet und bestimmt im Wesentlichen die absolute Schwingungsbelastung des Katalysatorsystems.

Gelingt es nicht die hohen Frequenzen vom Katalysator durch geeignete Entkopplungsmaßnahmen innerhalb der Abgasanlage fernzuhalten, so ist in der Konsequenz

mit sehr hohen mechanischen Belastungen – im Extremfall sogar mit Resonanzproblemen – zu rechnen.

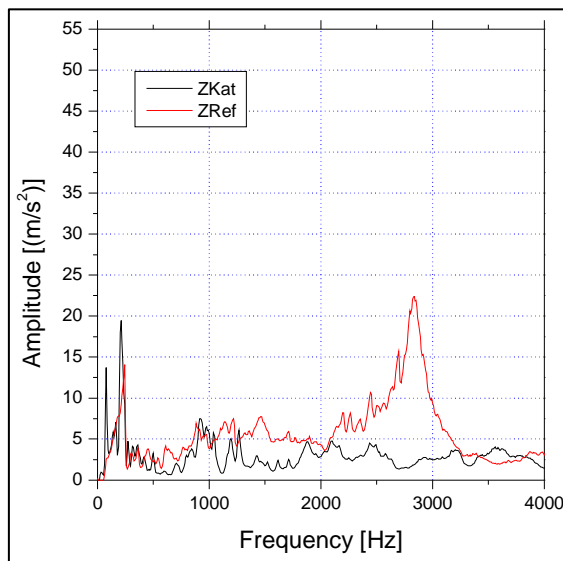


Abbildung 4. Typischer Beschleunigungs- / Frequenzverlauf für Abgaskrümmer und Katalysator

Je nach Projektfortschritt und Kenntnis der Anforderungen werden Versuche unter realen Belastungen auf Komponentenprüfständen, Motorprüfständen oder im Fahrzeug bei Emitec und/oder beim Kunden durchgeführt werden. Die aus diesen Tests entnommenen (unbeschichteten) Träger oder (beschichteten) Katalysatoren werden auf typische Schadensbilder hin untersucht, um daraus die Belastung abzuleiten und ein entsprechend belastbares Design auszulegen.

Da der technisch optimale Weg eines Fahrzeugdauerlaufs an der Originalapplikation aufgrund seiner langen Laufzeit und seinen sehr hohen Kosten eher für die abschließende Validierung genutzt wird, wurden in der Vergangenheit Testverfahren entwickelt, die den spezifischen Produkteigenschaften gerecht werden und die realen Belastungen simulieren können.

Ein bei Emitec entwickelter Test am Komponentenprüfstand [1] zeigt hier besondere Vorteile: Bei diesem in Abbildung 5 dargestellten Testaufbau (mit Testbedingungen für Otto-Fahrzeuge) wird der Katalysator auf einem Rüttler montiert und die Vorrichtung 1-axial angeregt. Durch die um 45° geneigte Einspannung erfolgt so eine 2-axiale Anregung des Katalysators. Gleichzeitig wird das Versuchsteil über einen Gasbrenner zyklisch mit definierten Abgastemperaturen, Masseströmen und Transienten (dT/dt) beaufschlagt.

Durch die gezielte Überlagerung dieser typischer Belastungen können bereits nach 50-100 Stunden gewinnbringende Aussagen getroffen werden, ob der Katalysator eine geforderte Lebensdauer von > 150.000 km erreichen kann.

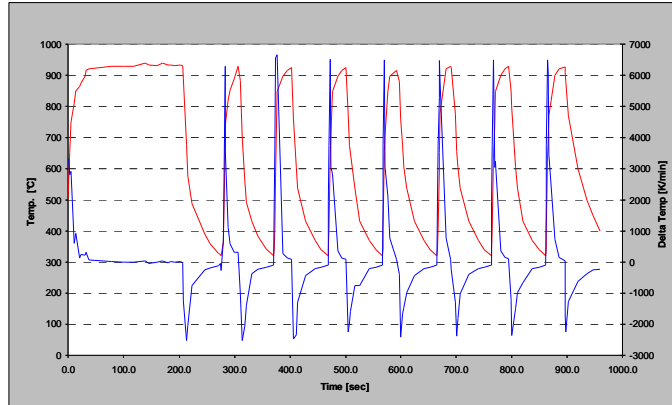


Abbildung 5. Aufbau Komponentenprüfstand und Key Life Time Testbedingungen

Typische Schädigungen, die bei dieser Art Test entstehen können, sind im Einzelnen nachfolgend aufgeführt sowie deren Hauptursache erläutert:

Auf mikroskopischer Ebene verhält sich eine Folie von z.B. 30µm Stärke sehr ähnlich, wie ein Bandstahl, der analog belastet wird. Abbildung 6 zeigt einen **glatten bzw. gezackten Bruch**, der hohe Schwingungsbelastung bei moderaten Temperaturen impliziert.



Abbildung 6. mechanisch induzierter Bruch (Schwingungsbruch)

Dem gegenüber steht ein typischer **thermisch induzierter Bruch** (Abbildung 7), der sich durch die thermische induzierte wechselnde Zug-Druckbelastung bei vorwiegend hohen Temperaturen und der damit verbundenen herabgesetzten Materialfestigkeit in seiner Entstehung zunehmend verjüngt. Zum Teil laufen solche Brüche sehr spitz und fließend aus, andererseits gibt es hier auch Bruchbilder, bei den sich die Folienenden wulstartig ausbilden.

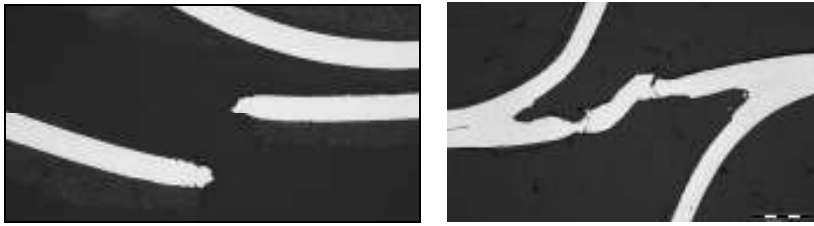


Abbildung 7. thermisch induzierter Bruch

In vielen Fällen treten die beiden Bruchformen, die auf thermische oder mechanische Kräfte hindeuten aufgrund von überlagerten Belastungen auch kombiniert auf. Aufgabe der Bauteilanalyse ist es, die Unterscheidung zwischen primärer und sekundärer Schädigung zu ermitteln. Mitunter kann dies jedoch nicht immer zweifelsfrei geklärt werden. Nur dann lassen sich geeignete Designmaßnahmen zur Optimierung des Bauteils ableiten.

Ein typisches Indiz für eine Motorfehlfunktion stellt das Auffinden von **Belägen auf der Matrix** dar. Ölaschen, die sich zunächst an der Matrixstirnfläche anlagern, sich aber auch innerhalb der Matrix ablagern, rufen häufig „Vergiftungen“ der Beschichtung (Washcoat) hervor. Der Belag führt dabei zu einer frühzeitigen Alterung der Beschichtung und setzt so die Effektivität des Katalysators herab. Hier sind Maßnahmen zur Verbesserung der Bauteilfestigkeit entweder nicht möglich oder extrem kostenintensiv. Die Bauteilanalyse liefert hier aber dennoch wertvolle Hinweise, indem Unregelmäßigkeiten oder Fehlfunktionen am Motor identifiziert werden.

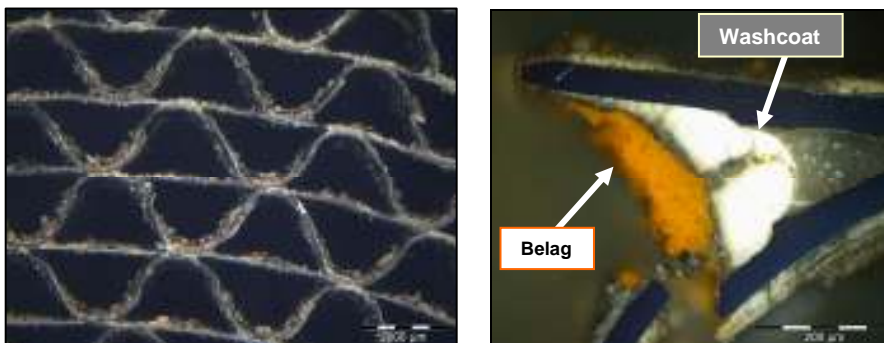


Abbildung 8. Beläge auf Matrixstirnfläche und in den Zellen

Bei der eingesetzten Legierung des Folienmaterials, diffundiert durch die Wärmebehandlung ein Teil des Aluminiums an die Folienoberfläche und bildet dort eine korrosionsbeständige Schutzschicht aus Aluminiumoxid. Findet man **Hochtemperaturkorrosion** (Abbildung 9), so weist dies darauf hin, dass durch Motorfehlfunktionen über einen längeren Zeitraum sehr hohe Temperaturen jenseits der regulären Arbeitstemperaturen an der Matrix angelegen

haben. Dies führt dazu, dass Diffusionsvorgänge im Werkstoff verstärkt werden und es zu einer Aluminiumverarmung in der Folie kommt. Durch mechanische Belastung auftretende Mikrorisse, können nicht mehr ausheilen und bieten Angriffspunkte für Korrosion. Zwar werden auch im Lötprozess kurzzeitig ähnliche Temperaturen erreicht, dies geschieht jedoch im Hochvakuum, wodurch entsprechende Korrosion verhindert wird.

Neben der langen Einwirkzeit können Motoröl- oder Kraftstoffrückstände Ursache für einen solchen Schaden sein oder auch eine undichte Abgasanlage, die eine überproportional große Menge an Sauerstoff in das System gelangen lässt. Die motoreigene Lambda-Regelung interpretiert diese Zusatzluft als zu mageres Gemisch und fettet weiter an. D.h. es steht ausreichend Kraftstoff und Sauerstoff für eine extreme exotherme Reaktion auf dem Katalysator zur Verfügung. Hierbei können leicht Temperaturen von 1200 °C und mehr entstehen.

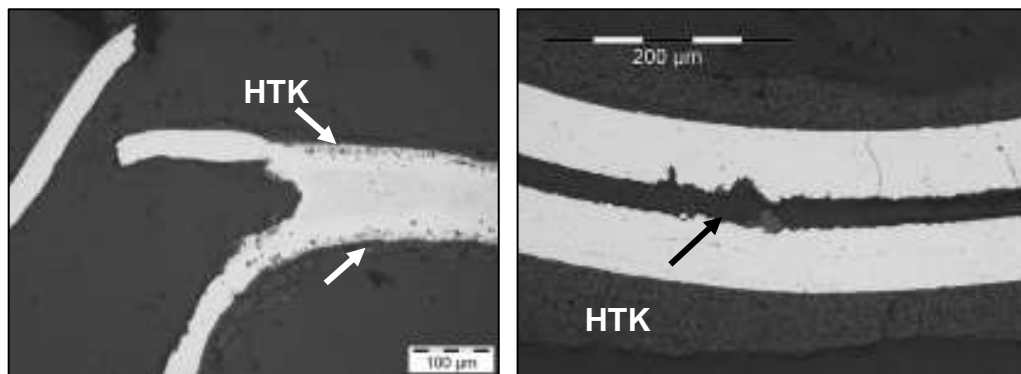


Abbildung 9. Hochtemperaturkorrosion (HTK)

Durch Hochtemperaturkorrosion wird die Haltbarkeit des Werkstoffs herabgesetzt. Vom Schadensbild her ähnelt die Hochtemperaturkorrosion der eher bekannten Nasskorrosion und kann als Flächen- wie auch als Lochkorrosion auftreten.

Betrachtet man die Matrix makroskopisch, so finden sich auch hier signifikante Hinweise für die Ursache der aufgetretenen Schäden.

Knitterpfade (Abbildung 10) und **Randspalt** entstehen durch hohe Temperaturtransienten. Trifft der heiße Abgasstrom auf die Matrix des Katalysators, so dehnen sich die metallischen Folien aus. Die Matrix stützt sich dabei auf dem Trägermantel ab und die heißen Folien werden aufgrund der bei diesen Temperaturen verringerten mechanischen Festigkeit deformiert und irreversibel verformt. Im negativen Thermoschock zieht sich die Matrix wieder zusammen. Nach und nach entsteht dabei ein Randspalt, dessen Breite sich aber nach einigen Zyklen nicht weiter vergrößert.

In ähnlicher Weise entstehen auch die Riss-/Knitterpfade: Die „Spitze“ der Welllage drückt dabei auf die benachbarte Glattlage, verspannt sich und die durch die S-Matrix angestrebte Torsion „faltet“ die Zellen bei entsprechend hohen Thermoschockbelastungen. Ähnlich einem bekannten Rissfortschritt in massiven Bauteilen, führt diese Faltung zu einer lokalen Verfestigung und nachfolgend zu einem fortschreitenden Knitterpfad.

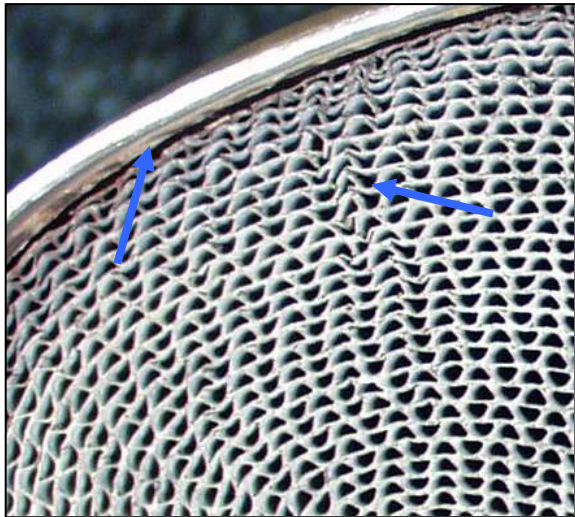


Abbildung 10. Knitterpfad und Randspalt

Folienrisse an der Gaseintrittsseite, wie in Abbildung 11 dargestellt, sind meist die Folge von Gaspulsation, die eine Glattlage lokal zu Schwingungen anregt und damit eine Dauerbiegebelastung in diesem Bereich ausübt. Eine solche Beeinträchtigung kann zwar auf eine größere Matrixfläche verteilt auftreten, ist aber auf einzelne Zellen beschränkt.

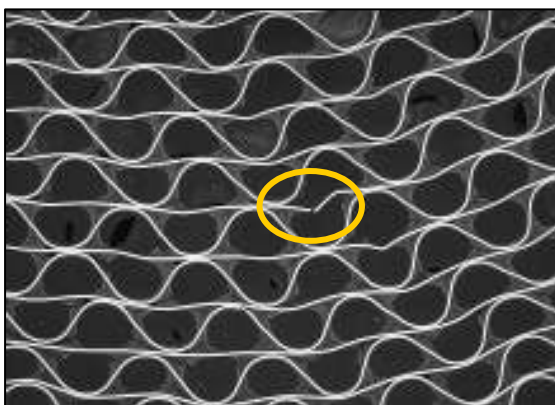


Abbildung 11. Folienrisse am Gaseintritt

Wird die Matrix neben der Gaspulsation jedoch zusätzlich durch eine erhöhte Schwingungsbelastung beaufschlagt, so kann sich ein solcher „Schädigungskeim“ zu einem Risspfad ausformen und im Extremfall zu einem Matrixausbruch führen. Um dem

entgegenzuwirken, ist es wichtig den Schadensmechanismus und die kausalen Zusammenhänge zu verstehen.

Im Gegensatz dazu findet man **verformte und umgeklappte Zellen** an der Matrixstirnfläche eher bei extrem hohen Temperaturspitzen, wenn die Zellwände durch die Kräfte des Gasstroms bei nachlassender Materialfestigkeit umklappen. Neben den erwähnten Temperaturpeaks liegt häufig auch eine sehr ungünstige Anströmung vor, bei der ein sehr großer Teil des Abgasstroms auf einen kleinen Teil der Matrixfläche konzentriert wird. Durch die Zellverformung verringert sich dabei die Eintrittsfläche einzelner Kanäle, was einen erhöhten Gegendruck der Matrix zur Folge hat, und somit die Kräfte des Gasstroms weiter steigert.

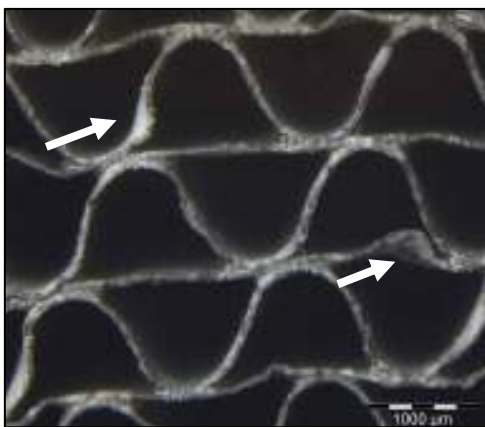


Abbildung 12. Zellumklappungen durch lokal verstärkte Anströmung

Bei Fahrzeugversuchen können sich hier zudem durch in Europa unübliche Kraftstoffbeimischungen weitere Probleme ergeben, wie z.B. im asiatischen Raum häufig organische Manganverbindungen zur Steigerung der Klopfestigkeit hinzugegeben werden. Das Mangan lagert sich dann auf der Gaseintrittsseite des Katalysators ab und führt mittelfristig zur vollständigen Verstopfung der Matrix. Als Abhilfemaßnahme ist hier lediglich der Einsatz einer Zellstruktur mit einem größeren hydraulischen Durchmesser möglich. Das Problem ist damit zwar nicht vollständig behoben, jedoch führt dies zu einer deutlichen Verlängerung der Laufzeit bis zum Totalausfall. Eine solche Maßnahme hätte aber ein vollständiges Re-Design der Katalysatoranlage zur Folge.

5 Alternative Trägerdesigns

Betrachtet man die verschiedenen Schadensbilder, so führt dies zunächst zu der Möglichkeit, aus der Kenntnis um den Schadensverursacher, das Design des Trägers zu optimieren. Da sich Folien- und Mantelmaterial sehr gut umformen lassen, bietet der Metalit® hier eine Vielzahl von Möglichkeiten die thermische oder mechanische Belastbarkeit eines

Trägers weiter zu verbessern oder die Effektivität des Katalysatorsystems zu steigern. Einzelne Beispiele sind in Abbildung 13 dargestellt.

Zum anderen bietet die Analyse eines Katalysators aber auch die Möglichkeit Entwicklungspartner auf überhöhte Beanspruchung hinzuweisen, und diese bei der Reduzierung der schädigungsrelevanten Größen aktiv zu unterstützen. Beispielhaft sei hier eine Optimierung der Strömungsverteilung, die Reduzierung von Temperaturpeaks oder auch eine Modifikation des Cannings zu nennen, welches erheblichen Einfluss auf das Schwingverhalten der gesamten Abgasanlage haben kann.

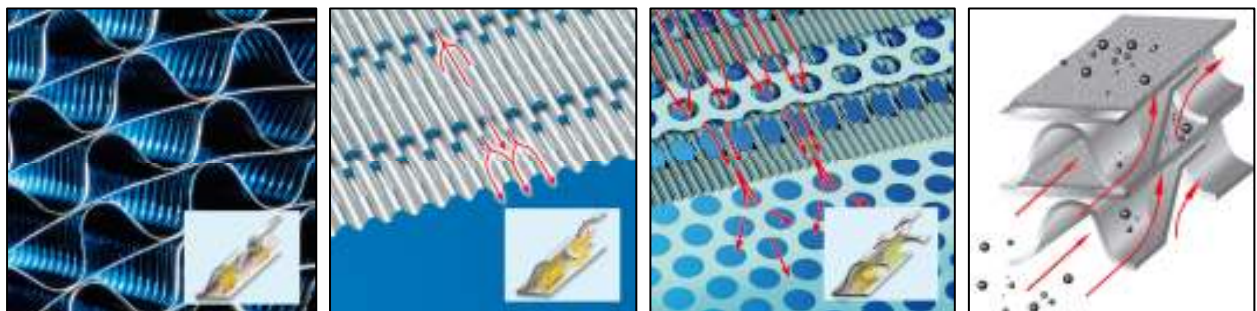


Abbildung 13. Applikationsspezifische Matrixstrukturen (TS-, LS-, PE-, PM-Design)

Die direkte Einflussnahme über ein verändertes Trägerdesign soll nachfolgend zeigen, wie die Designentwicklung dabei voranschreitet und so immer wieder an neue Aufgaben und wachsende Belastungen angepasst wurde.

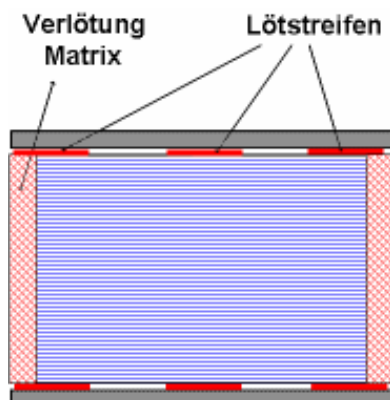


Abbildung 14. Metalit® - Lötplan A mit Gaseintritts- und Gasaustrittslötung

Das in Abbildung 14 dargestellte Design zeigt das ursprüngliche und einfachste Design, das durch seine hohe Stabilität aufgrund der allseitigen Lötverbindung bei extremen Thermoschockbelastungen die auftretende Matrixdehnung nicht kompensieren kann. Das TEC-Design (Thermal Expansion Compensation; Abbildung 15) stellt eine kostengünstige Maßnahme dar, moderate Thermoschockbelastungen über das Trägerdesign zu

kompensieren. Die Matrix wird dabei an der thermisch stärker belasteten Gaseintrittsseite vom Mantel entkoppelt, während die erforderliche Anbindungs­länge zum Mantel hin nach hinten verschoben wird. Die Matrix hat nun die Möglichkeit thermische Kräfte über eine leicht tordierende Matrix und über axiale Dehnung zu kompensieren. Bei den ersten Zyklen stützt sich die Matrix zwar auch bei diesem Design auf dem Mantel ab, mit der Folge von Zelldeformationen. Diese „Selbsthilfemaßnahme“ des Trägers setzt bei entsprechender Auslegung die Betriebsfestigkeit oder die Effektivität des Katalysators nicht herab.

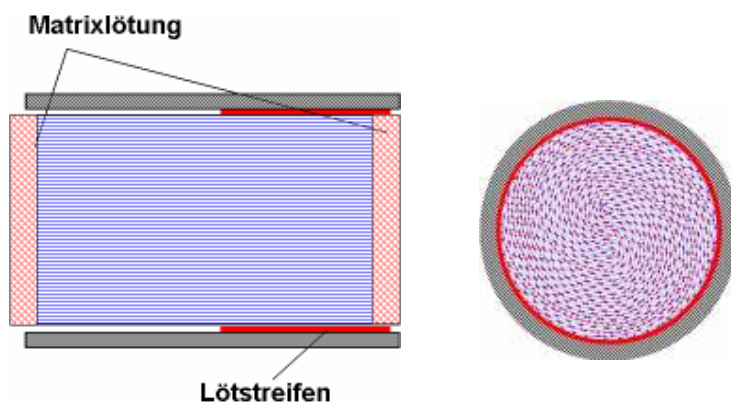


Abbildung 15. TEC-Design

Treten massivere Thermoschockbelastungen auf, so muss zusätzlich die Gasaustrittsseite entkoppelt werden. Das HD-Design (High Durability; Abbildung 16) kann durch seinen Aufbau mit einem zusätzlich integrierten federnden Wellmantel sowohl thermische wie auch mechanische Belastungen ausgleichen und erhöht so die Dauerhaltbarkeit des Trägers um Faktor 2-3 gegenüber einer Standard-Applikation.

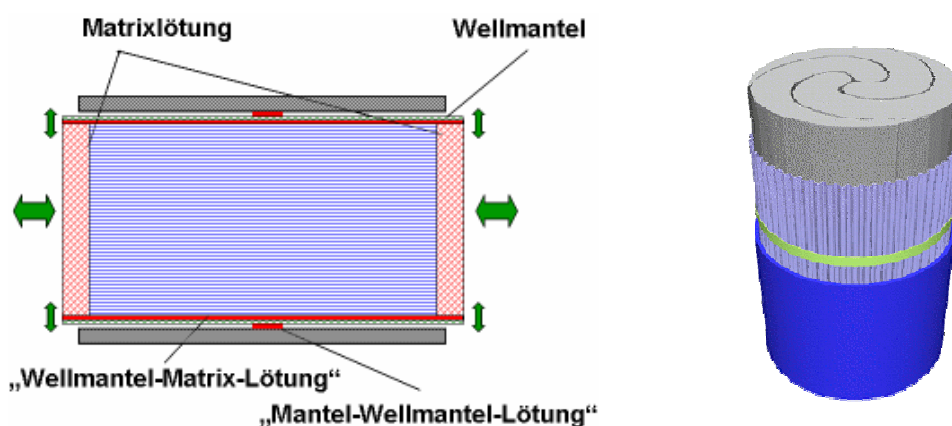


Abbildung 16. HD-Design

Betrachtet man den Aufbau eines solchen Trägers wird jedoch auch schnell deutlich, dass dieses Design nicht im gleichen Preissegment angeboten werden kann. Damit hat sich das

HD-Design zwar bei Herstellern von Hochleistungsfahrzeugen durchsetzen können, aufgrund des ständigen Wettbewerbs wird aber auch hier eine kostengünstigere und trotzdem gleichwertige Alternative nachgefragt.

Eine Lösung, die erst mit der Weiterentwicklung in der Prozesstechnik umgesetzt werden konnte, ist das HF-Design [2] (High Flexible; Abbildung 17). Hier wird der im HD-Design erzeugte Freiheitsgrad zwischen Mantel-Wellmantel-Lötung und den Matrix-Stirnflächen in gestapelter Folge in die Matrix verlagert, sodass der zuvor noch erforderliche Wellmantel entfallen und trotzdem eine vollflächige Anbindung der Matrix ermöglicht werden kann.

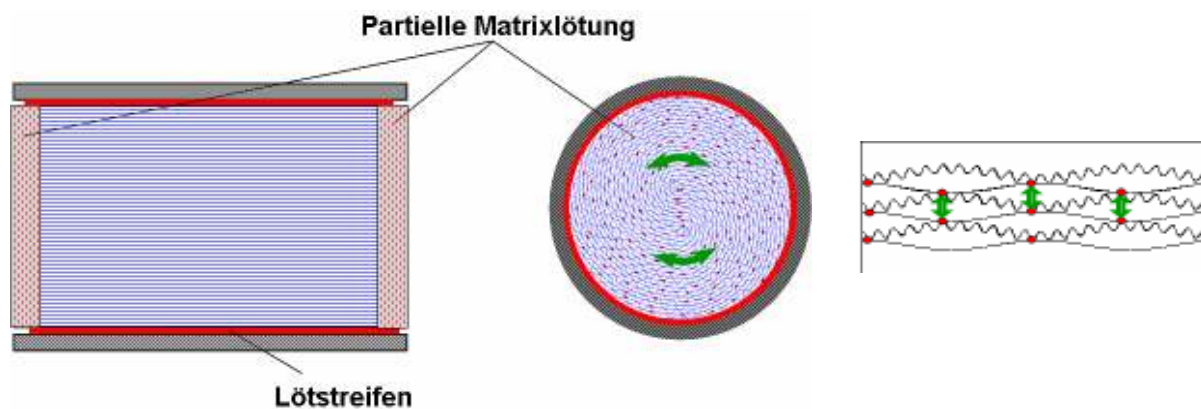


Abbildung 17. HF-Design

Die Matrix erhält so Hunderte interne Freiheitsgrade, sodass die durch Thermoschocks hervorgerufene Belastung durch radiale und tordierende Bewegung kompensiert werden kann.

6 Zusammenfassung

Der Metallträger stellt mit der aufgetragenen Beschichtung und dem Canning eine komplexe Einheit dar. Während die wirkenden thermischen und mechanischen Belastungen zumeist vom Motor eingebracht werden, finden zudem auch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten des Systems statt, die sich frei überlagern können.

Sind die Belastungskollektive nicht bekannt, oder können diese nicht ausreichend spezifiziert werden, stellt die Bauteilanalyse ein Sachgebiet dar, das aus den vorgefundenen Schädigungen deren Ursachen und damit das fragliche Belastungskollektiv ermittelt kann. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung des Trägers ein und bieten zusätzlich - durch den umfangreichen Funktionsbaukasten, des Metalit[®] - die Möglichkeit auch laufenden Kundenprojekte an ein ermitteltes Belastungskollektiv anzupassen.

Zudem wird die Möglichkeit geschaffen, durch enge Zusammenarbeit mit den Kunden auch dort Hinweise zu geben, die das Zusammenspiel im Gesamtsystems „Motor – Abgasanlage – Katalysator“ verbessern und damit dessen Qualität steigern.

Die Bauteilanalyse nimmt damit eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von Metallträgern ein, die über Unternehmensgrenzen hinaus weiter an Bedeutung gewinnt.

- [1] Nagel, T., Kramer, J., Presti, M., Schatz, A., Breuer, J., Emitec GmbH, Salzman, R., Scaparo, J. A., Montalbano, A. J., Ford Motor Company; A new approach of accelerated life testing for metallic catalytic converters, SAE 2004-01-0595
- [2] Althöfer, K., Brück, R., Müller, W., Emitec GmbH, Ulmet, V., Southwest Research Institute; Innovative, maßgeschneiderte Katalysatorträgerkonzepte für leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Emission Control, Dresden 2006