

Entwicklung einer Katalysatorstechnologie zur Darstellung von Niedrigstmissionskonzepten an Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Emitec Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH Hauptstraße 150 53797 Lohmar	19 U 99049

Vorhabensbezeichnung:

Entwicklung einer Katalysatorstechnologie zur Darstellung von Niedrigstmissionskonzepten an Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.1999-31.03.2002 (verlängert bis 30.06.2002)

Berichtszeitraum:

Projektjahr: 01.11.1999 - 30.06.2002

I. Aufgabenstellung, Projektbeschreibung, -planung und -durchführung

Durch die fortschreitenden Forderung an die Automobilindustrie immer niedrigere Abgasgrenzwerte einzuhalten, besteht der Bedarf die vorhandenen Technologien zur Emissionsminderung weiterzuentwickeln. Ein weiterer Schritt der Emitec GmbH auf diesem Weg voranzuschreiten, wird in der vorliegenden Arbeit dargestellt. Ziel des Forschungsprojektes war es, in den 4 Teilprojekten „Verbesserung des Massentransportes“, „Katalysatorisolation“, „Reduzierung der thermischen Masse“ und „Interner Strömungsausgleich“ Konzepte zu entwickeln, die Niedrigstmissionen an Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren unterstützen. Im 5. Teilprojekt „Katalysator-design“ sollte die gewonnenen Erfahrungen ganz oder teilweise genutzt werden, um die erzielten Ergebnisse praktisch umzusetzen.

Durch die jahrelange Erfahrung der Emitec GmbH in der Entwicklung metallischer Träger für Abgaskatalysatoren und durch die damit verbundene enge Zusammenarbeit mit Beschichtern, Cannern und Automobilherstellern liegen dem Zuwendungsempfänger erforderliche Basisinformationen in den relevanten ingenieur- und naturwissenschaftlichen Bereichen vor. Außerdem verfügt die Emitec GmbH über Laboreinrichtungen, Abgassimulatoren und Motorprüfstände mit deren Hilfe Untersuchungen durchgeführt und Ergebnisse verifiziert werden konnten. Die zu Projektstart nicht vorhandenen Einrichtungen für schwingungstechnische Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes angeschafft und genutzt.

Wie oben erwähnt, wurde das Gesamtprojekt in 5 Teilprojekte unterteilt. Die Projektplanung war dabei gleichlautend angelegt und wurde in nachfolgenden Projektphasen abgearbeitet: Literaturrecherche – Theoretische Betrachtung/Auslegung – Untersuchungen an favorisierten Varianten – Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen – Studie Fertigungsparameter – Emissionsmessungen. Je nach Projektverlauf, mussten Untersuchungen an verschiedenen Varianten durchgeführt werden, was in einzelnen Teilprojekten zu Verzögerungen führte und schließlich auch zu einer dreimonatigen Verlängerung der Vorhabensdauer.

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen fand – abgesehen von der Erbringung der dargestellten Fremdleistungen – nicht statt.

II. Darstellung der Ergebnisse

Eine eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte erfolgt in den beigefügten Berichten. Hier wird auch auf den voraussichtlichen Nutzen und die Verwertbarkeit der Ergebnisse eingegangen. Die Inhalte der Teilprojekte sind wie folgt:

A.	VERBESSERUNG DES MASSENTRANSPORTES	A-1
1.	HINTERGRUND DER UNTERSUCHUNGEN	A-1
2.	ENTWICKLUNGSGRUNDLAGEN.....	A-1
3.	FEM-KALKULATION DER OPTIMALEN ZELLFORM	A-2
4.	UNTERSUCHUNGEN AN TRÄGER MIT TS-DESIGN.....	A-4
5.	HOHE ZELLDICHTEN UND VERRINGERUNG DES PITCH-WELLHÖHEN VER-HÄLTNISSES	A-6
6.	UNTERSUCHUNGEN AN TRÄGERN MIT LS-STRUKTUR.....	A-14
7.	HALTBARKEITUNTERSUCHUNGEN.....	A-19
8.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	A-19
B.	KATALYSATORISOLATION	B-1
1.	LITERATURRECHERCHE	B-1
2.	THEORETISCHE AUSLEGUNG.....	B-2
3.	TEMPERATURUNTERSUCHUNGEN.....	B-4
4.	EINFLUSS VERSCHIEDENER ISOLATIONEN SOWIE DEREN KOMBINATIONEN AUF DIE KAT-TEMPERATUREN	B-6
5.	EINFLUSS DES ABSTANDS AUF DIE TEMPERATUR EINES BENACHBARTEN BAUTEILS	B-7
6.	EINFLUSS DER TS-ISOLATION	B-9
7.	EINFLUSS VON VERSCHIEDENEN ISOLATIONSPRINZIPIEN AUF DIE KAT-TEMPERATUREN.....	B-11
8.	KERAMISCHE VERGUßMASSEN-ISOLATIONSVARIANTEN	B-13
9.	KERAMISCHE FASER-ISOLATIONSVARIANTEN	B-14
10.	KOMBINATIONEN VON METALLISCHEN FOLIEN UND KERAMISCHEN FASERMATTEN:	B-16
11.	WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE	B-17
C.	REDUZIERUNG DER THERMISCHEN MASSE	C-1
1.	LITERATURRECHERECE	C-1
2.	THEORETISCHE AUSLEGUNG.....	C-1
3.	KATALYSATORBERECHNUNG	C-5
4.	REDUZIERUNG DER LOTMENGE	C-6
5.	KORROSIONSUNTERSUCHUNGEN	C-9
6.	VERBESSERUNG DER KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT DES GELÖTETEN MATRIXBEREICHES	C-13
7.	ALTERNATIVE VERFAHREN ZUR MINIMIERUNG UND VERGLEICHMÄßIGUNG DER LOTMENGE	C-16
8.	VERBESSERUNG DER KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT DES GELÖTETEN MATRIX-BEREICHES.....	C-17
9.	DAUERHALTBARKEITUNTERSUCHUNGEN	C-19
10.	EMISSIONSMESSUNGEN.....	C-22
11.	WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE	C-23
D.	INTERNER STRÖMUNGS AUSGLEICH	D-1
1.	LITERATURRECHERCHE UND THEORETISCHE AUSLEGUNG	D-1
2.	MODELLUNTERSUCHUNGEN	D-2
3.	STRÖMUNGSVERTEILUNGSMESSUNG	D-4
4.	FERTIGUNGSPROZESS MISCHERSTRUKTUR	D-7
5.	INHOMOGENE VORSpanNUNGEN BEI MISCHERN MIT SINTERMETALLVLIES	D-10
6.	DAUERHALTBARKEIT	D-11
7.	STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE IM MISCHER.....	D-12
8.	STUDIE BESCHICHTBARKEIT.....	D-16
9.	DAUERHALTBARKEITUNTERSUCHUNGEN	D-17
10.	STUDIE FERTIGUNGSPARAMETER	D-18
11.	DAUERHALTBARKEITUNTERSUCHUNGEN	D-19
12.	WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE	D-21
E.	KATALYSATORDESIGN	E-1
1.	TEMPERATURMESSUNGEN	E-1
2.	UNTERSUCHUNGEN ZUM FERTIGUNGSPROZESS.....	E-2
3.	DAUERHALTBARKEITUNTERSUCHUNGEN	E-5
4.	MOTORPRÜFSTANDSDAUERLÄUFE	E-8
5.	EMISSIONSMESSUNGEN.....	E-12
6.	WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE	E-13

Im Rahmen des SAE-Kongresses in Detroit (März 2002) wurden Ergebnisse der Untersuchungen mit dem HD-Design (Katalysatorisolation/ Katalysatordesign Teilprojekt B/ D) vorgestellt. Weitere Veröffentlichungen zu Trägern mit strukturierten Folien (LS- und SQ-Design sind geplant für TAE Esslingen, Wiener Motorensymposium und SAE-Kongress 2003.

Da die Ergebnisse der Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen und Emissionsmessungen einen wesentlichen Teil des Firmen-Know-Hows wiedergeben, bitten wir darum, diese Ergebnisse vertraulich zu behandeln!

Ebenso darf die Liste der Schutzrechtsanmeldungen nicht veröffentlicht werden, da Veröffentlichungen noch nicht abgeschlossen sind.

III. Erfolgskontrollbericht

1. Wissenschaftlich technische Ergebnisse

A. Verbesserung des Massentransportes

Es wurden 3 verschiedene Designs untersucht, die eine Verbesserung des Massentransportes erzielen können.

- TS-Design
- SQ-Design
- LS-Design

Das TS-Design weist keine fertigungs- oder beschichtungs-technische Schwierigkeiten auf, so dass dieses Design in Serie umsetzbar ist. Mit diesem Design alleine können jedoch die zukünftigen Abgasgrenzwerte nicht gehalten werden.

Mit dem SQ- und dem LS-Design werden auf ähnliche Weise die Diffusionswege verkürzt. In beiden Varianten wird die katalytisch beschichtete Folie in das Zentrum des Kanals verlagert und damit die Reaktionsgeschwindigkeit im Katalysator erhöht. Insbesondere das LS-Design zeigt in Dauerhaltbarkeits- und Emissionsuntersuchungen positive Ergebnisse. Die oben beschriebenen Schwierigkeiten bei der Fertigungsumsetzung von LS-Trägern mit höherer Zelldichte konnte inzwischen für Prototypen ausgeräumt werden. Ebenso zeigen die Beschichtungsversuche positive Ansätze, die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Erfolg versprechen.

B. Katalysatorisolation

Ziel einer wirksamen Katalysatorisolation ist primär die Reduktion der Temperaturbelastung von Bauteilen, die in der Nähe des Katalysators angeordnet sind. Dabei kann es sich bei motornahen Anwendungen um mechanische, hydraulisch oder elektronische Bauteile handeln, die bei zu hohen Temperaturen Schaden nehmen würden. Ähnliches gilt für die sog. Unterbodenposition, wo verhindert werden muss, dass umliegende, auch nicht zum Fahrzeug gehörende Dinge Feuer fangen könnten.

Die zweite Hauptfunktion der Katalysatorisolation ist direkt mit der ersten gekoppelt und besteht darin, eine möglichst hohe Katalysator-Innentemperatur aufrechtzuerhalten bzw. ein Abfließen von Energie in den für die Gesamtemissionen wichtigen Kaltstartphase zu verhindern. Dies erfolgt „automatisch“ bei einer Begrenzung des Wärmeflusses nach außen zur Reduzierung der Katalysatoroberflächentemperatur. Die Maßnahme ist erforderlich, da die Konvertierungsleistung des Katalysators bei hohem Temperaturen ansteigt und somit niedrige Emissionen erzielt werden können, wenn wirksame Katalysatorisolationen eingesetzt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass wirksame Katalysatorisolationssysteme entwickelt wurde, die beiden Anforderungen, sowohl der Reduzierung der Oberflächentemperaturen, als auch der Verringerung von Emissionen, in hohem Maße gerecht werden.

Die beschriebenen Ergebnisse wurden im Teilprojekt E „Katalysatordesign“ weiter verwendet, wobei die beiden Grundanforderungen an eine Isolation genutzt werden konnten. Das zusätzlich erzielte hohem Maße an Flexibilität und Dauerhaltbarkeit der Verbindung der Matrix zum Mantel wird in diesem Teilbericht näher beleuchtet.

C. Reduzierung der thermischen Masse

Die Verringerung der thermischen Masse eines Katalysators führt zur Verringerung der Kaltstartemissionen durch schnelleres Aufheizen. Die thermische Masse setzt sich zusammen aus Beschichtungsgewicht und dem Gewicht des Trägers. Das Trägergewicht kann durch den Einsatz von Metallfolien mit Dicken $\leq 30 \mu\text{m}$ gesenkt werden.

Verarbeitung und Einsatz von Folien dieser Dicke stellen zusätzliche Anforderungen an Material und Fertigungsprozess, von denen die folgenden Schwerpunkte im Rahmen dieses Teilprojekts untersucht wurden. Mit dem Ziel der Verringerung der Korrosion speziell im Lötbereich wurden alternative Lote und Belotungstechniken getestet. Als erfolgversprechend erwies sich dabei der Einsatz von Folienmaterial mit höheren Aluminiumgehalten.

Mit der Verringerung des Folienquerschnitts rückt die Dauerhaltbarkeit des Trägers zunehmend in den Mittelpunkt der Auslegung. Die im Rahmen dieses Teilprojekts durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Dauerhaltbarkeit in Motorprüfstandsläufen durch modifizierte Designs deutlich gesteigert werden kann. Getestet wurden u. a. verschiedene Matrixlötungen sowie verschiedene Varianten der Mantel-Matrix-Anbindung. Als günstig für das Thermoschockverhalten erwies sich die Beschränkung der Matrixlötung auf die Gaseintrittsseite bei gleichzeitiger Verhinderung von Verbindungen außerhalb dieses Bereichs.

Parallel zur Designoptimierung wurde mit der Arbeit an alternativen Folienwerkstoffen höherer Festigkeit begonnen, die auch über den Rahmen der Förderung hinaus fortgesetzt wird.

D. Interner Strömungsausgleich

Ziel war es ein metallische Wabenstruktur mit Strömungsausgleich zwischen benachbarten Zellen zu entwickeln. Dadurch kann neben einer zusätzliche Durchmischung des Abgases (z.B. eingedüster Harnstoff beim SCR-System) eine Homogenisierung von Konzentrationen bzw. eine Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeiten (Gleichförmigkeit) erzielt werden.

Das Abgas innerhalb des Trägers wird definiert geführt bzw. umgelenkt, so dass es zu einem lokalen Strömungsausgleich zwischen benachbarten Zellen innerhalb der Ebene und zwischen den Ebenen kommt.

Das System ist ähnlich einem Standardträger aufgebaut, wobei abwechselnd glatte und gewellte Folienlagen die Wabenstruktur bilden. Die Strömungsumlenkung erfolgt durch sogenannte Leitbleche (Schaufeln), die in die Wellfolie integriert sind. Die Anordnung, Anzahl und Geometrie der Schaufeln beeinflussen die Mischeffektivität und Druckverlust des Gesamtsystems.

Um einen Strömungsausgleich zwischen benachbarten Ebenen zu ermöglichen ist neben den eingebrachten Leitbleche in der Wellfolie eine poröse Glatfolie zwingende notwendig. Der Grad der Porosität innerhalb der Glatfolie beeinflusst zusätzlich die Mischeffektivität und den Druckverlust.

Als Glatfolie kann auch ein Filtermedium verwendet werden, so dass neben einer lokalen Durchmischung (Mischeffekt) auch Rußpartikel zwischen gelagert werden können. Hierfür ist jedoch ein vorgeschalteter Oxidationskatalysator bzw. eine Beschichtung des Systems notwendig, um den gespeicherten Ruß zu regenerieren (chemische Reaktion von NO_2 mit Ruß) und somit ein Verblocken des Trägers zu vermeiden. Umfassender Untersuchungen zum Partikelabscheider erfolgten außerhalb Förderprojektes.

E. Katalysatordesign

Basierend auf den Untersuchungen in den Teilberichten B (Katalysatorisolation) und C (Reduktion der thermischen Masse) wurde ein neues Träger-Design entwickelt. Ziel war eine Applikation die den motornah herrschenden Bedingungen optimal angepasst ist und die Einhaltung zukünftige Abgasgrenzwerte unterstützt. Mit dem HD-Design konnte eine Lösung gefunden werden, die die Möglichkeit bietet, auch bei sehr dünnen Folien hohe wechselnde Temperaturbelastungen dauerhaft zu kompensieren. Noch nicht erklärbar sind die widersprüchlichen Ergebnisse zwischen den Temperaturmessungen am Strömungsprüfstand und den Emissionsergebnissen im EU3-Test. Hier sind weitere Untersuchungen geplant.

2. Fortschreibung des Verwertungsplans

Emitec-Schutzrechtsanmeldungen

---Vertraulich---

Wirtschaftliche und wissenschaftliche Erfolgsaussichten und Anschlussfähigkeiten

Die Verbesserung des Massentransports und damit der Katalysatoreffektivität ermöglicht es, Katalysatorsysteme kostengünstiger zu gestalten. Durch die Erhöhung der Zelldichte beispielsweise kann der Träger mit deutlich kleinerem Volumen ausgelegt werden, was zum einen Package- aber vor allem Kostenvorteile für den OEM bedeutet (Beschichtungskosten). Durch den Einsatz von strukturierten Folien ist eine Reduzierung des Materialeinsatzes möglich, was neben verringertem Gewicht und thermischer Masse auch die Trägerkosten reduziert und damit die Wettbewerbsposition diesbezüglich verbessert. Speziell bei strukturierten Folien und optimierter Zellge-

ometrie (hohe Zelle) werden hohe Anforderungen an die Fertigungstechnologie gestellt. Hierzu sind einige alternative Verfahren denkbar, die im Anschluss an die Entwicklungsphase untersucht werden müssen.

Da im Automobilbau grundsätzlich die gesamten Systemkosten betrachtet werden, ist eine effektive und dennoch einfache und vor allem kostengünstige Isolierung für den Katalysator von hoher Bedeutung. Als bester Kompromiss diesbezüglich erwies sich bei diesem Forschungsprojekt die Isolation mittels metallischem Doppelmantel mit dazwischenliegendem Luftspalt. Aufgrund der zunehmend beengten Bauraumverhältnisse durch die steigende Anzahl an Nebenaggregaten und Verwendung größerer Motoren kommt dem Thema Wärmeabstrahlung abgasführender Teile immer größere Bedeutung zu. Die gestiegenen Anforderungen bezüglich Effektivität erfordern eine weitere Optimierung sämtlicher Betriebsphasen. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen ist somit auch eine weitere Optimierung der Katalysatorisolation erforderlich.

Die Erhöhung der Zelldichte und damit der Katalysatoreffektivität kann nur sinnvoll umgesetzt werden, wenn durch die Reduktion der Folienstärke der freie Querschnitt (Druckverlust) und die thermische Masse (Aufheizverhalten) des Trägers in etwa konstant gehalten werden kann. Die zu erwartenden Wettbewerbsvorteile sind unter Projekt 1 beschrieben. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit der dünnen Folien Handlungsbedarf bestand. Diese wurde durch eine Veränderung der Zusammensetzung des Folienmaterials verbessert. Die Entwicklung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Stahlhersteller.

Neben den denkbaren Einsatzgebieten zur Strömungsverteilung ist vor allem der Einsatz der Mischerstruktur in Verbindung mit einer Sintermetallglattlage zur Absorption von Rußpartikeln interessant. Dieses System hat gegenüber den bislang üblichen Systemen deutliche Vorteile (offene Struktur, Betriebssicherheit), die es vor allem für bestimmte Anwendungsfälle (z.B. LKW) interessant machen.

Durch die gestiegenen Belastungen heutiger Katalysatorsysteme werden immer höhere Anforderungen an die mechanische und thermische Dauerhaltbarkeit gestellt. Um im Markt zu bestehen ist eine konstruktive Lösung auch für besonders hohe Anforderungen unabdingbar. Durch das neu entwickelte Design wird das mögliche Einsatzspektrum der Träger deutlich erweitert und somit eventuell die Möglichkeit für neue Systemansätze geschaffen. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem im Hinblick auf die Hochtemperaturfestigkeit der dünnen Folien Handlungsbedarf besteht. Diese kann eventuell durch eine Veränderung der Zusammensetzung des Folienmaterials verbessert werden. Dies müsste in enger Zusammenarbeit mit dem Stahlhersteller geschehen.

Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Alle Teilprojekte führten zu verwertbaren Ergebnissen. Obwohl bis zum Projektende nicht alle Designs in einem serienreifen Stadium waren, bestand und besteht jedoch in allen Teilprojekten die Aussicht die gemachten Erfahrungen in wissenschaftlichen und/oder wirtschaftlichen Erfolg umzumünzen.

Einhaltung von Zeit- und Kostenplan

Der ursprüngliche Zeitplan für das Gesamtprojekt wurde um 3 Monate überschritten. Verzögerungen wurden insbesondere in den Teilprojekten A („Verbesserung des Massentransportes“), C („Reduzierung der thermischen Masse“), und D („Interner Strömungsausgleich“) festgestellt. Während in Teilprojekt C die Verzögerung dadurch zustande kam, dass Untersuchungen mehrfach an unterschiedlichen Varianten durchgeführt werden mussten, weil die zunächst favorisierte Version nicht die gewünschten Ergebnisse lieferte, sind die Verzögerungen in den Teilprojekten A und D auf externe Ursachen zurückzuführen. Speziell durch Schwierigkeiten bei der Umsetzung geeigneter Beschichtungsverfahren, konnten die darauf aufbauenden Emissionstest nur zeitverzögert durchgeführt werden.

Begründet durch die notwendigen Zusatz- und Verifizierungsuntersuchungen sind für die Emitec GmbH zusätzliche Kosten angefallen, die dem Träger teilweise zur Kenntnis gebracht wurden. Nachforderungen wurden nicht gestellt.

IV. Berichtsblatt

Liegt bei

A. Verbesserung des Massentransportes

1. HINTERGRUND DER UNTERSUCHUNGEN

Die Effektivität der Schadstoffumsetzung eines Katalysators, wie die Reaktionsgeschwindigkeit jedes anderen heterogenen katalytischen Systems, hängt von der komplizierten Reaktionskinetik und der Geschwindigkeit des Massentransportes zu und von der katalytischen Oberfläche ab. Diese Effekte werden wiederum von der Temperatur bestimmt. Während der "light-off-Phase" ist die Gastemperatur relativ niedrig und die gesamte Verbrennung wird durch die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion an der Katalysatoroberfläche bestimmt. Massen- und Wärmetransport zwischen der Katalysatoroberfläche und dem umgebenden Gas laufen im Vergleich zur chemischen Reaktion schnell ab. Strömt das Gas zügig durch den Monolithen, verhält sich das System als ob es adiabatisch ist, wobei die Reaktionsrate mit steigender Temperatur exponentiell zunimmt, was aus der chemischen Reaktion an den Zellwänden des Monolithen resultiert. Die Systemtemperatur erhöht sich daraufhin im vorderen Bereich des Monolithen, so dass der Massentransport des Gases zur Katalysatoroberfläche der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist. Im warmen Betriebszustand eines Automobils wird also die Umsetzung der Schadstoffe durch die Geschwindigkeit des Massentransports limitiert.

Bei den vorherrschenden Massendurchflussraten ist die Strömung in den Zellkanälen mit glatten Wänden, generell laminar. Bei solch einem laminaren Strömungsprofil erreicht ein beträchtlicher Anteil der Hauptstromkomponenten die aktiven Zentren mit Hilfe der Diffusion. Sie werden dort von der Washcoat-Schicht umschlossen, was die Umsatzgeschwindigkeiten limitiert und unbehandelte Schadstoffe emittieren lässt.

Durch eine Beeinflussung der Gasströmung könnte eine radiale Komponente (Umleitung, Turbulenz) eingebracht werden, die eine anhaltende Vermischung der Kern- und Randströmung anregt und somit den Massentransport zur Wand hin verbessert. Katalysatoren mit Metallfolie besitzen diesbezüglich ein hohes Potential, da sich Kanalstrukturen durch entsprechende Walzvorrichtungen verwirklichen lassen.

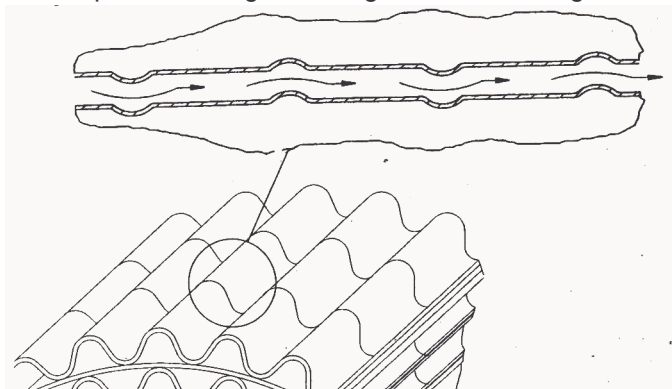
2. ENTWICKLUNGSGRUNDLAGEN

Aufgrund der schärferen Gesetzgebungen müssen zur Verbesserung des Massentransportes neue Designs entwickelt werden. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden folgende Designs untersucht:

TS-Design, Transversally Structured Corrugation. Es handelt sich hierbei um eine Mikrowellung auf der Welllage, 90° zur Strömungsrichtung, die alle 2,5 mm wiederholt wird. Mit Hilfe der TS-Struktur kann der Druckverlust reduziert werden, da bei gleicher katalytischer Effektivität das Katalysatorvolumen verringert werden kann, bedingt durch den besseren Massentransport.

Bild 1. TS-Design

LS-Design (Longitudinally Structured Corrugation), Turbulenz wird durch wiederholten Kanaleintritt durch partielle Gegenwellung in der Welllage des Katalysators erreicht. Vorteil: Mit Hilfe der



modifizierten Zellkanalstruktur kann der Differenzdruck reduziert werden. Zudem wird der Massentransport durch heftige Strömungsturbulenzen verbessert, wobei diese nur auf einer Seite der LS-Folie auftreten.

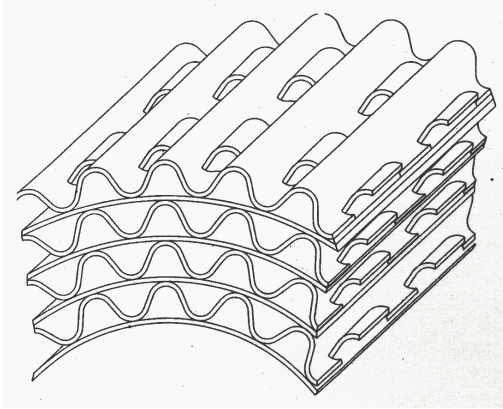


Bild 2. LS-Design

Hohe Zelldichte und verringertes Pitch-Wellhöhen Verhältnis; Diese Designmodifikation verbessert den Stofftransport durch die kürzeren Wege und durch eine Reduktion des hydraulischen Durchmessers.

Das nachfolgende Bild verdeutlicht diesen Sachverhalt. Dargestellt ist hier ein Ausschnitt eines beschichteten Kanals eines Katalysators:

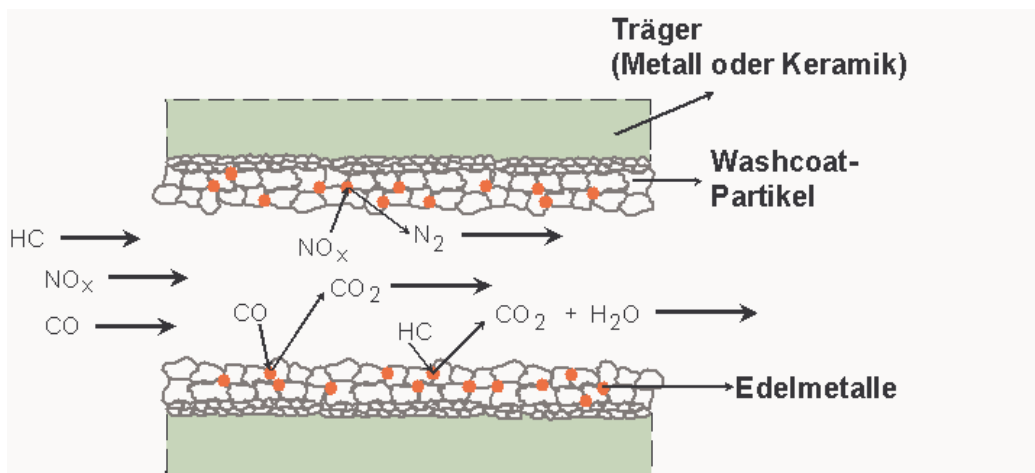


Bild 3. Stofftransport und chemische Reaktion im Katalysator

Der Vorgang kann in Einzelschritte aufgeteilt werden:

1. Transport der Reaktanden HC, CO und NO_x aus der Gasphase an die Oberfläche der Kanalwand
2. Diffusion zu den Edelmetallen durch die Poren des Washcoats, wobei die Schichtdicke und Porosität des Washcoats eine entscheidende Rolle spielt.
3. Adsorption der Reaktanden an den Edelmetallen
4. Katalytische Umsetzung
5. Desorption der Reaktionsprodukte Stickstoff, Kohlendioxid und Wasser von den Edelmetallen
6. Diffusion der Reaktionsprodukte an die äußere Oberfläche des Washcoats
7. Transport der Reaktionsprodukte von der Festkörperoberfläche in die Gasphase

Erhöhung der Zelldichte verringert den hydraulischen Durchmesser, Erhöhung der Temperatur vergrößert den Diffusionskoeffizienten, beides erhöht den Stofftransportkoeffizienten und verbessert den Stofftransport. Es ist ersichtlich, dass bei Trägern mit höheren Zelldichten, der Stofftransport durch die kürzeren Transportwege zu den Edelmetallen verbessert und somit die Reaktionsgeschwindigkeit verkürzt werden kann.

3. FEM-KALKULATION DER OPTIMALEN ZELLFORM

Im Rahmen der Zellenformuntersuchungen, wurde ein Simulationsmodell erstellt, das die Adsorptionseffektivität einer katalytischen Zellenwand berechnen soll.

Ziel der Untersuchung ist, einen Vergleich zwischen verschiedenen Zellenformen (runde, rechteckige, sechseckige und sinusförmige Zelle) zu ermitteln. Dieser Vergleich wird aufgrund der adsorbierten Masse entlang des Zellenumfanges und der Restkonzentration im Abgas entlang der Kanalachse berechnet.

Das Modell besteht aus zwei Modulen:

Das *Strömungsmodul* berechnet innerhalb einer vorgegebenen 3D Maschendomäne die Abgasgeschwindigkeit im Kanal (Navier-Stokes Gleichungen). Als Ergebnis erhält man eine Strömungsverteilung im Kanalquerschnitt.

Das *Adsorptionsmodul* basiert auf der Theorie der „Massentransportlimitierten Umsatzreaktion“: die Abgasmasse, die die katalytische Wand erreicht, wird 100% konvertiert. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist die Diffusion der Moleküle von der Gasphase zur Wand.

Die berechneten Zellformen werden in Bild 1 dargestellt. Jeder Kanal (Geometrie) wird mit einer bestimmten Maschenaufteilung diskretisiert.

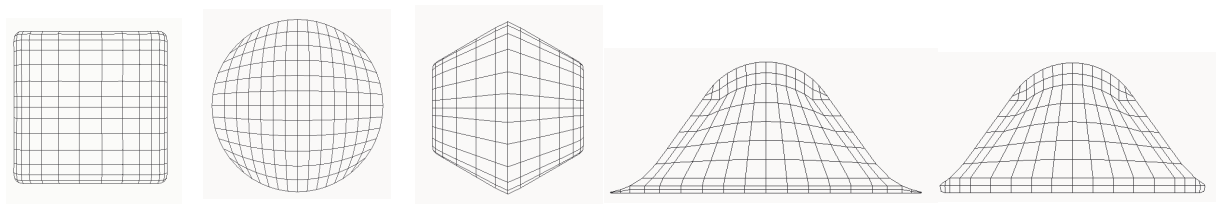


Bild 4. Rechteckige Zelle, runde Zelle, sechseckige Zelle, sinusförmige Zelle (vorbeschichtet), sinusförmige Zelle (nachbeschichtet)

Aus den Berechnungen ist der Effekt der Ecken der recht- und in der sechseckigen Zelle klar zu erkennen, sowie auch der Effekt der Zwickeln in den sinusförmigen Zellen. Die runde Zelle hat logischerweise eine gleichmäßige Wandeffektivität, da hier die Diffusionswege überall konstant sind.

Dazu ist noch zu bemerken, dass die vorbeschichtete sinusförmige Zelle keinen Vorteil bringt, da die tieferen Zwickeln an der gesamten Umsatzreaktion fast überhaupt nicht teilnehmen.

Um einen direkten Vergleich der verschiedenen Zellformen zu ermöglichen wurden die Adsorptionseffektivitäten auf dem ganzen Umfang integriert.

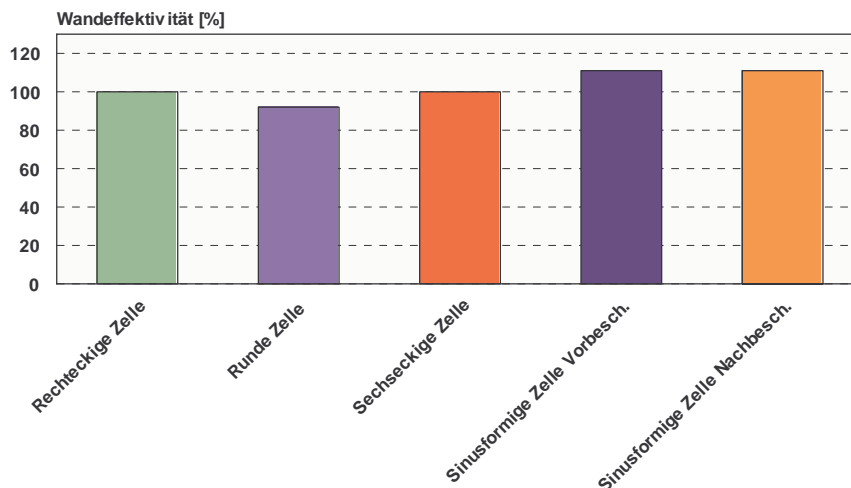


Bild 5. Relative normalisierte Wandeffektivität in Abhängigkeit verschiedener Zellformen

Als Basis (100 %) wurde die rechteckige Zelle angenommen. Aufgrund des größeren Umfanges, weisen die sinusförmigen Zellen einen höheren Wert der Effektivität.

Wenn man andererseits die Integrierte Effektivität spezifisch auf dem Umfang bezieht sehen die Resultate anders aus. In der sinusförmigen Zelle bewirkt der relativ hohe Anteil an Umfang mit geringer Effektivität eine Reduzierung des gemittelten Wertes. Das macht sich um so mehr bemerkbarer in der vorbeschichteten sinusförmigen Zelle (der Zwickel ist hier tiefer).

Die Zelle, die die besten Resultate ergibt ist die sechseckige. Diese Geometrie stellt einen guten Kompromiss zwischen relativ hohen Umfang und relativ gering schwankende Diffusionswege dar.

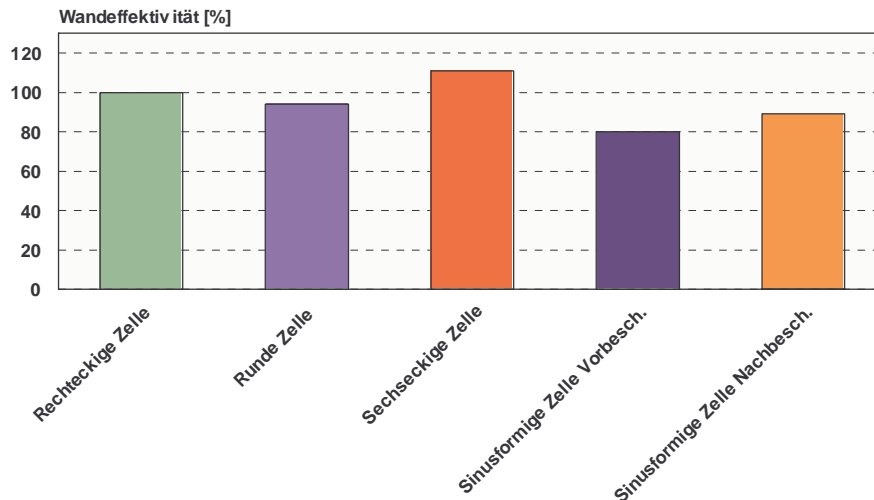


Bild 6. Relative Umfang-spezifische Wandeffektivität in Abhängigkeit verschiedener Zellformen

4. UNTERSUCHUNGEN AN TRÄGER MIT TS-DESIGN

4.1. STRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN AN TRÄGERN MIT TS-STRUKTUR

Versuche an einem Modell-Strömungsprüfstand mit Ammoniak-Eindüsung haben zu einer Design-Vorentscheidung bei der TS-Struktur geführt. Die Sekundärstruktur kann in bezug auf Höhe, Abstand und Position geändert werden.

Bei den Versuchen auf dem Strömungsprüfstand mit einer Modell TS-Struktur wurden Höhen von 3 und 5 mm getestet sowie Abstände der Wellungen von 50, 100 und 150mm.

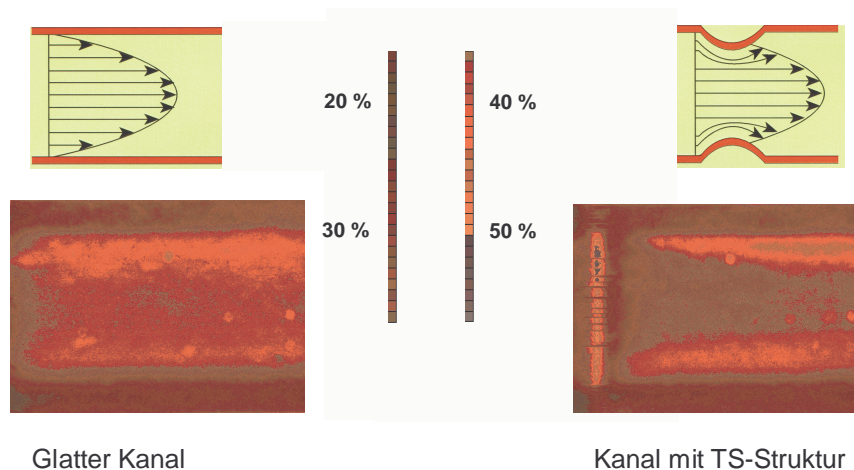


Bild 7. relative Intensität der Ammoniak-Wandkonzentration

Man erkennt, dass bei einem Kanal mit TS-Struktur aufgrund der Verwirbelung eine erhöhte Ammoniak-Konzentration im Wandbereich auftritt. Variiert man die Kanalhöhe kommt heraus, dass das Optimum bei 3mm liegt. Die Variation des Abstandes der TS-Wellungen ergibt ein Optimum bei 100mm.

Überträgt man z. B. das Modell mit 3mm Höhe und 100mm Abstand auf einen Metallträger, ergeben sich folgende Abhängigkeiten in Zusammenhang von der Zelldichte:

Cell Density [cps]	TS Corrugation Height [mm]	TS Distance [mm]
100	0.19	18
200	0.13	9
300	0.11	6
400	0.10	4
500	0.08	3

Bild 8. Abhängigkeit der TS-Struktur von der Zelldichte

4.2. FERTIGUNGSVERSUCHE MIT TS-STRUKTUR

Erste Fertigungsversuche haben ergeben, dass zur Herstellung von TS-Trägern sämtliche Parameter optimiert werden müssen. Im Zwischenbericht wurde in 3 Flussdiagrammen die verschiedenen Fertigungsschritte dargestellt und anhand von Beispielen näher erläutert, welche Optimierungspotentiale gegeben sind. Im Rahmen dieses Abschlussberichtes wird auf diese Thematik nicht näher eingegangen.

Alle Fertigungsschritte angefangen bei der Wellfolienherstellung über das Wickeln und Eindrücken der Matrix bis hin zum LVM-Prozess (Entfetten, Beleimen, Trocknen, Beloten, Löten) wurden so optimiert, dass eine Serienfertigung für Träger mit TS-Struktur bis zu einer Folienstärke von $\geq 40\mu\text{m}$ und 600cps möglich ist.

4.3. BESCHICHTUNGSVERSUCHE MIT TS-STRUKTUR

Zur Beschichtbarkeit von Trägern mit TS-Struktur wurden Versuche mit einem Beschichter durchgeführt. Zur Bewertung wurde ein Gewichtvergleich von Trägern mit Primärwellung und Trägern mit zusätzlicher Sekundärwellung durchgeführt. Mit einem Perthometer wurde die Folienstruktur abgefahren um festzustellen, ob aufgrund der Beschichtung sich die relativ scharfe Form der TS-Wellung ändert.

Der Gewichtvergleich ergab, dass kein Unterschied zwischen den Trägern mit Primärwellung und mit TS-Struktur besteht, d.h. die Beschichtungsmenge, die auf die Träger kommt, ist identisch.

Ein Vergleich der Konturen der beschichteten und unbeschichteten Folie zeigt, dass die TS-Struktur durch den Beschichtungsprozess nicht verdeckt wird und nur eine minimale Ausglättung in den Randbereichen bewirkt.

4.4. DAUERHALTBARKEITSVERSUCHE UND EMISSIONSMESSUNGEN AN TRÄGERN MIT TS-STRUKTUR

--- Vertraulich ---

5. HOHE ZELLDICHEN UND VERRINGERUNG DES PITCH-WELLHÖHEN VERHÄLTNISSSES

5.1. ERGEBNISSE DER PARAMETERUNTERSUCHUNG

5.1.1 Porosität

- Beim unbeschichteten Träger bringt eine Erhöhung des Verhältnisses Pitch/Wellhöhe von 1:1 auf 3:1 eine Porositätserniedrigung von 1%.
- Der Grund hierfür liegt in der Menge des benötigten Folienmaterials für eine Zelle.
- Bei beschichteten Träger hat das Verhältnis p/h einen deutlich größeren Einfluss auf die Porosität (4%). Begründet ist dieses durch die große Menge an Washcoat-Ablagerungen in den Zwickeln und einem zunehmenden inneren Zellumfang.

5.1.2 GSA beschichteter Zellen

- Die GSA ändert sich mit dem Verhältnis p/h ($\Delta\text{GSA} \approx 8\%$). Die Zunahme der GSA ist auf den größer werdenden inneren Zellenumfang zurückzuführen.

5.1.3 Gewicht Folienmaterial (Menge)

- Durch Variation des Verhältnisses p/h wird die Menge (Gewicht) des verwendeten Folienmaterials für eine Zelle beeinflusst. Mit wachsendem Zellenumfang steigt die Materialmenge bis zu 17%.

5.1.4 Gewicht Washcoatmaterial (Menge)

- Durch Variation des Verhältnis p/h hat man einen großen Einfluss auf die benötigte Washcoat – Menge (Gewicht) für eine Zelle (bis zu 41%).
- Der Mengenzuwachs bei einem hohen Pitch-Wellhöhenverhältnis ist auf den größeren Umfang und auf Ablagerungen von großen Mengen Washcoats in den Zwickel zurückzuführen. Entscheidend hierfür ist der Verrundungsradius.

5.1.5 Gewicht einer beschichteten Zelle

- Durch die benötigten Mengen an Folienmaterial und Washcoat für eine Zelle bei definierten Pitch-Wellhöhen-Verhältnissen ist ein deutlicher Zuwachs mit steigendem Verhältnis zu erkennen ($\Delta m = 24\%$).

5.1.6 Druckverlust

- Mit steigendem Pitch-Wellhöhen-Verhältnis steigt der Druckverlust. Diese resultiert aus der geringer werdenden Porosität und dem kleiner werdenden hydraulischen Durchmesser.

5.1.7 Hydraulischer Durchmesser

- Der hydraulische Durchmesser wird um so kleiner, je größer das Verhältnis Pitch / Wellhöhe wird. Dieses ist bedingt durch das sich ändernde Verhältnis zwischen Umfang und Fläche einer Zelle.
- Die Fläche einer Zelle verkleinert sich mit wachsendem Pitch / Wellhöhen- Verhältnis.
- Der Umfang einer Zelle steigt mit wachsendem Pitch / Wellhöhen-Verhältnis.

5.2. KONVERTIERUNGSVERHALTEN

Um das Konvertierungsverhalten der modifizierten Zellenformen zu untersuchen wurde das Programm Katprog verwendet.

Mit einem vorgegebenen Massenstrom, Temperaturverlauf und HC-Konzentrationen wurden die einzelnen Zellendesigns untersucht.

Es ergaben sich folgende kumulierte Emissionsverläufe für die einzelnen Zellendesign-Varianten (Katalysatorabmessungen: $\varnothing 98,4 \times 74,5 \text{ mm}$, 400cpsi, 0.03mm):

Bild 9. Kumulierte HC Emissionen innerhalb der ersten 150 Sekunden

Man unterscheidet hier zwischen zwei Bereichen:

- Bereich 1: Aufheizphase
- Bereich 2: Betriebswarmer Zustand

Im Bereich 1 erkennt man einen Vorteil von >2% für das niedrigen Pitch-Wellhöhen-Verhältnisse, welcher auf die geringere thermische Masse des Trägers zurückzuführen ist.

Im Bereich 2 haben die hohen Pitch-Wellhöhen-Verhältnisse einen Vorteil von ca. 2% gegenüber den niedrigen. Begründet ist dieses in einer höheren GSA und einem kleineren hydraulischen Durchmesser. Ferner fällt der Massenstrom zu diesem Zeitpunkt sehr stark ab und die HC-Menge nimmt zu. Durch die geringere thermische Masse kühlen die Träger mit geringen Pitch-Wellhöhen-Verhältnis schneller aus, als die Träger mit größerer thermischen Masse.

5.3. FERTIGUNGSVERSUCHE

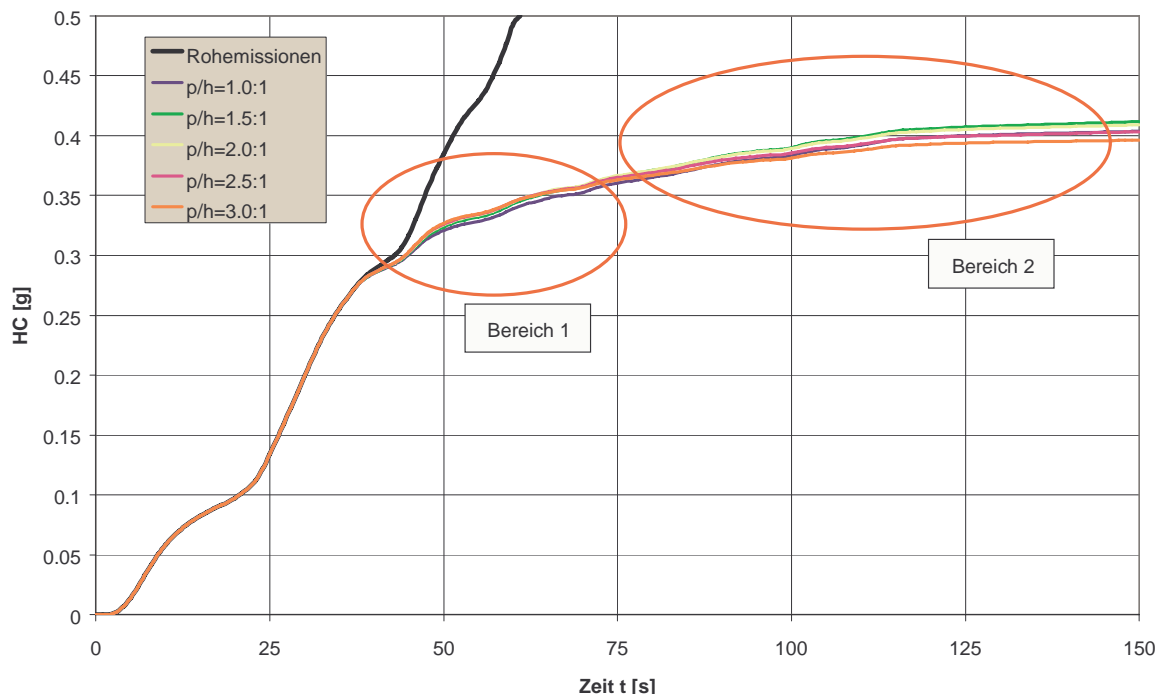
5.3.1 Wellbarkeit von Folien mit verringertem Pitch-Wellhöhen-Verhältnis

Für die Versuche wurden Folien mit zwei Stärken (30 und 50 µm) gewellt. Dazu wurden verschiedene Wellwalzen-Sätze eingesetzt, um annähernd gleiche Zellenzahlen bei unterschiedlichem Pitch/Wellhöhen-Verhältnis zu erzielen und zu vergleichen. Die Folie wurde gewellt, die Träger auf dem Versuchswickelstand gewickelt. Von jedem Trägerdesign wurden mindestens 5 Träger gewickelt und davon später 2 gelötet.

Folienarten:	50 µm:	Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	1,53	-> 677cps
		Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	2,29	-> 637cps
	30 µm:	Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	1,23	-> 632cps
		Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	2,24	-> 613cps

5.3.2 Wellbarkeit von Folien mit hohe Zelldichten

Es wurden verschiedene Wellwalzen konstruiert, mit denen sich die hohen Zelldichten darstellen



lassen. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, ein möglichst geringes Pitch-Wellhöhen Verhältnis darzustellen.

Durch die Fertigungsversuche haben sich folgende Punkte ergeben:

- Die Herstellung hochzelliger Wellwalzen ist sehr aufwendig. Die Lieferqualität ist stark schwankend. Die Hersteller sind nicht in der Lage, das Fertigungsergebnis zu überprüfen, so dass eine

Vermessung extern durchgeführt werden muß. Meßergebnisse und Wellenergebnisse konnten bisher in keinen eindeutigen Zusammenhang gebracht werden. Aus diesem Grund wurde ein alternatives Herstellungsverfahren von Wellwalzen mit verändertem Werkstoff erprobt, um die Standzeit der Werkzeuge zu erhöhen.

- Bei 30µm Folien und dicker, wurde ein hoher Verschleiß der 800cps Wellwalzen beobachtet.

5.3.3 Mehrstufiges Wellen

Nachfolgend werden die Auslegungskriterien für das mehrstufige Wellen – in diesem Fall zweistufig für die Zelldichte 800cps beschrieben. Die Auslegungskriterien haben jedoch unabhängig von der Zelldichte und Anzahl der Wellen ihre Gültigkeit.

Ziel war es eine Zellform (Sinusform) mit einem Pitch-Wellhöhen Verhältnis von ca. 1.4 – 1.5 und einer Zelldichte von 800cps herzustellen. Maximale Folienstärken sind 30µm bzw. optional 40µm.

Es ist anzumerken, dass sich bei einem Pitch-Wellhöhen Verhältnis von 1.3 und einer sinusförmigen Zelle ein Minimum im Zellumfang ergibt. Aus Gründen der Prozesssicherheit beim Wellen bzw. Wickeln, Beleimen und Beloten wurde zunächst ein etwas höheres Verhältnis angestrebt (1.4 – 1.5). Ferner wurde festgestellt, dass es sich bei der „tatsächlichen“ Zellform nicht um eine exakte Sinusform handelt (Überlagerung von Sinus-, Dreieck- und Stiffform), welches zu Abweichungen zwischen Theorie und Praxis führt.

Jedes Walzenpaare wird über den Synchronantrieb angetrieben. Diese sind über einen Zahnriemen miteinander verbunden, dadurch wird die notwendige identische Drehzahl zwischen den Walzenpaaren erreicht.

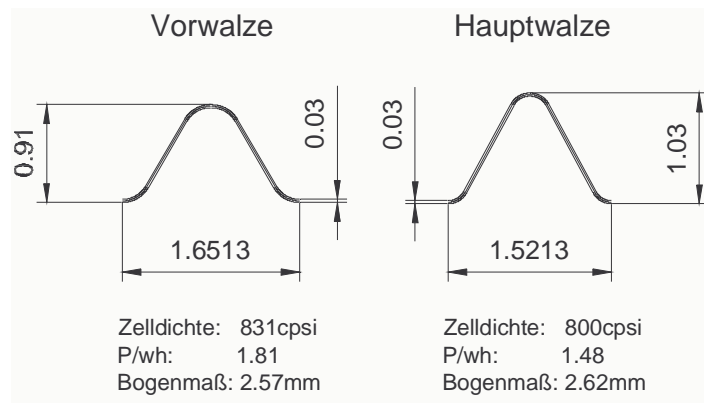


Bild 10. Zellformen Vorwalze – Hauptwalze

Der Pitch bei diesem Prozess wird um ca. 0.1mm reduziert. Dabei kann die Wellhöhe um ca. 0.1mm erhöht werden. Über dieses Verfahren sind Träger reproduzierbar fertigbar.

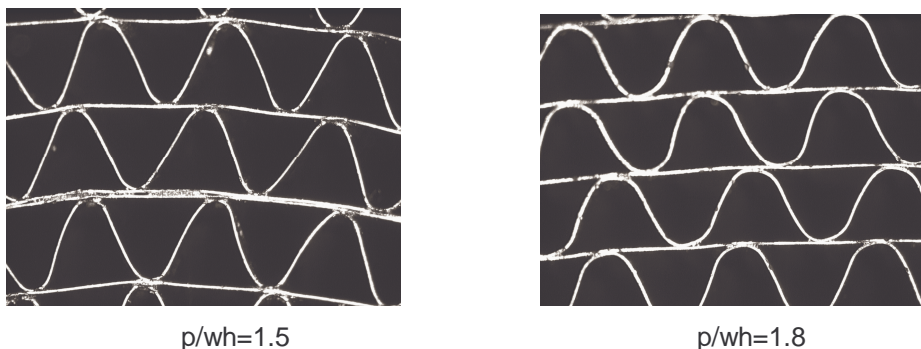


Bild 11. Zellformenvergleich

5.3.4 Wickelversuche

Beim Wickeln von Matrixpaketen mit niedrigem Pitch-Wellhöhen Verhältnis kommt es zu folgenden Schwierigkeiten:

- Träger können nur mit sehr niedriger Vorspannung gewickelt werden
Der Grund liegt in der steiferen Zellform (höhere Formsteifigkeit)
- Es kommt zu Lagenablösungen innerhalb des Wickelzentrums
Der Grund liegt im schlechteren „Gleitverhalten“ der Welllage und der fehlende Vorspannung im Matrixzentrum

Durch diverse Versuche konnte für die Zellform $p/wh=1.5$ eine exakte und konstante Zelldichte erreicht werden.

5.3.5 Beleimen und Beloten (LVM)

Es wurde die Leim- und Lotaufnahme von Trägern mit folgenden Abmessungen und Zellformen untersucht:

- Matrixdurchmesser: 110mm
- Matrixlänge: 110mm
- Zelldichte: 800cps
- Folienstärke: 30 μ m
- Wickeltyp: SM4

Die ersten Versuche zeigten eine deutliche Streuung und eine höhere Lotaufnahme bei den Trägern mit der Zellform $p/wh=1.5$. Diese Schwankungen (Erhöhungen) sind auf die Veränderung der Kapillarwirkungen im Zwickel zurückzuführen bzw. ist das Beleim- und Belotverfahren für flachere Zellformen ausgelegt.

Um ein ideales Beleimen bzw. Beloten mit niedrigem Pitch-Wellhöhen Verhältnis zu erreichen sind weitere Versuche mit alternativen Verfahren notwendig, die allerdings nicht im Rahmen des BMBF-Programms durchgeführt werden.

5.3.6 Versuchsergebnisse

- Alle Träger mit verringertem Pitch/Wellhöhen-Verhältnis war n.i.O.
- Es waren mit verringertem Pitch/Wellhöhen-Verhältnis nur Träger innerhalb einer sehr geringen Vorspannungsspanne von 1,5 bis 2,5 % wickelbar, was in der Praxis wegen zu hoher Schwankungen kaum einstellbar ist.
- Hauptfehler war ein Wickelfehler der sich durch Lagenablösung im Wickelzentrum äußerte. Dieser ist auch nicht durch entspannen zu beseitigen.

Zur Verbesserung der Ergebnisse wurde ein 2-stufige Wellenrichtung konstruiert und gebaut. Die Versuche zeigten nach Überarbeitung den gewünschten Erfolg. Durch das Wellen in mehreren Schritten wird der Umformgrad pro Wellschritt reduziert, so dass auch höhere Ausprägungen der Folie möglich sind. Für 900cps ist eine Erweiterung auf dreistufiges Wellen beauftragt.

5.4. VERGLEICH METALIT –KERAMIK

Um einen Vergleich zu Keramik-Trägern zu ziehen, wurden hier folgende Geometrien ergänzend betrachtet:

- 400 cps ; 4eck ; 4mil
- 400 cps ; 4eck ; 6.5mil
- 400 cps ; 6eck ; 4mil
- 400 cps ; 6eck ; 6.5mil

Verglichen wurden:

- Porosität (Beschichtet mit Washcoat-Dicke 0.025mm)
- Druckverlust (Beschichtet mit Washcoat-Dicke 0.025mm)
- Washcoat Menge (Gewicht) je Zelle

5.4.1 Ergebnisse des Metalit-Keramik-Vergleichs

Im Vergleich zum Keramikträger sieht man, dass die verwendete Washcoat-Menge (Gewicht) je Zelle bei einer Keramik-Zelle wesentlich niedriger liegt ($\Delta m \approx 50\%$) als bei einer Metalit-Zelle. Der Grund hierfür liegt in der Ablagerung des Washcoates in den Zwickeln.

Durch Variation des Pitch/Wellhöhenverhältnis können Verbesserungen in der Reduzierung des Druckverlustes, Steigerung der Porosität und Reduzierung des Gewichtes (besonders die Washcoatmenge) gegenüber einem Keramikträger erzielt werden.

Die Vor- und Nachteile der modifizierten Well-Pitchhöhenverhältnisses wurden quantitativ in einer weiteren Untersuchung ermittelt. Hier sind nur die Ergebnisse dargestellt.

Vorteile	Nachteile
Reduzierung des Gewichtes ca. 20%	Verlust an GSA ca. 10%
Erhöhung der Porosität ca. 20%	
Reduzierter Druckverlust ca. 25%	
Verminderte Menge an Washcoat	

Zusammenfassend sollen hier noch mal die Vor- und Nachteile eines niedrigen Pitch/ Wellhöhenverhältnisses gegenüber einem hohem aufgeführt werden:

Vorteile:

- + Geringerer Druckverlust
- + Geringere Materialmenge (Kosten)
- + Geringere Mengen an Washcoat (Kosten)
- + Schnelleres Aufheizverhalten, bedingt durch geringere thermische Masse

Nachteile:

- kleinere GSA
- größere hydraulischer Durchmesser
- geringere Wärmespeicherfähigkeit, bedingt durch geringere thermische Masse

5.5. BESCHICHTUNGSVERSUCHE

Ergebnis ist, dass durch die Veränderung der Viskosität und des Feststoffgehaltes der Suspension die Träger problemlos beschichtet werden können. Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass der prozentuale Washcoatanteil im Zwickel aufgrund der steileren Zellform sinkt.

5.6. DAUERHALTBARKEITSVERSUCHE

--- Vertraulich ---

5.6.1 Ergebnisse der Dauerhaltbarkeitsversuche von Trägern mit verringertem Pitch-Wellhöhen Verhältnis

--- Vertraulich ---

5.6.2 Thermische Dauerhaltbarkeit

--- Vertraulich ---

5.6.3 Schwingungsuntersuchungen

Um die Änderungen im Schwingungsverhalten der unterschiedlichen Zellform zu vergleichen, wurde an Trägern (Standard 800cps und modifizierte Zellform mit 800 cps) eine Modalanalyse durchgeführt.

Bei der Modalanalyse wird der Träger über zwei Fäden aufgehängt und über eine elektromagnetischen Schwingungserreger (Shaker) punktuell angeregt. Das Anregungssignal ist ein weißes Rauschen im Frequenzbereich 5 bis 8000 Hz.

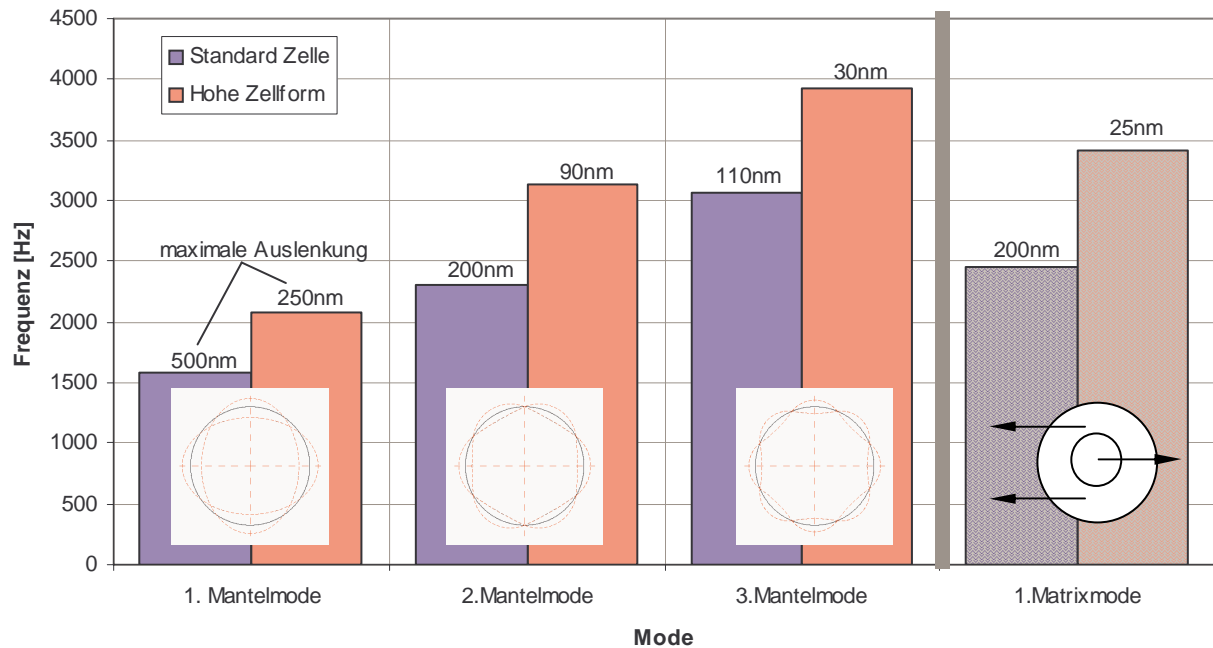


Bild 12. Vergleich Mantel- und Matrixmoden

- Die Frequenzen der einzelnen Mantelmoden werden etwa um 1000 Hz bei der modifizierten Zellform nach oben verschoben
- Sowohl die Auslenkungen als auch die Beschleunigungen im Bereich der Mantelmoden sind zum Teil ein Vielfaches kleiner als bei der modifizierten Zellform
- Die Frequenz des ersten Matrixmode ist um ca. 1000 Hz bei der modifizierten Zellform nach oben verschoben.

5.7. EMISSIONSMESSUNGEN

--- Vertraulich ---

5.7.1 Emissionsmessungen an Trägern mit verringertem Pitch-Wellhöhen Vverhältnis

--- Vertraulich ---

5.8. BESCHICHTUNGSVERSUCHE

Zusammen mit einem Beschichter wurde für die Folie mit LS-Struktur ein Beschichtungs-Programm gefahren. Folgende Parameter wurden im Rahmen des Programms bei der Beschichtung geändert:

- Partikelgrößenverteilung
- pH-Wert
- Feststoffgehalt
- Viskosität

Ergebnis der Beschichtungsversuche ist, dass die Folien selbst mit modifiziertem Washcoat nicht über die herkömmlichen Beschichtungsmethoden beschichtbar sind. Normalerweise wird die Suspension durch die Träger gedrückt, die Zellkanäle werden nachfolgend mit Druckluft freigespült. Dieses ist bei der LS-Struktur nicht möglich, da die Luft innerhalb des Kanals aufgrund der Struktur „Ausweichmöglichkeiten“ hat und somit vereinzelt eingebrachte Zellen verstopfen und ungleichmäßiger Verteilung der Beschichtung führen.

Um diese neue Struktur beschichten zu können, muss eine neue Methode entwickelt werden. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Fliehkräften. Bei dieser Methode werden die Träger in eine Suspension getaucht und nachfolgend wird in einer Zentrifuge aufgrund der Fliehkräfte die Suspension in dem Träger gleichmäßig verteilt. Für dieser weiterführenden Untersuchungen wurde bereits eine Zentrifuge

entwickelt, mit der sich das beschriebene Beschichtungsverfahren untersuchen lässt. Die erforderliche Unterstützung durch externe Stellen (Beschichter) und der Umfang des Versuchsprogramms lassen es jedoch nicht zu, diese Betrachtungen im Rahmen des BMBF-Programms durchzuführen. Damit sind auch Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen Emissionsmessungen nicht möglich.

5.9. EFFEKTIVITÄTSUNTERSUCHUNGEN

--- Vertraulich ---

6. HALTBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

--- Vertraulich ---

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im vorliegende Teilprojekt wurden 3 verschiedene Designs untersucht, die eine Verbesserung des Massentransportes erzielen können. Das TS-Design weist keine fertigungs- oder beschichtungs-technische Schwierigkeiten auf, so dass dieses Design in Serie umsetzbar ist. Mit diesem Design alleine können jedoch die zukünftigen Abgasgrenzwerte nicht gehalten werden.

Mit dem SQ- und dem LS-Design werden auf ähnliche Weise die Diffusionswege verkürzt. In beiden Varianten wird die katalytisch beschichtete Folie in das Zentrum des Kanals verlagert und damit die Reaktionsgeschwindigkeit im Katalysator erhöht. Insbesondere das LS-Design zeigt in Dauerhaltbarkeits- und Emissionsuntersuchungen positive Ergebnisse. Die oben beschriebenen Schwierigkeiten bei der Fertigungsumsetzung von LS-Trägern mit höherer Zelldichte konnte inzwischen für Prototypen ausgeräumt werden. Ebenso zeigen die Beschichtungsversuche positive Ansätze, die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Erfolg versprechen.

B. Katalysatorisolation

1. LITERATURRECHERCHE

Um ein frühes Anspringen sowie hohe Konvertierungsraten des Katalysators zu gewährleisten ist eine motornahe Anordnung hilfreich. Hierbei bildet der Katalysator zusammen mit Krümmer und Abgasrohrsystem eine Baugruppe, stark wärmeabstrahlender Anbauteile, die in teilweise engem räumlichen Kontakt mit temperaturempfindlichen Anbauteilen steht. Dazu zählen unter anderem Teile wie Luftfiltergebläse, Ansaugkanal, Zahnriemenabdeckung und ähnliches. Zudem nimmt die Anzahl der Hilfs- und Nebenaggregate in modernen Fahrzeugen zu. Die Folge dieser wachsenden Anbauteildichte im Motorraum ist, dass die vom Abgassystem freigesetzte Wärmemenge schlechter abgeführt werden kann. Die zunehmende Enge im Motorraum limitiert auch Isolationsmaßnahmen an der Abgasanlage, so dass Maßnahmen zum Schutz der benachbarten Anbauteile zu bevorzugen sind, die, eine möglichst niedrige Anbauteiltemperatur gewährleisten, ohne wertvollen Bauraum zu verschenken.

Im Vergleich zur Unterbodenposition werden an einen motornahen Katalysator bezüglich Dauerhaltbarkeit und Isolation höhere Anforderungen gestellt. Höhere Temperaturspitzen und -transienten erzeugen thermisches Altern und größere Spannung in der Matrix. Die Isolation verhindert das Aufheizen der Doppelmanteltemperatur, zum Schutz der umgebenden Komponenten und das schnelle Auskühlen des Trägers während der "soak time" im FTP-Test. Bezüglich der Wärmespeicherfähigkeit muss erwähnt werden, dass motornahe Träger, durch den engen Bauraum bedingt, kleine Träger sind und eine geringere Wärmekapazität besitzen, als die vergleichsweise großen Träger in Unterbodenposition.

Um die thermische Belastung auf den Motorblock zu reduzieren muss die Isolation die Temperatur des Doppelmantels so weit wie möglich herabsetzen. Der Wärmetransport durch die Isolationsschicht zur Außenseite des Trägers kann mit drei Mechanismen beschrieben werden: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Die Wärmeverteilung hängt zudem vom Isolationsmaterial und dem Temperaturniveau der Isolation ab.

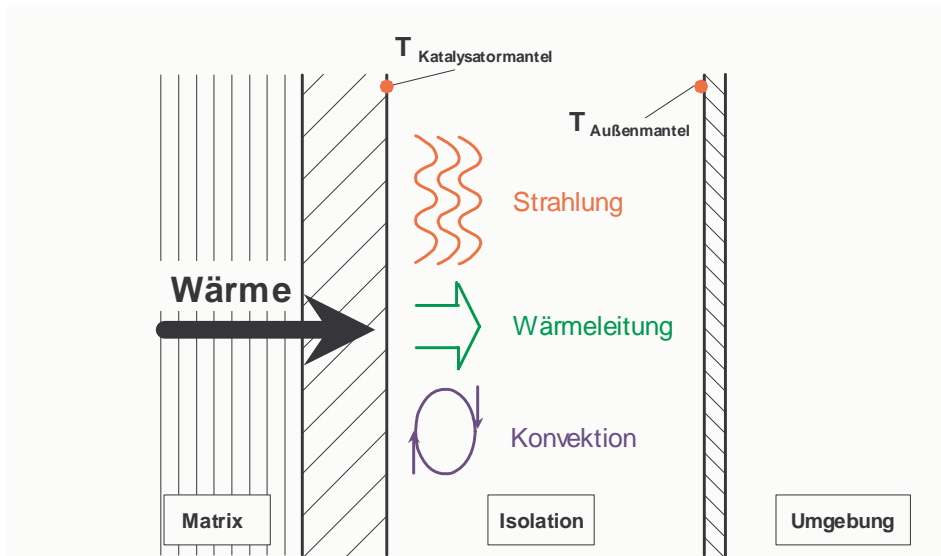


Bild 1. Aufbau einer Katalysatorisolation und Grundmechanismen des Wärmetransports durch die Isolation

1.1. WÄRMELEITUNG

Für die an das Anbauteil übertragene Wärmemenge ist der Abstand zum Abgassystem sowie dessen Oberflächentemperatur maßgebend. Limitierend wirkt sich jedoch die bekanntlich geringe Wärmeleitfähigkeit des Isolationsmaterial aus.

Reine Wärmeleitung liegt vor, wenn das Bauteil zum Beispiel neben oder unterhalb des heißen Abgassystems angeordnet ist und keine äußere Luftströmung vorliegt (Fahrzeugstillstand). Bei allen anderen Anordnungen und Fahrzuständen wird die Wärmeleitung im Vergleich zur Konvektion und Strahlung nur eine untergeordnete Rolle spielen.

1.2. KONVEKTION

Eine konventionelle Aufheizung des Anbauteils ist in all denen Fällen zu erwarten, wo das Anbauteil entweder so nah an das Abgassystem herangeführt wird, dass es in die Grenzschicht "eintaucht", die sich an dessen Umfang ausbildet, oder aber wenn die räumliche Lage des Anbauteils einen Konvektionsstrom (frei oder erzwungen) von der Abgasanlage an das Anbauteil zulässt.

In der Praxis wird die freie Konvektion um die Komponenten des Abgassystems aufgrund der Luftführung innerhalb des Motorraums mehr oder weniger stark durch erzwungene Strömung überlagert werden. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen (Luftführung) lässt sich dabei sowohl die Kühlung des Abgassystems als auch die Aufheizung benachbarter Anbauteile steuern.

Für beide Vorgänge ist die Oberflächentemperatur des Abgassystems ein wichtiger Einflussparameter. Bei vorgegebenen Luftströmungen sowie bei der Anströmung des Anbauteils durch die vom Abgassystem erwärmte Luft, spielt die Geschwindigkeit der Strömung die Hauptrolle.

1.3. STRAHLUNG

Neben der Anordnung der Strahlungspartner zueinander (Abstand) spielt bei der Strahlung vor allem deren Oberflächentemperatur sowie die Strahlungsemissionszahlen der beteiligten Oberflächen eine Rolle. Durch Verringerung des Emissionsgrades der Katalysatoroberfläche kann der Wärmeeintrag in den Motorraum deutlich reduziert werden wobei das thermische Energieniveau des Katalysators ansteigt [1, 6].

Unterschiedliche Isolationsmaterialien und Oberflächen [6] wurden an verschiedenen Stellen bei unterschiedlichen Temperaturen getestet [2, 3, 4, 5].

- [1] Schlünder, E.: Einführung in die Wärmeübertragung, Vieweg Verlag, 1991
- [2] Hartsock, D., Stiles, D., Bable, W., Kranig, J.; Ford Motor Co.: "Analytical and experimental evaluation of a thermally insulated automotive exhaust System", SAE 940312
- [3] Breuer, J., Brück, R., Diewald, R., Hirth, P.; Emitec GmbH: "Temperature examination on a metal catalyst system", SAE 971028
- [4] Umehara, K., Yamada, T., Hijikata, T., Makino, M., Katsube, F.; NGK Insulators: "Design development of high temperature manifold converter using thin wall ceramic substrate", SAE 971030
- [5] Sakashita, K., Fukushima, K., Yamada, K.; Ibidem Co., Furutani, T., Tamura, N.; Toyota Motor Corp.: "The development of an alumina fiber mat for a catalytic converter", SAE 1999-01-0270
- [6] Bauer, H., Haldenwanger, H.-G.; Audi AG, Hirth, P., Brück, R.; Emitec GmbH: "Thermal management of close coupled catalyst", SAE 1999-01-1231

2. THEORETISCHE AUSLEGUNG

Um den Effekt von verschiedenen Isolationsmaterialien beurteilen zu können, wurde ein Rechenmodell entwickelt. Folgende Stoffdaten wurden verwendet:

Zur Berechnung der Mantel- und Doppelmanteltemperaturen sind die Temperatur der Umgebung und des Katalysatorzentrums, sowie die Katgeometrie, der Massenstrom, die Luftspaltenbreite, der Emissionsfaktor, die Stoffdaten der Luft und des Isolationsmaterials, wenn vorhanden, notwendig. Energiebilanzen wurden für Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung aufgestellt [6].

Die folgenden Diagramme zeigen Berechnungsergebnisse, die die Differenz des Wärmeübergangs, bei verschiedenen Temperaturen zwischen Luftspaltisolation, Vakuum und zweier Isolationsmaterialien, SaffilMatte und Micro-Therm, darstellen.

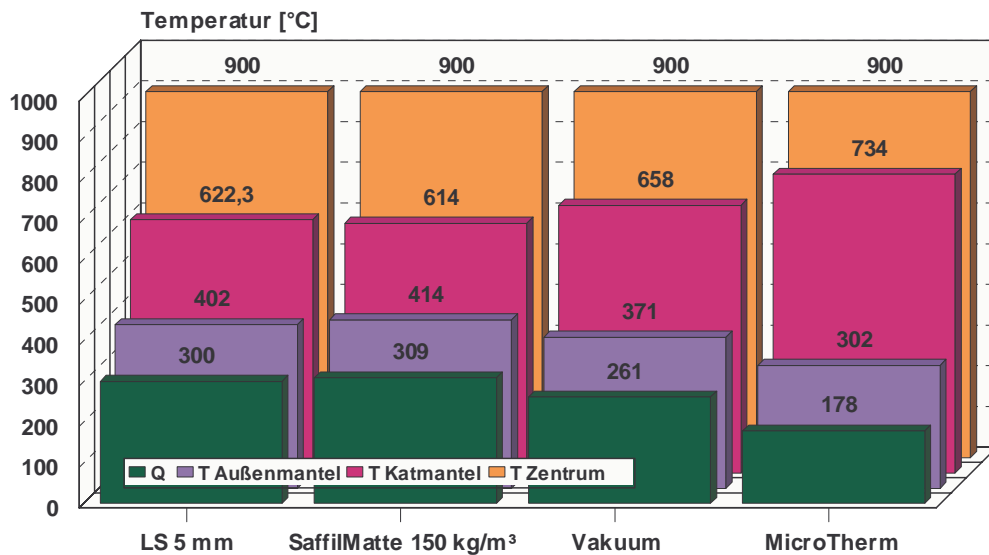


Bild 2. Vergleich von Trägertemperaturen mit div. Isolationen, Berechnete Werte, $T_{Zentrum}=900^{\circ}\text{C}$

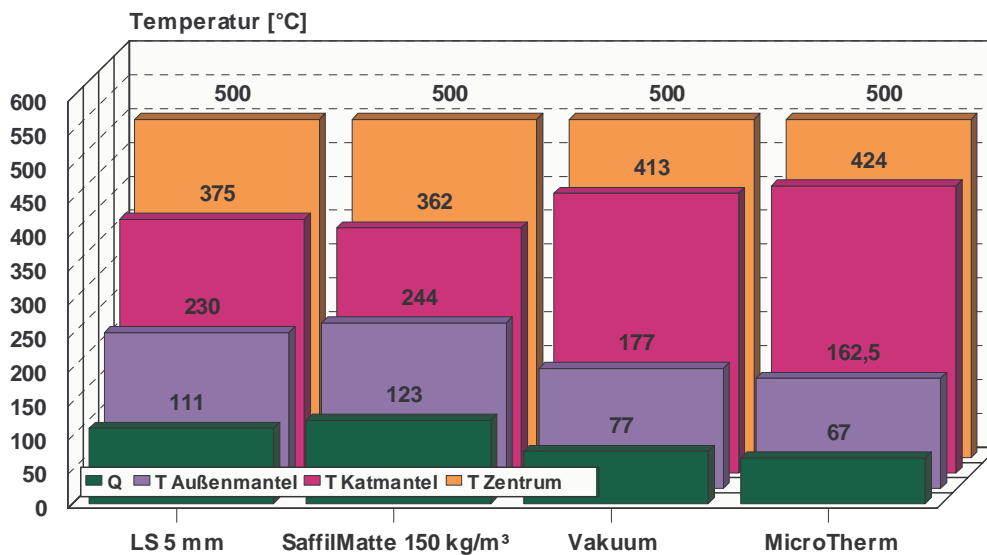


Bild 3. Vergleich von Trägertemperaturen mit div. Isolationen, Berechnete Werte, $T_{Zentrum}=500^{\circ}\text{C}$

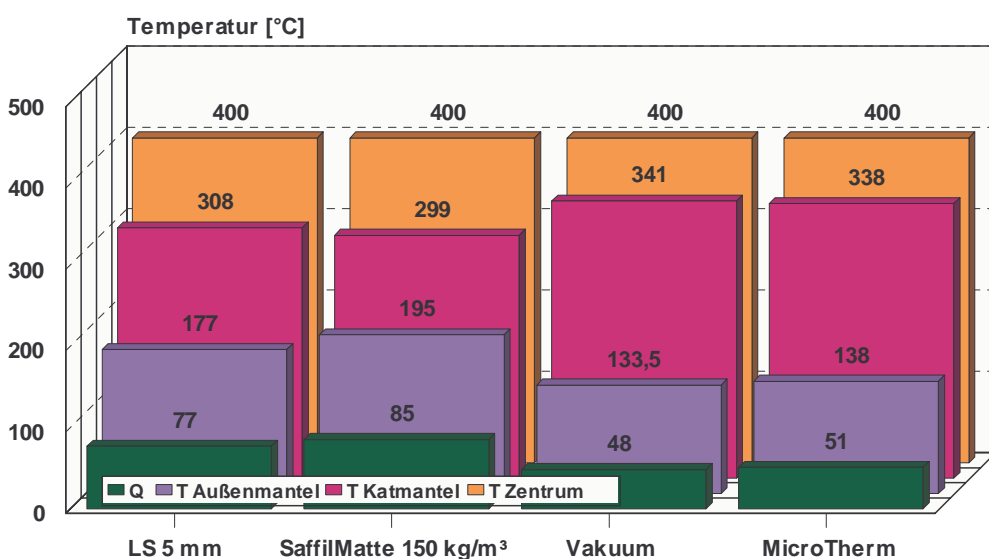


Bild 4. Vergleich von Trägertemperaturen mit div. Isolationen, Berechnete Werte, $T_{Zentrum}=400^{\circ}\text{C}$

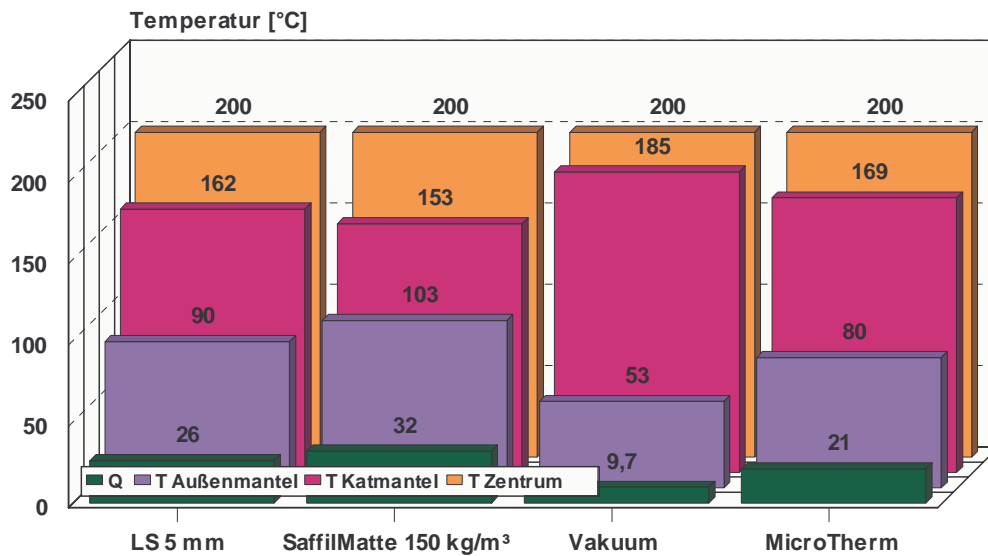


Bild 5. Vergleich von Trägertemperaturen mit div. Isolationen, Berechnete Werte, $T_{Zentrum}=200^{\circ}\text{C}$

Es zeigt sich, dass die Wärmeabgabe vom Kat an die Umgebung bei $T > 400^{\circ}\text{C}$ mit Micro-Therm am geringsten ist, bei $T \approx 400^{\circ}\text{C}$ isoliert das Vakuum jedoch am besten. Problematisch bei Vakuumisolation zwischen Kat und Doppelmantel ist die Herstellung sowie Dichtigkeit. Zudem liegt die Temperatur im betriebswarmen Zustand eher bei 900°C , so dass das Isolationsmaterial Micro-Therm, laut Berechnung, am Besten ist.

3. TEMPERATURUNTERSUCHUNGEN

3.1. EINFLUSS DER LUFTSPALTBREITE

Als Isolationen wurde ausschließlich der Luftspalt zwischen Kat und Doppelmantel eingesetzt. Die Abmessung des Luftspalts wurde wie folgt variiert:

	LS 1 mm	LS 2 mm	LS 3 mm	LS 4 mm	LS 5 mm	LS 8 mm	LS 10 mm
Ø innen [mm], Kat	123	125	127	129	131	137	141
Länge [mm], DoMa	170	170	170	170	170	150 + 2 Konen	150 + 2 Konen
Wand [mm], DoMa	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Material, DoMa	1.4828	1.4828	1.4828	1.4828	1.4828	1.4828	1.4828

Bild 6. Eigenschaften von Kat und Doppelmantel beim ersten Test des Einflusses der Luftspaltisolation

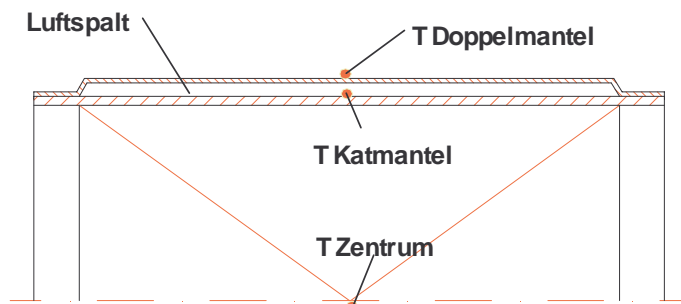


Bild 7. Skizze des Testkatalysators mit Temperaturmeßstellen

Folgende Resultate wurden erzielt:

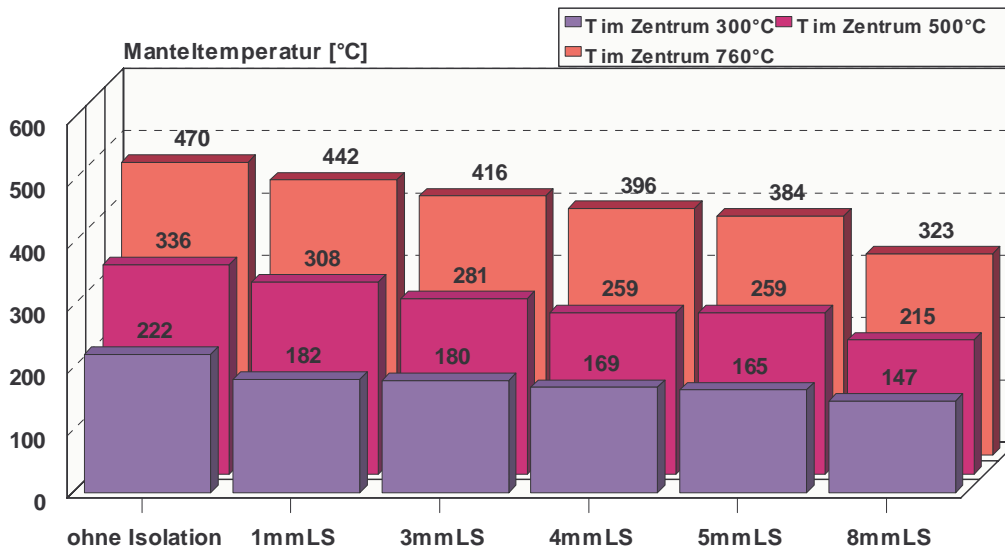


Bild 8. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen Luftspaltdicken bei 300°C, 500°C und 750°C im Kat-Zentrum

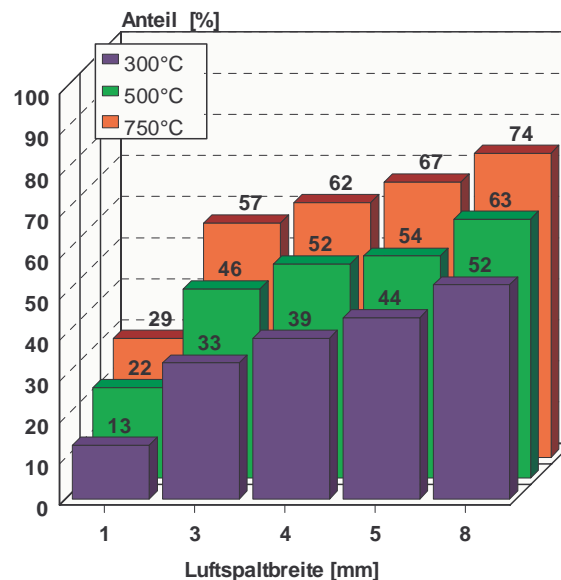


Bild 9. Berechneter Anteil der Wärmestrahlung am gesamten Wärmeübergangskoeffizienten ($\epsilon = 0.4$ für Mantel und Doppelmantel)

3.2. ZUSAMMENFASSUNG

- Zunehmende Spaltbreite verbessert die Isolationswirkung grundsätzlich, sinnvolle Werte liegen zwischen 3 und 6 mm. Dies gilt für alle Kat-Zentrumstemperaturen zwischen 300 und 900°C.
- Die Verbesserung beruht auf der Reduzierung der Wärmeleitung durch Erhöhung der Schichtdicke der Luft.
- Konvektion im Luftspalt ist vernachlässigbar.
- Der Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung ist weitgehend unabhängig von der Spaltbreite, somit nimmt der Anteil der Strahlung am Gesamtvorgang mit zunehmender Spaltbreite zu.

4. EINFLUSS VERSCHIEDENER ISOLATIONEN SOWIE DEREN KOMBINATIONEN AUF DIE KAT-TEMPERATUREN

4.1. VARIATION DER LUFTSPALTBREITE UND -AUSFORMUNG IM VERGLEICH ZUM KERAMIKKAT (QUELLMATTE)

Im Gegensatz zu den geschilderten Testbedingungen wurde nun ein zusätzliches Temperaturniveau von 900°C im Katzentrum betrachtet, um die Belastung von motornah angeordneten Katalysatoren besser simulieren zu können. Die hierzu benötigte Energie wurde nun zusätzlich zur vorgeschalteten Heizbirne durch die katalytische Verbrennung von zusätzlich eingedüstem Propan an einem Vorkatalysator bereitgestellt.

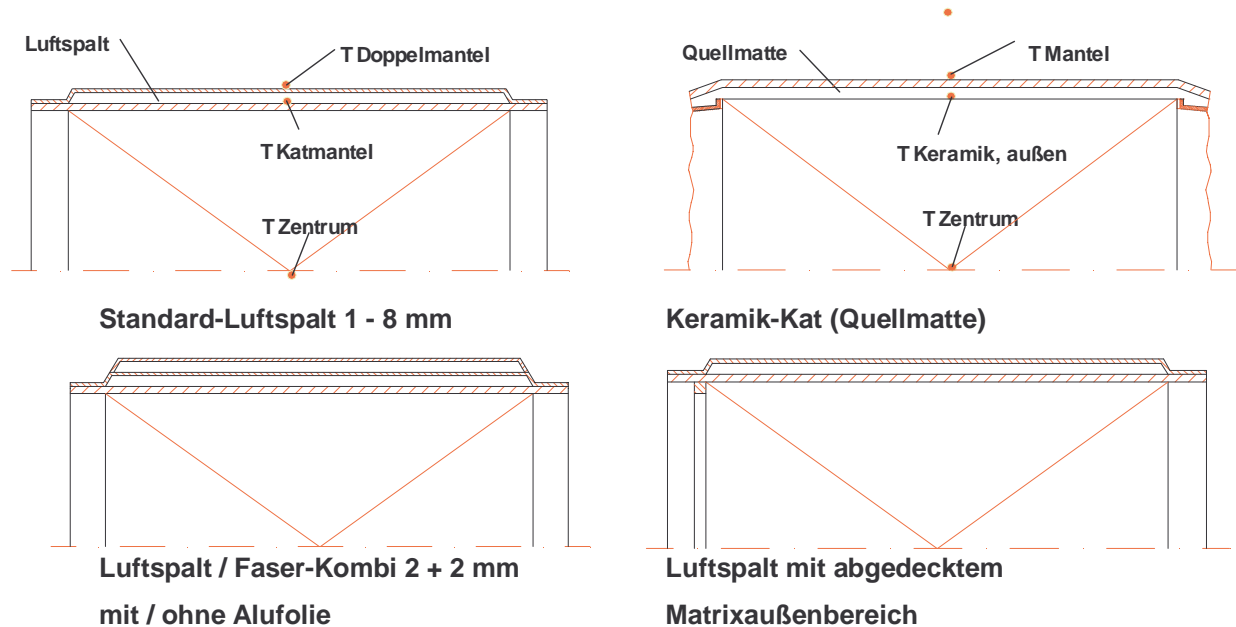


Bild 10. Skizze der Isolationsvarianten mit Temperaturmessstellen

Folgende Resultate wurden erzielt:

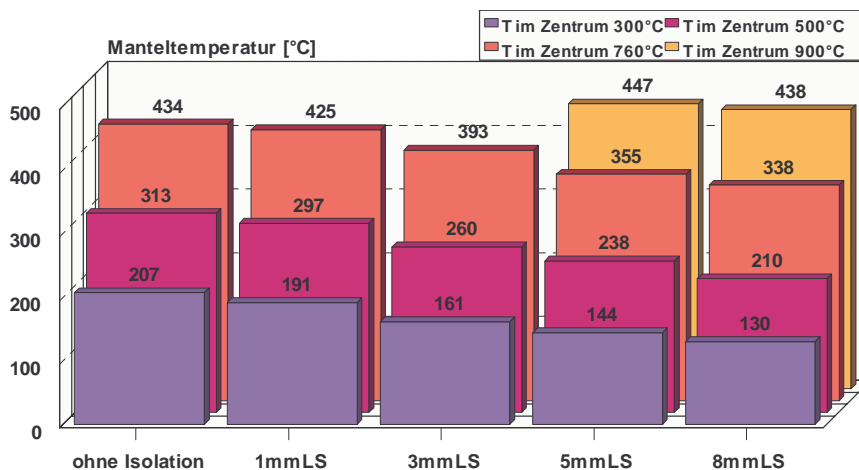


Bild 11. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen Luftspaltdicken bei 300°C, 500°C, 750°C und 900°C im Kat-Zentrum

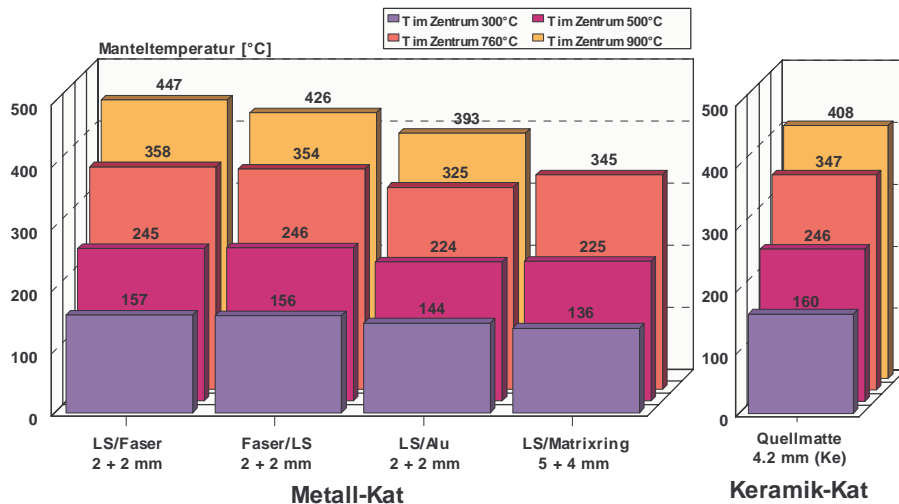


Bild 12. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen Isolationsvarianten bei 300°C, 500°C, 750°C und 900°C im Kat-Zentrum

4.2. ZUSAMMENFASSUNG

4.2.1 Horizontal geteilter Luftspalt (mit / ohne darin enthaltenen keramischen Fasern):

- Im Vergleich zum Standard-Luftspalt mit 5 mm Breite sind von den beiden Varianten LS + Fasermatte (innenliegender Luftspalt) und Fasermatte + LS (außenliegender Luftspalt) mit je 2 mm Stärke bei hohen Temperaturen Vorteile zu erwarten, die aus der Absorption / Reflexion der Strahlung durch die keramischen Fasern herrührt. Hingegen können bei tieferen Temperaturen Vorteile für die reine Luftspaltisolation erwartet werden, da die Fasern im Vergleich zur Luft eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Dies wird durch die Messergebnisse weitgehend bestätigt.
- Die Variante Fasermatte + LS (außenliegender Luftspalt) zeigt bei höherer Temperatur ein besseres Resultat als die umgekehrt angeordnete Variante, da die bei höherer Temperatur effektivere Isolation (Fasermatte) an der heißen Seite (innen) angeordnet ist.

4.2.2 Horizontal geteilter Luftspalt (mit Alu beschichteter Katmantel und innerer Doppelmantel):

- Im Vergleich zum Standard-Luftspalt mit 5 mm kann bei niedrigen Temperaturen keine Änderung, bei hohen Temperaturen jedoch eine sehr deutliche Verbesserung festgestellt werden. Im Gegensatz zu hohen Temperaturen ist der bei niedrigeren Temperaturen durch Strahlung übertragene Wärmeanteil relativ gering, so dass sich eine Änderung der Oberflächenemissionszahlen durch Einsatz des Aluminiums nicht auswirkt. Ganz anders jedoch bei hohen Temperaturen, wo eine Reduzierung von über 50°C erzielt werden konnte.

4.2.3 Keramischer Katalysator mit Quellmattenisolation:

- Im Vergleich zum Standard-Luftspalt wird bei niedriger Temperatur
- erwartungsgemäß ein Vorteil des Luftspalts, bei hoher Temperatur ein Vorteil der Quellmatte festgestellt.

4.2.4 Standard-Luftspalt + abgedeckter Matrixaußenbereich vor Kat:

- Durch Einlegen eines 4 mm breiten Rings vor Kat wird ein Durchströmen des Randbereichs der Matrix verhindert, wodurch sowohl die Katmantel- als auch die Doppelmanteltemperatur gesenkt wird.

5. EINFLUSS DES ABSTANDS AUF DIE TEMPERATUR EINES BENACHBARTEN BAUTEILS

Abweichend von den geschilderten Testbedingungen wurde jetzt nur noch ein Temperaturniveau von 900°C vor Katalysator betrachtet, was etwa einer Zentrumstemperatur von 950°C entspricht.

Um zusätzlich Informationen über die zu erwartenden Temperaturen eines in unmittelbarer Nachbarschaft zum Katalysator positionierten Anbauteils (Wasserpumpe, E-Box, Keilriemen oder ähnliches) zu erhalten, wurde in variabler Entfernung zum Katalysator ein Blechstreifen mit den Abmessungen 100 x 50 mm positioniert, der auf der dem Katalysator zugewandten Seite matt schwarz lackiert war.

Folgende Resultate wurden erzielt:

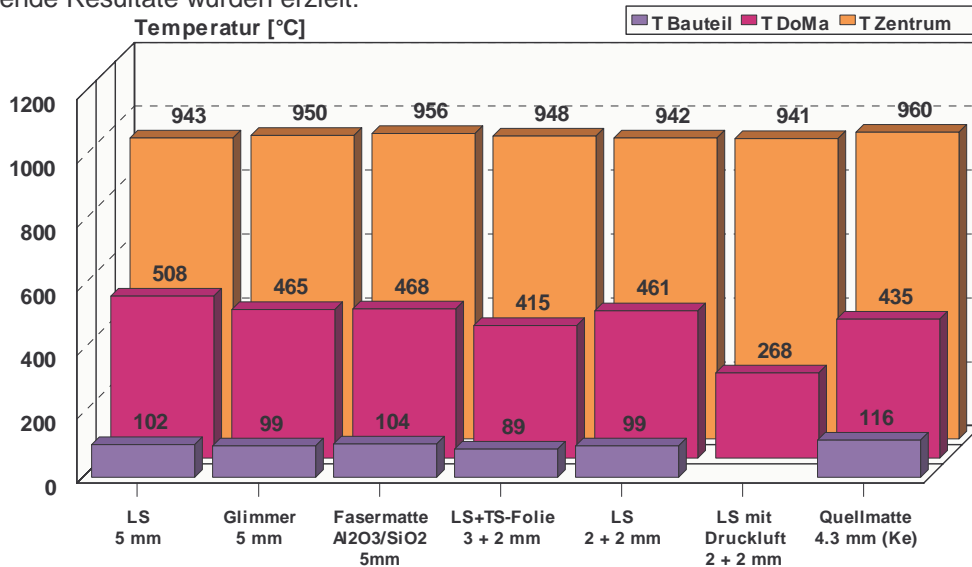


Bild 13. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen Isolationen bei 950°C im Kat-Zentrum (Bauteilabstand zum Kat = 20 mm)

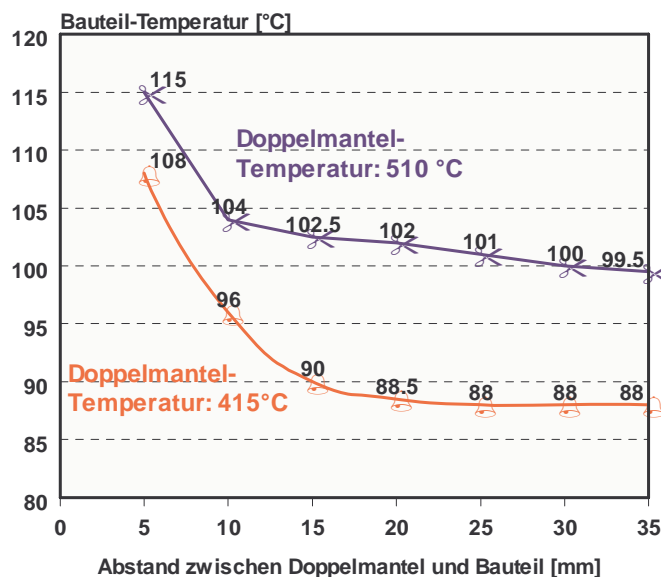


Bild 14. Zusammenhang zwischen Abstand von Kat und Bauteil und Bauteiltemperatur bei unterschiedlichen Katmantel-Temperaturen

5.1. ZUSAMMENFASSUNG

5.1.1 Metallkat mit keramischer Fasermatte bzw. Glimmer

- Sowohl Glimmer als auch die Fasermatte reduzieren die Wärmeabstrahlung und verringern somit gegenüber dem Standard-Luftspalt die Kat-Oberflächentemperatur.
- Dabei gilt: Je höher die Dichte der Fasern, umso besser ist die Fähigkeit zur Reflexion und Absorption der Strahlung und somit die Eignung zum Einsatz bei hohen Temperaturen.

- Bei tieferen Temperaturen kehrt sich dieser Effekt ins Gegenteil um: Mit steigender Dichte nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit der Materialien zu, wodurch die Isolationswirkung bei tieferen Temperaturen gegenüber der des Luftspalts zurückfällt.

5.1.2 Horizontal geteilter Luftspalt / Luftspalt mit TS-Folie

- Eine (z.B. der horizontal geteilte LS) oder mehrere Metallfolien oder Bleche (z.B. Einsatz einiger Lagen TS-gewellten Glattbandes im Luftspalt) reflektieren die Wärmestrahlung (umso besser, je geringer die Emissionszahlen sind).
- Theoretisch kann die durch Strahlung übertragene Wärme durch den Einsatz eines Zwischenblech um 50 %, durch den Einsatz von 10 Blechen sogar um 90% reduziert werden. Dies erklärt den Vorteil der TS-Isolation im Vergleich mit dem horizontal geteilten Luftspalt.

5.1.3 Horizontal geteilter Luftspalt mit druckluftdurchströmtem äußerem Spalt

- Die turbulente Strömung durch den Luftspalt nimmt einen großen Teil der Wärme auf und führt somit zu einer deutlichen Reduzierung der Doppelmanteltemperatur, aber auch der Matrixtemperatur. Im Gegensatz zu einer wirksamen Isolation, die den radiale Wärmeverlust senkt und somit die Temperatur im Kat erhöht, wird hier mehr Wärme abgeführt und die Temperatur insgesamt (auch im Katinneren) reduziert.

5.1.4 Quer angeströmter Metall- bzw. Keramik-Kat

- Erzwungene äußere Konvektion simuliert den Fahrbetrieb, wobei der äußere Wärmeübergangskoeffizient von ca. 5 – 10 W/m/K auf Werte von bis zu 100 W/m/K angehoben werden kann und die Kat-Oberflächentemperatur entsprechend gesenkt wird. Analog zur den Ergebnissen bei Naturkonvektion erzielt die Quellmattenisolation auch hier ein besseres Ergebnis als die Luftspaltisolation.

5.1.5 Einfluss des Abstandes zwischen Bauteil und Katalysator auf die Bauteiltemperatur

- Es zeigt sich, dass die Temperatur eines Bauteils, das neben dem Katalysator angeordnet ist, mit zunehmendem Abstand sinkt. Eine Erhöhung des Abstands von 0 bis auf 10-15 mm reduziert die Temperatur drastisch, da innerhalb dieser Entfernung die Wärmeleitfähigkeit der Luft zusammen mit der den Kat umgebenden Naturkonvektionsschicht die maßgebliche Rolle für den Wärmeübergang spielt. Für Entfernungen > 15 mm beobachtet man nur noch einen geringen Einfluss des Abstands auf die Anbauteiltemperatur, da hier im wesentlichen nur noch die durch Strahlung übertragene Wärme eine Rolle spielt.
- Die den Wärmeübergang hierbei bestimmenden Größen sind die Strahlungsemissionszahlen der beiden Strahlungspartner (Kat und Anbauteil) sowie die Form und Position der Strahler zueinander. Diese Faktoren lassen sich im Formfaktor zusammenfassen. Bei Abständen von 20-50 mm tritt keine signifikante Änderung der Formfaktoren mehr auf. Dies erklärt, warum sich die Anbauteiltemperatur bei Variation des Abstands in diesem Bereich kaum ändert.

6. EINFLUSS DER TS-ISOLATION

In diesem Teil der Messungen wird der Frage nachgegangen, wie sich die Anzahl der in den Luftspalt integrierten Metallfolien (TS-Isolation) auf die Oberflächentemperaturen des Katalysators auswirkt.

Der Testkatalysator verfügte in der Basisvariante über einen Luftspalt von 3.45 mm Breite. In diesen Spalt wurden sukzessive eine steigende Anzahl von Metallfolien integriert, um das Isolationsverhalten zu verbessern.

In die Praxis umgesetzt wurde dies durch Umwickeln des Katalysators mit einem Paar Folien, das aus einer Glattlage und einer TS-gewellten Glattlage bestand. Dieses Paar wurde in der Länge so variiert, dass es den Katalysator 1-mal (= 2 Lagen), 2-mal (= 4 Lagen) ...bis zu 5-mal (=10 Lagen) umschlungen.

Die Abmessungen der Träger und die Charakteristika der TS-Isolationen sind im Folgenden zusammengestellt:

	4 Lagen	6 Lagen	8 Lagen	10 Lagen
Ø innen [mm]	104.6	104.6	104.6	104.6
Länge [mm]	150	150	150	150
Wand [mm]	0.5	0.5	0.5	0.5
Material	1.4828	1.4828	1.4828	1.4828
Ø Paket	106	107	108.4	109.2

Bild 15. Eigenschaften von Kat, Doppelmantel und TS-Isolation, (Gesamtaußen-Ø = 112.6 mm, Doppelmantelstärke = 0.5 mm)

Die Anordnung der Folien ist anhand der nachfolgenden Abbildungen wiedergegeben:

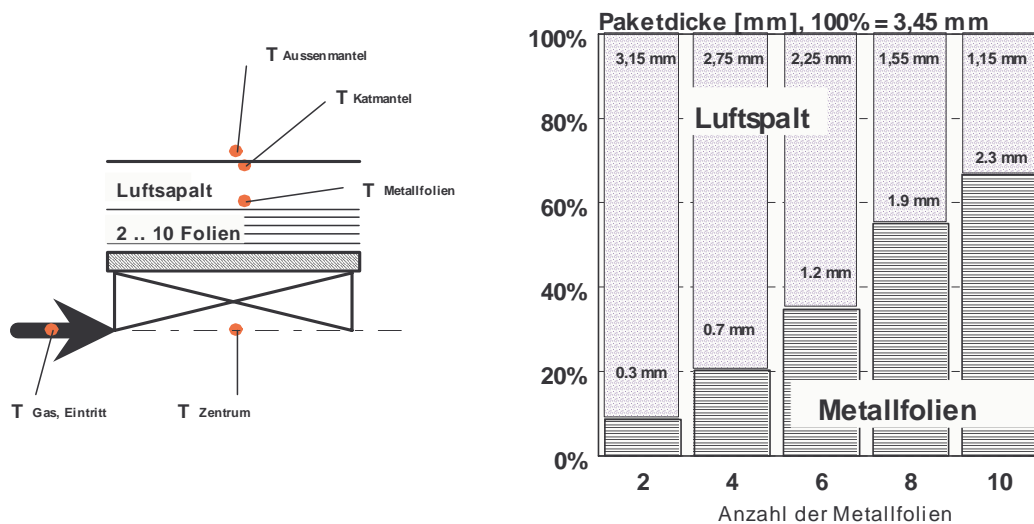


Bild 16. Aufbau der verschiedenen Varianten zur Untersuchung der TS-Isolation

Folgende Resultate wurden erzielt:

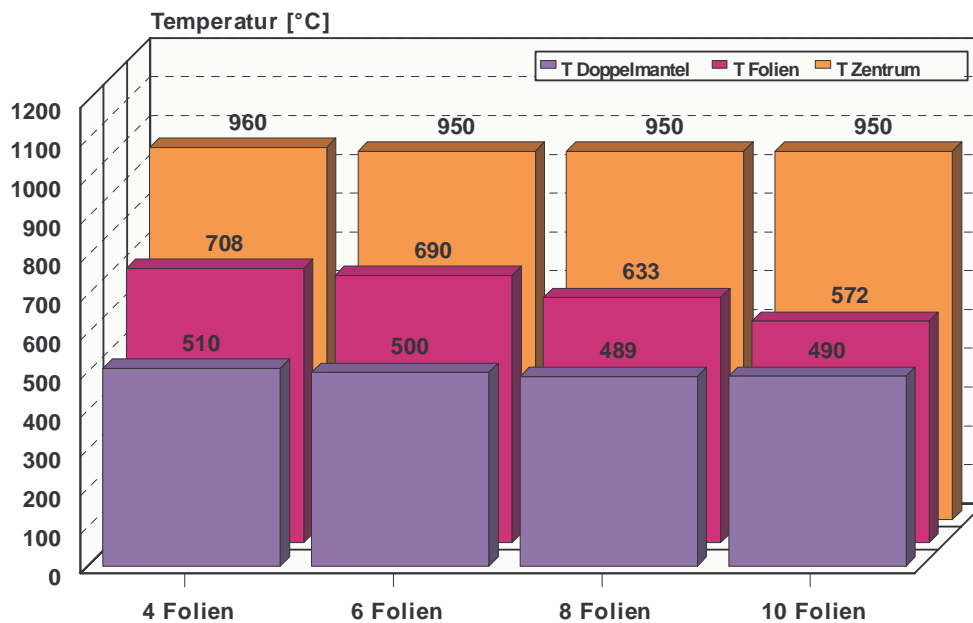


Bild 17. Gemessene Temperaturen mit unterschiedlicher Anzahl von Folien im Luftspalt

6.1. ZUSAMMENFASSUNG

- Bei konstanter Gesamtisoliationsstärke von 3.45 mm wirkt sich der Einsatz von Metallfolien im Luftspalt positiv auf die Verringerung der Doppelmanteltemperaturen aus.
- Die Wirkung zusätzlich eingefügter Folien sinkt jedoch mit der Anzahl schon vorhandener Folien. Dieser Effekt kann auf den Beitrag der mit jeder zusätzlich eingebauten Folie steigender Wärmeleitung zurückgeführt werden, die den Effekt der Strahlungsreflexion teilweise wieder kompensiert. Im Mittel senkt jede zusätzliche Folie die Doppelmanteltemperatur um etwa 5°C.
- Die Wirkung der Folien beruht auf Absorption und Reflexion der Wärmestrahlung.

7. EINFLUSS VON VERSCHIEDENEN ISOLATIONSPRINZIPIEN AUF DIE KAT-TEMPERATUREN

In diesem Teil der Untersuchungen wurde ein breites Spektrum denkbarer Isolationsvarianten getestet. Es kann folgendermaßen unterteilt werden: metallische Varianten, keramische Vergussvarianten, keramische Faservarianten, sowie Kombinationen aus metallischen und keramischen Versionen. Alle Tests wurden an identischen Trägern bei identischen Testbedingungen durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Resultate gewährleisten zu können.

7.1. METALLISCHE ISOLATIONSVARIANTEN

Testmuster zweier Firmen wurden untersucht: Thermsulate und Emitec. Der Aufbau und das Funktionsprinzip beider Varianten ist identisch: Gestapelte Metallfolien mit Abstandshaltern bilden Hohlräume, innerhalb deren die Strahlung reflektiert wird. Durch die Verwendung von n Folien kann der Wärmeverlust theoretisch auf ein n-tel reduziert werden.

Die Isolationsvariante TS-Isolation von Emitec entspricht der in Abschnitt 1.1.4 vorgestellten Variante mit 10 Folien. Die folgende Tabelle und Grafik veranschaulichen den Aufbau der Thermsulate-Isolation:

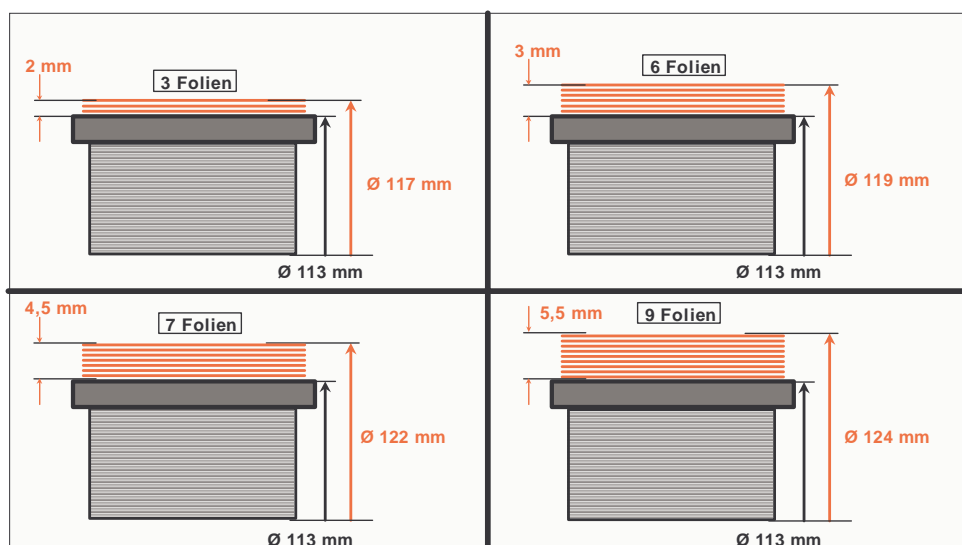


Bild 18. Aufbau und Abmessungen der metallischen Isolationsvarianten von Thermsulate, ohne Doppelmantel

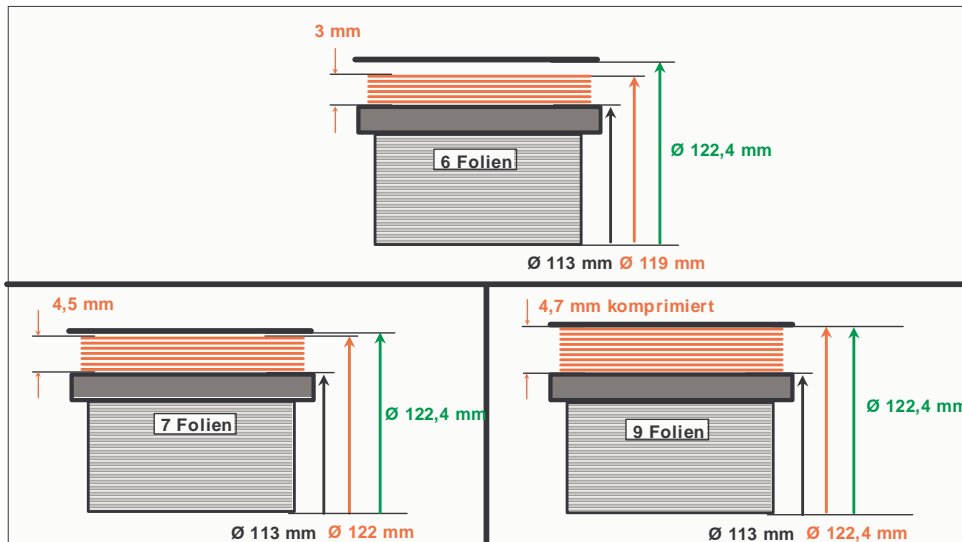


Bild 19. Aufbau und Abmessungen der metallischen Isolationsvarianten von ThermoSulate, mit Doppelmantel

Abmessungen und Aufbau der ThermoSulate-Isolationen wurden wie folgt variiert:

	Emitec	Therm3	Therm6	Therm7	Therm9	Therm6m	Therm7m	Therm9m
Ø Kat [mm]	113	113	113	113	113	113	113	113
Länge [mm]	110	110	110	110	110	110	110	110
Doppelmantel	ja	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Anzahl der Folien	10	3	6	7	9	6	7	9
Außen-Ø [mm]	123	117	119	122	124	123	123	123
Stapelhöhe [mm]	3.45	2	3	4.5	5.5	3	4.5	4.7

Bild 20. Abmessungen und Aufbau der ThermoSulate-Isolationen bei der Messung des Einflusses metallischer Isolationsvarianten

Folgende Resultate wurden erzielt:

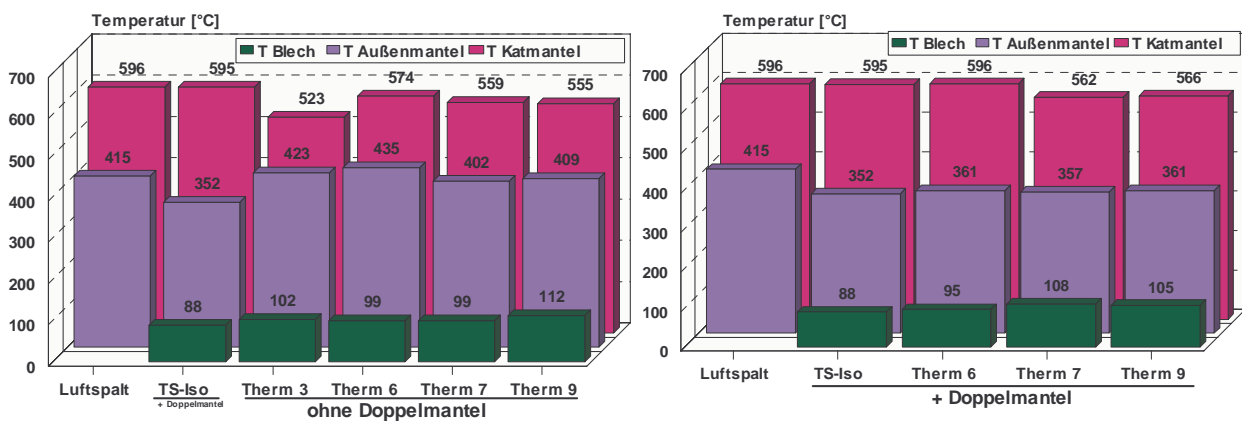


Bild 21. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen ThermoSulate-Isolationen

7.2. ZUSAMMENFASSUNG

- Die mit Doppelmantel getesteten Muster weisen in etwa dieselbe Effektivität wie die TS-Isolation auf, die Muster ohne Doppelmantel liegen in etwa auf dem Niveau der Luftspaltisolation.
- Obwohl theoretisch ein starker Einfluss der Anzahl der Folienanzahl besteht, wurde dieser Einfluss bei den Messungen nur tendenziell gefunden (Messungen ohne Doppelmantel). Die Ergebnisse mit Doppelmantel unterscheiden sich kaum, egal ob 6, 7 oder 9 Folien verwendet wurden.
- Es gelten dieselben Gesetzmäßigkeiten wie im Falle der TS-Isolation: Verringerung des Strahlungsanteils mit steigender Folienanzahl durch Reflexion/Absorption wird teilweise kompensiert durch Zunahme der Wärmeleitfähigkeit. Die bei den Testteilen vorliegenden Mustern verfügen über eine relativ hohe Anzahl von Kontaktpunkten zur Nachbarfolie, so dass entsprechend viele Wärmebrücken zur Verfügung stehen.
- Der Einsatz eines Doppelmantels bringt aufgrund eines zusätzlichen Schilts inklusive Luftspalt eine weitere Verbesserung.

8. KERAMISCHE VERGUßMASSEN-ISOLATIONSVARIANTEN

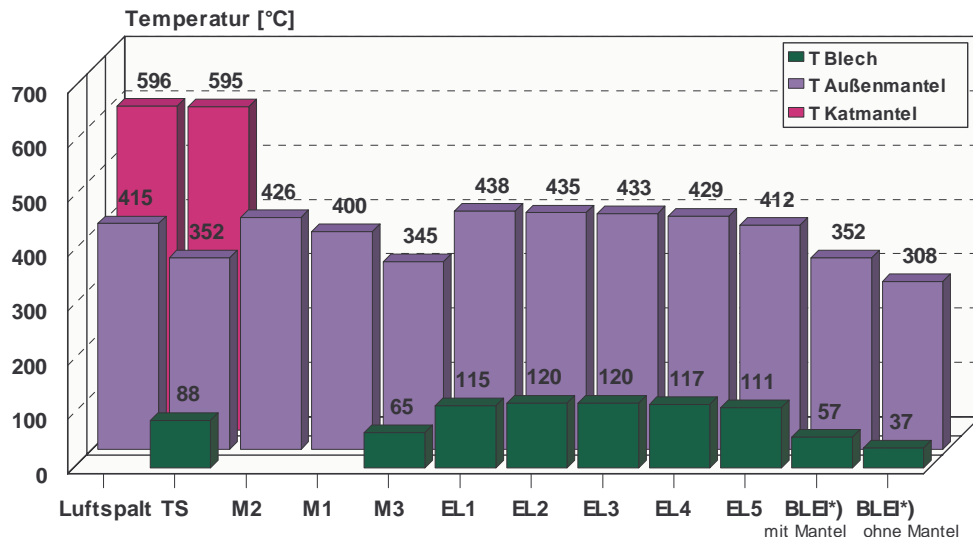
Testmuster dreier Firmen wurden untersucht: Mechadyne, Elring-Klinger und BLEI. Es ist leider nicht vollständig bekannt, welcher Aufbau und welche Zusammensetzung bei den einzelnen Varianten angewendet wurde. Mechadyne gibt an, keramische bzw. polykeramische Stoffe zu verarbeiten. Elring-Klinger verwendet zum einen geschäumte keramische Vergussmassen, zum anderen Vergussmassen, in die Glashohlkugeln oder keramische Hohlkörper eingebettet sind. Das von BLEI eingesetzte Material basiert auf ebenfalls auf einem Mix keramischer Materialien. Hierbei sind keramische Hohlkugeln (\varnothing 50 μ m, Wandstärke 1 μ m) zusammen mit Keramikpartikeln (\varnothing 1 μ m) in eine Trägermatrix aus „weicher“ Keramik eingebettet. Es wurden folgende Varianten geprüft:

	Mechadyne			Elring-Klinger					BLEI	
	M1	M2	M3	EL1	EL2	EL3	EL4	EL5	BLEI	BLEI
Ø Kat [mm]	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Länge [mm]	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
Doppelmantel	ja	ja	nein	Ja	ja	ja	ja	Ja	Ja	nein
Aufbau/ Material	<i>Poly-Keramik</i>	<i>Poly-Keramik</i>	<i>Poly-Keramik</i>	<i>Keramik/Hohlkörper</i>	<i>Keramik/Glas-körper</i>	<i>ge-schäumte Keramik</i>	<i>ge-schäumte Keramik</i>	<i>ge-schäumte Keramik</i>	<i>Keramik/Hohlkörper</i>	<i>Keramik/Hohlkörper</i>
Dichte [kg/m³]	?	520	?	1200	1200	750	550	400	?	?
Schichtdicke	4.7	4.7	15	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	5

Bild 22. Eigenschaften von Kat, Doppelmantel und Isolation der Messung des Einflusses von keramischen Vergussmassen-Isolationen

Alle Isolationen ist gemein, durch die eingebauten Hohlräume die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren und durch die Vielzahl der inneren Oberflächen die Wärmestrahlung zu reduzieren. Wie die Resultate zeigen, funktioniert dies jedoch leider nur in der Theorie.

Folgende Resultate wurden erzielt:



*) - thermisches GGW nicht erreicht wegen Brandgefahr

Bild 23. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen keramischen Vergußmassen-Isolationen

8.1. ZUSAMMENFASSUNG

- Die untersuchten Muster zeigen bis auf eine Ausnahme alle deutlich schlechtere Resultate als die Standard-Luftspaltisolation.
- Generell ist die Dichte der Vergussmassen, speziell bei Mechadyne und Elring-Klinger, recht hoch (400-1200 kg/m³). Dies mag ein Grund für die unbefriedigenden Resultate sein. Obwohl eingebaute Hohlkörper und / oder Poren Grenzflächen den Strahlungsanteil reduzieren sollen, scheint es, als würde dieser Effekt nicht zustande kommen, oder aber als ob eine Kompensation des Effekts durch die stark ausgeprägte Wärmeleitung innerhalb der sehr dichten Werkstoffmatrix stattfände.
- Bei BLEI scheint die thermische Stabilität noch nicht gegeben zu sein. Das Material beginnt sich bei einer Katmanteltemperatur von ca. 600°C zu zersetzen.
- Die Variante Mechadyne 3 erzielt bei mehr als 3-facher Schichtdicke ein der TS-Isolation vergleichbares Resultat.

9. KERAMISCHE FASER-ISOLATIONSVARIANTEN

Testmuster von sechs verschiedenen Firmen wurden untersucht: Eberspächer, Frenzelit, HKO. Kager, 3M und Microtherm. Dementsprechend unterschiedlich ist auch die Zusammensetzung der Fasern. Über die Eberspächer-Matte liegen keine Infos vor. Die Fasern bestehen teils aus fast reinem SiO₂, teils aus fast reinem Al₂O₃ oder auch aus einem Gemisch beider Stoffe. Eine Ausnahme ist MicroTherm, welches nicht aus Fasern, sondern aus Partikeln besteht, bei dem neben einem hohen Titanoxid-Anteil weitere Metalloxide verarbeitet werden. Hergestellt werden die Fasern entweder mit Hilfe eines (etwas teureren) Spinnverfahrens oder im sogenannten Schleudergussverfahren. Vorteile des Spinnens sind vor allem konstanter Faser-Ø über die Länge, hohe Faserlänge, homogene Eigenschaften sowie keine Lungengängigkeit. Entsprechend fallen die Nachteile beim Schleudergussverfahren aus: Sehr ungleichmäßiger Ø bis hin zum Faserkopf, der u.U. abgetrennt werden kann, inhomogene Eigenschaften, Lungengängigkeit.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über den Aufbau sowie die Eigenschaften der verwendeten Isolationen: Die angegebenen Dichten beziehen sich auf das Volumen der Isolation in ausgebautem Zustand. Die Dicke der leeren Luftspalts betrug 4.25 mm.

	E20	E32	K27	F36	H14	H37	M34	MT31
Ø Kat [mm]	113	113	113	113	113	113	113	113
Länge [mm]	110	110	110	110	110	110	110	110
Doppelmantel	Ja	ja	Ja	Ja	ja	Ja	Ja	Ja
Hersteller	Eber-spächer	Eber-spächer	Kager	Frenzelit	HKO	HKO	3M	Micro-Therm
Aufbau/ Material	?	?	50%Al ₂ O ₃ 50% SiO ₂	100% SiO ₂	100% SiO ₂	100% SiO ₂	100% Al ₂ O ₂	65%SiO ₂ 32%TiO ₂ sonstige Oxide
Lagenanzahl/ Dicke	2/2mm	3/2mm	7/0.7mm	1/9mm	1/7mm	1/12mm	1/6mm	Pulver
Dichte [kg/m ³]	200	320	270	360	140	370	340	310
Lagendicke mm]	4	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25

Bild 24. Eigenschaften von Kat, Doppelmantel und Isolation bei der Messung des Einflusses der verschiedenen keramischer Fasermatten

Im folgenden sind die Resultate gezeigt:

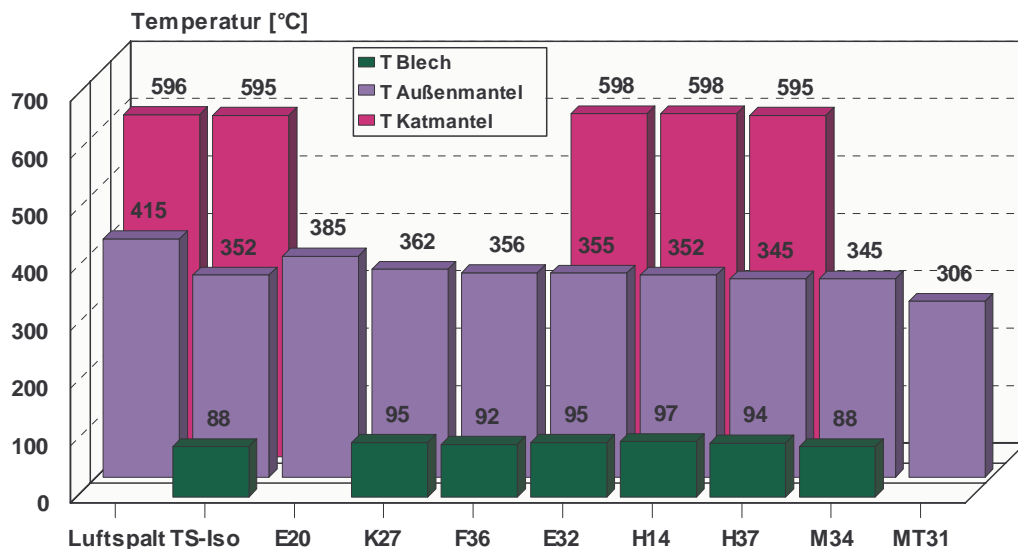


Bild 25. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen keramischen Faserisolutionsvarianten

9.1. ZUSAMMENFASSUNG

- Vergleich der einzelnen Faserisolationen Die untersuchten Muster erzielen fast ohne Ausnahme Manteltemperaturen, die vergleichbar mit den Resultaten TS-Isolation sind.
- Eine Anhebung der Faserdichte (z.B. bei Eberspächer oder HKO) führt durch die Erhöhung der Anzahl reflektierender und absorbierender Oberflächen zu einer Verringerung der Wärmestrahlung und somit zu einer Verbesserung der Isolationseigenschaften. Bei zunehmender Kompression steigt allerdings auch die Anzahl der Kontaktstellen der Fasern, was wiederum die Wärmeleitung begünstigt. Ab einer bestimmten Faserdichte heben sich diese Effekte gegenseitig auf.

- Die Unterschiede in der Effektivität zwischen den einzelnen Varianten sind trotz der Bandbreite der Materialien und Dichten relativ gering.
- Lediglich der Microtherm-Werkstoff war in der Lage, die Oberflächentemperatur des Katalysators nochmals deutlich zu reduzieren.

10. KOMBINATIONEN VON METALLISCHEN FOLIEN UND KERAMISCHEN FASERMATTEN:

Hier ist es von Interesse, ob die Kombination von metallischen Strahlenschutzschilden und keramischen Fasermatten eine deutliche Verbesserung der Isolationseigenschaften hervorrufen würden. Hierzu wurden die Muster von Kager und Eberspächer ausgesucht und derart modifiziert, dass eine Metallfolie zusammen mit einer Fasermatte n mal um den Katmantel gewickelt wurde (Metallfolie 40µm bzw. 50µm stark, jeweils außen angeordnet). Im Falle der 2 mm starken Eberspächermatte war n=2, beim 0.7 mm starken Kager-Cerapaper betrug n=7. Den prinzipiellen Aufbau zeigt die nachfolgende Skizze.

Die Abmessung und Eigenschaften der untersuchten Muster sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

	E20	E20/Metall	K27	K27/Metall
Ø Kat [mm]	113	113	113	113
Länge [mm]	110	110	110	110
Doppelmantel	Ja	Ja	Ja	Ja
Hersteller	Eberspächer	Eberspächer	Kager	Kager
Aufbau/ Material	?	?	50%Al ₂ O ₃ 50%SiO ₂	50%Al ₂ O ₃ 50%SiO ₂
Anzahl Ke-Lagen/ Dicke	2/2mm	2/2mm	7/0.6mm	7/0.6mm
Anzahl Me-Lagen/ Dicke	--	2/50µm	--	7/40µm
Dichte [kg/m ³]	200	200	270	270
Lagendicke [mm]	4	4.25	4.25	4.25

Bild 26. Eigenschaften von Kat, Doppelmantel und Isolation bei der Messung des Einflusses der Kombination von Metallfolien und Fasermatten

Folgende Resultate wurden erzielt:

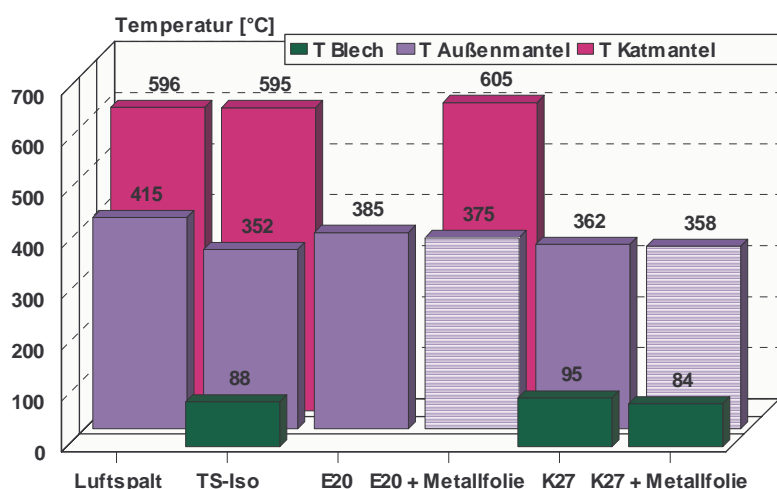


Bild 27. Gemessene Temperaturen mit verschiedenen Kombinationen von Metallfolien und Fasermatten

10.1. ZUSAMMENFASSUNG

- Durch das Einfügen von metallischen Folien in das Lagenpaket aus keramischen Fasermatten konnte die Isolationswirkung im Vergleich zur reinen Fasermatte nochmals verbessert werden.
- Sieben zusätzliche Folien innerhalb der keramischen Kager-Matte verbesserten das Resultat um lediglich 5K, während zwei zusätzliche metallische Folien bei der Eberspächermatte schon 10K brachten. Offensichtlich spielt auch hier wieder der Einfluss der Wärmeleitung eine wichtige Rolle.

11. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE

Ziel einer wirksamen Katalysatorisolation ist primär die Reduktion der Temperaturbelastung von Bauteilen, die in der Nähe des Katalysators angeordnet sind. Dabei kann es sich bei motornahen Anwendungen um mechanische, hydraulisch oder elektronische Bauteile handeln, die bei zu hohen Temperaturen Schaden nehmen würden. Ähnliches gilt für die sog. Unterbodenposition, wo verhindert werden muss, dass umliegende, auch nicht zum Fahrzeug gehörende Dinge Feuer fangen könnten.

Die zweite Hauptfunktion der Katalysatorisolation ist direkt mit der ersten gekoppelt und besteht darin, eine möglichst hohe Katalysator-Innentemperatur aufrechtzuerhalten. Dies erfolgt „automatisch“ bei einer Begrenzung des Wärmeflusses nach außen zur Reduzierung des Katalysatoroberflächentemperatur. Die Maßnahme ist erforderlich, da die Konvertierungsleistung des Katalysators bei hohem Temperaturen ansteigt und somit niedrige Emissionen erzielt werden können, wenn wirksame Katalysatorisolationen eingesetzt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass wirksame Katalysatorisolationssysteme entwickelt wurde, die beiden Anforderungen, sowohl der Reduzierung der Oberflächentemperaturen , als auch der Verringerung von Emissionen, in hohem Maße gerecht werden.

Die beschriebenen Ergebnisse wurden im Teilprojekt E „Katalysatordesign“ weiter verwendet, wobei die beiden Grundanforderungen an eine Isolation genutzt werden konnten. Das zusätzlich erzielte hohem Maße an Flexibilität und Dauerhaltbarkeit der Verbindung der Matrix zum Mantel wird in diesem Teilbericht näher beleuchtet.

C. Reduzierung der thermischen Masse

1. LITERATURRECHERCHE

Durch Minimieren der thermischen Masse kann das Aufheizverhalten im Kaltstart verbessert werden [1, 2, 3, 5, 6]. Die thermische Masse eines Katalysators besteht aus der Masse des Katalysatorkörpers und der Washcoat-Masse. Da die Washcoat-Masse zwar auf ein Minimum herabgesetzt werden kann, neue Mehrfach-Beschichtungen, die die Effektivität erhöhen sollen, jedoch eher mehr Masse mit sich bringen, ist es schwierig die thermische Masse des Katalysators durch die Beschichtung zu reduzieren. Durch Entwicklung von dünnwandigen Metallsubstraten, Serienreife momentan bis 30µm [4], konnte das Kaltstartverhalten jedoch weit verbessert werden, und die Einhaltung der Emissions-Grenzwerte wird dadurch vereinfacht.

- [1] Maus, W., Swars, H., Brück, R., Kaiser, F.W.; Emitec GmbH, Held, W., Rohlf, M.; VW AG: "Improved cell design for increased catalytic conversion efficiency", SAE 940932
- [2] Brück, R., Diewald, R., Hirth, P., Kaiser, F.W.; Emitec GmbH: "Design criteria for metallic substrates for catalytic converters", SAE 950789
- [3] Brück, R., Diewald, R., Diringer, J.; Emitec GmbH: "Design criteria of metal substrates for future catalyst applications, part II", SAE 960558
- [4] Brück, R., Diewald, R., Maus, W., Wieres, L., Kaiser, F.W.; Emitec GmbH: "New ultra thin wall catalyst for close-coupled applications", SAE 980420
- [5] Kikuchi, S., Hatcho, S., Okayama, T., Inose, S.; Honda R&D Co., Ikeshima, K.; NGK Insulators: "High cell density and thin wall substrate for higher conversion ratio catalyst", SAE 1999-01-0268
- [6] Ball, D., Tripp, G.; Delphi Automotive, Socha, L., Heibel, A., Kulkarni, M.; Corning, Weber, P.; Southwest Research Institute, Linden, D.; ASEC Manufacturing: "A comparison of emissions and flow restriction of thin wall ceramic substrate for low emission vehicles", SAE 1999-01-0271

2. THEORETISCHE AUSLEGUNG

Zum Vergleich von Metall- und Keramikträger wurden die physikalischen Daten betrachtet. Die Angaben für den Metallträger beziehen sich nur auf die Matrix. Die thermische Masse des Mantels wurde nicht berücksichtigt. Folgende Träger wurden zum Vergleich herangezogen (alle Ø110x110 mm):

Metall:

- 400 cpsi; 0,05 mm Folienstärke
- 400 cpsi; 0,04 mm Folienstärke
- 400 cpsi; 0,03mm Folienstärke
- 600 cpsi; 0,04 mm Folienstärke
- 600 cpsi; 0,03 mm Folienstärke
- 600 cpsi; 0,025 mm Folienstärke
- 800 cpsi; 0,03 mm Folienstärke
- 800 cpsi; 0,025 mm Folienstärke
- 800 cpsi; 0,02 mm Folienstärke
- 1000 cpsi; 0,03 mm Folienstärke
- 1000 cpsi; 0,025 mm Folienstärke
- 1000 cpsi; 0,02 mm Folienstärke

Keramik:

- 400 cpsi; 6,5 mil
- 400 cpsi; 4 mil
- 600 cpsi; 4 mil
- 600 cpsi; 3 mil
- 900 cpsi; 3 mil
- 900 cpsi; 2 mil

Das „>“-Zeichen und das „<“-Zeichen werden im Sinne von „ist besser als“ und „ist schlechter als“ verwendet.

2.1. WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENT α

Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden für einen Massenstrom von 40 kg/h und einer Temperatur von 20 °C berechnet.

Für geringere Zelldichten (400 und 600 cps) und die betrachteten Foliendicken ist der Metallträger dem Keramikträger bei gleicher Zelldichte unabhängig von der Foliendicke im α überlegen.

Bei größeren Zelldichten muss die Foliendicke mit in Betracht gezogen werden. Vergleicht man den 800 cps Metall- mit dem 900 cps Keramikträger liegen für diesen Fall die Wärmeübergangskoeffizienten der Träger bei unterschiedlichen Foliendicken nah beieinander (s. prozentualer Vergleich).

Metallträger mit 1000 cps haben wiederum einen wesentlich günstigeren Wärmeübergangskoeffizienten als die 900 cps Keramikträger.

Bei hohen Zelldichten muss daher stark auf die Anforderungen an den Träger geachtet werden, um die richtige Auswahl (800 oder 1000 cps) zu treffen.

Me 400; 0,05	>	Ke 400; 6,5	(+ 10,5%)
Me 400; 0,04	>	Ke 400; 4	(+ 14,5%)
Me 400; 0,03	>	Ke 400; 4	(+ 13%)
Me 600; 0,04	>	Ke 600; 4	(+ 8,8%)
Me 600; 0,03	>	Ke 600; 3	(+ 8,3%)
Me 800; 0,03	<	Ke 900; 3	(- 1,2%)
Me 800; 0,03	>	Ke 900; 2	(+ 1,2%)
Me 800; 0,02	<	Ke 9; 2 (- 0,3%)	
Me 1000; 0,03	>	Ke 900; 3	(+ 12,9%)
Me 1000; 0,02	>	Ke 900; 2	(+ 15,2%)

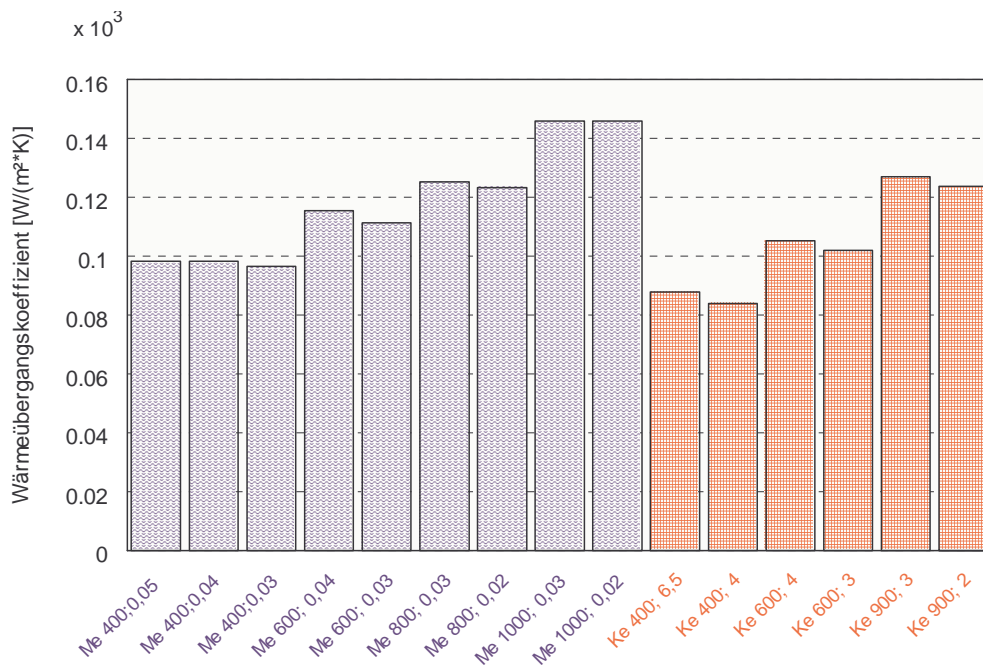


Bild 1. Wärmeübergangskoeffizienten α

2.2. WÄRMEMENGEN ZUR AUFHEIZUNG VON TRÄGERN

Für die Berechnung der benötigten Wärmemenge zur Aufheizung eines Trägers von 20°C auf 170°C / 200°C / 250°C wurde die spez. Wärmekapazität (s. Abbildung 2) in einem Temperaturintervall von 10 K gemittelt und mit der Masse des Katalysators und dem ΔT (10K) multipliziert. Die sich für die Temperaturintervalle ergebenden Wärmemengen wurden kumuliert. Die kumulierte Wärmemenge entspricht somit der zur Aufheizung bis zur Temperatur T (von 20 °C auf 170/200/250°C) benötigten Energie.

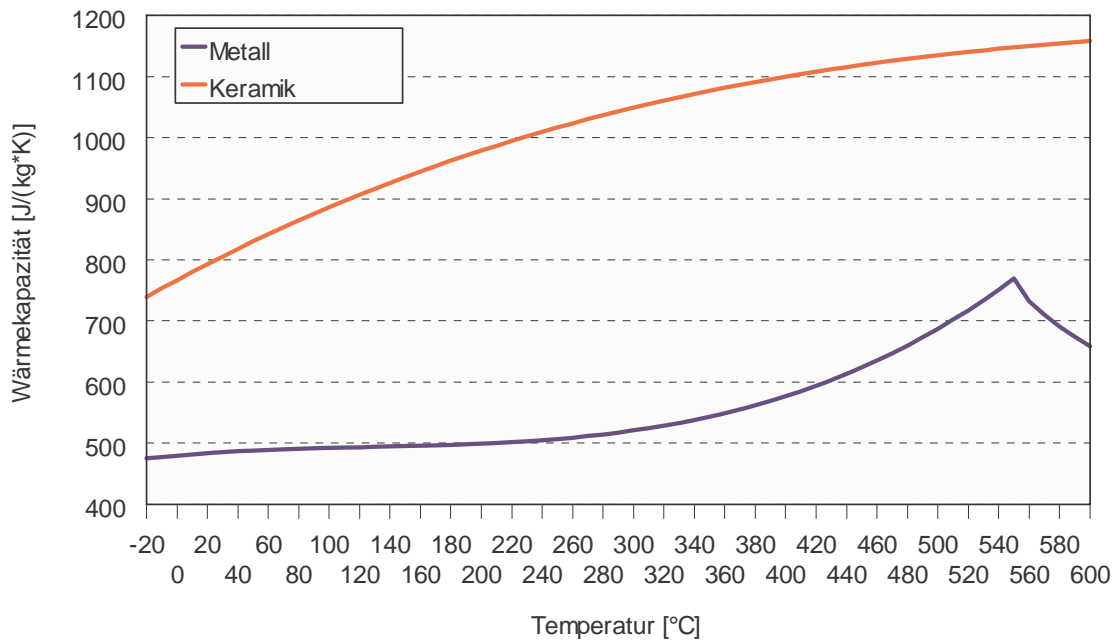


Bild 2. spez. Wärmekapazitäten c_p für Metall- und Keramik

Aufgrund der spez. Wärmekapazität hat der Keramikträger im Bereich niedriger Temperaturen einen Vorteil gegenüber dem Metallträger. Da das c_p aber bei Keramik steil ansteigt und bei Metall bis ca. 350 °C nahezu konstant bleibt, nimmt der Vorteil mit steigender Temperatur stetig ab.

D. h., vergleicht man die Aufheizung von Träger am Beispiel Me 600cps; 0,04mm und Ke 600cps; 4 mil von 20 auf 170°C, hat der Keramikträger z.B. einen Vorteil von 6,9%, bei einer Aufheizung bis 200°C von 5,5 % und bei einer Aufheizung bis 250°C von 3,5%. Der Keramikträger erreicht somit zwar schneller die Light Off Temperatur, bei höheren Temperaturen erwärmt sich der Metallträger wiederum besser und schneller. Für den Vergleich mit dem Ke 600 cps, 4 mil kann somit nur ein Metallträger herangezogen werden, der bei gleicher Zelldichte eine dünnere Folienstärke aufweist, also Me 600 cps; 0,03mm, um einen Vorteil bezüglich eines früheren Light Off's zu erzielen.

2.2.1 Metall- und Keramikträger 400 cps

Die Metallträger 400 cps, 0,05 mm und 0,04 mm Folie sind im Vergleich zum Ke 400; 6,5 günstiger bezüglich der Wärmeaufnahme.

Der Metallträger 400cps, 0,03 mil ist wiederum günstiger als der Keramikträger 400 cps, 4mil.

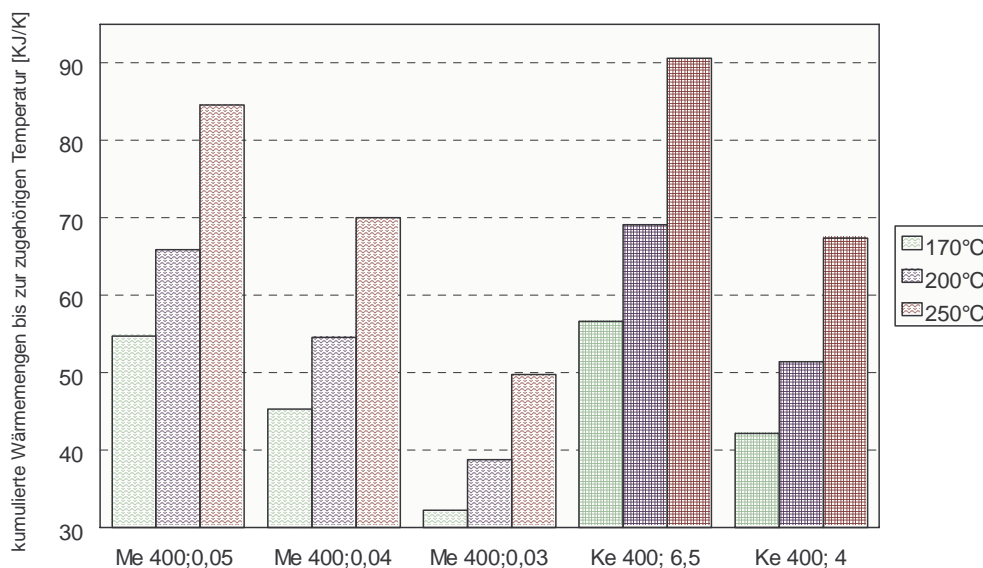


Bild 3. Vergleich von Metall- und Keramikträgern mit 400 cps

2.2.2 Metall- und Keramikträger 600 cpsi

Für die 600 cpsi Träger ist festzustellen, dass der Metallträger 600cpsi, 0,04 mm ungünstiger im Aufheizverhalten ist als der Keramikträger 600 cpsi, 4 mil. Vergleicht man den Me 600 cpsi, 0,3 mm mit dem Ke 600cpsi, 4 mil bzw. dem Me 600 cpsi, 0,025 mm mit dem Ke 600 cpsi, 3 mil, so stellt man fest, dass beide Metallträger bezüglich der Wärmeaufnahme günstiger sind als die entsprechenden Keramikträger.

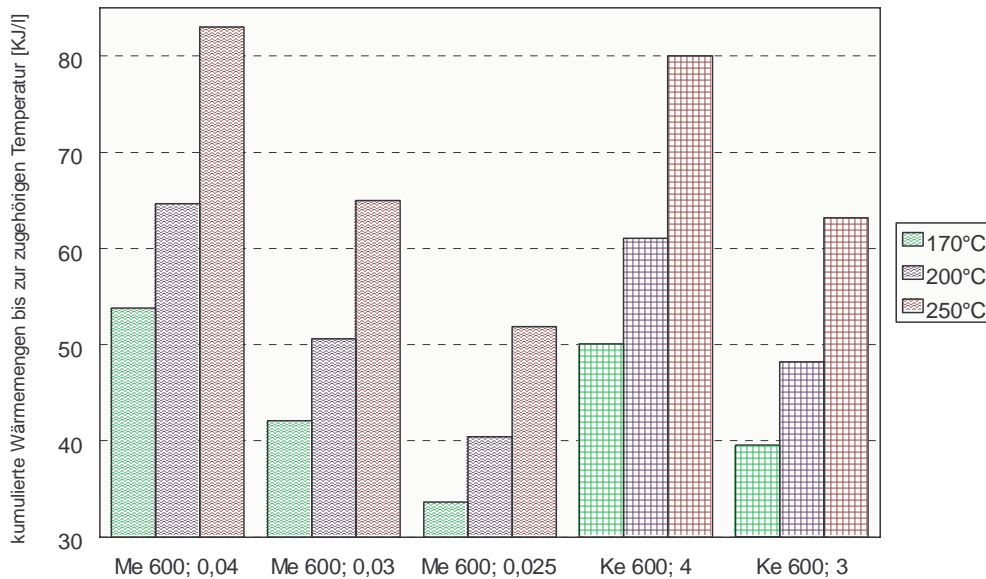


Bild 4. Vergleich von Metall- und Keramikträgern mit 600 cpsi

2.2.3 Metallträger 800/1000 cpsi und Keramikträger 900 cpsi

Im Vergleich von 800 bzw. 1000 Zellern mit den Keramikträgern mit 900 cpsi, stellt sich der Me 1000 cpsi, 0,03 mm als Träger mit der höchsten Wärmeaufnahme dar.

Besser als der Keramikträger 900 cpsi, 3 mil sind der Me 800 cpsi, 0,03 mm und der Me 1000, 0,025 mm. Beide Träger weisen eine identische spez. Wärmeaufnahme auf und sind günstiger als der Keramikträger.

Der Me 800 cpsi, 0,020 mm Träger weist nahezu die gleiche Wärmeaufnahme auf wie der Ke 900 cpsi, 2 mil. Die Träger Me 800 cpsi, 0,02 mm bzw. Me 1000 cpsi, 0,02mm sind hingegen günstiger.

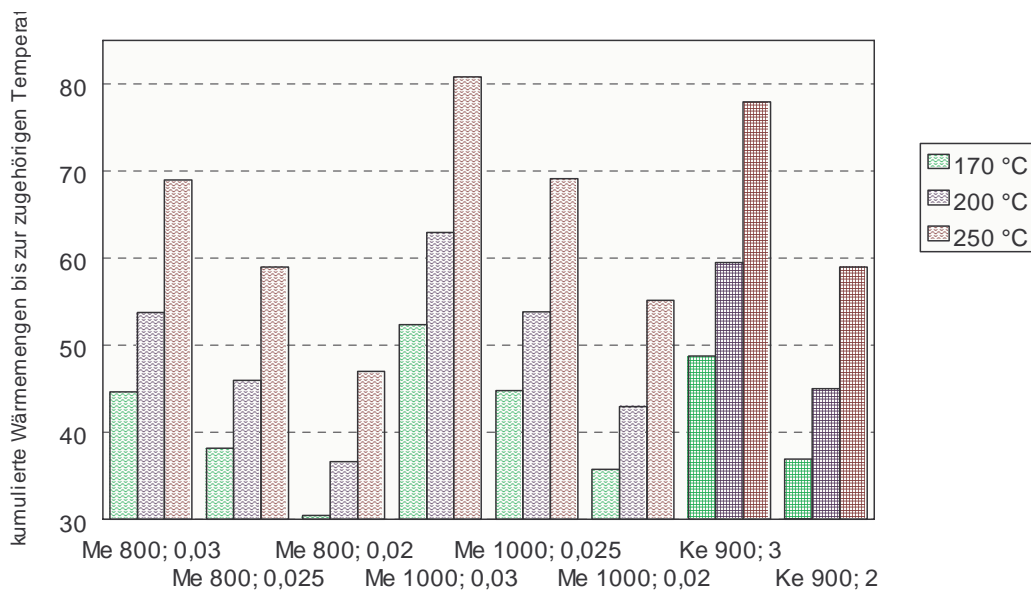


Bild 5. Vergleich von Metallträgern 800/1000 cpsi und Keramikträgern 900 cpsi

2.2.4 Zusammenfassung

Die Light-Off Temperaturen für Beschichtungen werden immer geringer und für ein Einhalten von ULEV und SULEV Grenzwerte wird ein immer früheres Anspringen des Katalysators erforderlich. Aufgrund des Nachteils der spez. Wärmekapazität muss bei gleicher Zelldichte die Folienstärke beim Metallträger zunehmend dünner werden, um ein Einhalten der Grenzwerte zu gewährleisten.

Nachfolgend sind zusammenfassend die Wärmemengen aller erwähnten Trägertypen aufgeführt, die für eine Aufheizung von 20 auf 200 °C notwendig sind.

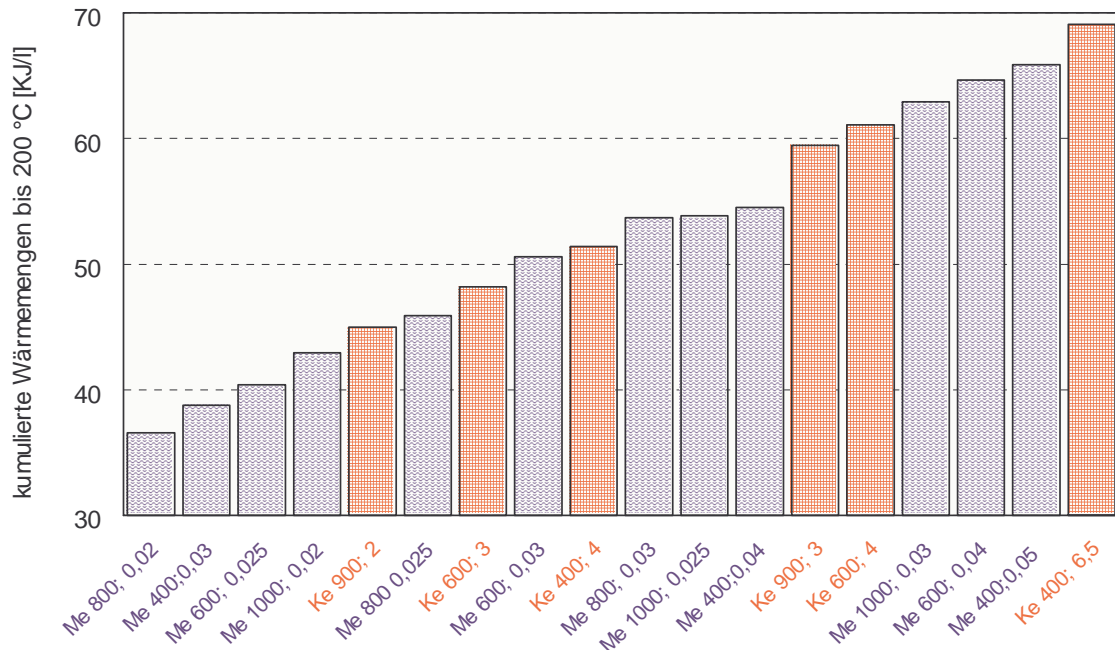


Bild 6. Vergleich von Metall- und Keramikträgern mit verschiedenen Zelldichten bei 200 °C

3. KATALYSATORBERECHNUNG

Um den Einfluss der thermischen Masse auf das Kaltstartverhalten zu demonstrieren wurden Berechnung mit unterschiedlichen Katalysatoren durchgespielt. Es zeigt sich, dass bei einer Zelldichte von 400cps, wie auch bei 800cps, die HC-Emissionen mit abnehmender Folienstärke (80-20µm) reduziert werden. Ähnliches zeigt auch der Einfluss des Washcoates. Je dünner die Beschichtung (250-50 g/l), desto kleiner ist die thermische Masse und desto besser die katalytische Konvertierung.

Bei einer weiteren Berechnung wurde der Vergleich Metall-Keramik bei Kaskadensystemen betrachtet. Es ist ersichtlich, dass das Keramiksystem am schnellsten anspringt, der Metallträger aber nach ca. 23 s eine bessere Konvertierung zeigt. Dies resultiert aus der unterschiedlichen thermischen Masse der Träger. Die spezifische Wärmekapazität des Keramikträgers ist bei niedrigen Temperaturen, wie sie im Kaltstart vorliegen, am kleinsten. Bei einer Temperatur von 100°C schneiden sich die beiden spezifischen cp-Kurven und der Vorteil von Metall kommt zur Geltung. Erst bei einer Temperatur von ~450°C liegt die spezifische Wärmekapazität von Keramik wieder unter der von Metall. Da die light-off Temperatur zwischen 215-245°C liegt, favorisiert Metall das Aufheizverhalten des gesamten Trägers.

4. REDUZIERUNG DER LOTMENGE

Mit der Entwicklung dünnwandiger Metallsubstraten gewinnt die Wahl des Belotverfahrens an Bedeutung. Zum Erreichen der Ziele einer Verringerung der Lotmenge über den Trägerquerschnitt und ein einfacheres Beloten wurden der Einsatz von Lot untersucht, dass als schaumförmige, dünne Schicht geringer Dichte an die Trägerstirnfläche gedrückt wurde. Diese Lotschicht sollte so beschaffen sein, dass beim Andrücken ein Verkrallen an der Matrixstirnfläche erfolgt.

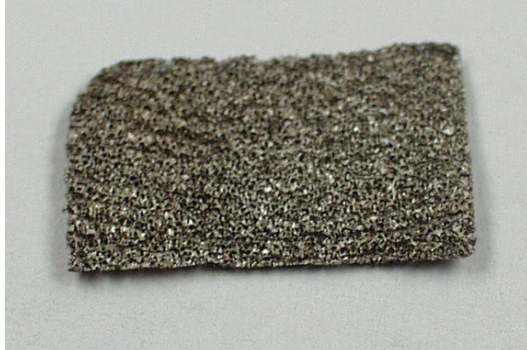


Bild 7. Dreidimensionale Metallschaumstruktur (Raney-Nickel)

Da die Herstellung von Schaum aus Standardlot NB30-E1 derzeit nicht möglich ist, wurden andere Lote als Folie bzw. in schaumähnlicher Form eingesetzt. Die nachfolgende Tabelle faßt die Eigenschaften der eingesetzten Lote zusammen.

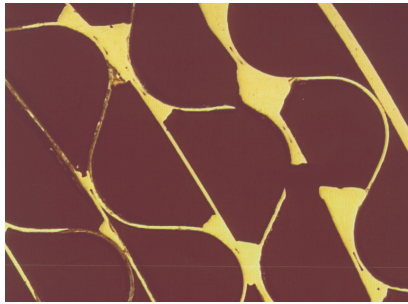
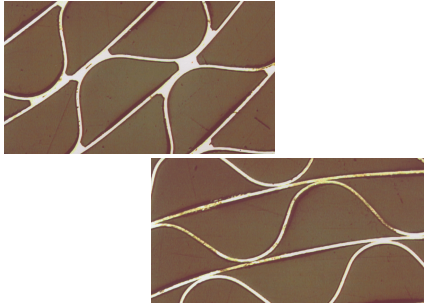
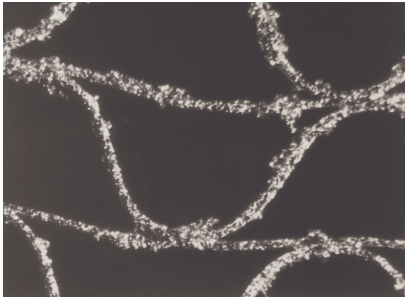
Lot	Beschreibung	Lotdichte [g/cm ²]	Lotgewicht [g/Stirnfläche]
NB 30 Transfer Tape	0.127 mm	0.065	0.67
	0.381 mm		0.64
	Auf einer Kleberschicht fixiertes Lotpulver; Beloten erfolgt durch Anpressen der zweiten Kleberseite an zu belotende Fläche		0.67
		0.191	2.02
			2.01
			1.94
MBF 50- Lotfolie	0.05 mm	0.038	0.21
	Lotfolie mit einer Zusammensetzung entsprechend BNi5; Borgehalt \approx 1.5Ma.-%; Zum Fixieren der Lotfolie wurde die Matrixstirnfläche mit Prittroller non-permanent behandelt.		0.20
			0.21
MBF 80- Lotvlies (ungesintert und gesintert)		0.030	0.30
	Erzeugen von Fasern aus MBF80-Lotfolie und Weben eines Vlieses aus diesen Fasern; Borgehalt \approx 3.6Ma.-%; Zum Fixieren der Lotfolie wurde die Matrixstirnfläche mit Prittroller non-permanent behandelt.		0.27
			0.31

Bild 8. Eingesetzte Lote

4.1. AUFBRINGEN DES LOTES

Keines der eingesetzten Lote hielt ohne Kleber auf der Matrixstirnfläche. Auch das der gewünschten Schaumstruktur am meisten ähnliche Lotvlies verkrallte sich nicht in der Matrixstirnfläche.

4.2. LOTFLUSS UND LOTVERTEILUNG

NB 30 Transfer Tape 0.127 mm:	
<p>Viele Folienbrüche und -umklappungen \Rightarrow Lot tropft nach Erweichen auf die Matrix und beschädigt die Struktur</p> <p>Lotverteilung über Trägerquerschnitt relativ gleichmäßig</p> <p>Variierende Lotmengen in den Zwickeln</p> <p>Nahezu keine Flankenbelotung \Rightarrow ursprünglich flächig verteiltes Lot zieht in die Zwickel</p> <p>Lötanbindung = 83.6 % in 1.5 mm Schlifftiefe</p>	
NB 30 Transfer Tape 0.381 mm:	
<p>Im Bereich der beloteten Fläche ist die Matrix bis in Tiefen von ca. 10mm durch herabtropfendes Lot weitgehend zerstört.</p> <p>Lotfluss und Lötanbindung konnten nicht bestimmt werden.</p>	
MBF 50-Lotfolie:	
<p>Keine Folienbrüche, leichte Zelldeformationen</p> <p>Lotverteilung über Trägerquerschnitt ungleichmäßig mit Bereichen hoher Lotkonzentration neben unbeloteten Bereichen (keine Berührung zwischen Matrixkanten und Lotfolie beim Erreichen des Liquidus-Bereiches)</p> <p>Sehr gleichmäßige Lotverteilung über den Zellquerschnitt \Rightarrow Lot zieht nicht in die Zwickel</p> <p>Lötanbindung = 41.2 % in 1.5 mm Schlifftiefe</p>	
MBF 80-Lotvlies:	
<p>Keine Folienbrüche, keine Zelldeformationen</p> <p>Gleichmäßige Lotverteilung über Trägerquerschnitt</p> <p>Gleichmäßige Lotverteilung über Zellquerschnitt \Rightarrow Lot zieht nicht in die Zwickel</p> <p>Lötanbindung = 56.5 % in 1.5 mm Schlifftiefe</p> <p>Auch mit stark abnehmender Lotkonzentration in 3 und 4mm Tiefe bleibt MBF 80 über den gesamten Zellquerschnitt verteilt.</p>	

Stellvertretend für alle eingesetzten Lote wurde für MBF80-Lotvlies die Lötanbindung als Funktion der Schlifftiefe bestimmt. Bereits in 4mm Abstand von der beloteten Stirnfläche ist nahezu keine Lötanbindung mehr nachweisbar. Im Vergleich zum Standard-Belotverfahren ist dafür die Lotkonzentration an den Folienkanten deutlich höher.

4.3. KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT VON LOTSCHÄUMEN

Um mögliche Auswirkungen der teilweise hohen Borgehalte der Testlote auf die Korrosionsbeständigkeit der gelöteten Matrix zu überprüfen, wurden jeweils zwei Wickelkörper mit je einer beloteten Stirnfläche dem Emitec-Standardauslagerungstest unterzogen.

Während die Ergebnisse für NB30 Transfer Tape (borfrei) und MBF 50-Lotfolie (\approx 1.5 Ma.-% Bor) mit den Ergebnissen der Chargenqualifizierung des eingesetzten Materials vergleichbar sind, verschlechtert sich Oxidationsbeständigkeit von mit MBF80-Lotvlies (\approx 3.6 Ma.-% Bor) gelötetem Material.

Für die beiden borhaltigen Lote wird bereits nach 25 Stunden Auslagerung starke Korrosion im gelöteten Bereich gefunden, verbunden mit Folienbrüchen und Eisenoxidbildung.

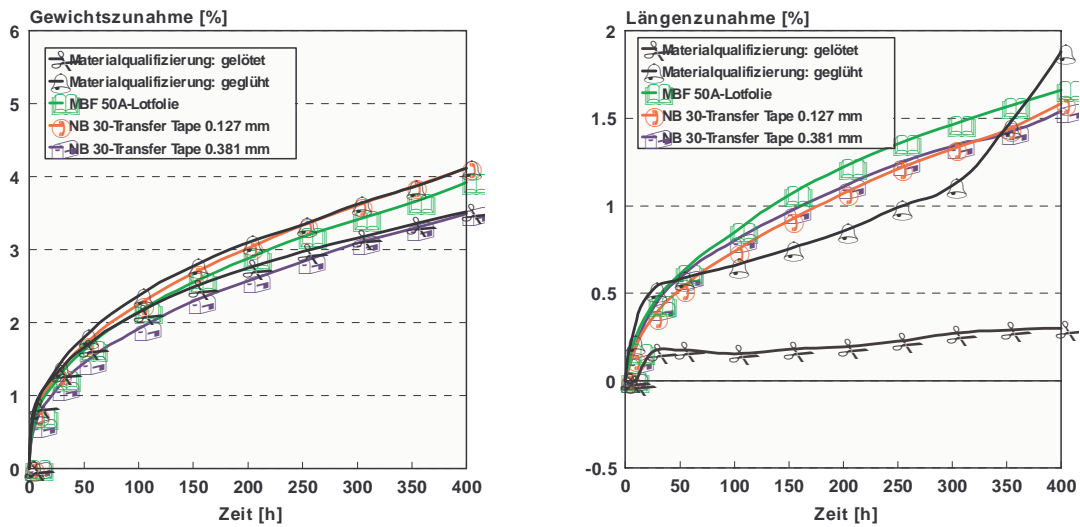


Bild 9. Auslagerungsergebnisse der Proben mit NB 30 Transfer Tape und MBF 50-Lotfolie

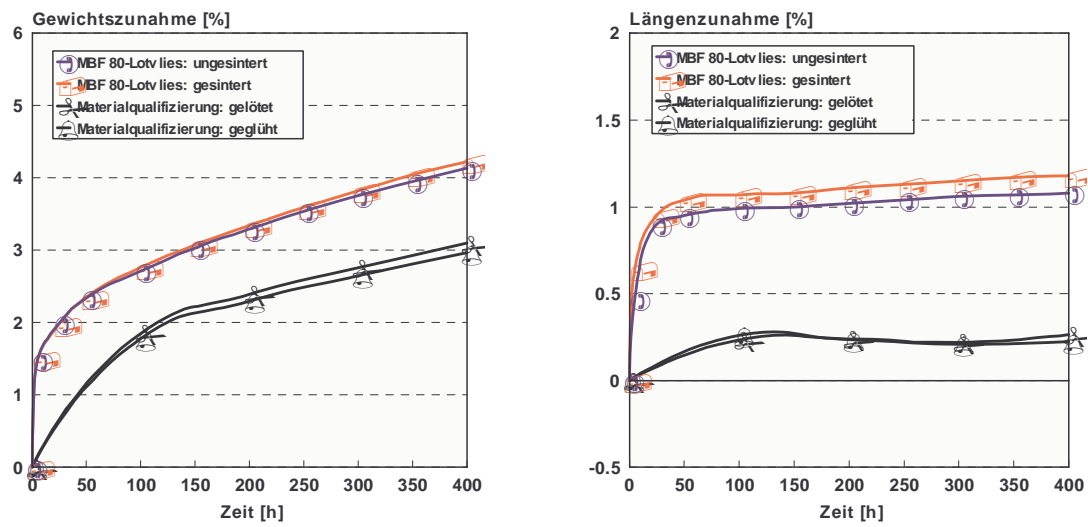


Bild 10. Auslagerung der Proben mit MBF 80-Lotvlies

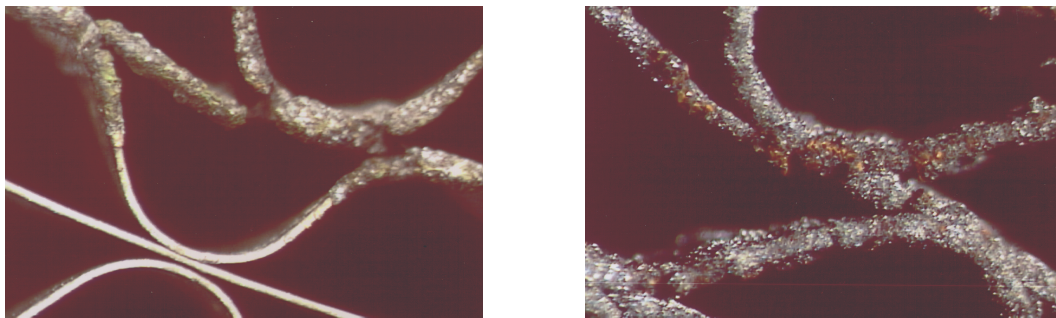


Bild 11. Mit MBF 50-Lotfolie belotete Probe nach 25 Stunden bei 1100°C (links), mit MBF 80-Lotvlies belotete Folie nach 25 Stunden bei 1100 °C (rechts)

4.4. ZUSAMMENFASSUNG

Keines der getesteten Lote in alternativer Form erfüllt die Anforderungen, die an eine Matrixlötung gestellt werden müssen.

- Beloten durch einfaches Eindrücken des Lotes in die Matrixstirnfläche nicht möglich
- Kein Ziehen in die Zwickel (Ausnahme: NB 30 Transfer Tape 0.127 mm)
- Beschädigung der Matrix durch herabtropfendes Lot bei Lotmengen ≥ 0.6 g/Stirnfläche
- Sehr hohe Lotkonzentration an den Matrixkanten \Rightarrow lokale Korrosion beim Einsatz hochborhaltiger Lote

5. KORROSIONSUNTERSUCHUNGEN

Bei der Verwendung dünnwandiger Folien in Metallsubstraten muss das Korrosionsverhalten der Folien besonders betrachtet werden. Dies kann durch eine Verringerung der Lotmenge pro cm² Trägerstirnfläche erzielt werden. Mit Hilfe hochborhaltiger Lote und dem damit verbundenen verbesserten Fließverhalten sollte erreicht werden, dass auf gelötete Folien ≤ 30 µm eine geringere Lotmenge aufgebracht werden muss und sich dadurch keine merkliche Korrosion im Lötbereich zeigt.

Lot	Lotkornfraktion		Borgehalt [Ma.-%]	Kleber	Lotaufnahme [g] ¹
NB 30	Standard	< 106 µm	-	Benzinkleber HTW-Kleber	0.51 0.52
NB 30-E1	Standard	< 106 µm	≈ 0.1	Benzinkleber	0.37
		< 75 µm		HTW-Kleber	0.34
	Sonder	< 63 µm < 45 µm		HTW-Kleber ²	0.37 0.30 0.27
EBP-2/M	Sonder	< 75 µm	0.58	HTW-Kleber ³	0.28
		< 63 µm			0.20
		< 45 µm			0.15
EBP-3/M	Standard	< 106 µm	1.16	Benzinkleber	0.48
		< 75 µm		HTW-Kleber	0.32
	Sonder	< 63 µm < 45 µm		HTW-Kleber ³	0.18 0.13 0.10

¹ Mittelwert aus jeweils drei Einzelwerten
² 5:1-verdünnter Leim; Trocknungstemperatur 85-90 °C
³ 20:1-verdünnter Leim; Trocknungstemperatur 120 °C

Bild 12. Eingesetzte Lote und Kleber

5.1. LOTMENGEN

Keine signifikanten Unterschiede in der aufgenommenen Lotmenge < 106 µm in Abhängigkeit vom Kleber (Streuungen zwischen Proben einer Serie sind z. T. deutlich größer als die Unterschiede zwischen den Mittelwerten zweier Serien)

Mit kleinerer Lotkornfraktion nimmt die aufgenommene Lotmenge ab. Die aufgenommene Lotmenge wird gleichzeitig sehr stark von der Leimverdünnung und den Trocknungsbedingungen bestimmt.

5.2. LÖTQUALITÄT, LÖTANBINDUNG

Lot/Kleber	Zelldeformationen/Folienbrüche	Lotverteilung über den Querschnitt	Lotfluß	Lötanbindung in 1.5 mm
NB 30, < 106 µm, HTW-Kleber	Deformierte Zellen im Bereich höherer Lotkonzentration; Folienbrüche (siehe Abb. 1)	Sehr inhomogen	Sehr mäßig; vergleichsweise viel Flankenbelotung	53.4 %
NB 30, < 106 µm, Benzinkleber	Einschnürungen und Folienbrüche in vielen Lötstellen (siehe Abb. 2)	Vergleichsweise homogen	Mäßig; wenig Flankenbelotung	89.3 %
NB 30-E1, < 106 µm, HTW-Kleber	Deformationen und Folienumklappungen; keine erkennbaren Folienbrüche	Inhomogen	Mäßig; teilweise Flankenbelotung	45.9 %
NB 30-E1, < 75 µm, HTW-Kleber	Keine erkennbaren Zelldeformationen; vereinzelte Folienbrüche (Trägerrand)	Sehr inhomogen	Mäßig; wenig Flankenbelotung	42.7 %
NB 30-E1, < 63 µm, HTW-Kleber	Keine erkennbaren Zelldeformationen; keine Folienbrüche	Inhomogen	Mäßig bis gut; wenig Flankenbelotung	63.4 %
NB 30-E1, < 45 µm, HTW-Kleber	Keine erkennbaren Zelldeformationen; keine Folienbrüche	Inhomogen	Mäßig; wenig Flankenbelotung	38.2 %
NB 30-E1, < 106 µm, Benzinkleber	Leichte Zelldeformationen; keine Folienbrüche	Sehr inhomogen	Mäßig; wenig Flankenbelotung	70.9 %
EBP-2/M, < 75 µm, HTW-Kleber	Zelldeformationen im Bereich des Trägerrandes; viele Folienbrüche; sehr viele Einschnürungen	Vergleichsweise homogen	Gut; keine Flankenbelotung	91.3 %
EBP-2/M, < 63 µm, HTW-Kleber	Keine erkennbaren Zelldeformationen; viele Folienbrüche und Einschnürungen	Inhomogen	Gut; vereinzelt Flankenbelotung	60.8 %
EBP-2/M, < 45 µm, HTW-Kleber	Wenig Zelldeformationen; vergleichsweise viele Brüche in Lötstellen	Leicht inhomogen	Mäßig bis gut; keine Flankenbelotung	66.2 %
EBP-3/M, < 106 µm, HTW-Kleber	Kaum Zelldeformationen; viele Folienbrüche in Lötstellen	Relativ homogen	Gut; keine Flankenbelotung (siehe Abb. 3)	84.2 %
EBP-3/M, < 75 µm, HTW-Kleber	Keine Zelldeformationen; viele Folienbrüche und Einschnürungen im Lötbereich	Sehr inhomogen	Mäßig bis gut; keine Flankenbelotung	28.9 %
EBP-3/M, < 63 µm, HTW-Kleber	Vereinzelte Zelldeformationen im Bereich des Trägerrandes; keine Folienbrüche, vereinzelte Einschnürungen	Sehr inhomogen	Mäßig; keine Flankenbelotung	30.8 %
EBP-3/M, < 45 µm, HTW-Kleber	Keine erkennbaren Zelldeformationen; vereinzelte Brüche in Lötstellen	Sehr inhomogen	Mäßig; keine Flankenbelotung	23.6 %
EBP-3/M, < 106 µm, Benzinkleber	Zelldeformationen; viele Folienbrüche im Lötbereich (meist mit Einschnürung)	Homogen	Gut; wenig Flankenbelotung	99.3 %

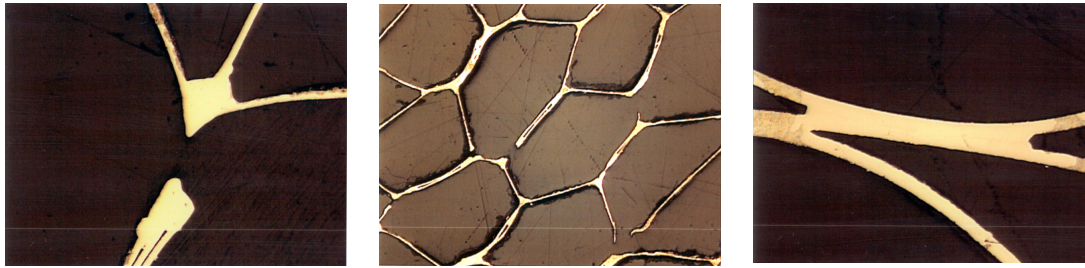


Bild 13. Gebrochene Folie mit Einschnürung in einer NB 30-Lötstelle (links), Folienbrüche in NB 30-Lötungen (mitte); EBP-3/M-Lötstelle (rechts)

5.2.1 Korrosionsverhalten gelötete Stirnflächen

Zur Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit des gelöteten Matrixbereiches wurden die Stirnflächen der Wickelkörper nach Auslagerung über 50 Stunden bei 1100°C an Luft untersucht.

Alle Träger zeigten die durch Al-Verarmung in den an die Lötstelle angrenzenden Matrixbereichen hervorgerufene verstärkte Korrosion.

Lot	Korngrößenfraktion	Anteil vollständig korrodierter Bereiche	
		Lötstellen mit Anbindung	Belotete Matrix ohne Anbindung
NB 30-E1	< 75 µm	≈ 4 %	≈ 7 %
	< 63 µm	≈ 6 %	≈ 2 %
	< 45 µm	≈ 12 %	≈ 1 %

Kein Rückgang der Korrosion mit abnehmender Lotkornfraktion

⇒ Mögliche Ursache: Vergleichsweise große Lotmengen durch von den hochborhaltigen Loten abweichende Beleimbedingungen

EBP-2/M	< 75 µm	≈ 16 %	≈ 56 %
	< 63 µm	≈ 22 %	≈ 6 %
	< 43 µm	≈ 7 %	≈ 8 %
EBP-3/M	< 75 µm	≈ 37 %	≈ 16 %
	< 63 µm	≈ 24 %	≈ 24 %
	< 45 µm	≈ 21 %	≈ 2 %

Im Vergleich zum Standardlot stärker fortgeschrittene Korrosion nach 50 h. Stärkere Korrosion der Lötstellen selbst.

⇒ Mögliche Ursache: Zu starke Erosion des Grundwerkstoffes durch zu hohe Löttemperatur

Tendenzielle Abnahme der Korrosion mit abnehmender Lotkornfraktion/Lotmenge. Im Vergleich zum Standardlot stärker fortgeschrittene Korrosion nach 50 h. Stärkere Korrosion der Lötstellen selbst.

⇒ Mögliche Ursache: Zu starke Erosion des Grundwerkstoffes durch zu hohe Löttemperatur

Tendenzielle Abnahme der Korrosion mit abnehmender Lotkornfraktion/Lotmenge.

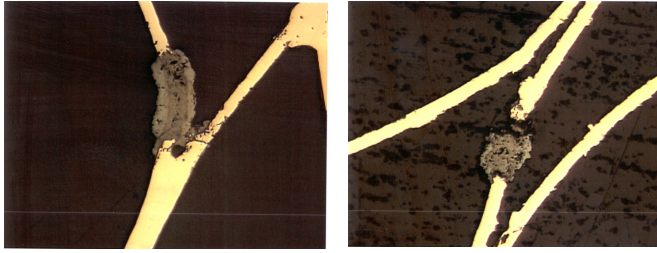


Bild 14. Korrosion im Bereich einer Lötstelle (links), Korrosion im Bereich einer beloteten Stelle (rechts)

5.2.2 Gesamter Träger

Die Auslagerungsergebnisse für die verschiedenen Lote sind nachfolgend dargestellt.

Auf Grund der vergleichsweise geringen Korrosionsbeständigkeit des eingesetzten Folienmaterials sind signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Loten nicht feststellbar (Ausnahme: NB 30-E1/Benzinkleber mit oxidativem Durchbruch nach 150 Stunden).

Allgemein kann folgendes festgestellt werden:

- Die Verringerung der mittleren Lotkorngröße bewirkt keine Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit der gelöteten Teile.
- Die vergleichsweise guten Ergebnisse mit EBP-3/M lassen sich mit der Tatsache erklären, dass die betreffenden Teile nicht im Laborlötöfen gelötet wurden.

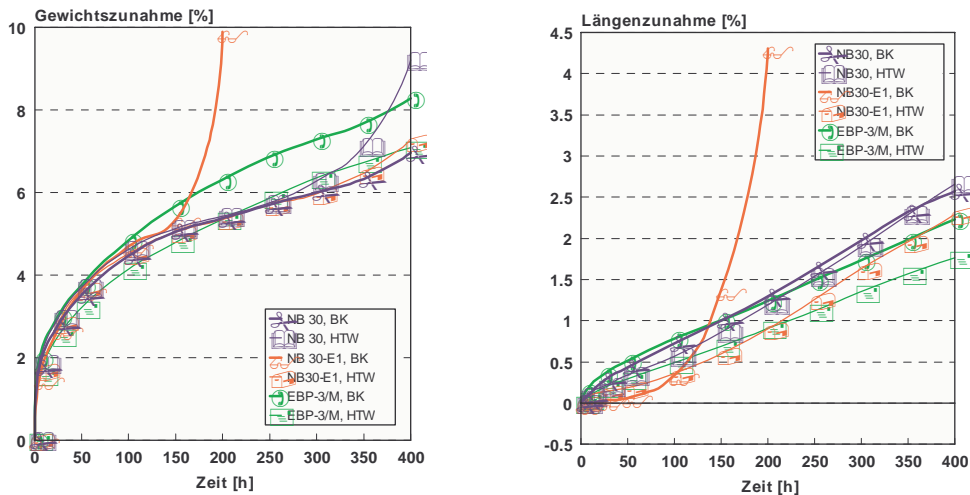


Bild 15. Oxidationsbeständigkeit und Längenänderung von gelöteten 25 µm-Wickelkörpern mit verschiedenen Loten < 106 µm

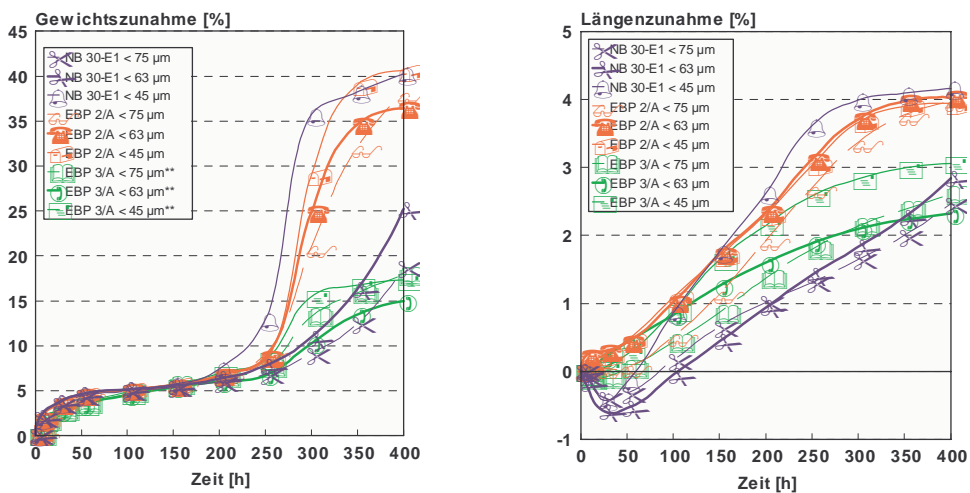


Bild 16. Oxidationsbeständigkeit und Längenänderung von mit verschiedenen Loten (Sonderlot-Kornfraktionen) gelöteten 25 µm-Wickelkörpern

5.2.3 Zusammenfassung

Die Verringerung der Korrosionsanfälligkeit der gelöteten Bereiche dünner Folien lässt sich nach vorliegenden Ergebnissen mit dem Einsatz von Loten mit besserer Fließfähigkeit **nicht** realisieren, da die Lotmenge im Vergleich zum Standardlot mit der herkömmlichen Belotung nicht ausreichend gesenkt werden kann.

Die Verringerung der mittleren Lotkorngröße verringert zwar tendenziell die Korrosionsanfälligkeit der Lötstellen, verhindert sie aber nicht.

Die Konzentration an Folienbrüchen und Einschnürungen in den Lötstellen bei mit hochborhaltigen Loten gelöteten Träger lässt sich vermutlich durch Senken der Löttemperatur verringern.

6. VERBESSERUNG DER KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT DES GELÖTETEN MATRIXBEREICHES

6.1. UNTERSUCHUNG VON COBALT-BASISLOTEN

Folien mit Dicken $\leq 0.03\text{mm}$ zeigen eine durch Al-Ni-Legierungsbildung und daraus resultierende Al-Verarmung hervorgerufene deutlich verminderte Korrosionsbeständigkeit im Lötbereich. Eine theoretische Möglichkeit, die Korrosionsbeständigkeit der gelöteten Matrix zu verbessern, besteht darin, das legierungsbildende Nickel im Lot durch Metalle zu ersetzen, die mit Aluminium keine stabilen intermetallischen Legierungen bilden.

Ein kommerziell erhältliches Lot, das diese Bedingung erfüllen könnte, ist das Cobalt-Basislot Lot A.

Eigenschaft	Lot A (Cobalt-Basislot)		Lot B	
Zusammensetzung [Ma.-%] (Auswahl)	Cr	19	Cr	17 – 18
	Si	8	Si	8.5 – 9.5
	C	0.4	C	< 0.04
	B	0.8	B	0.09 – 0.14
	Ni	17	Ni	Rest
	Co	Rest	Co	< 0.1
Solidus-Liquidus-Bereich [°C]	1045 - 1140		1080 - 1135	
Empfohlene Löttemperatur [°C]	1175		1190	
Oxidationsbeständigkeit und mechanische Eigenschaften	Übereinstimmend			
Eingesetzte Lotkornfraktion	$\leq 106 \mu\text{m}$		$\leq 75 \mu\text{m}$	

Wickelkörper ($\varnothing 38 \times 74.5 \text{ mm}$, 400cps, 0.025 mm) wurden einseitig beleimt und belotet sowie in einem der Fertigungsöfen bei 1190 °C gelötet. Es wurden Untersuchungen an diesen Trägern durchgeführt, die nachfolgende Ergebnisse zeigten.

6.1.1 Lötqualität

Eigenschaft	Lot A	Lot B
Mittlere Lotaufnahme	$0.31 \pm 0.05 \text{ g}$	$0.30 \pm 0.10 \text{ g}$
Mittlere Lötanbindung	54.1 %	63.7 %
Lotverteilung über den Trägerquerschnitt	Inhomogen	Leicht inhomogen
Lotfluss	Mäßig bis schlecht	Mäßig bis schlecht
Zelldeformationen, Folienbrüche	Verjüngungen in Lötstellen, vereinzelt Folienbrüche am Trägerrand	Vereinzelte Zelldeformationen am Trägerrand
Besonderheiten	Starkes Schrumpfen der gelöteten Stirnfläche; große Randspalte	-

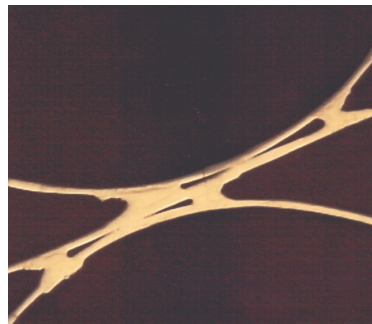
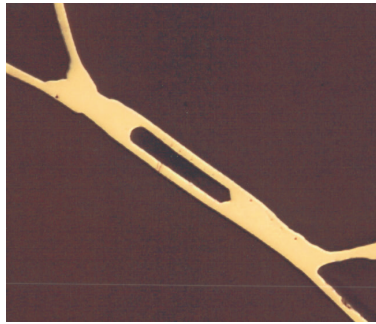


Bild 17. Lötstellen; a) 25 μm + Lot A

b) 25 μm + Lot B.

6.1.2 Elementverteilung in den Lötstellen

Die Verteilung der Elemente Aluminium, Cobalt und Nickel ist in den folgenden Bildern für das Cobalt-Basislot Lot A und das Nickel-Basislot Lot B angegeben.

Es ist deutlich zu erkennen, dass in den Lot A -Lötstellen im Gegensatz zum Standardlot keine Anreicherung von Aluminium im Vergleich zum Folienwerkstoff auftritt. Auch die Al-Abreicherung in Folienbereichen in unmittelbarer Nähe von Lötstellen ist bei Einsatz von Lot A nicht so ausgeprägt.

Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass Cobalt im Gegensatz zu Nickel keine stabilen intermetallischen Legierungen mit Aluminium bildet.

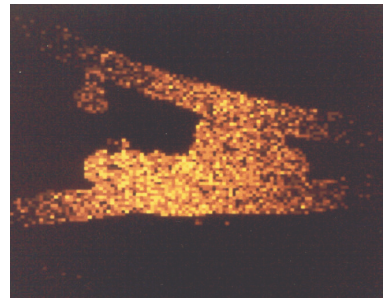
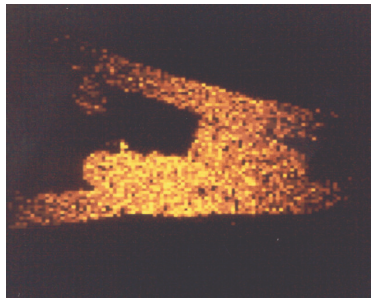
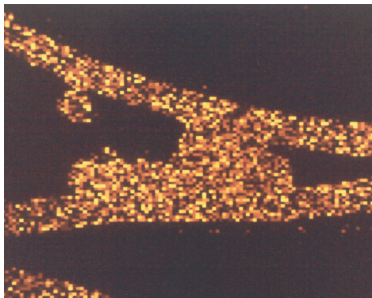


Bild 18. Elementverteilung in einer Lot A -Lötstelle

a) Aluminium-Verteilung

b) Cobalt-Verteilung

c) Nickel-Verteilung

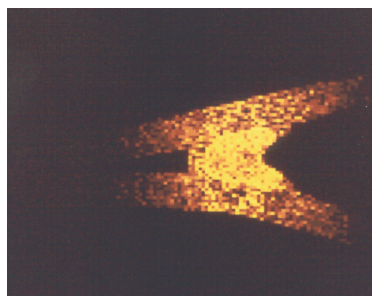
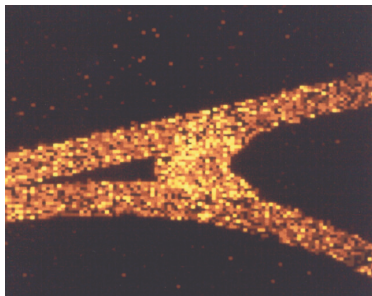


Bild 19. Elementverteilung in einer Lot B -Lötstelle

a) Aluminium-Verteilung

b) Nickel-Verteilung

6.1.3 Korrosionsbeständigkeit

Die Ergebnisse der Auslagerung 1100 °C der mit Lot A gelöteten Wickelkörper aus 25 μm -Standardfolie sind in nachfolgendem Bild dargestellt. Zum Vergleich sind Kurven für mit Standardlot < 75 μm gelötete Teile aus einem anderen Programm mit aufgenommen worden. Die Kurven belegen, dass es letztendlich keinen wesentlichen Unterschied in der Korrosionsbeständigkeit zwischen beiden Loten gibt, wobei die Gewichtszunahme über die Zeit einen qualitativ anderen Verlauf zeigt. Die mit Lot A gelöteten Teile schrumpfen in den ersten 25 bis 50 Stunden der Auslagerung deutlich weniger als die mit Standardlot gelöteten Wickelkörper.

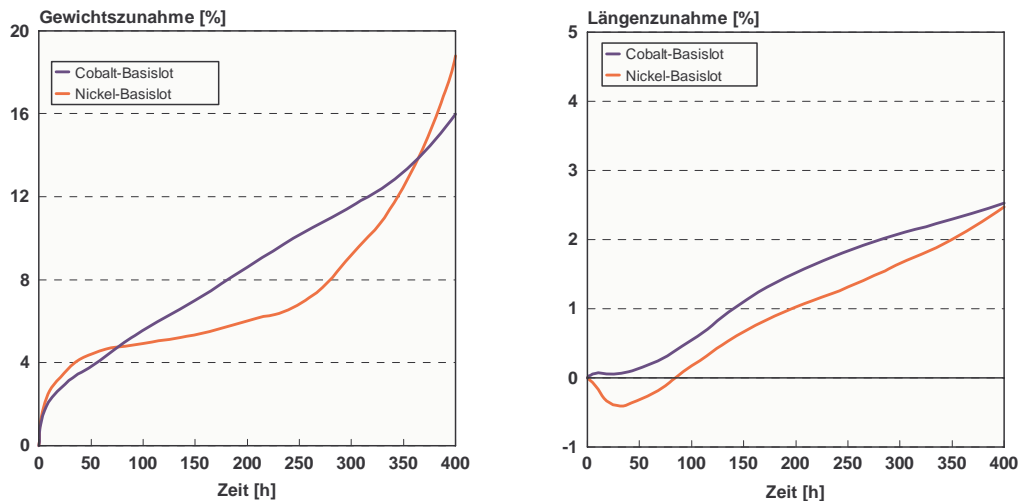


Bild 20. Ergebnisse der Auslagerung von 25 µm-Folie bei 1100 °C an Luft für 400 Stunden
a) Gewichtszunahme b) Längenwachstum

6.1.4 Lichtmikroskopische Untersuchung der gelöteten Matrix

Bedingungen: Probenpräparation nach 50 Stunden bei 1100 °C an Luft

Das Bild zeigt den typischen Verlauf der Korrosion an Lot A -gelöteten Trägern. Im Gegensatz zum Standardlot erfolgt der oxidative Durchbruch in der Lötstelle selbst und nicht in Al-verarmten Folienbereichen in Lötstellennähe. Nach 50 Stunden bei 1100°C sind nahezu 100 % der Lötstellen betroffen.

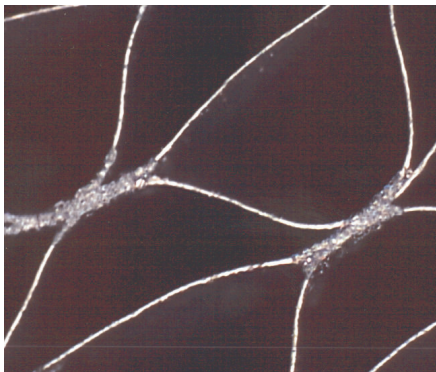


Bild 21. Lot A -Lötstellen nach 50 Stunden bei 1100 °C

6.1.5 Zusammenfassung

Co-Basislot ist wegen des größeren Solidus-Liquidus-Bereiches schwerer zu verarbeiten. Speziell auf Folien mit höheren Aluminium-Gehalten sind Fließverhalten und Lötanbindung schlechter als bei Einsatz von Standardlot.

Die von Ni-Basisloten bekannte Al-Ni-Legierungsbildung findet mit Cobalt in deutlich geringerem Ausmaß statt.

Die Auslagerungsergebnisse zeigen, dass sich Korrosionsbeständigkeit und Formstabilität bei Einsatz von Co-Loten verschlechtern.

Die Korrosionsbeständigkeit des gelöteten Matrixbereiches verbessert sich durch den Einsatz von Lot A nicht.

Die im Vergleich zu Ni-Basisloten geringere Al-Abreicherung in Folienbereichen nahe Lötstellen scheint primär den Effekt hervorzurufen, dass anstelle der lotnahen Matrixbereiche die Lötstelle selbst weniger korrosionsresistent ist. Weitere Versuche mit Co-Basisloten sind nicht geplant.

7. ALTERNATIVE VERFAHREN ZUR MINIMIERUNG UND VERGLEICHMÄßIGUNG DER LOTMENGE

7.1. FERTIGUNGSVERSUCHE MIT HOT-MELT-KLEBERN

Ziel der Untersuchung ist eine gleichmäßigere Lotverteilung über dem Matrixquerschnitt und eine Minimierung der in den Träger eingebrachte Lotmenge. Das Auftragen eines Klebers erfolgt mittels Auftragsrad auf den ersten 2 mm der Welllage, dabei wird der Kleber auf den Wellspitzen positioniert. Nach dem Auftragsrad wird die Klebeschicht abgestreift, um die Menge zu reduzieren.

Erforderliche Klebereigenschaften

Hohe Temperaturen Flüssig und klebend
Raumtemperatur Fest und nicht klebend (Gewährleistung der Wickelfähigkeit der Lagenpakete)

Sonstige Vorgaben

Geringe Schichtdicke des Klebers
Geringe Erstarrungszeit
Kein Verlaufen über den Zellquerschnitt im erwärmten Zustand
Gute Lotaufnahme, gute Haftung des Lotpulvers
Rückstandsfreie thermische Zersetzung während des Lötens (keine Kontamination von Ofenräumen und Pumpständen)

Fertigungstests

Tests mit vier Sublosen unterschiedlicher Größe
Ø 47 × 60 mm, 250cps, 0.05 mm Sublose mit 200, 500, 1000 und 2000 Teilen

Kleberauftrag

Liniengeschwindigkeit 10 m/min
Geschwindigkeit der Auftragsräder 10 m/min
Auftragsdicke (Rakelabstand) 0.2 mm
Breite des Auftrags 2 mm
Kleber variabel
Verarbeitungstemperatur 180 °C
Temperatur des Abstreifers 180 °C

7.1.1 Verarbeitbarkeit verschiedener Kleber

	Kleber A	Kleber B	Kleber C
Verarbeitungstemperatur	180 °C	ca. 200 °C	140 °C
Kleberverarbeitbarkeit	gut	Schlecht - Hochviskos - Starke Oxidation	gut
Matrixverarbeitbarkeit (Gleiten der Folien)	schlecht	gut	gut
Entfettungsbedingungen, Beloten	180 °C, 3 Minuten - Gute Entfettung - Starkes Verlaufen des Klebers (Flankenbelotung)	180 °C, 3 Minuten - Gute Entfettung - Kleberbeschichtung i.O.	140 °C, 3 Minuten - Schlechte Entfettung (Flankenbelotung) - Starkes Verlaufen des Klebers

7.1.2 Lötanbindung

- Keine Auffälligkeiten bei den Sublosen mit 200 und 500 Teilen
- Verlängerung des Lötzyklus bei den Sublosen mit 1000 und 2000 Teilen durch verlängerte Abpumpzeit der Heizkammer, verursacht durch starke Gasentwicklung
- Abnahme der Lötanbindungen mit zunehmender Sublosgröße.

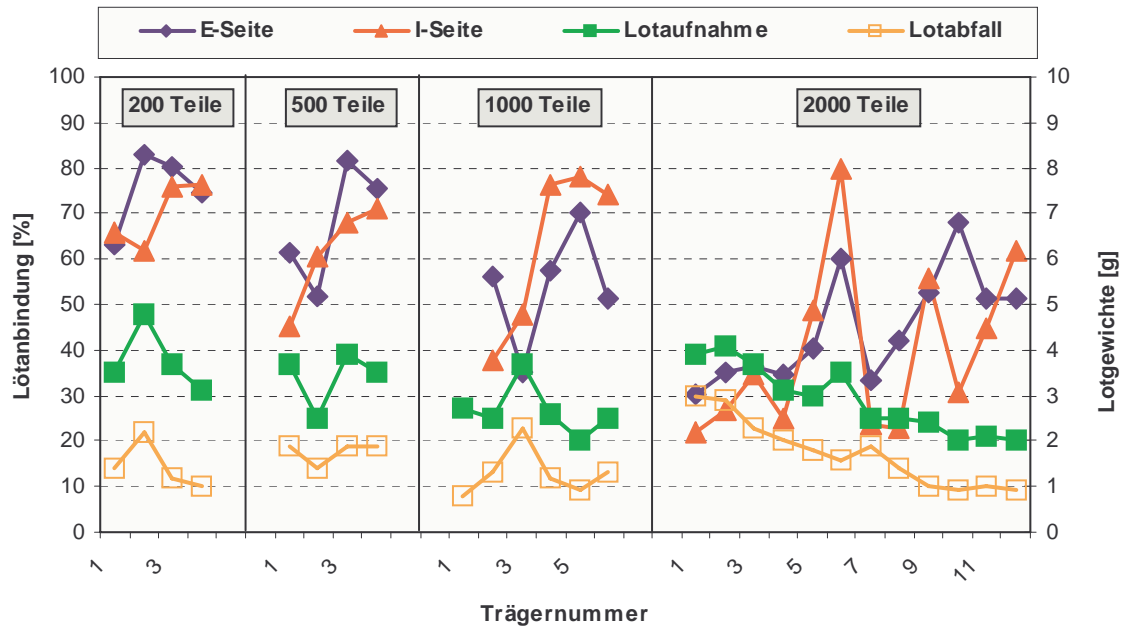


Bild 22. Lötanbindungen, Lotgewichte und Lotabfall für die vier Sublose

7.1.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse mit den großen Sublosen zeigen, dass die Kleberschicht für einen störungsfreien Betrieb der Öfen und Pumpstände zu dick ist. Eine Abschätzung der maximal zulässigen Kleberschichtdicke wird in nachfolgender Tabelle vorgenommen.

Träger	Ø 47 x 60 mm / 250cps / 0.05 mm			
Anzahl/Lötcharge	200	500	1000	2000
Leimmenge [g]				
- pro Träger	0.429	0.545	0.381	0.355
- pro Charge	86	273	381	710
Leimauftrag [mg/cm ²]	16	20	14	13
Schichtdicke [µm]	172	216	153	143
Anmerkungen	Keine Auffälligkeiten in Bezug auf Endvakuum und Lötdauer		Durch starke Ausgasung verlängerte Lötdauer und Kontamination der Ofenauskleidung sowie der Rohrleitungen und Pumpstände	
Schlussfolgerungen	Pro Lötcharge maximal zulässige Menge Kleber < 300 g Die geforderte Dicke der Klebeschicht von ≤16µm kann mit Hot-Melt-Klebern <u>nicht</u> realisiert werden.			

8. VERBESSERUNG DER KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT DES GELÖTETEN MATRIXBEREICHES

8.1. UNTERSUCHUNG VON ALUMINIUMHALTIGEN NI-BASISLOTEN

Geringe Al-Konzentrationen im Lot können eventuell die im belöteten Teil der Matrix auftretende Al-Verarmung kompensieren und auf diese Weise die Korrosionsbeständigkeit der Lötstellen von Folien mit Dicken ≤ 30 µm erhöhen.

Folgende Lote wurden in der Kornfraktion 36 – 75 µm zur Verfügung gestellt:

- E 1987 mit einem Al-Gehalt von ca. 0.26 Masse-%
- E 1989 mit einem Al-Gehalt von ca. 0.69 Masse-%

Getestet wurden diese Lote im Vergleich zu einem Standardlot NB 30-E1. Für diese Tests wurden Wickelkörper der Abmessungen Ø 38 × 74.5 mm, 400cps, 25 µm Standardfolie (5.6 Masse-% Al) und 25 µm High-Tech-Folie (7.3 Masse-% Al) eingesetzt. Die Testschwerpunkte waren im einzelnen:

- Lotaufnahme, Lötanbindung
- Korrosionsbeständigkeit des Trägers insgesamt sowie speziell der Lötstellen

8.1.1 Ergebnisse

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zu Lotaufnahme und Lötanbindung in Abhängigkeit vom Lot und der eingesetzten Folie enthält nachfolgende Tabelle.

Lot	Lotaufnahme [g]		Lötanbindung [%]	
	Standard	High Tech	Standard	High Tech
E 1987	1.17	0.87	93.7	48.1
E 1989	1.07	0.90	88.6	45.1
Standard	1.07	0.90	93.6	59.1

Die High-Tech-Folie mit höherem Al-Gehalt zeigt eine geringere Lotaufnahme und deutlich schlechtere Lötanbindungen als das Standardfolienmaterial.

Die Lötanbindung nimmt auch mit steigendem Al-Gehalt des Lotes leicht ab. Der Einfluss der Al-Konzentration in der Folie überwiegt aber bei weitem. Zur Ermittlung der Korrosionsbeständigkeit des Lötbereiches wurde der Anteil an total korrodierten Lötstellen nach 50 und nach 100 Stunden bei 1100 °C bestimmt.

Lot	Vollständig korrodierte Lötstellen Standardfolie [%]		Vollständig korrodierte Lötstellen High-Tech-Folie [%]	
	50 h	100 h	50 h	100 h
	E 1987: 0.27 Masse-% Al	17.3	31.5	0.6
E 1989: 0.66 Masse-% Al	18.0	32.3	0.0	0.0
Standard	26.2	30.1	3.5	0.6

Bild 23. Korrosionsbeständigkeit des Lötbereiches

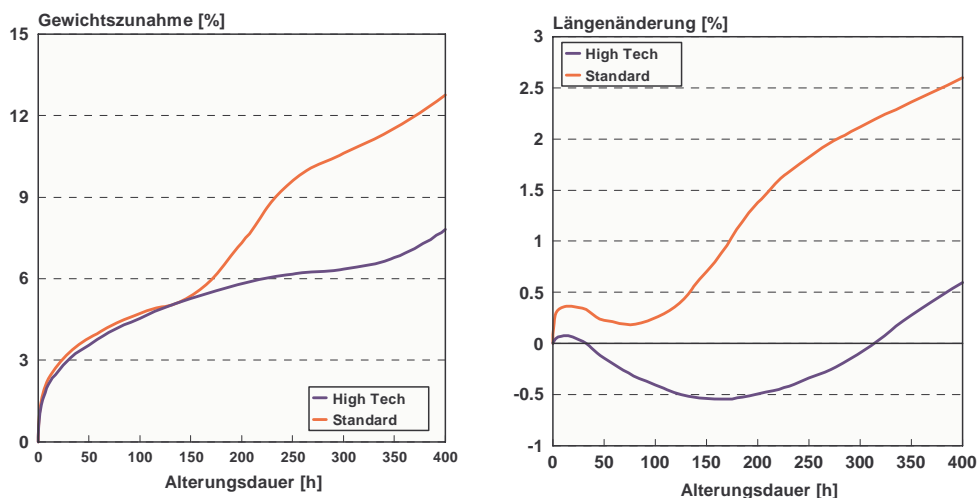


Bild 24. Korrosionsbeständigkeit der verschiedenen Folienmaterialien

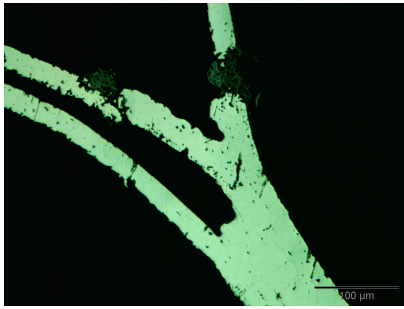


Bild 25. Typische Lötstelle mit vollständig korrodierter Folie im Lötbereich

Der Einfluss der verschiedenen Lote auf die Korrosionsbeständigkeit der Folien ist nahezu vernachlässigbar. Ausschlaggebend für die deutlich bessere Korrosionsbeständigkeit der High-Tech-Folie ist der höhere Al-Gehalt dieses Materials. Der Einsatz von Al-haltigen Loten mit Standardfolie verlangsamt das Fortschreiten der Korrosion im Lötbereich.

9. DAUERHALTBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

9.1. STANDARDFOLIE

--- Vertraulich ---

9.1.1 Standardlötung

--- Vertraulich ---

9.1.2 Modifizierte Lötung

--- Vertraulich ---

9.2. ALTERNATIVE FOLIENMATERIALIEN

--- Vertraulich ---

10. EMISSIONSMESSUNGEN

--- Vertraulich ---

11. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE

Die Verringerung der thermischen Masse eines Katalysators führt zur Verringerung der Kaltstartemissionen durch schnelleres Aufheizen. Die thermische Masse setzt sich zusammen aus Beschichtungsgewicht und dem Gewicht des Trägers. Das Trägergewicht kann durch den Einsatz von Metallfolien mit Dicken $\leq 30 \mu\text{m}$ gesenkt werden.

Verarbeitung und Einsatz von Folien dieser Dicke stellen zusätzliche Anforderungen an Material und Fertigungsprozess, von denen die folgenden Schwerpunkte im Rahmen dieses Teilprojekts untersucht wurden. Mit dem Ziel der Verringerung der Korrosion speziell im Lötbereich wurden alternative Lote und Belotungstechniken getestet. Als erfolgversprechend erwies sich dabei der Einsatz von Folienmaterial mit höheren Aluminiumgehalten.

Mit der Verringerung des Folienquerschnitts rückt die Dauerhaltbarkeit des Trägers zunehmend in den Mittelpunkt der Auslegung. Die im Rahmen dieses Teilprojekts durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die Dauerhaltbarkeit in Motorprüfstandsläufen durch modifizierte Designs deutlich gesteigert werden kann. Getestet wurden u. a. verschiedene Matrixlötungen sowie verschiedene Varianten der Mantel-Matrix-Anbindung. Als günstig für das Thermoschockverhalten erwies sich die Beschränkung der Matrixlötung auf die Gaseintrittsseite bei gleichzeitiger Verhinderung von Verbindungen außerhalb dieses Bereichs.

Parallel zur Designoptimierung wurde mit der Arbeit an alternativen Folienwerkstoffen höherer Festigkeit begonnen, die auch über den Rahmen der Förderung hinaus fortgesetzt wird.

D. Interner Strömungsausgleich

Die Teilprojekte „interner Strömungsausgleich und „Verbesserung des Massentransportes“ sind sich in mancher Hinsicht sehr ähnlich. In der Literaturrecherche, der theoretischen Auslegung und der Versuchsdurchführung bestehen daher Parallelen.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

1. LITERATURRECHERCHE UND THEORETISCHE AUSLEGUNG

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Die Effektivität der Schadstoffumsetzung eines Katalysators, ist von der Geschwindigkeit der chemischen Reaktion und des Massentransportes zu und von der katalytischen Oberfläche abhängig. Diese Effekte werden wiederum von der Temperatur bestimmt. Während der "light-off-Phase" ist die Gastemperatur relativ niedrig und die gesamte Verbrennung wird durch die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion an der Katalysatoroberfläche bestimmt. Massen- und Wärmetransport zwischen der Katalysatoroberfläche und dem umgebenden Gas laufen im Vergleich zur chemischen Reaktion schnell ab. Im warmen Betriebszustand ist das Verhalten genau anders herum. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist dann der Massentransport des Gases zur Katalysatoroberfläche.

Durch Beeinflussung der Gasströmung in der Matrix (Umleitung, Turbulenz) kann eine anhaltende Vermischung der Kern- und Randströmung erzeugt werden, die eine Vermischung der Abgaskomponenten bewirkt und den Massentransport zur Wand hin verbessert.

Katalysatoren mit Metallfolie besitzen diesbezüglich ein hohes Potential, da sich Kanalstrukturen durch entsprechende Walzvorrichtungen verwirklichen lassen.

Fa. Behr hat diesbezüglich Entwicklungsarbeit geleistet [1], die von Fa. Emitec weitergeführt werden. Folgende Modelle wurden zur Verbesserung des Strömungsausgleichs angedacht [2, 3]:

1. **SQ-Design**, wiederholtes Aufspalten der Strömung in Katalysatorkanäle zur Erzeugung von Turbulenzen beim Kanaleintritt, Abbildung 1.1.

Gelöscht: M

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Vorteil: Durch inneren Strömungsausgleich sowie hoher spezifischer Wirksamkeit kann die Zelldichte halbiert werden, was zu einer Senkung von Abgasgegendruck und Gewicht führt. Zudem können die Kosten durch Materialeinsparung (Matrixfolie und Beschichtung) reduziert werden.

2. **LS-Design** (Longitudinally Structured Corrugation), Turbulenz wird durch wiederholten Kanaleintritt durch partielle Gegenwellung in der Welllage des Katalysators erreicht, Abbildung 1.2.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Vorteil: Mit Hilfe der modifizierten Zellkanalstruktur kann der Differenzdruck reduziert werden. Zudem wird der Massentransport durch heftige Strömungsturbulenzen verbessert, wobei diese nur auf einer Seite der LS-Folie auftreten.

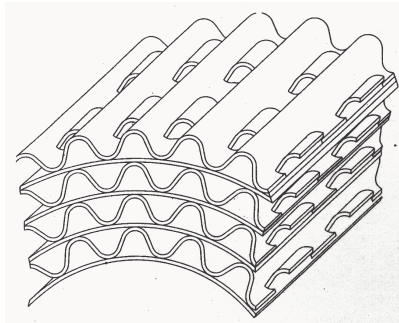
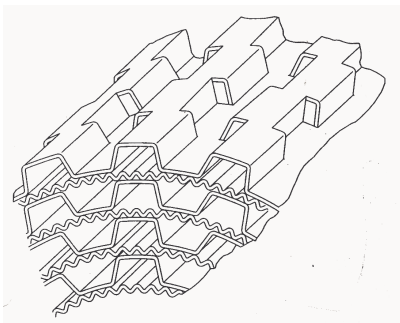


Bild 1. SQ-Design

LS-Design

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Gelöscht: MS

Formatiert

Formatiert

Ein Problem dieser Träger mit modifizierter Matrixfolie ist die Beschichtbarkeit. Weder durch Tauch- noch durch die „Durchströmungs-Methode“ kann derzeit eine feine homogene Beschichtung garantiert werden. Auch wenn die Träger nachträglich mit Luft durchblasen werden, kann es bei diesen exotischen Strukturen zu undefinierten oder ungleichmäßigen Strömungen kommen. Zudem ist die mechanische und thermische Stabilität dieser Träger noch zu klären.

- [1] Nonnemann, M.: "Neue Metallträger für Abgaskatalysatoren mit erhöhter Aktivität und innerem Strömungsausgleich", ATZ 91 (1989) 4, S.185-192
- [2] Maus, M., Swars, H., Brück, R., Kaiser, F.W.: Emitec GmbH, Held, W., Rohlf, M.: VW AG: "Improved Cell Design for increased catalytic conversion efficiency", SAE 940932
- [3] Brück, R., Diringer, J., Martin, U., Maus, W.: Emitec GmbH: "Flow improved efficiency by new cell structures in metallic substrates", SAE 950788

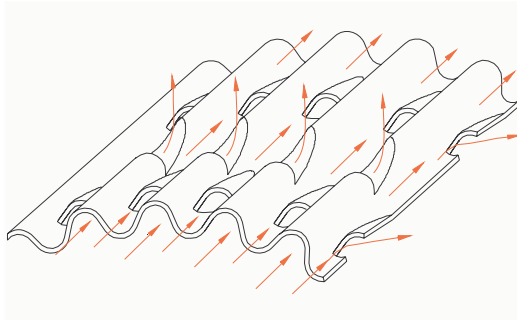
Aus den theoretischen Überlegungen geht hervor, dass ein Design entwickelt werden muss, das eine homogene katalytische Beschichtung ermöglicht, einen nahezu neutralen Druckverlust gewährleistet, den Dauerhaltbarkeitskriterien entspricht und Emissionsvorteile erzielt.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

2. MODELLUNTERSUCHUNGEN

2.1. KATALYTISCHER MISCHERAUFBAU

Als Grundlage für den Aufbau eines katalytischen Mischers dient der Standardaufbau eines Metallkatalysators. Durch eine Modifizierung der gewellten Folie, wird die Strömung durch sogenannte Schaufeln (Leitbleche) so umgelenkt, dass es zu lokalen Vermischungen mit Nachbarzellen kommt. Die Vermischung erfolgt sowohl in der Ebene (gleiche Wellfolie) als auch zwischen den Ebenen (benachbarte Wellfolie).



Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bild 2. Mischprinzip

Die Modifizierung der Welllagen besteht darin, dass neben der Erstellung der Wellgeometrie, eine „Schaufelform“ zusätzlich eingepreßt wird.

Mehrere Welllagen werden zu einem Paket gestapelt und zu einer Matrix gewickelt. Zwischen den Welllagen darf sich keine geschlossene Glattlage befinden, da somit ein Mischeffekt zwischen den Welllagen behindert sein würde.

Um eine ausreichende Stabilität des Katalysators zu gewährleisten können als Glattlagenersatz folgendes verwendet werden:

- a. Glattlagenstreifen am Ein- bzw. Austritt
- b. Streckmetallfolie/ Lochfolie
- c. Keine Lagen (Stabilität durch Welllagen)

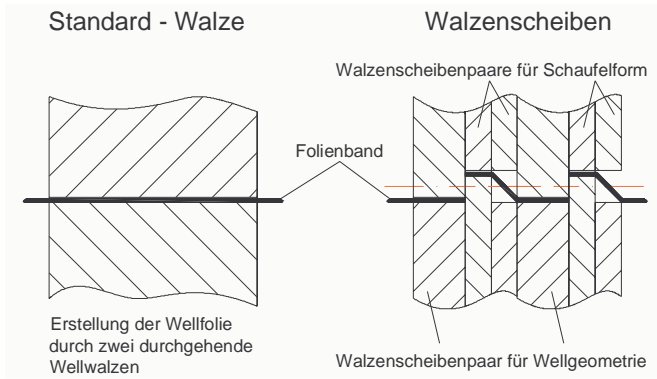
Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

2.2. WERKZEUG

Zur Herstellung einer Wellfolie mit eingepreßten Leitblechen muss das Werkzeug (Wellwalzen) modifiziert werden. Die Walzen bestehen aus einzelnen Zahnscheiben, wobei jedes Scheibenpaar eine spezielle Funktion hat:

- Erstellung der Wellgeometrie
- Erstellung der Schaufel (Leitblech)

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen



← **Formatiert:** Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bild 3. Aufbau Werkzeug

2.3. MISCHEFFEKT

Der Mischer basiert auf dem Prinzip, dass eine Schaufel einen Teil der Strömung in die benachbarten Zellen (gleiche Ebene) und in die nächste Ebene umlenkt.

Durch die Vorgabe der Struktur (Anordnung der Welllagen zueinander) und der Anzahl der Wechsellmöglichkeiten, ergibt sich unter der Annahme, dass in einer Zelle eingedüst wird, eine theoretische Anzahl von Zellen, welche an einer Vermischung teilnehmen.

Das Bildungsgesetz der am Mischeffekt beteiligten Zellen lautet:

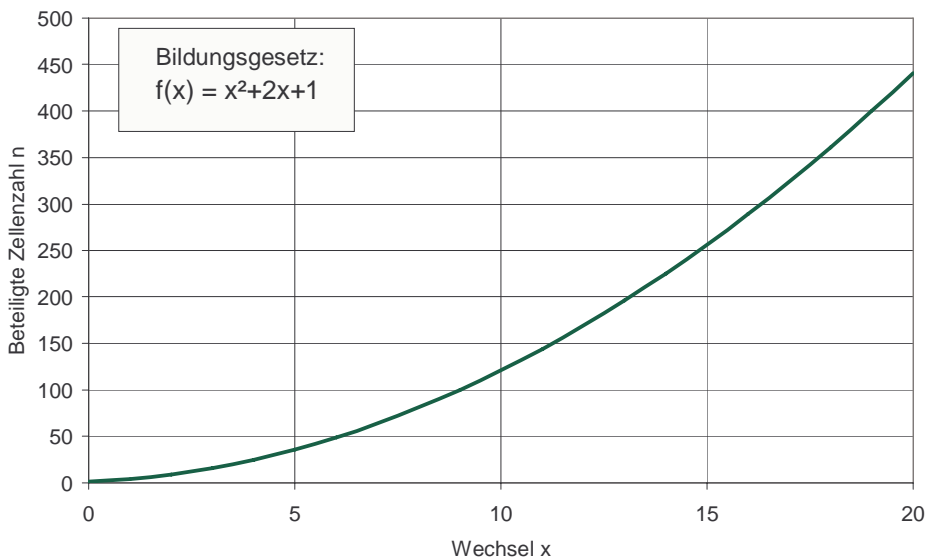


Bild 4. Bildungsgesetz Mischer: Die Formel gilt nur für einen theoretisch optimalen Matrixaufbau und ist unabhängig vom Katalysatordurchmesser und Zelldichte.

Formatiert
Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen
Formatiert
Formatiert
Formatiert

Soll eine komplette Vermischung (Zentrum – Rand) über den gesamten Katquerschnitt erfolgen, so müssen radial alle Zellen am Mischvorgang beteiligt sein.

Da ein Katalysatorträger aus einer Vielzahl gestapelter Welllagen besteht, benötigt man für solch eine Komplettdurchmischung (von Zentrum bis zum Rand) für jeden „Welllagenwechsel“ eine Schaufel. Die Mischeffektivität (bezogen auf den Radius) ist somit abhängig von:

- Katalysatordurchmesser
- Wellhöhe (cps)

← **Formatiert:** Nummerierung und Aufzählungszeichen

Das folgende Beispiel zeigt, dass bei einem Katalysator mit vorgegebenem Durchmesser eine Erhöhung der Zellenanzahl, eine Erhöhung der Kanalwechsel bedeutet wenn der gleiche Durchmischungsgrad erreicht werden soll. Betrachtet man einen Kat mit einer Zelldichte von 100 cps,

so benötigt man 15 Wechsel für eine Komplettdurchmischung was eine Katlänge von 150mm (5x10mm) erfordert. Ein 800 cpsi Träger mit identischem Katquerschnitt würde somit eine Länge von 470mm benötigen (3fache Länge).

Würde man einen Katalysator mit doppelt so großem Querschnitt bauen, so würde sich die Baulänge zusätzlich verdoppeln.

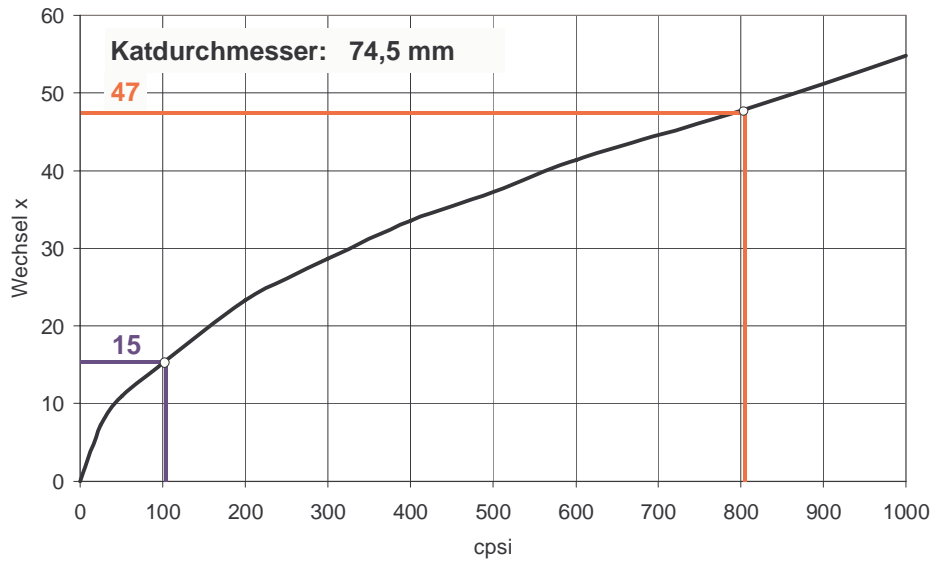


Bild 5. Anzahl der Wechsel in Abhängigkeit von cpsi und Durchmesser

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

3. STRÖMUNGSVERTEILUNGSMESSUNG

3.1. VERSUCHSAUFBAU

In Versuchen, sollte neben der Mischeffektivität der Druckverlust ermittelt werden. Bei dem Versuch wird der Träger in einem transparentes Rohr (Plexiglasrohr) fixiert, an einem Ende des Rohres wird eine Absaugung angebracht und am anderen Ende wird über ein Räucherstäbchen Rauch zugeführt.

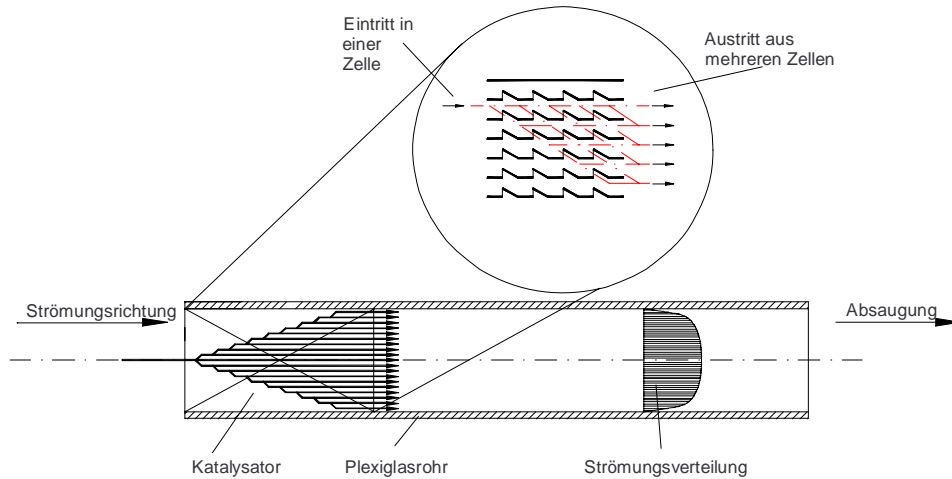


Bild 6. Versuchsaufbau

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Durch den Sog wird der Rauch durch den Träger geleitet. Der Rauch wird so eingedüst, dass dieser in der Eintrittsebene des Katalysators in eine Zelle eintritt.

Durch den Mischeffekt in Längsrichtung der Strömung, tritt der Rauch aus mehreren Zellen der Matrix aus. Die Anzahl der Zellen, welche am Mischeffekt beteiligt sind, geben Aufschluß über die Mischeffektivität.

3.2. VERSUCHSERGEBNISSE

In den ersten Versuchen wurden folgende Katalysatoren verwendet:

Zelldichte: 100 cpsi; Durchmesser: 62 mm; Länge: 85 mm; Schaufelanzahl: 4; Folienstärke: 50 μm

Um einen Einfluss des Wickeltypen festzustellen, wurde der Versuch mit folgenden Varianten durchgeführt:

- spiral gewickelt
- Typ S5
- Typ S12

Die Träger sind mit Glattlagenstreifen (Breite 10 mm) am Ein- und Austritt gewickelt worden, so dass ein Mischeffekt zwischen den Ebenen ungehindert stattfinden kann.

Mit Hilfe der folgenden Bilder kann die maximale Vermischung des Katalysators ermittelt werden (tatsächlicher Matrixaufbau).

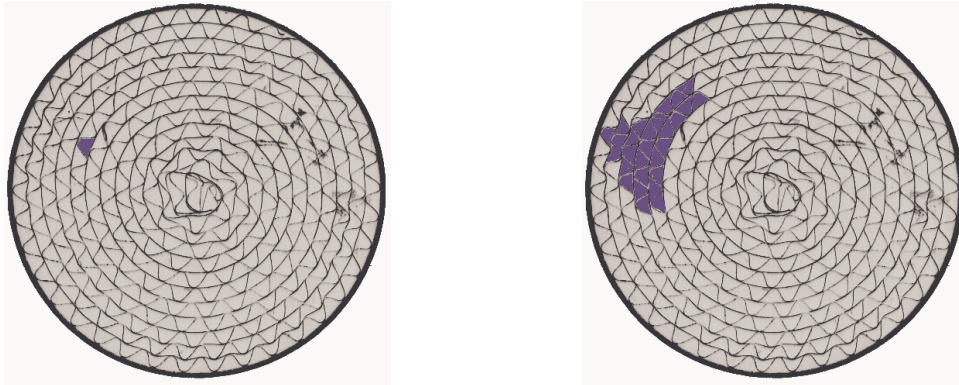


Bild 7. Gaseintritt

Gasaustritt

Es zeigt sich, dass bei einer Eindüsung in einer Zelle die Anzahl der Zellen nach 4 Wechselmöglichkeiten maximal 25 Zellen beim Austritt betragen kann (deckungsgleich mit theoretischem Wert).

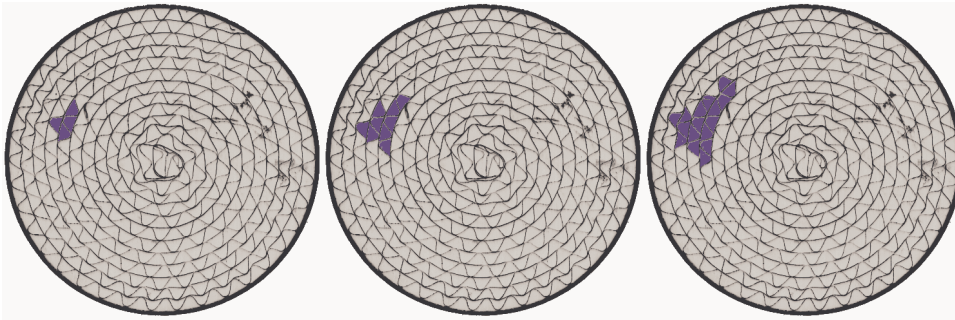


Bild 8. Zwischenschritte des 1., 2. und 3. Wechsel

Es ergeben sich somit folgende theoretische Mischungsverhältnisse:

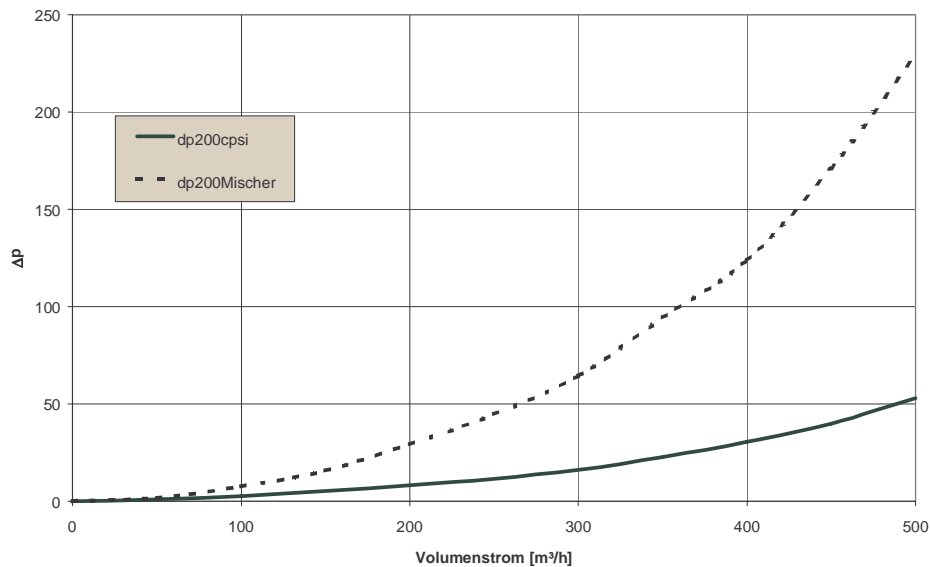
1. Wechsel	$i=1:4$	3. Wechsel	$i=1:16$
2. Wechsel	$i=1:9$	4. Wechsel	$i=1:25$

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

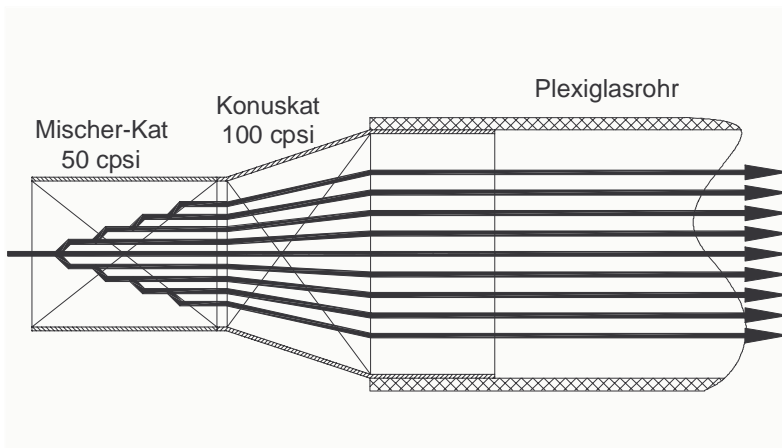
Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen



3.3. KASKADENSYSTEM

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bei der Verwendung eines Mischers als Vorkat und einem Konuskat als Verteiler, kann eine Vermischung über den gesamten Katquerschnitt erfolgen.



Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bild 9. Kaskade bestehend aus Mischerkat und Konuskat

Eine Mischeffekt über den gesamten Katquerschnitt ist abhängig vom Querschnitt (Durchmesser) und der Zellengeometrie (cps) nur bedingt möglich. Mit steigendem Trägerdurchmesser und höheren Zelldichten wird die Baulänge des Mischer-Kat größer. Dieses hat Nachteile im Bauraum und im Druckverlust.

Um einen Mischeffekt über den gesamten Katquerschnitt zu erzielen, kann eine Kaskade verwendet werden: Die Mischung erfolgt in einen Träger mit kleinen Durchmesser, mittels eines Mischer-Kat mit niedriger Zelldichte (z.B. 50 cps). Anschließend weitet ein Konuskat das Vermischte Abgas auf einen größeren Durchmesser auf.

4. FERTIGUNGSPROZESS MISCHERSTRUKTUR

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Zur Zeit wird die Mischerstruktur in einem Arbeitsschritt in das Folienband eingebracht. Dabei wird die Primärwellung und die Sekundärwellung (Schaufeln) durch spezielle Walzen erstellt. Die Walzen setzen sich aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Scheiben zusammen. Jeder Scheibentyp erzeugt eine spezielle Kontur:

Walzentyp A: Erstellung der Primärwellung (Standard Wellung)

In diesem Schritt wird das Wellband sinusförmig verformt. Charakteristische Größen sind Pitch p , Wellhöhe w_n und Folienstärke f .



Walzentyp B: Erstellung der vorderen Schaufelkontur

In diesem Schritt wird das Folienband partiell geschnitten und eine „Gegenwellung“ erzeugt (dieser Arbeitsschritt ist identisch mit dem der LS-Struktur). Charakteristische Größen sind die Einprägtiefe t und die Länge l_1 .



Walzentyp C: Erstellung der hinteren Schaufelkontur

In diesem Schritt wird das Folienband von der Gegenwellung (Walzentyp B) in Richtung der Primärwellung (Walzentyp A) zurückgeformt. Charakteristische Größen sind die Einprägtiefe t und die Länge l_2 .



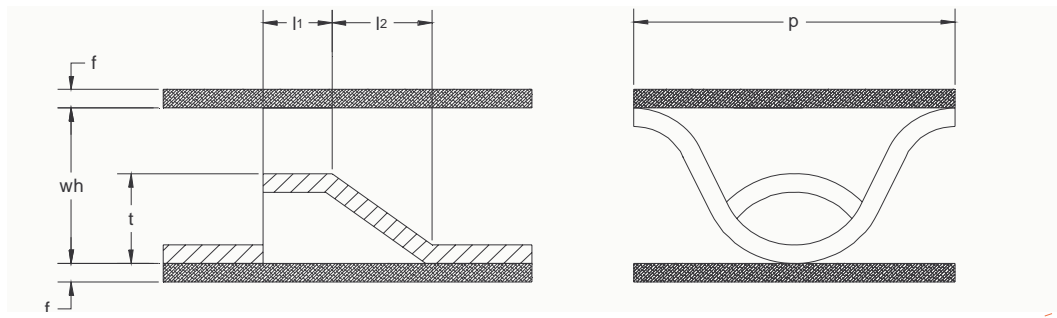


Bild 10. Schaufelgeometrie

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Als Standard-Mischer wird momentan die Zelldichte von 200cps verwendet, bei dem die Schaufeln auf Wellenberg und Wellental abwechselnd gleichgerichtet angeordnet sind.

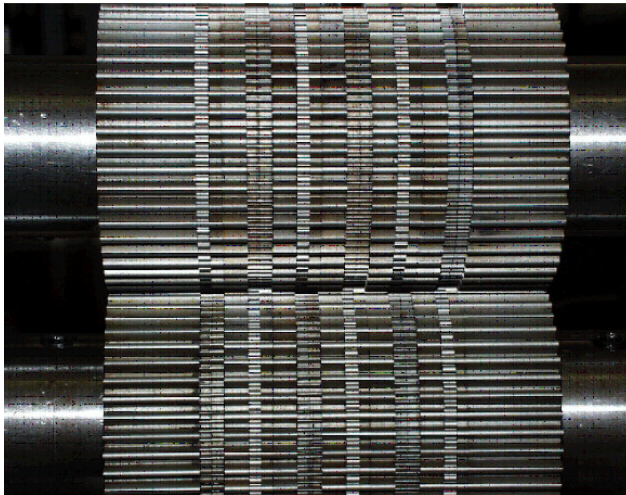


Bild 11. Aufbau Walzenwerkzeug für Standard-Mischer

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Weitere Daten eines Standard-Mischers:

<u>Folienbreite:</u>	<u>74.5mm</u>
<u>Folienstärke:</u>	<u>0.05mm</u>
<u>Folienband:</u>	<u>1.4767 Weichband</u>
<u>Zelldichte:</u>	<u>200cps</u>
<u>Schaufelanordnung:</u>	<u>Abwechselnd auf Wellenberg und Wellental</u>
<u>Schaufellänge:</u>	<u>5.2mm</u>
<u>Abstand Schaufel:</u>	<u>5.2mm</u>
<u>Wellhöhe:</u>	<u>1.55 – 1.6mm</u>
<u>Wickeltyp:</u>	<u>Typ 3</u>
<u>Lötplan:</u>	<u>B (Lötstreifenbreite 50% Matrixlänge)</u>
<u>Glattlagen:</u>	<u>a.) keine (nur Streifen GE und GA)</u>
	<u>b.) Lochfolie</u>
	<u>c.) Sintermetallfaser</u>
	<u>d.) Streckmetall</u>
	<u>e.) geätzte Folien</u>

Es wurde festgestellt, dass die Wellhöhe über die Folienbreite nicht konstant ist. Durch die unterschiedlichen Wellungen und Prägungen kommt es zu einer um 0.05-0.1mm niedrigeren Mischerwelllage im Randbereich. Dieses führt zu unterschiedlichen Vorspannungen im Träger (Tonnenform). Weitere Erkenntnisse zu diesem Tonneneffekt und Möglichkeiten diesem entgegenzuwirken werden später dargestellt.

Das oben beschriebene Werkzeug basiert auf einer Evolventenverzahnung und sollte zunächst nachweisen, dass das Wellprinzip mit unterschiedlichen Zahnscheiben funktioniert. Für Kleinstserien ist dieses Werkzeug nicht ausgelegt, so dass die Walzen mit äußerster Vorsicht zu benutzen sind (Handwellbock).

4.1. VARIATIONSMÖGLICHKEITEN MISCHERSTRUKTUR

Schaufelgeometrie

Die Mischergeometrie wird durch die Scheibendicken der LS-Scheibe und der Führungsscheibe bestimmt:

Bei 200cpsi ergibt sich eine Schauffellänge von 5.2mm

Bei 25cpsi ergibt sich eine Schauffellänge von 8.4mm

Schaufelanordnung

Die Schaufel können wie folgt innerhalb einer Welllage angeordnet werden:

200cpsi Mischer:

Schaufeln auf Wellenberg hintereinander gleichgerichtet (1)

Schaufeln auf Wellenberg hintereinander gegenläufig (2)

Schaufeln auf Wellenberg und Wellental abwechselnd gleichgerichtet (3)

Schaufeln auf Wellenberg und Wellental abwechselnd und gegenläufig (4)

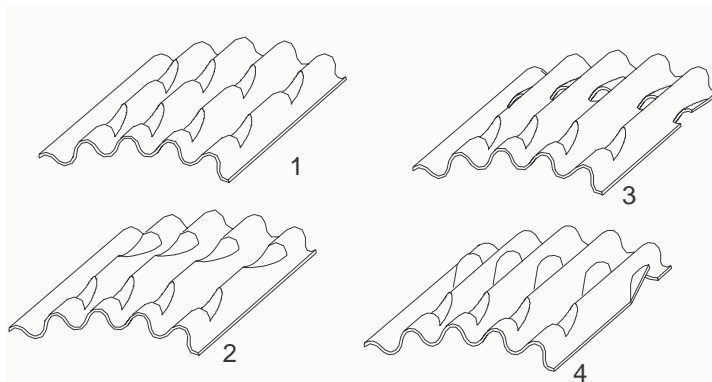
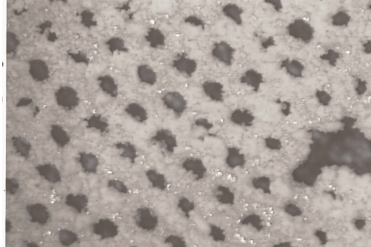
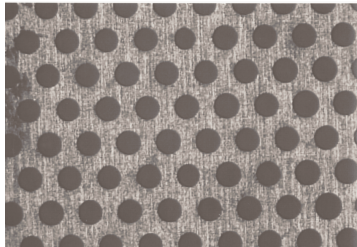
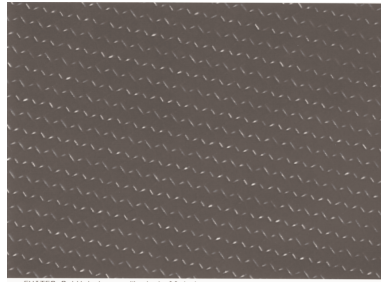
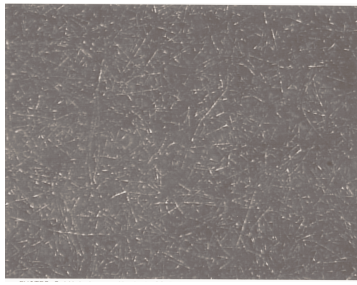


Bild 12. Schaufelanordnungen 200cpsi

Um den eigentlichen Mischereffekt zu erzielen ist eine teilweise durchlässige Glattlage erforderlich. Diese Funktion kann von verschiedenen „Folienstrukturen“ wie Sintemetallflies, Drahtgeflecht oder Lochfolie (mit und ohne Beschichtung) erzielt werden.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen



Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bild 13. Mikroskopische Probenaufnahmen teilweise durchlässiger Glattlagen

a) Sintermetallvlies Neuzustand

b) Drahtgewebe

c) geätzte Emitec-Folie

d) geätzte Emitec-Folie (beschichtet)

Neben der in den bisherigen Berichten bereits beschriebenen radialen Durchmischung wurde auch eine Filtration von Partikel beobachtet. Dieser Effekt hat besondere Bedeutung bei Grenzwerten für Diesel-Motoren, bei denen auch Partikelemissionen reduziert werden müssen.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

5. INHOMOGENE VORSPANNUNGEN BEI MISCHERN MIT SINTERMETALLVLIES

Gelöscht: F

Das Sintermetallvlies wird aus dem Werkstoff 1. 4404 hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 0.3mm, eine Breite von ca. 74.5mm und eine Länge von ca. 1000mm.

Durch den Strukturaufbau des Vliesmaterials wird der Leim bzw. das Lot vom Material stark aufgesaugt, so dass es zu keiner optimalen Lötanbindung zwischen Welllage und Vlieslage kommt.

Um die Kapillarwirkung im Sintermetallvlies zu reduzieren wurde das Material in einer Breite von ca. 10mm beidseitig verdichtet (GE- und GA-Seite). Diese Verdichtung erfolgt über Walzen und reduziert die Folienstärke von 0.3mm auf >0.1mm (>60%).

Durch diese Verdichtung im Randbereich (GE- und GA-Seite) und unterschiedlichen Folienstärken innerhalb des Vliesmaterials kommt es zu unterschiedlichen axialen Vorspannungen innerhalb der Matrixstruktur. Die Vorspannung im Randbereich (GE- und GA-Seite) ist wesentlich geringer als in der Mitte (Tonnenform). Ferner berühren sich die Well- und Glattlage an der Stirnflächen nicht mehr (Luftspalt), welches die Lötqualität zusätzlich reduziert. Eine Erhöhung der Vorspannung auf >15% führte nur zu Zellendehformationen im Randbereich der Matrix. Im Zentrum der Matrix (besonders zwischen den Wickellöchern) führte die Erhöhung der Vorspannung zu keiner Verbesserung. Alternativen für diese Problematik sind eine Mikrowellung des verdichteten Randbereiches oder eine schmalere verdichtete Streifen ca. 2-3mm hinter der GE- und GA-Seite.

Durch die Mikrowellung des Randbereiches wird über die gesamte Vliesfolie eine konstante (projizierte) Folienstärke (Wellhöhe) erreicht. Die Wellhöhe in diesem Bereich beträgt ca. 0.2-0.3mm. Diese minimale Wellhöhe ist sehr schwierig in ein Fasermaterial einzubringen. Ferner kann es zum Luftspalt zwischen Well- und Glattlage kommen.

Die zweite Alternative ist ein Verdichten der Vliesfolie in einem Bereich von 2-3mm hinter der GE- und GA-Seite. Die Breite des verdichtenden Materials beträgt ca. 2mm. Dadurch wird zwar der Leim und das Lot innerhalb der ersten 2-3mm vom Vlies aufgesaugt (größere Mengen), jedoch durch den verdichteten Bereich dahinter entsteht einen Kapillarsperre (definierter Bereich). Erste Versuche zeigten, dass dieses Prinzip funktioniert. Zu prüfen ist es, ob sich das Lot ähnlich verhält und es zu einer Lötverbindung mit der Welllage kommt.

Verstärkt wird der Effekt der unterschiedlichen Vorspannung innerhalb des Trägers durch unterschiedliche Wellhöhen innerhalb der Welllage. Durch die unterschiedlichen Verformungsgrade der Mischerstruktur (Randbereich Standard-Form / Mittenbereich Mischerform) wird im Randbereich (GE- und GA-Seite) eine um ca. 0.1- 0.2mm geringere Wellhöhe als in Zentrum erreicht.

Um diese unterschiedlichen Wellhöhen in der Welllage zu kompensieren muss das Werkzeug (Walzenscheiben) modifiziert werden. Dabei werden die Walzen im Randbereich so umkonstruiert, dass dort eine theoretisch größere Wellhöhe erreicht wird. Durch das unterschiedlichen Rückfederverhalten der Folie stellt sich eine gleichmäßige Wellhöhe ein (Walzenscheiben sind bestellt).

6. DAUERHALTBARKEIT

--- Vertraulich ---

6.1. ERGEBNIS

--- Vertraulich ---

7. STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE IM MISCHER

Die Effizienz der Mischerstruktur wurde bereits in vorangegangenen Berichten dargestellt. Nachfolgende Untersuchungen zielen daher auf die Funktionsprüfung des Mixers und dessen Dauerhaltbarkeit am Motorprüfstand sowie die Funktion der porösen Glattlage als Partikelfilter.

7.1. SIMULATION DER STRÖMUNG IN EINEM MISCHER

Die Simulation wurde an einem 2-dimensionalen Modell mit mehreren parallelen Kanälen durchgeführt. Zur Kalibrierung des Programms zur Bestimmung der Strömungsverteilung werden Messungen an 2 Kanälen durchgeführt, die durch eine poröse Lage verbunden waren. Der Gasstrom wurde in einen Kanal eingeleitet. Aufgrund des Gegendrucks des Kanals, wurde ein Teil des Gasstroms durch die poröse Lage in den 2. Kanal geleitet. Die Strömungsgeschwindigkeit und -verteilung wurde hinter den Kanälen gemessen. Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten zeigt nachfolgendes Diagramm.

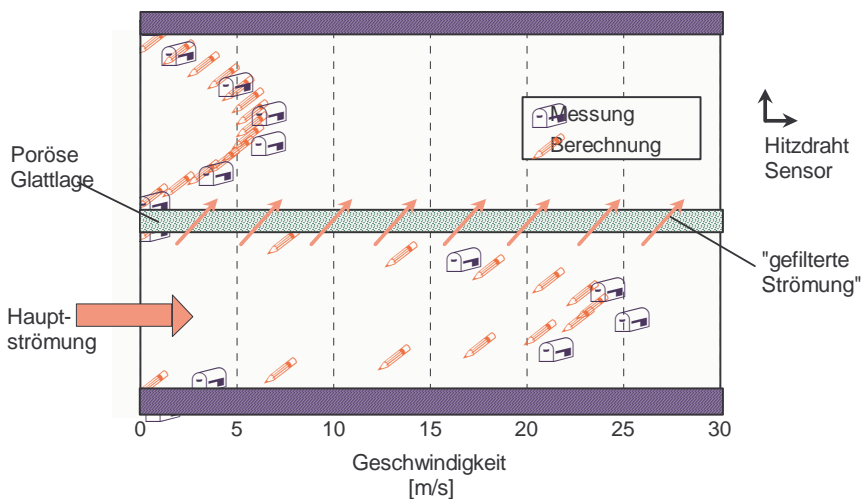


Bild 14. Vergleich gemessener und berechneter Strömungsverteilung zweier benachbarter Kanäle

In einem 2. Schritt wurde der prozentuale Anteil der Strömung berechnet, die durch die poröse Glattlage strömt, in Abhängigkeit von deren Porosität. Dabei wurde berücksichtigt, dass ein größerer Massenstrom die Filtereffektivität erhöht. Die „wahre Porosität“ entspricht dabei der Porosität der Folie der oben beschriebenen Strömungsverteilungsmessung. Die Fasermatte hatte eine Dicke von 0,5mm und eine Porosität von 85%, bei einem Faserdurchmesser von 0,012mm.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Gelöscht: <sp><sp>

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

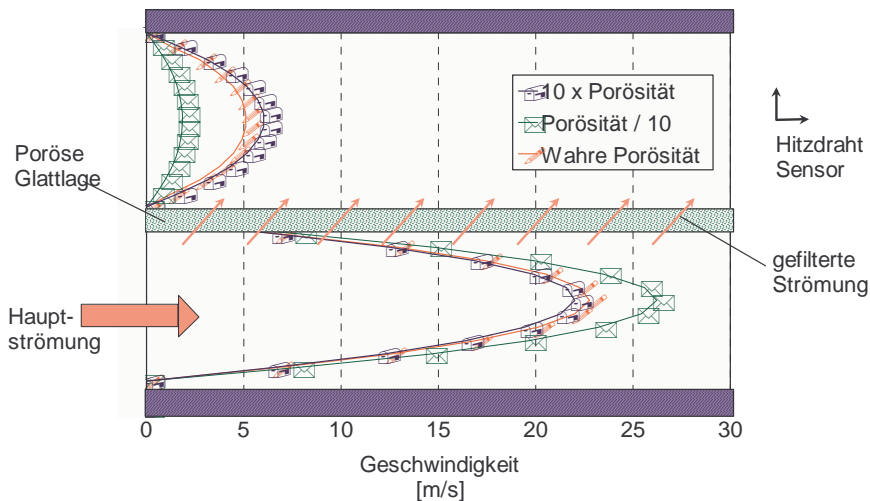
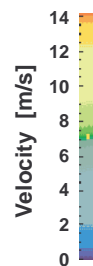
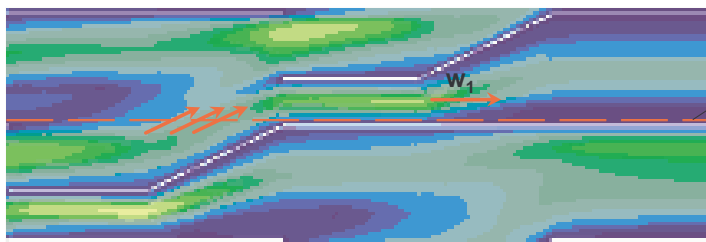


Bild 15. Prozentualer Anteil, der durch die poröse Lage gehenden Strom, in Abhängigkeit von der Porosität

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Im Fahrzeug arbeitet der Mischer mit unterschiedlichen Massenströmen. Der Anteil der „Querströmung“ durch die poröse Lage nimmt im Zentrum des Kanals mit dem Massenstrom zu. Dies führt zu dem Schluss, dass bei kontinuierlicher Regeneration die Filtereffektivität mit größerem Massenstrom ansteigt.

mass flow 125 kg/h



mass flow 250 kg/h

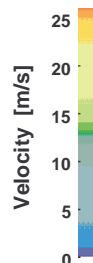
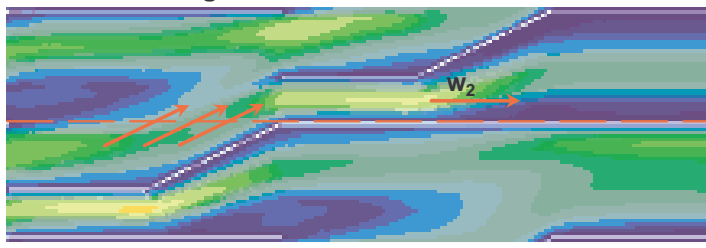


Bild 16. Kanalströmung in einem offenen Partikelfilter in Abhängigkeit vom Massenstrom

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

7.2. EFFIZIENZBETRACHTUNGEN IM LABORVERSUCH MIT SYNTHETISCHEN RUßÄHNLICHEN PARTIKELN

Ein Testträger mit einer Zelldichte von 200cps wurde mit einem Gas mit synthetischen rußähnlichen Partikeln durchströmt. Der Test wurde unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Volumenstrom: 335l/h
 Temperatur: 350°C
 O₂-Konzentration: 10 Vol.-%
 NO₂-Konzentration: 300 ppm

Partikelmasse: 3,5-3,9 mg/m³ (bei Raumtemperatur)

Filterabmessungen: Ø10x45mm; 200cps

Porosität der Glattlage: 85%

Dicke der Glattlage: 0,5mm

Am getesteten Lastpunkt mit einer Raumgeschwindigkeit von 95.000 l/h konnte eine Effektivität von 14% erzielt werden. Die Ergebnisse wurden durch die Partikel-Anhäufung im Testlauf beeinflusst. Durch die relative hohe Temperatur reagierten die Partikel mit dem NO₂, sodass eine Partikelreduktion

Von bis zu 50% erreicht werden konnten.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

7.3. DRUCKVERLUSTUNTERSUCHUNGEN

Der Druckverlust an berußten und unberußten Mischern/Partikelfilter wurde untersucht. Im beschichteten Zustand wurden 0,5g Ruß in der porösen Lage des Filters gespeichert, welcher über längere Zeit bei niedrigen Temperaturen am Gasaustritt eines Dieselmotors eingesetzt wurde. Im unbeschichtete Zustand konnte keine Rußablagerung festgestellt werden. Der Partikelfilter wurde in den Abmessungen Ø118x74,5mm; 200cps getestet. Die Druckverlustbetrachtung zeigt im nachfolgenden Diagramm, dass ein beschichteter Filter nur eine Druckverlustzunahme von 14% zeigt, während traditionelle keramische Filtersysteme eine Druckverlustzunahme um den Faktor 5-8 erzeugen.

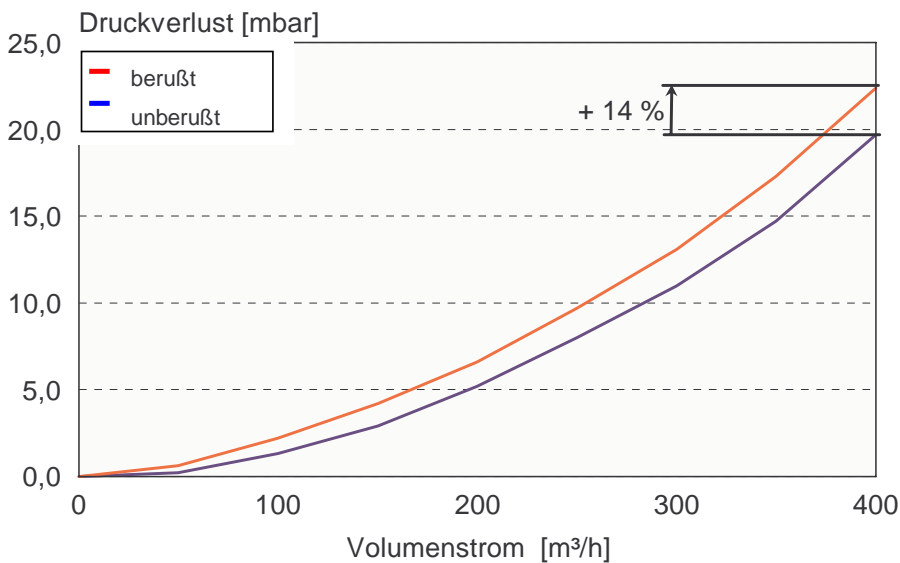


Bild 17. Druckverlust am offenen Partikelfilter (beladen und unbeladen) als Funktion des Volumenstroms

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

7.4. ABGASMESSUNGEN AM DYNAMISCHEN MOTORPRÜFSTAND

--- Vertraulich ---

7.5. ZUSAMMENFASSUNG

--- Vertraulich ---

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

8. STUDIE BESCHICHTBARKEIT

Ziel eines Mischerkatalysators ist es, den eingedüsten Harnstoff in den Abgasstrom eines Dieselaggregates homogen über den Strömungsquerschnitt zu verteilen und dadurch eine höhere Effektivität eines SCR-Systems zu erreichen.

Um die Effektivität bzw. die Baugröße der beiden Systeme zu optimieren, wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen direkt der Mischer beschichtet wird (Hydrolysekatalysator). Hierzu wurden

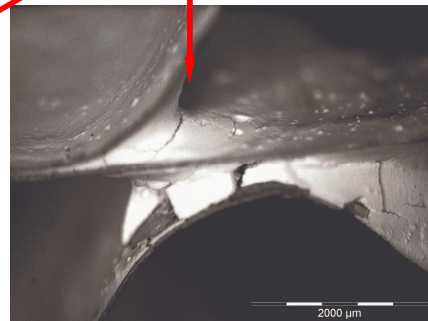
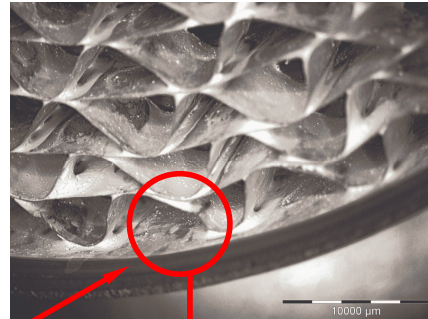
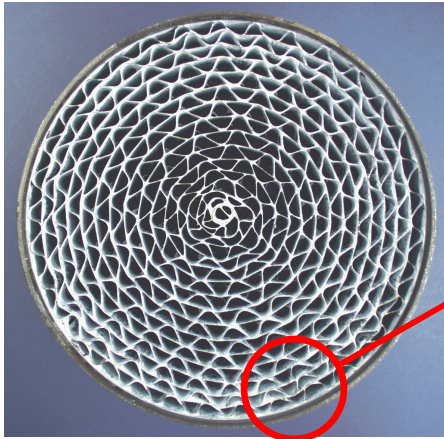
Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

mehrere Firmen beauftragt eine solche Mischerstruktur mit einer speziellen Katalyseschiicht zu beschichten.

8.1. KRITERIEN FÜR DIE GÜTE DER BESCHICHTBARKEIT SIND:

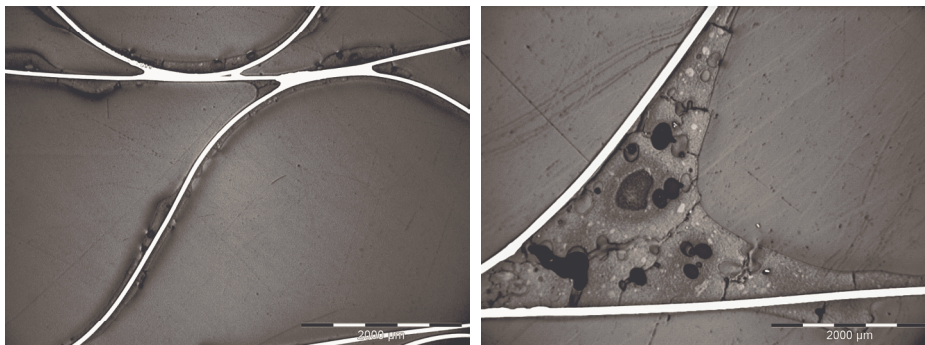
- Washcoatverteilung
- Haftung der Washcoates auf dem Folienmaterial
- Ablagerung des Washcoates im Zwickel
- Ablagerung im Schaufelbereich

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen



Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bild 18. Makroskopische Aufnahmen: Gaseintrittsseite und Details



Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Bild 19. Mikroskopische Aufnahmen: Schliffbilder von Beschichtung und Folie

8.2. ZUSAMMENFASSUNG

Schattierungen (hell/dunkel) auf der Matrixoberfläche sowohl auf der GE- und GA-Seite sind deutlich zu erkennen, welches auf sehr hohe Schwankungen in der Washcoatverteilung zurückzuführen sind.

Detailuntersuchungen zeigen, dass es zu starken Anhäufungen von Washcoat im Zwickel kommt.

Im Zwickel kommt es zusätzlich zum Abplatzen des Washcoates, welches auf eine gewisse Sprödigkeit der Beschichtung zurückzuführen ist.

9. DAUERHALTBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

--- Vertraulich ---

10. STUDIE FERTIGUNGSPARAMETER

Um eine Serienfertigung von strukturierten Welllagen durchzuführen wurden folgende Parameter untersucht:

10.1. HERSTELLVERFAHREN / MONTAGE

- Werkstoff
- Herstellprozess
- Zusammenbau
- Toleranzen

10.2. WELLPROZESS

- Wellhöhe
- Folienstärke
- Zellform
- Toleranzen

10.3. STANDZEIT WALZEN

- Vorschubgeschwindigkeit
- Verschleiß (Art und Ort)
- Instandhaltung

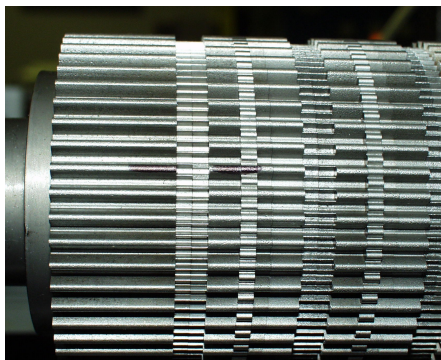
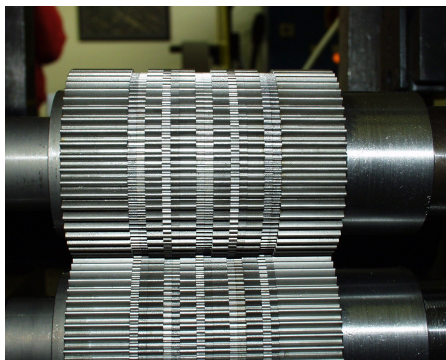


Bild 20. Werkzeugaufbau

10.4. ZUSAMMENFASSUNG

Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Verwendung von unterschiedlichen Werkstoffen bzw. Härtebehandlungen (Oberflächenbehandlungen) die Standzeit der einzelnen Walzenscheiben beeinflusst werden kann. Somit kann je nach Verschleiß die jeweiligen Walzenscheiben aus unterschiedliche Materialien bzw. Oberflächenbehandlung hinsichtlich Wartung und Instandhaltung ausgelegt werden. Untersuchungen laufen.

Als Herstellprozess wurden hier neben dem Erodieren das Schleifen, Fräsen bzw. Highspeedfräsen betrachtet. Kriterien hierbei waren Fertigungstoleranzen, Lieferzeiten, Standzeiten (Verschleiß) und Kosten. Parallel laufen Untersuchungen, welchen Einfluss unterschiedliche Toleranzbreiten auf den Herstellprozess haben.

Erste Versuche an serienähnlichen Maschinen zeigten, dass die geforderte Kontur (Form) erreicht wird. Untersuchungen mit unterschiedlichen Folienstärken mussten durch starken Verschleiß der Walzenscheiben verschoben werden, so dass hier keine weiteren Versuche durchgeführt werden konnten. Hierbei wird neben Veränderungen im Herstellprozess und Materialauswahl an der

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Optimierung der Walzenscheiben gearbeitet. Diese Optimierungen beinhalten neben der Reduzierung des Verschleißes, einen reibungsloseren Arbeitsschritt (Verharken der Folie während dem Wellen) und einen höheren Grad an Reproduzierbarkeit der Wellkontur bzw. Sekundärkontur.

Die Instandhaltung bzw. Wartung der Werkzeugen wird derzeit untersucht.

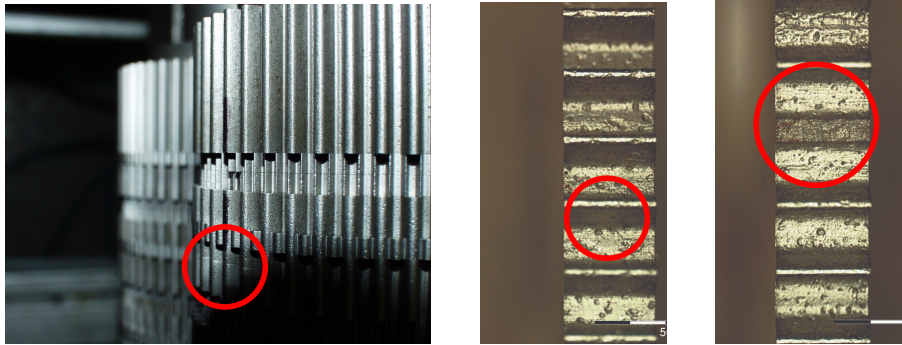


Bild 21. Verschleiß a.) ausgebrochener Zahn b.) „Pittingbildung“ c.) Zahnausbruch

11. DAUERHALTBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

--- Vertraulich ---

11.1. VERSUCHSAUFBAU

--- Vertraulich ---

11.2. VERSUCHSTEIL

--- Vertraulich ---

11.3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

--- Vertraulich ---

11.4. VERSUCHSERGEBNISSE

--- Vertraulich ---

12. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE

Ziel war es ein metallische Wabenstruktur mit Strömungsausgleich zwischen benachbarten Zellen zu entwickeln. Dadurch kann neben einer zusätzliche Durchmischung des Abgases (z.B. eingedüster Harnstoff beim SCR-System) eine Homogenisierung von Konzentrationen bzw. eine Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeiten (Gleichförmigkeit) erzielt werden.

Das Abgas innerhalb des Trägers wird definiert geführt bzw. umgelenkt, so dass es zu einem lokalen Strömungsausgleich zwischen benachbarten Zellen innerhalb der Ebene und zwischen den Ebenen kommt.

Das System ist ähnlich einem Standardträger aufgebaut, wobei abwechselnd glatte und gewellte Folienlagen die Wabenstruktur bilden. Die Strömungsumlenkung erfolgt durch sogenannte Leitbleche (Schaufeln), die in die Wellfolie integriert sind. Die Anordnung, Anzahl und Geometrie der Schaufeln beeinflussen die Mischeffektivität und Druckverlust des Gesamtsystems.

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Gelöscht: ¶
<#>Verbesserung des Massentransportes¶
<#>HINTERGRUND DER UNTERSUCHUNGEN¶

Die Effektivität der Schadstoffumsetzung eines Katalysators, wie die Reaktionsgeschwindigkeit jedes anderen heterogenen katalytischen Systems, hängt von der komplizierten Reaktionskinetik und der Geschwindigkeit des Massentransportes zu und von der katalytischen Oberfläche ab. Diese Effekte werden wiederum von der Temperatur bestimmt. Während der "light-off-Phase" ist die Gastemperatur relativ niedrig und die gesamte Verbrennung wird durch die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion an der Katalysatoroberfläche bestimmt. Massen- und Wärmetransport zwischen der Katalysatoroberfläche und dem umgebenden Gas laufen im Vergleich zur chemischen Reaktion schnell ab. Strömt das Gas zügig durch den Monolithen, verhält sich das System als ob es adiabatisch ist, wobei die Reaktionsrate mit steigender Temperatur exponentiell zunimmt, was aus der chemischen Reaktion an den Zellwänden des Monolithen resultiert. Die Systemtemperatur erhöht sich daraufhin im vorderen Bereich des Monolithen, so dass der Massentransport des Gases zur Katalysatoroberfläche der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist. Im warmen Betriebszustand eines Automobils wird also die Umsetzung der Schadstoffe durch die Geschwindigkeit des Massentransports limitiert. ¶
Bei den vorherrschenden Massendurchflussraten ist (... [1])

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

Formatiert

Gelöscht:

Gelöscht: ¶

Gelöscht: b

Gelöscht: i

Gelöscht: (hier sinusförmig)

Verbesserung des Massentransportes

HINTERGRUND DER UNTERSUCHUNGEN

Die Effektivität der Schadstoffumsetzung eines Katalysators, wie die Reaktionsgeschwindigkeit jedes anderen heterogenen katalytischen Systems, hängt von der komplizierten Reaktionskinetik und der Geschwindigkeit des Massentransportes zu und von der katalytischen Oberfläche ab. Diese Effekte werden wiederum von der Temperatur bestimmt. Während der "light-off-Phase" ist die Gastemperatur relativ niedrig und die gesamte Verbrennung wird durch die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion an der Katalysatoroberfläche bestimmt. Massen- und Wärmetransport zwischen der Katalysatoroberfläche und dem umgebenden Gas laufen im Vergleich zur chemischen Reaktion schnell ab. Strömt das Gas zügig durch den Monolithen, verhält sich das System als ob es adiabatisch ist, wobei die Reaktionsrate mit steigender Temperatur exponentiell zunimmt, was aus der chemischen Reaktion an den Zellwänden des Monolithen resultiert. Die Systemtemperatur erhöht sich daraufhin im vorderen Bereich des Monolithen, so dass der Massentransport des Gases zur Katalysatoroberfläche der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist. Im warmen Betriebszustand eines Automobils wird also die Umsetzung der Schadstoffe durch die Geschwindigkeit des Massentransports limitiert.

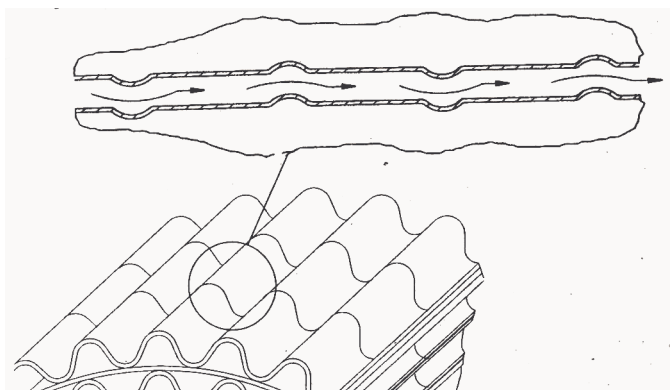
Bei den vorherrschenden Massendurchflussraten ist die Strömung in den Zellkanälen mit glatten Wänden, generell laminar. Bei solch einem laminaren Strömungsprofil erreicht ein beträchtlicher Anteil der Hauptstromkomponenten die aktiven Zentren mit Hilfe der Diffusion. Sie werden dort von der Washcoat-Schicht umschlossen, was die Umsatzgeschwindigkeiten limitiert und unbehandelte Schadstoffe emittieren lässt.

Durch eine Beeinflussung der Gasströmung könnte eine radiale Komponente (Umleitung, Turbulenz) eingebracht werden, die eine anhaltende Vermischung der Kern- und Randströmung anregt und somit den Massentransport zur Wand hin verbessert. Katalysatoren mit Metallfolie besitzen diesbezüglich ein hohes Potential, da sich Kanalstrukturen durch entsprechende Walzvorrichtungen verwirklichen lassen.

ENTWICKLUNGSGRUNDLAGEN

Aufgrund der schärferen Gesetzgebungen müssen zur Verbesserung des Massentransportes neue Designs entwickelt werden. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden folgende Designs untersucht:

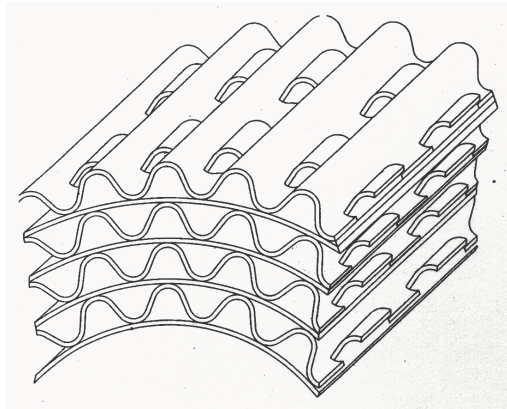
TS-Design, Transversally Structured Corrugation. Es handelt sich hierbei um eine Mikrowellung auf der Welllage, 90° zur Strömungsrichtung, die alle 2,5 mm wiederholt wird. Mit Hilfe der TS-Struktur kann der Druckverlust reduziert werden, da bei gleicher katalytischer Effektivität das



Katalysatorvolumen verringert werden kann, bedingt durch den besseren Massentransport.

TS-Design

LS-Design (Longitudinally Structured Corrugation), Turbulenz wird durch wiederholten Kanaleintritt durch partielle Gegenwellung in der Welllage des Katalysators erreicht. Vorteil: Mit Hilfe der modifizierten Zellkanalstruktur kann der Differenzdruck reduziert werden. Zudem wird der

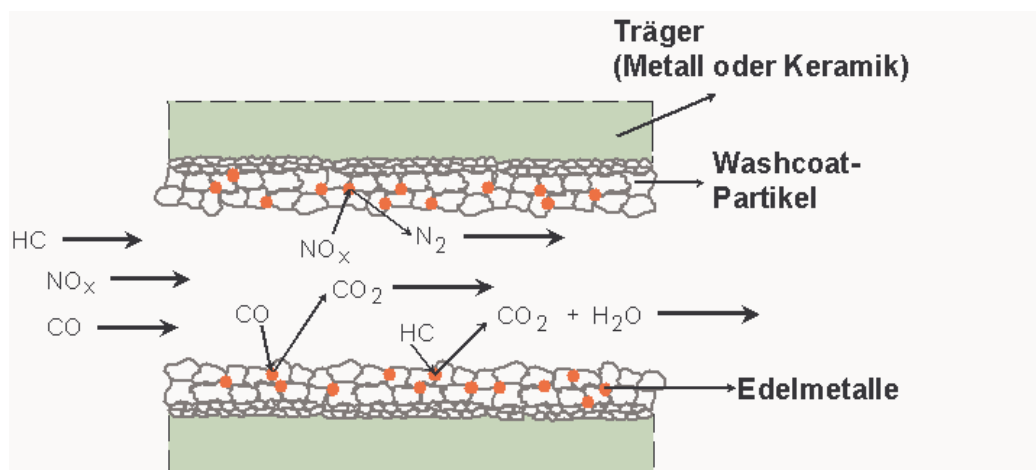


Massentransport durch heftige Strömungsturbulenzen verbessert, wobei diese nur auf einer Seite der LS-Folie auftreten.

LS-Design

Hohe Zelldichte und verringertes Pitch-Wellhöhen Verhältnis; Diese Designmodifikation verbessert den Stofftransport durch die kürzeren Wege und durch eine Reduktion des hydraulischen Durchmessers.

Das nachfolgende Bild verdeutlicht diesen Sachverhalt. Dargestellt ist hier ein Ausschnitt eines beschichteten Kanals eines Katalysators:



Stofftransport und chemische Reaktion im Katalysator

Der Vorgang kann in Einzelschritte aufgeteilt werden:

- Transport der Reaktanden HC, CO und NO_x aus der Gasphase an die Oberfläche der Kanalwand
- Diffusion zu den Edelmetallen durch die Poren des Washcoats, wobei die Schichtdicke und Porosität des Washcoats eine entscheidende Rolle spielt.
- Adsorption der Reaktanden an den Edelmetallen
- Katalytische Umsetzung
- Desorption der Reaktionsprodukte Stickstoff, Kohlendioxid und Wasser von den Edelmetallen
- Diffusion der Reaktionsprodukte an die äußere Oberfläche des Washcoats
- Transport der Reaktionsprodukte von der Festkörperoberfläche in die Gasphase

Erhöhung der Zelldichte verringert den hydraulische Durchmesser, Erhöhung der Temperatur vergrößert den Diffusionskoeffizient, beides erhöht den Stofftransportkoeffizient und verbessert den Stofftransport. Es ist ersichtlich, dass bei Trägern mit höheren Zelldichten, der Stofftransport durch die kürzeren Transportwege zu den Edelmetallen verbessert und somit die Reaktionsgeschwindigkeit verkürzt werden kann.

FEM-KALKULATION DER OPTIMALEN ZELLFORM

Im Rahmen der Zellenformuntersuchungen, wurde ein Simulationsmodell erstellt, das die Adsorptionseffektivität einer katalytischen Zellenwand berechnen soll.

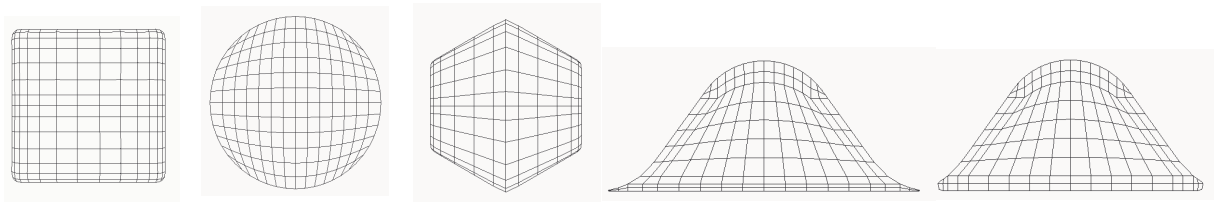
Ziel der Untersuchung ist, einen Vergleich zwischen verschiedenen Zellenformen (runde, rechteckige, sechseckige und sinusförmige Zelle) zu ermitteln. Dieser Vergleich wird aufgrund der adsorbierten Masse entlang des Zellenumfangs und der Restkonzentration im Abgas entlang der Kanalachse berechnet.

Das Modell besteht aus zwei Modulen:

Das *Strömungsmodul* berechnet innerhalb einer vorgegebenen 3D Maschendomäne die Abgasgeschwindigkeit im Kanal (Navier-Stokes Gleichungen). Als Ergebnis erhält man eine Strömungsverteilung im Kanalquerschnitt.

Das *Adsorptionsmodul* basiert auf der Theorie der „Massentransportlimitierten Umsatzreaktion“: die Abgasmasse, die die katalytische Wand erreicht, wird 100% konvertiert. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist die Diffusion der Moleküle von der Gasphase zur Wand.

Die berechneten Zellformen werden in Bild 1 dargestellt. Jeder Kanal (Geometrie) wird mit einer bestimmten Maschenaufteilung diskretisiert.

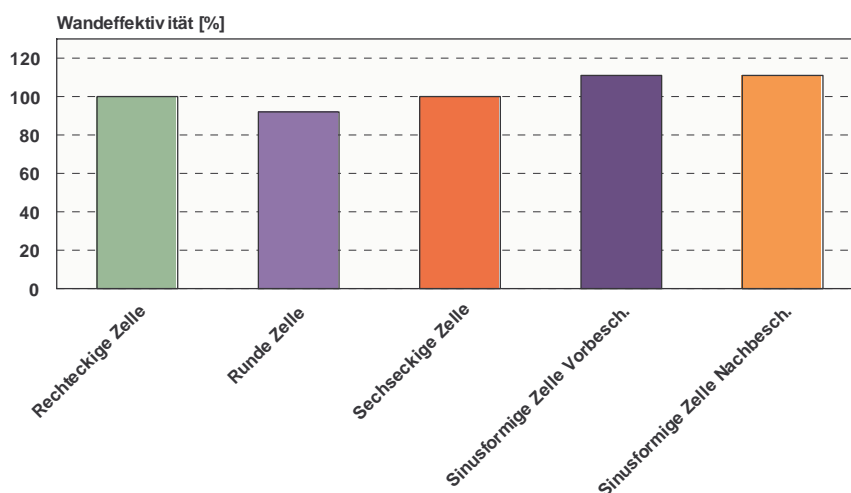


Rechteckige Zelle, runde Zelle, sechseckige Zelle, sinusförmige Zelle (vorbeschichtet), sinusförmige Zelle (nachbeschichtet)

Aus den Berechnungen ist der Effekt der Ecken der recht- und in der sechseckigen Zelle klar zu erkennen, sowie auch der Effekt der Zwickeln in den sinusförmigen Zellen. Die runde Zelle hat logischerweise eine gleichmäßige Wandeffektivität, da hier die Diffusionswege überall konstant sind.

Dazu ist noch zu bemerken, dass die vorbeschichtete sinusförmige Zelle keinen Vorteil bringt, da die tieferen Zwickeln an der gesamten Umsatzreaktion fast überhaupt nicht teilnehmen.

Um einen direkten Vergleich der verschiedenen Zellformen zu ermöglichen wurden die Adsorptionseffektivitäten auf dem ganzen Umfang integriert.

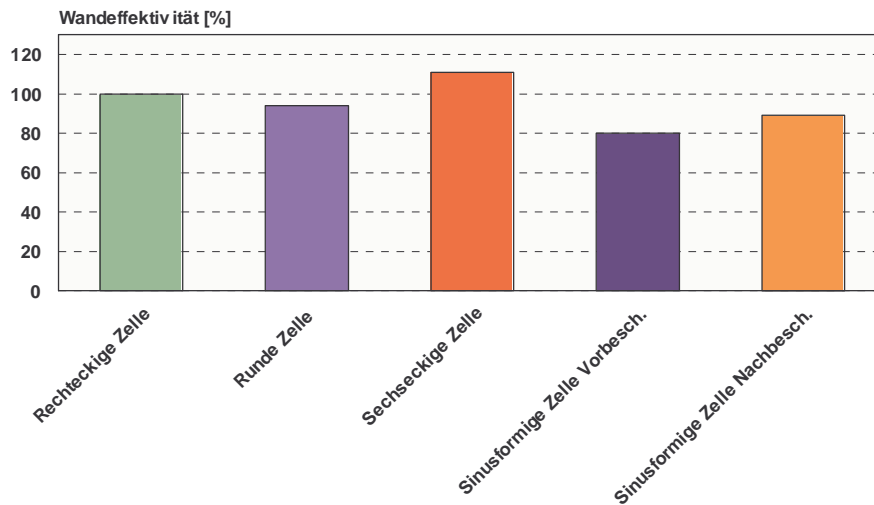


Relative normalisierte Wandeffektivität in Abhängigkeit verschiedener Zellformen

Als Basis (100 %) wurde die rechteckige Zelle angenommen. Aufgrund des größeren Umfangs, weisen die sinusförmigen Zellen einen höheren Wert der Effektivität.

Wenn man andererseits die Integrierte Effektivität spezifisch auf dem Umfang bezieht sehen die Resultate anders aus. In der sinusförmigen Zelle bewirkt der relativ hohe Anteil an Umfang mit geringer Effektivität eine Reduzierung des gemittelten Wertes. Das macht sich um so mehr bemerkbarer in der vorbeschichteten sinusförmigen Zelle (der Zwickel ist hier tiefer).

Die Zelle, die die besten Resultate ergibt ist die sechseckige. Diese Geometrie stellt einen guten Kompromiss zwischen relativ hohen Umfang und relativ gering schwankende Diffusionswege dar.



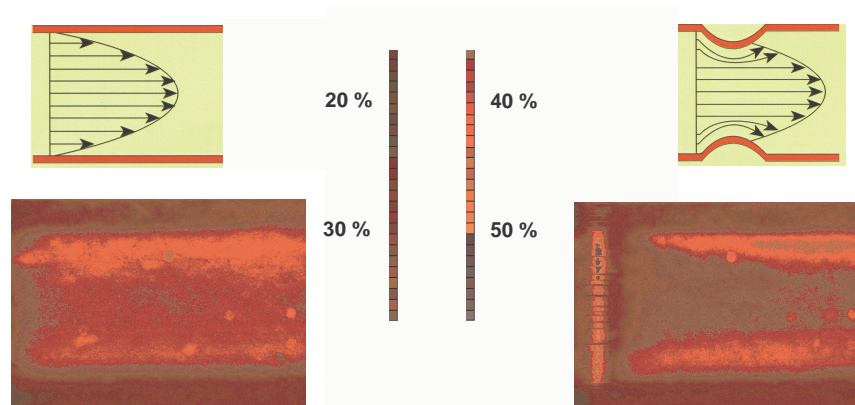
Relative Umfang-spezifische Wandeffektivität in Abhängigkeit verschiedener Zellformen

UNTERSUCHUNGEN AN TRÄGER MIT TS-DESIGN

STRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN AN TRÄGERN MIT TS-STRUKTUR

Versuche an einem Modell-Strömungsprüfstand mit Ammoniakendüsung haben zu einer Design-Vorentscheidung bei der TS-Struktur geführt. Die Sekundärstruktur kann in bezug auf Höhe, Abstand und Position geändert werden.

Bei den Versuchen auf dem Strömungsprüfstand mit einer Modell TS-Struktur wurden Höhen von 3 und 5 mm getestet sowie Abstände der Wellungen von 50, 100 und 150mm.



Glatter Kanal

Kanal mit TS-Struktur

relative Intensität der Ammoniak-Wandkonzentration

Man erkennt, dass bei einem Kanal mit TS-Struktur aufgrund der Verwirbelung eine erhöhte Ammoniak-Konzentration im Wandbereich auftritt. Variiert man die Kanalhöhe kommt heraus, dass das Optimum bei 3mm liegt. Die Variation des Abstandes der TS-Wellungen ergibt ein Optimum bei 100mm.

Überträgt man z. B. das Modell mit 3mm Höhe und 100mm Abstand auf einen Metallträger, ergeben sich folgende Abhängigkeiten in Zusammenhang von der Zelldichte:

Cell Density [cps]	TS Corrugation Height [mm]	TS Distance [mm]
100	0.19	18
200	0.13	9
300	0.11	6
400	0.10	4
500	0.08	3

Abhängigkeit der TS-Struktur von der Zelldichte

FERTIGUNGSVERSUCHE MIT TS-STRUKTUR

Erste Fertigungsversuche haben ergeben, dass zur Herstellung von TS-Trägern sämtliche Parameter optimiert werden müssen. Im Zwischenbericht wurde in 3 Flussdiagrammen die verschiedenen Fertigungsschritte dargestellt und anhand von Beispielen näher erläutert, welche Optimierungspotentiale gegeben sind. Im Rahmen dieses Abschlussberichtes wird auf diese Thematik nicht näher eingegangen.

Alle Fertigungsschritte angefangen bei der Wellfolienherstellung über das Wickeln und Eindrücken der Matrix bis hin zum LVM-Prozess (Entfetten, Beleimen, Trocknen, Beloten, Löten) wurden so optimiert, dass eine Serienfertigung für Träger mit TS-Struktur bis zu einer Folienstärke von $\geq 40\mu\text{m}$ und 600cps möglich ist.

BESCHICHTUNGSVERSUCHE MIT TS-STRUKTUR

Zur Beschichtbarkeit von Trägern mit TS-Struktur wurden Versuche mit einem Beschichter durchgeführt. Zur Bewertung wurde ein Gewichtsvergleich von Trägern mit Primärwellung und Trägern mit zusätzlicher Sekundärwellung durchgeführt. Mit einem Perthometer wurde die Folienstruktur abgefahren um festzustellen, ob aufgrund der Beschichtung sich die relativ scharfe Form der TS-Wellung ändert.

Der Gewichtsvergleich ergab, dass kein Unterschied zwischen den Trägern mit Primärwellung und mit TS-Struktur besteht, d.h. die Beschichtungsmenge, die auf die Träger kommt, ist identisch.

Ein Vergleich der Konturen der beschichteten und unbeschichteten Folie zeigt, dass die TS-Struktur durch den Beschichtungsprozess nicht verdeckt wird und nur eine minimale Ausglättung in den Randbereichen bewirkt.

DAUERHALTBARKEITSVERSUCHE UND EMISSIONSMESSUNGEN AN TRÄGERN MIT TS-STRUKTUR

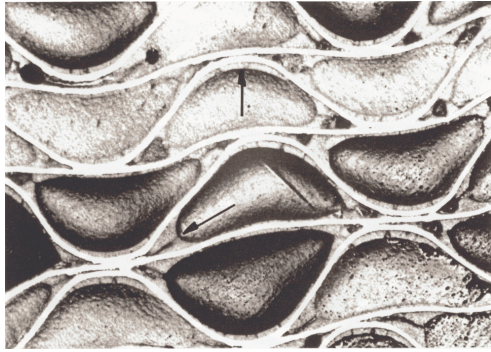
Bei den Dauerhaltbarkeitsversuchen wurden Träger mit Beschichtung auf Washcoat-Adhäsion und mechanische Haltbarkeit getestet.

Die Proben wurden auf der Gasaustrittsseite über den Querschnitt des Trägers verteilt entnommen und präpariert. Die Gaseintrittsseite wurde gewählt, weil dort die höchsten Temperaturen und die größte Dynamik vorherrschen und somit die am stärksten beanspruchte Stelle darstellt.

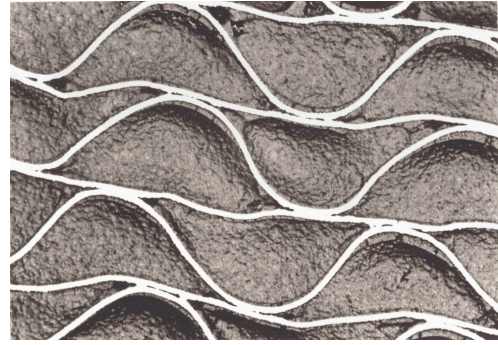
Folgende Schwerpunkte wurden bei der Untersuchung gesetzt:

- Washcoat Adhäsion
- Washcoatdicke
- Matrix-Lötung und
- Matrix/Mantel Anbindung

Getesteter Träger: $\varnothing 128 \times 174\text{mm}$, 400TS; Beschichtung JM87, 40g/ft³, 5:1



Randbereich



Zentrum

Die beiden Bilder zeigen repräsentativ für den Rest des Trägers sowohl die Beschichtung als auch die Matrix-Lötung. Die Anbindungshäufigkeit der Matrix entspricht den Anforderungen der technischen Spezifikationen und ist vergleichbar mit der von Trägern nur mit Primärwellung.

Bewertung der Ergebnisse

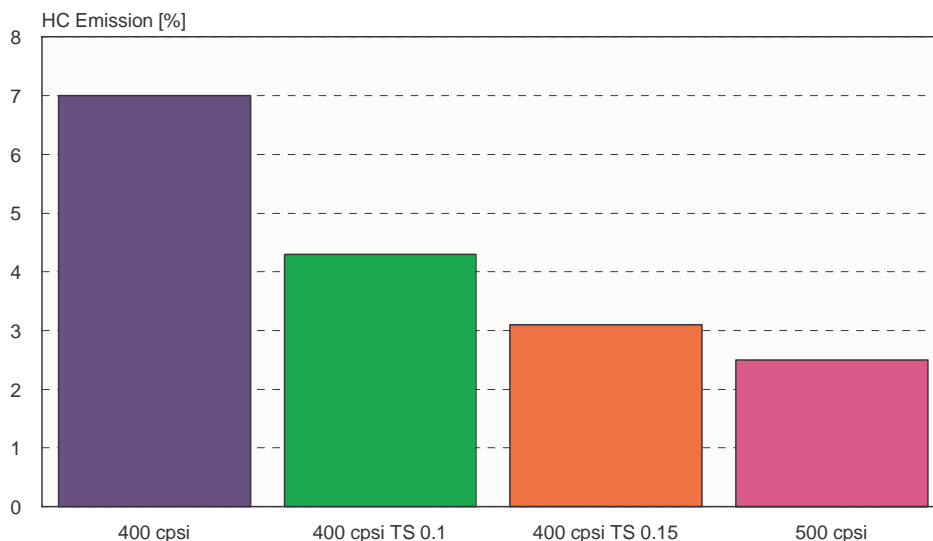
Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Funktion des Trägers sowohl seitens der Beschichtung als auch seitens der mechanischen Haltbarkeit den Anforderungen entspricht. Dies betrifft die Häufigkeit der Matrix / Matrix-Anbindungen und die Matrix/ Mantel-Verbindungen.

Bezüglich der Schichtdicke viel auf, dass die Dicke des Washcoats unterschiedlich ist. An den geraden Folien ist die Beschichtung relativ dünn, an anderen Stellen, besonders in den Zwickeln, relativ dick. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Washcoat und Beschichtung entstehen leichte Risse. Diese könnten aber durch eine weitere Optimierung der Beschichtung verbessert werden. Diese Optimierung wird in einem separatem Programm durchgeführt.

Aufgrund der Ergebnisse ist festzustellen, dass die mechanische Dauerhaltbarkeit des Katalysators gewährleistet ist.

Emissionsmessungen an Trägern mit TS-Struktur

Emissionsmessungen wurden bei einem konstanten Massendurchsatz von 500 kg/h und einer Temperatur von 820 °C durchgeführt. Bild 10 zeigt, dass durch den Einsatz eines Trägers mit einer TS-Wellung von 0,1mm im Vergleich zu einem Träger mit der einfachen Primärwellung, eine Verbesserung der Emissionen von 2,6% erzielt werden kann. Setzt man die Sekundärwellung auf 0,15mm, steigert sich die Verbesserung nochmals, so dass es insgesamt zu einer Verbesserung von 3,9% kommt. Die Emission des 400cps Trägers mit TS = 0,15mm entspricht schon nahezu der Emission eine 500cps Trägers.



HC-Emissionen im Vergleich TS- und Primärstruktur

Insgesamt ist somit festzustellen, dass durch den Einsatz der TS-Struktur im Vergleich gleicher Zelldichten erhebliche Verbesserung und somit auch Vorteile festzustellen sind.

Verbesserung des Stofftransportes durch Einsatz der TS-Wellung

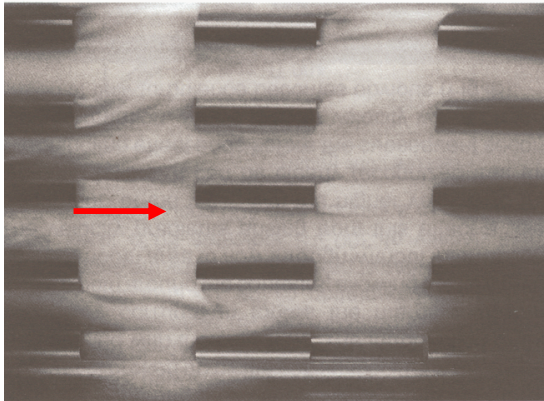
Aufgrund der Effektivitätssteigerung des Katalysatorvolumens vermindert werden. Dies bedeutet eine geringere Wärmekapazität (d.h. schnelleres Ansprungsverhalten) und eine Kosteneinsparung bei den Edelmetallen.

UNTERSUCHUNGEN AN TRÄGERN MIT LS-STRUKTUR

STRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN AN TRÄGERN MIT LS-STRUKTUR

Bei durchgeführten Strömungsversuchen erkennt man, dass die Strömung sowohl Komponenten in axiale, als auch in radiale Richtung hat.

Die Komponenten in axiale Richtung bewirken, dass aus einem 400cps Träger intern ein 800 cps Träger wird. Im Bild unten kann man deutlich erkennen, dass es zu Turbulenzen in den Bereichen nach der zusätzlich eingebrachten Wellung kommt. Dadurch ist ein optimierter Stofftransport gewährleistet. Durch die zusätzlich eingebrachte Wellung wird der Diffusionsweg von Schadstoffen, die sich in der Mitte der Strömung befinden zu den katalytisch aktiven Flächen auf der Folie deutlich verkürzt.



Strömungsversuch mit einer LS-Folie

In Trägern mit einer Primärwellung sind die Zellen strikt voneinander getrennt. Durch die Einbringung der LS-Struktur als Sekundärwellung ist eine geringfügige Durchmischung in radialer Richtung möglich.

BESCHICHTUNGSVERSUCHE

Zusammen mit einem Beschichter wurde für die Folie mit LS-Struktur ein Beschichtungs-Programm gefahren. Folgende Parameter wurden im Rahmen des Programms bei der Beschichtung geändert:

- Partikelgrößenverteilung
- pH-Wert
- Feststoffgehalt
- Viskosität

Ergebnis der Beschichtungsversuche ist, dass die Folien selbst mit modifiziertem Washcoat nicht über die herkömmlichen Beschichtungsmethoden beschichtbar sind. Normalerweise wird die Suspension durch die Träger gedrückt, die Zellkanäle werden nachfolgend mit Druckluft freigespült. Dieses ist bei der LS-Struktur nicht möglich, da die Luft innerhalb des Kanals aufgrund der Struktur „Ausweichmöglichkeiten“ hat und somit vereinzelt eingebrachte Zellen verstopfen und ungleichmäßiger Verteilung der Beschichtung führen.

Um diese neue Struktur beschichten zu können, muss eine neue Methode entwickelt werden. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Fliehkräften. Bei dieser Methode werden die Träger in eine Suspension getaucht und nachfolgend wird in einer Zentrifuge aufgrund der Fliehkräfte die Suspension in dem Träger gleichmäßig verteilt. Für diese weiterführenden Untersuchungen wurde bereits eine Zentrifuge entwickelt, mit der sich das beschriebene Beschichtungsverfahren untersuchen lässt. Die erforderliche Unterstützung durch externe Stellen (Beschichter) und der Umfang des Versuchsprogramms lassen es jedoch nicht zu, diese Betrachtungen im Rahmen des BMBF-

Programms durchzuführen. Damit sind auch Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen Emissionsmessungen nicht möglich.

HOHE ZELLDICHTEN UND VERRINGERUNG DES PITCH-WELLHÖHEN VERHÄLTNISSSES

ERGEBNISSE DER PARAMETERUNTERSUCHUNG

Porosität

Beim unbeschichteten Träger bringt eine Erhöhung des Verhältnisses Pitch/Wellhöhe von 1:1 auf 3:1 eine Porositätserniedrigung von 1%.

Der Grund hierfür liegt in der Menge des benötigten Folienmaterials für eine Zelle.

Bei beschichteten Träger hat das Verhältnis p/h einen deutlich größeren Einfluss auf die Porosität (4%). Begründet ist dieses durch die große Menge an Washcoat-Ablagerungen in den Zwickeln und einem zunehmenden inneren Zellumfang.

GSA beschichteter Zellen

Die GSA ändert sich mit dem Verhältnis p/h ($\Delta GSA \approx 8\%$). Die Zunahme der GSA ist auf den größeren werdenden inneren Zellenumfang zurückzuführen.

Gewicht Folienmaterial (Menge)

Durch Variation des Verhältnisses p/h wird die Menge (Gewicht) des verwendeten Folienmaterials für eine Zelle beeinflusst. Mit wachsendem Zellenumfang steigt die Materialmenge bis zu 17%.

Gewicht Washcoatmaterial (Menge)

Durch Variation des Verhältnis p/h hat man einen großen Einfluss auf die benötigte Washcoat – Menge (Gewicht) für eine Zelle (bis zu 41%).

Der Mengenzuwachs bei einem hohen Pitch-Wellhöhenverhältnis ist auf den größeren Umfang und auf Ablagerungen von großen Mengen Washcoats in den Zwickel zurückzuführen. Entscheidend hierfür ist der Verrundungsradius.

Gewicht einer beschichteten Zelle

Durch die benötigten Mengen an Folienmaterial und Washcoat für eine Zelle bei definierten Pitch-Wellhöhen-Verhältnissen ist ein deutlicher Zuwachs mit steigendem Verhältnis zu erkennen ($\Delta m \approx 24\%$).

Druckverlust

Mit steigendem Pitch-Wellhöhen-Verhältnis steigt der Druckverlust. Diese resultiert aus der geringer werdenden Porosität und dem kleiner werdenden hydraulischen Durchmesser.

Hydraulischer Durchmesser

Der hydraulische Durchmesser wird um so kleiner, je größer das Verhältnis Pitch / Wellhöhe wird. Dieses ist bedingt durch das sich ändernde Verhältnis zwischen Umfang und Fläche einer Zelle.

Die Fläche einer Zelle verkleinert sich mit wachsendem Pitch / Wellhöhen- Verhältnis.

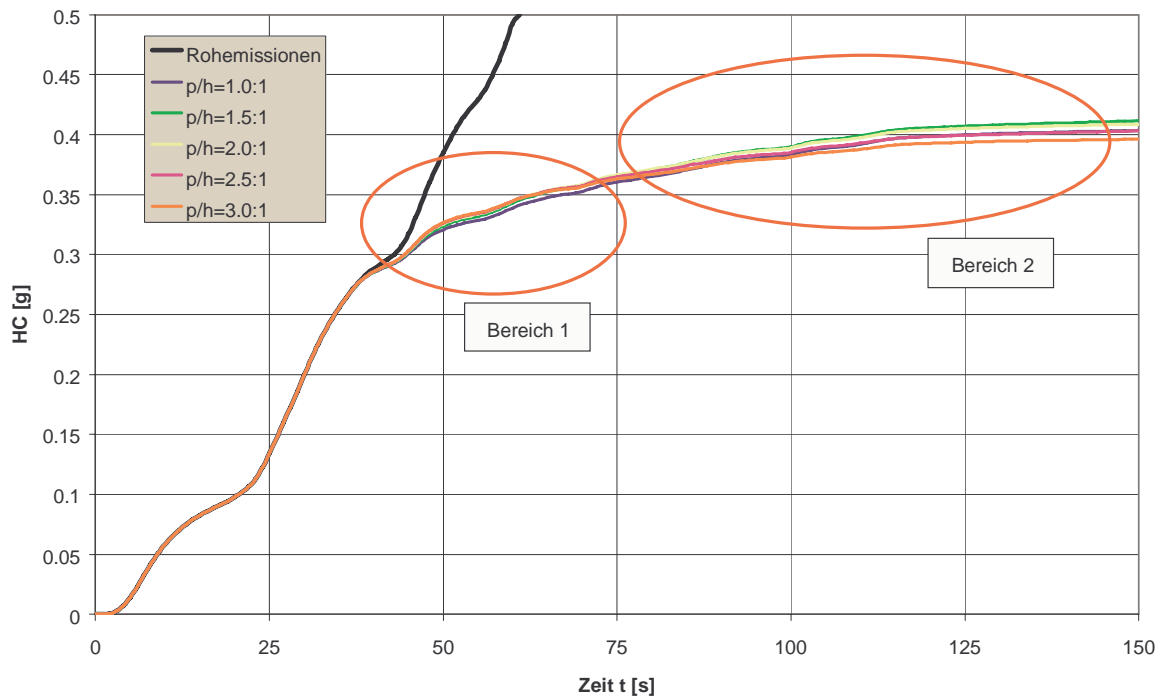
Der Umfang einer Zelle steigt mit wachsendem Pitch / Wellhöhen-Verhältnis.

KONVERTIERUNGSVERHALTEN

Um das Konvertierungsverhalten der modifizierten Zellenformen zu untersuchen wurde das Programm Katprog verwendet.

Mit einem vorgegebenen Massenstrom, Temperaturverlauf und HC-Konzentrationen wurden die einzelnen Zellendesigns untersucht.

Es ergaben sich folgende kumulierte Emissionsverläufe für die einzelnen Zellendesign-Varianten (Katalysatorabmessungen: Ø98,4x74,5mm, 400cps, 0.03mm):



Kumulierte HC Emissionen innerhalb der ersten 150 Sekunden

Man unterscheidet hier zwischen zwei Bereichen:

Bereich 1: Aufheizphase

Bereich 2: Betriebswarmer Zustand

Im Bereich 1 erkennt man einen Vorteil von >2% für das niedrigen Pitch-Wellhöhen-Verhältnisse, welcher auf die geringere thermische Masse des Trägers zurückzuführen ist.

Im Bereich 2 haben die hohen Pitch-Wellhöhen-Verhältnisse einen Vorteil von ca. 2% gegenüber den niedrigen. Begründet ist dieses in einer höheren GSA und einem kleineren hydraulischen Durchmesser. Ferner fällt der Massenstrom zu diesem Zeitpunkt sehr stark ab und die HC-Menge nimmt zu. Durch die geringere thermische Masse kühlen die Träger mit geringen Pitch-Wellhöhen-Verhältnis schneller aus, als die Träger mit größerer thermischen Masse.

FERTIGUNGSVERSUCHE

Wellbarkeit von Folien mit verringertem Pitch-Wellhöhen-Verhältnis

Für die Versuche wurden Folien mit zwei Stärken (30 und 50 µm) gewellt. Dazu wurden verschiedene Wellwalzen-Sätze eingesetzt, um annähernd gleiche Zellenzahlen bei unterschiedlichem Pitch/Wellhöhen-Verhältnis zu erzielen und zu vergleichen. Die Folie wurde gewellt, die Träger auf dem Versuchswickelstand gewickelt. Von jedem Trägerdesign wurden mindestens 5 Träger gewickelt und davon später 2 gelötet.

Foliendaten:	50 µm:	Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	1,53	-> 677cps
		Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	2,29	-> 637cps
	30 µm:	Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	1,23	-> 632cps
		Pitch/Wellhöhen-Verhältnis=	2,24	-> 613cps

Wellbarkeit von Folien mit hohe Zelldichten

Es wurden verschiedene Wellwalzen konstruiert, mit denen sich die hohen Zelldichten darstellen lassen. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, ein möglichst geringes Pitch-Wellhöhen-Verhältnis darzustellen.

Durch die Fertigungsversuche haben sich folgende Punkte ergeben:

Die Herstellung hochzelliger Wellwalzen ist sehr aufwendig. Die Lieferqualität ist stark schwankend. Die Hersteller sind nicht in der Lage, das Fertigungsergebnis zu überprüfen, so dass eine Vermessung extern durchgeführt werden muß. Meßergebnisse und Wellenergebnisse konnten bisher in keinen eindeutigen Zusammenhang gebracht werden. Aus diesem Grund wurde ein alternatives Herstellungsverfahren von Wellwalzen mit verändertem Werkstoff erprobt, um die Standzeit der Werkzeuge zu erhöhen.

Bei 30µm Folien und dicker, wurde ein hoher Verschleiß der 800cps Wellwalzen beobachtet.

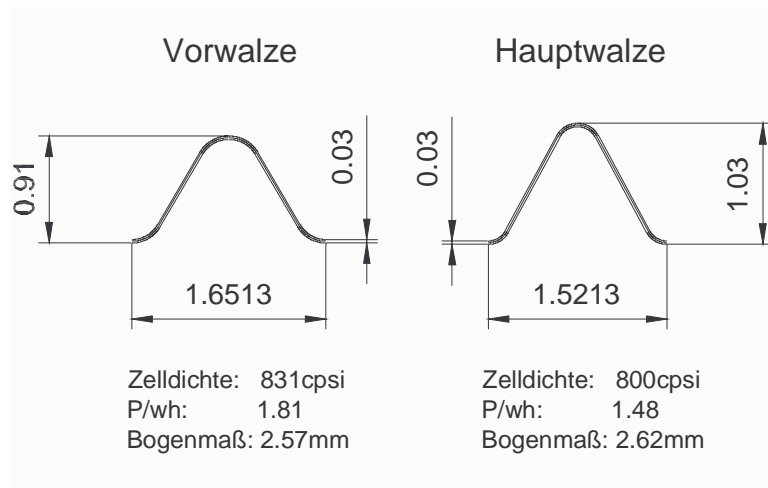
Mehrstufiges Wellen

Nachfolgend werden die Auslegungskriterien für das mehrstufige Wellen – in diesem Fall zweistufig – für die Zelldichte 800cps beschrieben. Die Auslegungskriterien haben jedoch unabhängig von der Zelldichte und Anzahl der Wellen ihre Gültigkeit.

Ziel war es eine Zellform (Sinusform) mit einem Pitch-Wellhöhen Verhältnis von ca. 1.4 – 1.5 und einer Zelldichte von 800cps herzustellen. Maximale Folienstärken sind 30µm bzw. optional 40µm.

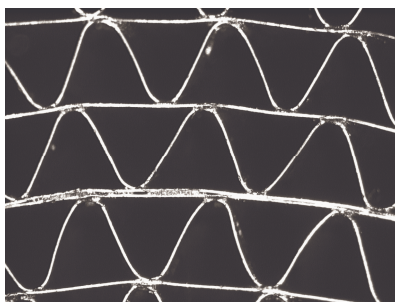
Es ist anzumerken, dass sich bei einem Pitch-Wellhöhen Verhältnis von 1.3 und einer sinusförmigen Zelle ein Minimum im Zellumfang ergibt. Aus Gründen der Prozesssicherheit beim Wellen bzw. Wickeln, Beleimen und Beloten wurde zunächst ein etwas höheres Verhältnis angestrebt (1.4 – 1.5). Ferner wurde festgestellt, dass es sich bei der „tatsächlichen“ Zellform nicht um eine exakte Sinusform handelt (Überlagerung von Sinus-, Dreieck- und Stiffform), welches zu Abweichungen zwischen Theorie und Praxis führt.

Jedes Walzenpaare wird über den Synchronantrieb angetrieben. Diese sind über einen Zahnriemen miteinander verbunden, dadurch wird die notwendige identische Drehzahl zwischen den Walzenpaaren erreicht.

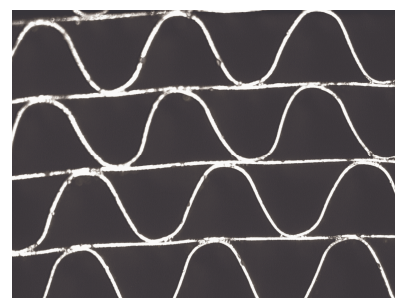


Zellformen Vorwalze – Hauptwalze

Der Pitch bei diesem Prozess wird um ca. 0.1mm reduziert. Dabei kann die Wellhöhe um ca. 0.1mm erhöht werden. Über dieses Verfahren sind Träger reproduzierbar fertigbar.



p/wh=1.5



p/wh=1.8

Zellformenvergleich

Wickelversuche

Beim Wickeln von Matrixpaketen mit niedrigem Pitch-Wellhöhen Verhältnis kommt es zu folgenden Schwierigkeiten:

- Träger können nur mit sehr niedriger Vorspannung gewickelt werden
- Der Grund liegt in der steiferen Zellform (höhere Formsteifigkeit)
- Es kommt zu Lagenablösungen innerhalb des Wickelzentrums
- Der Grund liegt im schlechteren „Gleitverhalten“ der Welllage und der fehlende Vorspannung im Matrixzentrum

Durch diverse Versuche konnte für die Zellform $p/wh=1.5$ eine exakte und konstante Zelldichte erreicht werden.

Beleimen und Beloten (LVM)

Es wurde die Leim- und Lotaufnahme von Trägern mit folgenden Abmessungen und Zellformen untersucht:

Matrixdurchmesser: 110mm
Matrixlänge: 110mm
Zelldichte: 800cps
Folienstärke: 30 μ m
Wickeltyp: SM4

Die ersten Versuche zeigten eine deutliche Streuung und eine höhere Lotaufnahme bei den Trägern mit der Zellform $p/wh=1.5$. Diese Schwankungen (Erhöhungen) sind auf die Veränderung der Kapillarkräfte im Zwickel zurückzuführen bzw. ist das Beleim- und Belotverfahren für flachere Zellformen ausgelegt.

Um ein ideales Beleimen bzw. Beloten mit niedrigem Pitch-Wellhöhen Verhältnis zu erreichen sind weitere Versuche mit alternativen Verfahren notwendig, die allerdings nicht im Rahmen des BMBF-Programms durchgeführt werden.

Versuchsergebnisse

Alle Träger mit verringertem Pitch/Wellhöhen-Verhältnis war n.i.O.

Es waren mit verringertem Pitch/Wellhöhen-Verhältnis nur Träger innerhalb einer sehr geringen Vorspannungsspanne von 1,5 bis 2,5 % wickelbar, was in der Praxis wegen der hohen Schwankungen kaum einstellbar ist.

Hauptfehler war ein Wickelfehler, der sich durch Lagenablösung im Wickelzentrum äußerte. Dieser ist auch nicht durch entspannen zu beseitigen.

Zur Verbesserung der Ergebnisse wurde ein 2-stufige Wellenrichtung konstruiert und gebaut. Die Versuche zeigten nach Überarbeitung den gewünschten Erfolg. Durch das Wellen in mehreren Schritten wird der Umformgrad pro Wellschritt reduziert, so dass auch höhere Ausprägungen der Folie möglich sind. Für 900cps ist eine Erweiterung auf dreistufige Wellen beauftragt.

VERGLEICH METALIT –KERAMIK

Um einen Vergleich zu Keramik-Trägern zu ziehen, wurden hier folgende Geometrien ergänzend betrachtet:

400 cps ; 4eck ; 4mil
400 cps ; 4eck ; 6.5mil
400 cps ; 6eck ; 4mil
400 cps ; 6eck ; 6.5mil

Verglichen wurden:

Porosität (Beschichtet mit Washcoat-Dicke 0.025mm)
Druckverlust (Beschichtet mit Washcoat-Dicke 0.025mm)
Washcoat Menge (Gewicht) je Zelle

Ergebnisse des Metalit-Keramik-Vergleichs

Im Vergleich zum Keramikträger sieht man, dass die verwendete Washcoat-Menge (Gewicht) je Zelle bei einer Keramik-Zelle wesentlich niedriger liegt ($\Delta m \approx 50\%$) als bei einer Metalit-Zelle. Der Grund hierfür liegt in der Ablagerung des Washcoates in den Zwickeln.

Durch Variation des Pitch/Wellhöhenverhältnis können Verbesserungen in der Reduzierung des Druckverlustes, Steigerung der Porosität und Reduzierung des Gewichtes (besonders die Washcoatmenge) gegenüber einem Keramikträger erzielt werden.

Die Vor- und Nachteile der modifizierten Well-Pitchhöhenverhältnisses wurden quantitativ in einer weiteren Untersuchung ermittelt. Hier sind nur die Ergebnisse dargestellt.

Vorteile	Nachteile
Reduzierung des Gewichtes ca. 20%	Verlust an GSA ca. 10%
Erhöhung der Porosität ca. 20%	
Reduzierter Druckverlust ca. 25%	
Verminderte Menge an Washcoat	

Zusammenfassend sollen hier noch mal die Vor- und Nachteile eines niedrigen Pitch/ Wellhöhenverhältnisses gegenüber einem hohem aufgeführt werden:

Vorteile:

- + Geringerer Druckverlust
- + Geringere Materialmenge (Kosten)
- + Geringere Mengen an Washcoat (Kosten)
- + Schnelleres Aufheizverhalten, bedingt durch geringere thermische Masse

Nachteile:

kleinere GSA
 größere hydraulischer Durchmesser
 geringere Wärmespeicherefähigkeit, bedingt durch geringere thermische Masse

BESCHICHTUNGSVERSUCHE

Ergebnis ist, dass durch die Veränderung der Viskosität und des Feststoffgehaltes der Suspension die Träger problemlos beschichtet werden können. Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass der prozentuale Washcoatanteil im Zwickel aufgrund der steileren Zellform sinkt.

DAUERHALTBARKEITSVERSUCHE

Verschiedene beschichtete Träger mit hohen 800cps Zeldichten wurden auf den Prüfständen mit dem ITC- und dem ETC-Test auf ihr Dauerhaltbarkeitsverhalten untersucht. Nachfolgend wird das Ergebnis eines Trägers, der einem ITC-Test unterzogen wurde, aufgezeigt:

Trägerabmessungen:

Matrixabmessungen: Ø79mm x 50,8mm; 800cps; 0,03mm Folie
 Mantelabmessungen:
 Außenmaße: Ø82mm x 1,0mm x 57mm; SULEV-Sicke
 Innenmaße: Ø80mm x 0,5mm x 50mm
 Träger wurden im beschichteten Zustand getestet.
 Beschichtung: LEX 120, 300 g/ft³, 1:18:1

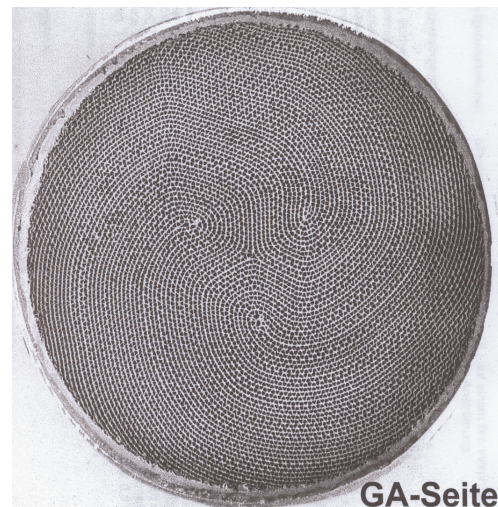
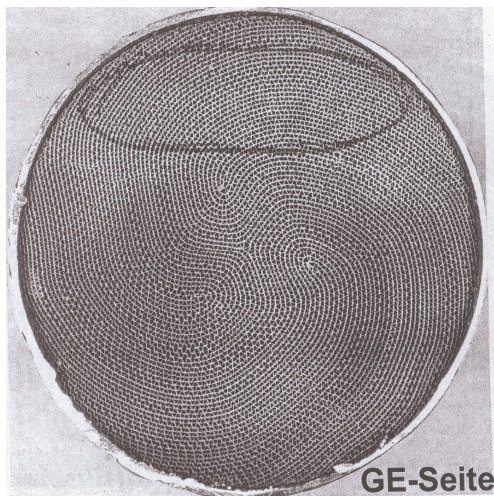
Testbedingungen:

Tmax: 960°C Matrix in 10mm Tiefe
 Tmin: 320°C Dto.
 Pos. Temperaturtransient: 9500 K/min (Gasttemperatur 10mm vor Kat)
 Pos. Temperaturtransient: 7000 K/min (Matrixtemperatur 15mm hinter Frontfläche)
 Neg. Temperaturtransient: -7000 K/min (Gasttemperatur 10mm vor Kat)
 Neg. Temperaturtransient: -1500 K/min (Matrixtemperatur 15mm hinter Frontfläche)
 Zykluszeit: 530s Heizen; 100s Kühlen

Es wurden zwei Träger getestet, einer mit konzentrischer und einer mit exzentrischer Anströmung

Ergebnisse der Dauerhaltbarkeitsversuche von Trägern mit verringertem Pitch-Wellhöhen Verhältnis

Beide Träger zeigten keine Auffälligkeiten. Bei exzentrischer Anströmung wurde lediglich im Bereich der Hauptanströmung ein geringer Matrix-Mantelspalt beobachtet. Nachfolgend sieht man die Gaseintritts- und die Gasaustrittsseite von dem exzentrisch angeströmten Träger:



GE-Seite nach ITC

GA-Seite nach ITC

Die getesteten Träger mit den hohen Zelldichten zeigten in den Standardtests keine Dauerhaltbarkeitsprobleme.

Thermische Dauerhaltbarkeit

Durch die Modifikation des Zellform wird das komplette Verhalten der Matrix hinsichtlich thermischer Ausdehnungen bzw. mechanischer Eigenschaften verändert.

Es wurden ITC-Tests durchgeführt.

Testdaten:

Tmax: 900°C

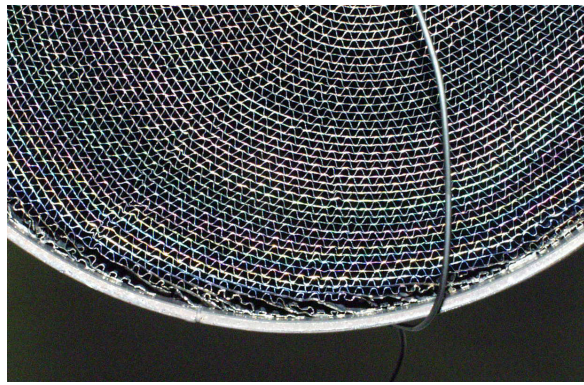
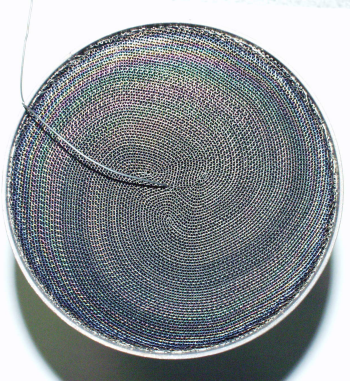
Tmin: 300°C

T: 2300 K/min

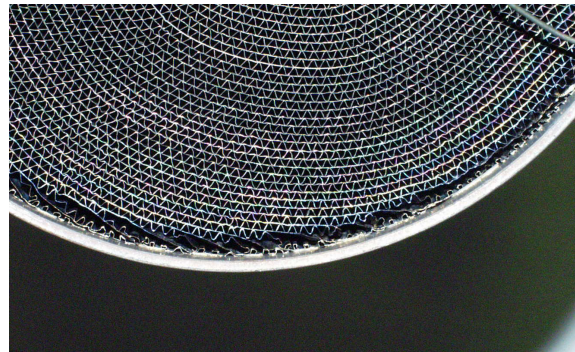
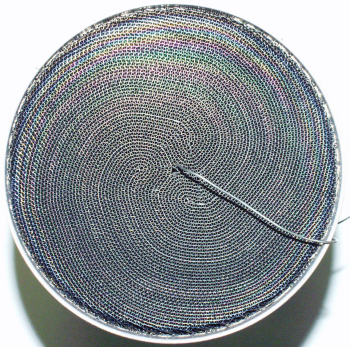
Zyklus: 7.5 / 7.5 min

Zyklusanzahl: 400

Vergleichsträger (Standard 800cpsi und 800cpsi mit modifizierter Zellform)



Trägerdaten: 800cps; 30µm; p/wh=1.8



Trägerdaten: 800cps; 30µm; p/wh=1.5

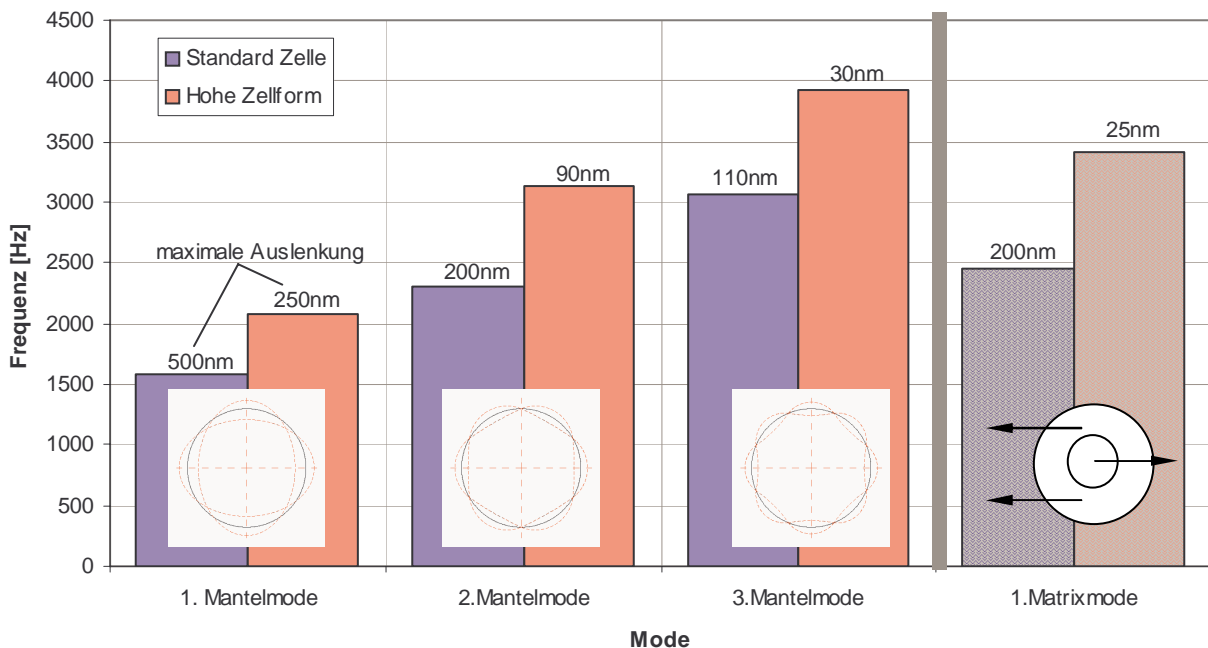
GA-Seite nach ITC-Test (hier 25 Stunden)

Der Versuch zeigt bei beiden Trägertypen eine ähnliche Schädigung. Es sind somit keine Unterschiede durch die geänderte Zellform feststellbar.

Schwingungsuntersuchungen

Um die Änderungen im Schwingungsverhalten der unterschiedlichen Zellform zu vergleichen, wurde an Trägern (Standard 800cps und modifizierte Zellform mit 800 cps) eine Modalanalyse durchgeführt.

Bei der Modalanalyse wird der Träger über zwei Fäden aufgehängt und über eine elektromagnetischen Schwingungserreger (Shaker) punktuell angeregt. Das Anregungssignal ist ein weißes Rauschen im Frequenzbereich 5 bis 8000 Hz.



Vergleich Mantel- und Matrixmoden

Die Frequenzen der einzelnen Mantelmoden werden etwa um 1000 Hz bei der modifizierten Zellform nach oben verschoben

Sowohl die Auslenkungen als auch die Beschleunigungen im Bereich der Mantelmoden sind zum Teil ein Vielfaches kleiner als bei der modifizierten Zellform

Die Frequenz des ersten Matrixmode ist um ca. 1000 Hz bei der modifizierten Zellform nach oben verschoben.

EMISSIONSMESSUNGEN

Die Untersuchungen wurden auf einem dynamischen Motorprüfstand der Porsche AG in Weissach durchgeführt. Für die Tests stand ein 5-Zylinder-Sauger-Motor mit 2,4l Hubraum von Volvo zur Verfügung. Das ursprüngliche ULEV-Motormanagement (\approx EU IV) wurde für die SULEV-Abgasvorschriften (\approx EEV) modifiziert.

Versuchsprogramm

Auf der Anlage wurden jeweils 3 FTP-Tests gefahren und die gemittelten Emissionswerte ermittelt. Bei je 2 dieser Tests wurde zusätzlich eine Modalanalyse der Emissionen vor und nach Katalysator erstellt. Außerdem wurden mit jeder Anlage drei Teillastpunkte, nämlich (50, 100 und 200kg/h) über einen längeren Zeitraum gehalten.

Emissionsmessungen an Trägern mit verringertem Pitch-Wellhöhen Verhältnis

Durch Änderungen der thermischen Masse, des Druckverlustverhaltens und der GSA wird das gesamte Effektivitätsverhalten des Trägers im Fahrbetrieb verändert.

Zur Zeit gibt es jedoch keine Vergleichsmessungen von Trägern mit unterschiedlichen Zellgeometrien. Hier wurden bisher nur Kat-Prog-Simulationen durchgeführt, welches auf der Basis der GSA, dem hydraulischen Durchmesser und der thermischer Masse das Kaltstartverhalten des Trägers berechnet wurden.

Reduzierung der thermischen Masse \rightarrow schnelleres Anspringen beim Kaltstart

Erhöhung des hydraulischen Durchmessers \rightarrow geringere Druckverlust

Reduzierung des GSA \rightarrow Geringere katalytische Oberfläche (beschichtungsdickenabhängig)

Die Bestätigungsversuche an einem Motorprüfstand oder an einem Fahrzeug stehen noch aus.

Ergebnisse

Anhand der Emissionsergebnisse ist deutlich zu erkennen, dass eine Erhöhung der Zellenzahl und somit eine Verkleinerung des hydraulischen Durchmesser zu einem verbesserten Stofftransport führt.

-----Abschnittswechsel (Nächste Seite)-----

Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass durch eine Modifikation der Zellform das Matrixverhalten beeinflusst wird. Dabei wird nicht nur das Verhalten der Struktur unter

	Zellform	Standard	Modifiziert	Bemerkung
Physik. Daten	Pitch-Wellhöhe	1.8	1.5	
	Therm. Masse	0	+	Thermische Masse wird um ca. 7% reduziert
Fertigung	Wellen	0	0	mehrstufiges Wellen notwendig
	Wickeln	0	-	Lagenablösungen im Wickelzentrum
	Vorspannung	0	-	Nur minimale Vorspannung zulässig
	Beleimen	0	- (?)	Prozessabhängig
	Beloten	0	- (?)	Prozessabhängig
	Lötqualität	?	?	Bisher keine Untersuchungen
Dauerhaltbarkeit / Effektivität	Thermisch	0	0	Es wurde kein Unterschied festgestellt
	Schwingung	0	+	Eigenmoden ca. 1000Hz höher
	Beschichtbarkeit	0	0	Es wurde kein Unterschied festgestellt
	Effektivität	0	?	Bisher keine Untersuchungen

Betriebsbedingungen beeinflusst, sondern sämtliche Fertigungsschritte müssen entsprechend angepasst werden

Um die Veränderungen der Zellform zu untersuchen, wurde

auf der Basis von 800cps eine Zellform mit einem Pitch-Wellhöhen Verhältnis 1.5 erstellt (Standardform ist eine Zelle mit Pitch-Wellhöhen Verhältnis 1.8). Es ist anzumerken, dass es sich schon bei der 800cps Standard-Zellform um eine relativ hohe Zellform handelt, so dass die Veränderungen verhältnismäßig gering ausfallen. Es gibt Standard-Zellformen bei denen das Pitch-Wellhöhen Verhältnis wesentlich höher ist ($p/wh > 3$), so dass hier eine Zellformmodifikation zu wesentlich höheren Veränderungen führen kann.

Im Anschluss ist ein tabellarischer Vergleich zwischen den beiden Zellformen dargestellt:

Im Rahmen zweier Programme wurde mittels amerikanischer FTP-75-Tests die Effektivität der LS-Struktur überprüft. Im zweiten Programm wurden auch Träger mit SQ-Struktur gefahren.

FTP-75 AN EINEM PORSCHE-MOTOR

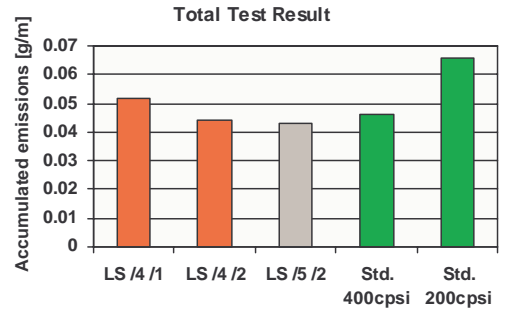
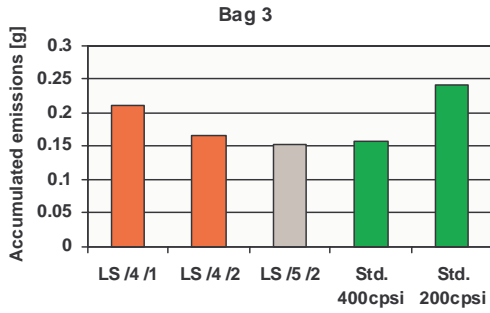
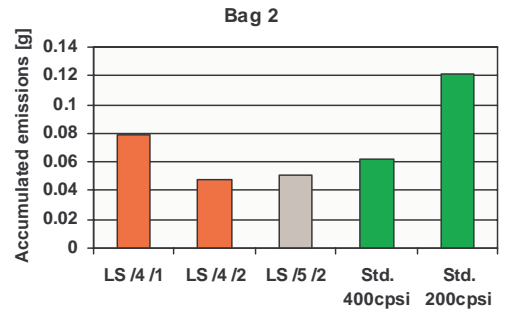
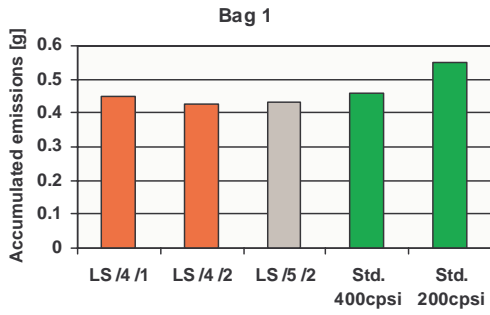
Im ersten Testprogramm wurde ein FTP-75-Tests durchgeführt. Die Dimensionen waren jeweils $\text{Ø}118 \times 74.5 \text{ mm}$ mit 200cpsi-Grundstruktur. Als Referenz wurde ferner ein 400cpsi-Standardträger eingesetzt. Bei den LS-Strukturen können folgende Dinge variiert werden:

Anzahl der Schaufeln pro Länge. Im speziellen Fall waren 4 oder 5 Schaufeln möglich

einseitige oder wechselseitige Struktur. Bei einer wechselseitigen Struktur werden in die Folien abwechselnd oben und unten Schaufeln eingedrückt. Dadurch sind die Schaufeln in jedem Kanal. Bei der einseitigen LS-Struktur werden die Schaufeln lediglich auf einer Seite der Wellfolie eingedrückt. Dadurch ist jeder zweite Kanal unstrukturiert.

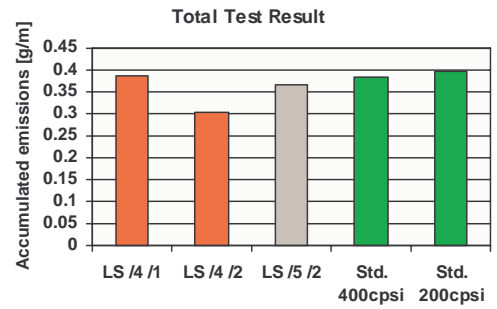
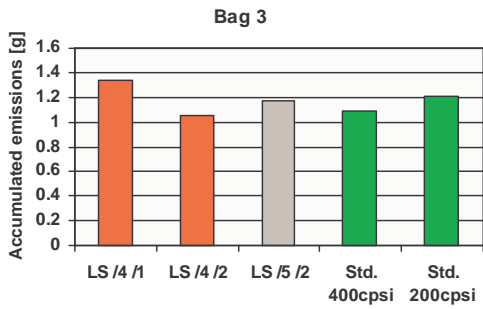
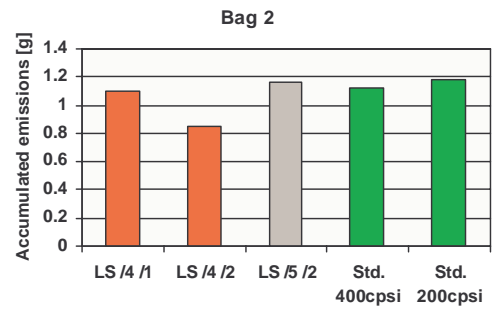
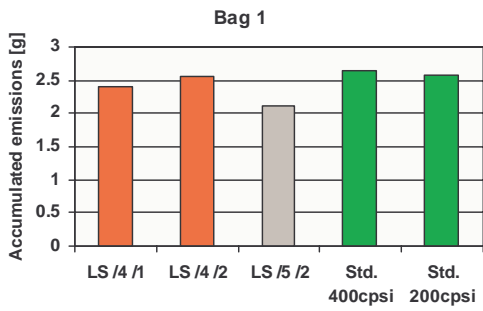
Es wurden basierend auf der 200cpsi-Grundstruktur wechselseitige Träger mit 4 und 5 Schaufeln gebaut, von den einseitigen lediglich einer mit vier Schaufeln.

Nachfolgend sind die Beutelergebnisse aus diesen Messungen dargestellt. Offensichtlich kann insbesondere die wechselseitige LS-Struktur ähnlich gute oder bessere Ergebnisse erzielen wie ein 400cpsi-Standardträger. Der einseitige LS-Träger ist eher mit einem 200cpsi-Standardträger vergleichbar, bringt also in der Emission vernachlässigbare Verbesserungen.

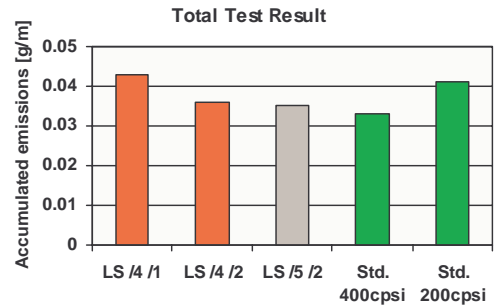
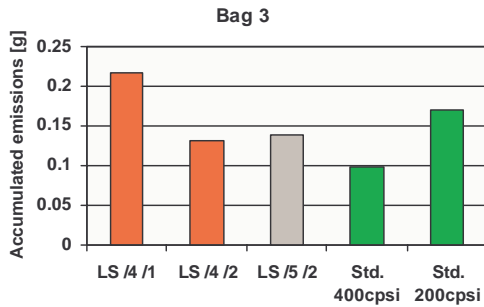
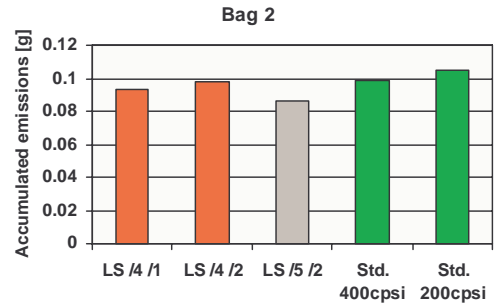
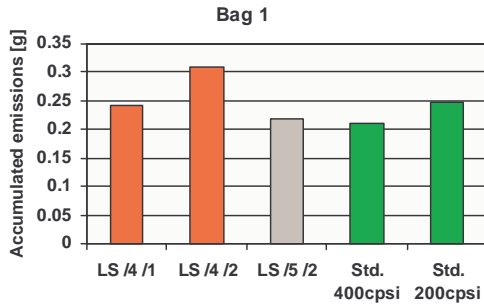


Beutelergebnisse HC

-----Seitenumbruch-----



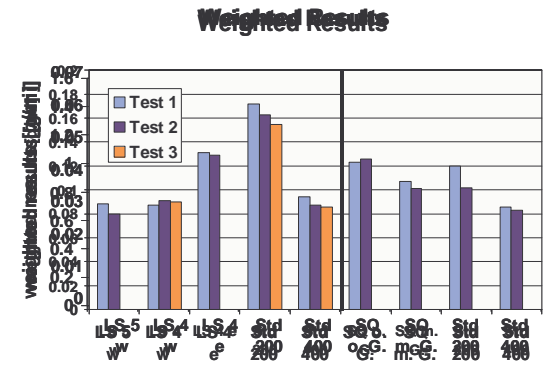
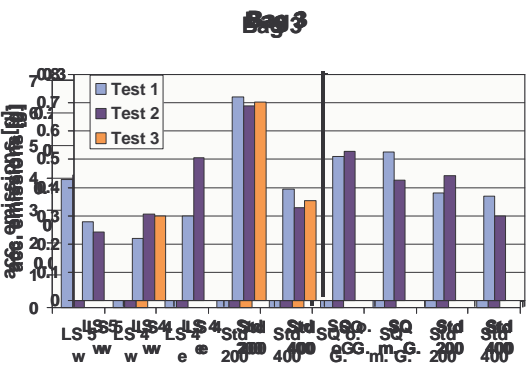
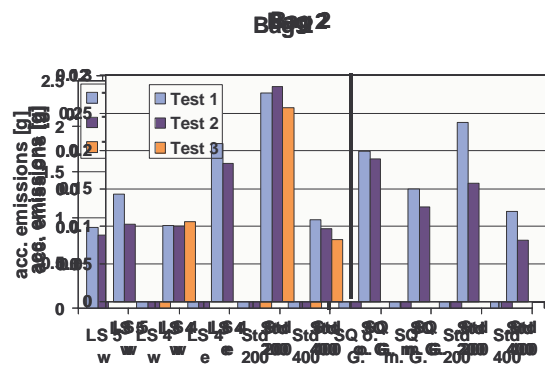
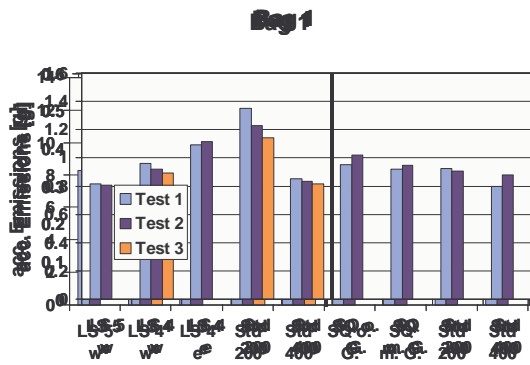
Beutelergebnisse CO



Beutelergebnisse NOx

FTP-75 AN EINEM AUDI 1,8-TURBO-MOTOR

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem obigen Programm an einem anderen Motor wurde diese an einem zweiten Motor wiederholt. Ferner wurden SQ-Träger mit und ohne Glattlage basierend auf einer 200cps-Grundstruktur mit 200cps- und 400cps Standardträgern verglichen. Es ist zu beachten, dass die beiden Gruppen aus unterschiedlichen Beschichtungslosen stammen und damit nicht direkt vergleichbar sind. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.



Beutelergebnisse HC Beutelergebnisse CO

Beutelergebnisse NOx

Die Ergebnisse für die LS-Träger entsprechen im Wesentlichen denen aus Kapitel 1.1. Auch hier sind die wechselseitigen LS-Träger mit dem 400cps-Standardträger vergleichbar.

Bei den SQ-Trägern stellt sich heraus, dass die Strukturänderung nicht die zusätzliche katalytische Fläche der Glattlage ersetzen kann. Trotz geringer Wärmekapazität stellt er auch in Beutel 1 die Obergrenze der Emissionen dar. Der SQ-Träger mit Glattlage ist in der Tendenz ähnlich dem wechselseitigem LS-Träger, scheint jedoch nicht ganz die Performance zu erreichen.

HALTBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

Ein weiterer kritischer Bereich bei Katalysator-Trägern ist die Dauerhaltbarkeit. Als effektiver Test, um dieses in relativ kurzer Zeit zu testen, bietet sich der sogenannte Super-Imposed-Test (SIT) an. Hierbei handelt es sich um einen kombinierten Heißrüttel- und Thermo-Zykliertest. Die Bedingungen sind im Einzelnen in der folgenden Tabelle dargestellt:

Größe	Einheit	Wert
Minimale Temperatur	°C	200
Maximale Temperatur	°C	800
Transient	K/min	2000
Beschleunigung RMS	g	22,5
min. Frequenz	Hz	50
max Frequenz	Hz	3000

SIT-Testbedingungen

Folgende Träger wurden getestet:

FA-Nr.	Durchmesser	Länge	Zelldichte	Folienstärke	Lötung	Typ	Laufzeit
E5000397-01	118 mm	74.5 mm	400cps	50µm	GE/GA	Standard	100 Std
E5000396-01	118 mm	74.5 mm	200cps	50µm	GE/GA	Standard	41:46 Std
E5511363-12	118 mm	74.5 mm	400cps	50µm	GE/GA	Standard; HD	100 Std
E5511363-11	118 mm	74.5 mm	200cps	50µm	GE/--	LS; HD	100 Std
E5511363-08	118 mm	74.5 mm	200cps	50µm	GE/GA	SQ mit Glattlage; HD	100 Std
E5511363-09	118 mm	74.5 mm	200cps	50µm	GE/GA	SQ ohne Glattlage; HD	22:50 Std

E. Katalysatordesign

Auf Basis der im Teilprojekt „Katalysatorisolation“ dargestellten Untersuchungsergebnisse wurden das sog. PZEV-Design für weitere Betrachtungen favorisiert. Das PZEV-Design sollte so optimiert werden, dass die Vorteile der äußeren Matrix-Isolation genutzt werden, um das Ziel besonders niedriger Emissionen zu erreichen und dabei die erforderliche Dauerhaltbarkeit des Trägers sicherzustellen.

1. TEMPERATURMESSUNGEN

Es wurden Temperaturmessungen durchgeführt, um eine Aussage über die Isolationswirkung des derzeitigen Entwicklungsstands ermöglichen zu können. Hierbei wurde das aktuelle PZEV-Design mit einem Katalysator verglichen, der TEC-C-Technik aufwies. Bei den Messungen wurden die Träger durch einen konstanten Heizgasstrom von 50 kg/h und einer Temperatur von 800°C aufgeheizt. Hierbei wurden die Temperaturen innerhalb des Katalysators gemessen und aufgezeichnet. Sie sind in den nachfolgenden Diagrammen für unterschiedliche Aufheizzeiten dargestellt.

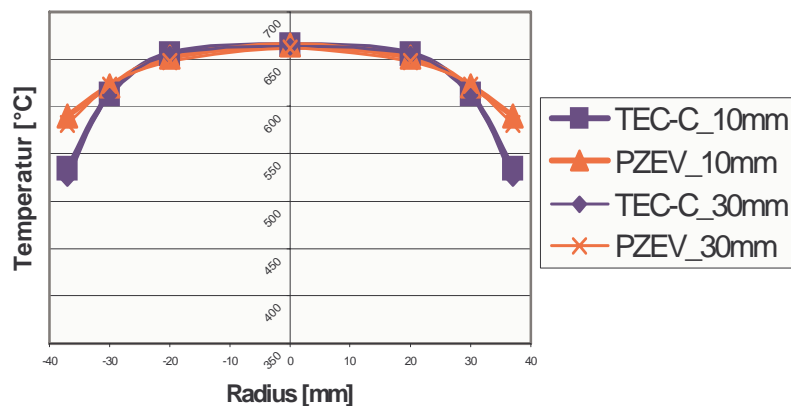


Bild 1. Temperaturverteilung nach 10 s Heizen

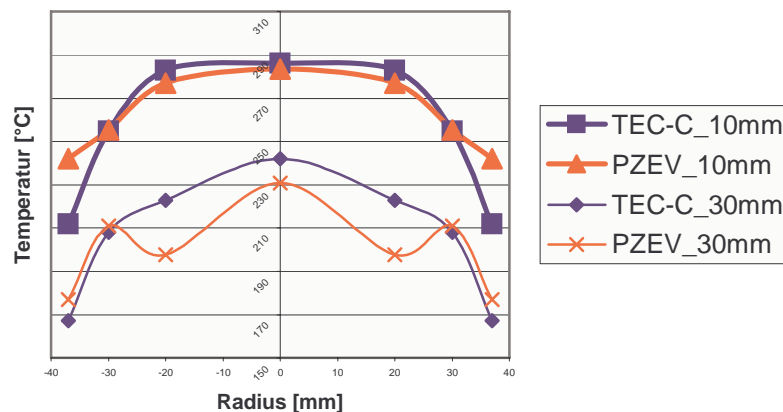


Bild 2. Temperaturverteilung nach 100 s Heizen

Wie den Grafiken entnommen werden kann, zeigt das PZEV-Design sowohl im Kaltstart als auch nach längerer Aufheizzeit besonders am Randbereich der Katalysatormatrix deutlich höhere Temperaturen und ist somit dem Standarddesign (hier repräsentiert durch TEC-C) in der Effektivität deutlich überlegen.

Es bleibt jedoch noch zu prüfen, wie sich die Temperaturen an der Außenseite des Katalysatormantels im Vergleich zum Standard verhalten. Dies wird Thema zukünftiger Tests sein.

2. UNTERSUCHUNGEN ZUM FERTIGUNGSPROZESS

2.1. FERTIGUNGSVERSUCHE MIT NICROFER 6025HT IN 250µM-DICKE

Das Anforderungsprofil für das Manschettenmaterial der PZEV-Träger sieht auch die Verwendung von 250µm-Folie vor. Mit der durchgeführten Untersuchung sollte geklärt werden, ob dieses Material in der Fertigung mit den vorhandenen Einrichtungen auf Breite gespalten, gewellt und auf Länge geschnitten werden kann.

Die Fertigungsversuche wurden an folgendem Bandmaterial durchgeführt:

Werkstoff: NiCroFer 6025HT
Werkstoff-Nr.: 2.4633
Charge: 150353
Foliendicke: 250 µm
Bandbreite: 200 mm
Zustand: weich

2.1.1 Spalten

Das angelieferte Material wurde auf der alten Spaltanlage, in der Prototypenfertigung von 200mm Breite auf 174 mm Breite gespalten.

- Die Auslegung der Maschine reichte aus, um das Band zu spalten. Es wurden keine sichtbare Abnutzung an den Schneidmessern festgestellt. Nach der 250µm-Folie wurde jedoch Folienmaterial in 30µm gespalten. Hier wurde ein erheblicher Schnittgrat festgestellt. Es ist somit davon auszugehen, dass doch ein größerer Messerverschleiß stattfindet.
- Risse konnten keine an der Schnittkante ermittelt werden.
- Die Messung des Schnittgrates ergab einen Wert von 0,0083 mm bis 0,0186 mm. Die Forderung der Werkstoffspezifikation verlangt einen Wert von 10% der Foliendicke mit einem Zielwert von 5%.

Messung Nr.:	Messung mit:	Istwert [mm]	Istwert [% der Foliendicke]	Sollwert 10% [mm]	Zielwert 5% [mm]
1	Konturograph	0,0186	7,44	0,0250	0,0125
2		0,0083	3,32		
3	Schliffbild	0,0147	5,88		
4		0,0169	6,76		

Somit liegt der Schnittgrat innerhalb der EMITEC-Spezifikationen.

- Die NiCroFerfolie in 250µm lässt sich auf den vorhandenen Einrichtungen in der Breite spalten.
- Die Messer der Spaltanlage müssen jedoch anschließend gewechselt werden, wenn dünne Folie geschnitten werden soll, da sonst der Schnittgard zu groß ist und nicht den EMITEC-Anforderungen mehr entspricht. Dies deutet auf einen nicht unerheblichen Messerverschleiß hin.
- Zukünftig (bei Serien) sollte das Band vom Hersteller in der benötigten Breite angeliefert werden.

2.1.2 Wellen

Das zuvor gespaltene Band sollte dann auf die Wellhöhen 1,0mm und 0,7mm gewellt werden (gemessen Wellspitze / Wellspitze).

- Es ist kaum möglich, die geforderte Wellhöhe bei einer Bandbreite von 174mm zu erreichen. Das Band zeigt eine Tonnenform und ist somit anschließend nicht mehr verarbeitbar.
- In einer Breite von 110mm lässt sich das Band jedoch wellen.
- Das Problem stellt sich anscheinend durch ein Durchbiegen der Wellwalze dar.
- Es muss eine Wellwalze mit größerem Durchmesser hergestellt werden, mit der höhere Wellkräfte aufgebaut werden können, ohne dass es zu einem Durchbiegen der Walze kommt.

2.1.3 Schneiden

Das gespaltene und gewellt Band wurde unter der Schere abgelängt. Es wurden 20 Schnitte 1-lagig, 20 Schnitte 2-lagig und 20 Schnitte 3-lagig durchgeführt.

- Bei den Versuchen zum Ablängen der Wellfolie in der 1-lagigen, 2-lagigen und 3-lagigen Ausführungen konnten keine negativen Punkte gefunden werden. Die Begutachtung der Messer und des Schnittgrates an der Folien verliefen ebenso positiv. Es konnten keine Risse an den Schnittkanten ermittelt werden.

2.1.4 Messen der Wellhöhe

Es ist notwendig, die Wellhöhe den Foliendicken anzupassen bzw. entsprechend zu definieren. Momentan wird die Wellhöhe Wellspitze / Wellspitze gemessen. Bei dicker werdendem Material ist somit aber die Ausprägung geringer. Daher wird die Wellhöhe als Maß der neutralen Faser definiert worden. Die Angabe der Wellhöhe in den Zeichnungen ist abhängig von der Foliendicke.

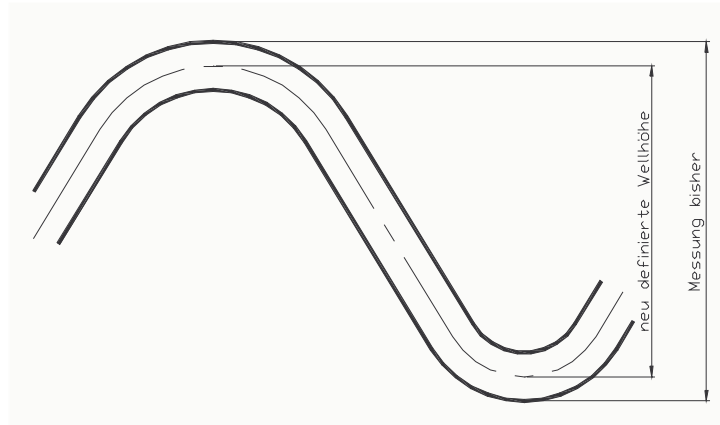


Bild 3. Vergleich von neu definierter und ursprünglicher Wellhöhenmessung

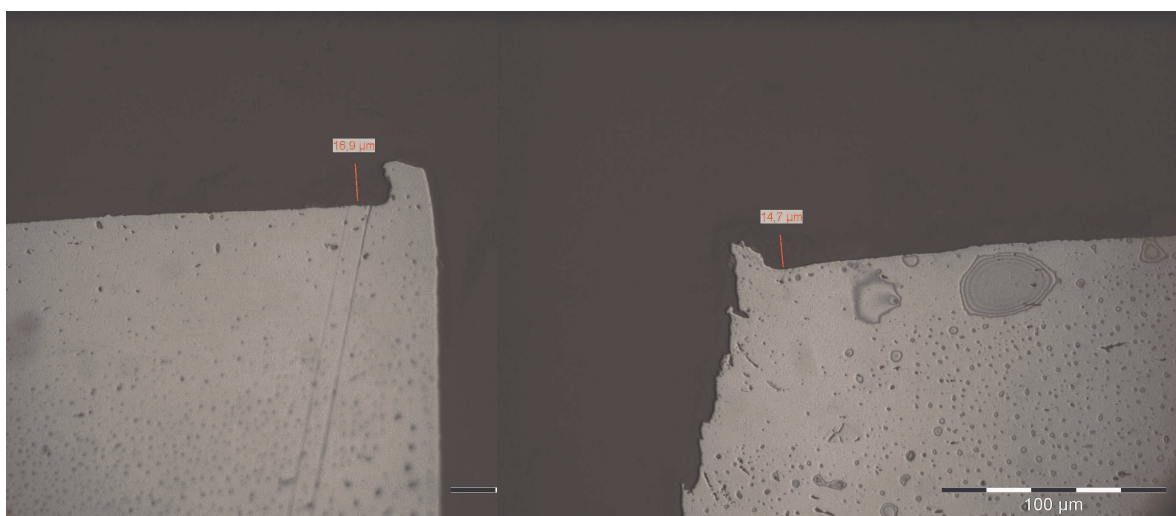


Bild 4. Schlichtbilder Schnittgrat

Um zukünftig auch breites 250µm-Folienmaterial wellen zu können muss der Wellbock und die Wellwalze stärker ausgeführt werden.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wird die Wellhöhe über die Wellspitzen bestimmt. D.h. mittels eines Meßschiebers wird der Abstand zwischen den Wellbergen gemessen. Siehe hierzu auch die Skizze unter „2. Zusammenfassung“. Dies hat zur Folge, dass bei dicker werdender Folie die Wellausprägung geringer wird. Dieser Fehler macht sich bei einer Foliendicke zwischen 0,03mm und 0,05 mm kaum bemerkbar. Da nun aber mit Foliendicken von 0,250mm gearbeitet wird, ist dieser Fehler relevant. Es wurde festgelegt, die Wellhöhe für die PZEV-Manschette zukünftig als Abstand der neutralen Faser zu definieren. Dieses Maß ist in der Fertigung jedoch nicht direkt meßbar. Daher sollen die Zeichnungsangaben zur Wellhöhe in Abhängigkeit zur Foliendicke angegeben werden.

2.2. UNTERSUCHUNG ZUR QUALIFIZIERUNG DER ROLLSCHWEIßNAHT

Bei der Herstellung von PZEV-Trägern, bzw. der Manschetten soll der Wellmantel und das Verbindungselement zukünftig mittels einer Rollnahtschweißung verbunden werden. Diese Notiz befaßt sich mit der Bewertung der Schweißnaht auf evtl. Einflüsse auf die Elementverteilung des Folienmaterials im Bereich der Schweißnaht und der Kontamination mit Kupfer durch die verwendete Kupferschweißelektrode. Desweiteren wird die Beeinflussung der Oxidationsbeständigkeit von NiCroFer6025HT-Folie durch die Schweißung und die Scherzugfestigkeit im Vergleich zu Lötverbindungen betrachtet.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Elementverteilung zeigt keine Kontamination der Schweißnaht durch Kupfer
- Es kommt zu keiner signifikanten Inhomogenität der Elemente Al und O.
- Es sind einige kleine punktförmige Anreicherungen an Cr festzustellen, was an diesen Stellen eine Verarmung an Nickel zur Folge hat.
- Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass keine negativen Beeinträchtigung der Elementverteilung durch die Schweißnaht vorliegt.
- Es konnte kein signifikanter Unterschied in der Oxidationsbeständigkeit und dem Formstabilitätsverhalten ermittelt werden.
- Die Schlißbilder der ausgelagerten Proben bestätigen die gemessenen Ergebnisse
- Die Scherzugfestigkeit liegt im vergleichbaren Rahmen der für Lötverbindungen ermittelten Werte
- Die Dehnung des Materials liegt über der Lötverbindungstechniken.
- Die Festigkeit liegt deutlich über der für eine Buckelnahtschweißung.

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse kann die Rollnahtschweißung für die Verbindung von Wellmantel und Verbindungselement bei PZEV-Trägern freigegeben werden.

2.3. FERTIGUNGSVERSUCHE VON PZEV-TRÄGER

Es wurden mehrere Fertigungsalternativen für eine spätere Serienfertigung von PZEV-Trägern verfolgt. In der Hauptsache liegen die Unterschiede in der Reihenfolge nach der gefertigt wird.

Bei der Version 1 wird erst die vorgefertigte Manschette in das Trägerrohr eingedrückt und anschließend die Matrix in die Manschette-Rohr-Einheit eingedrückt.

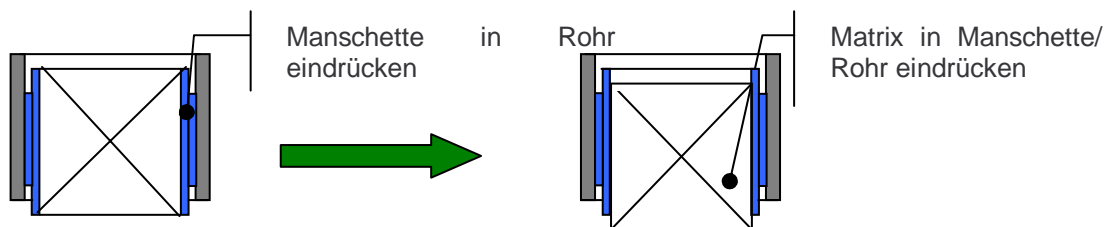


Bild 5. Fertigungsalternative Version 1

Bei der Version 2 wird erst die Matrix in die Manschette eingedrückt, beleimt und belotet und dann erst die Manschetten/Matrix-Einheit in das Trägerrohr eingepresst.

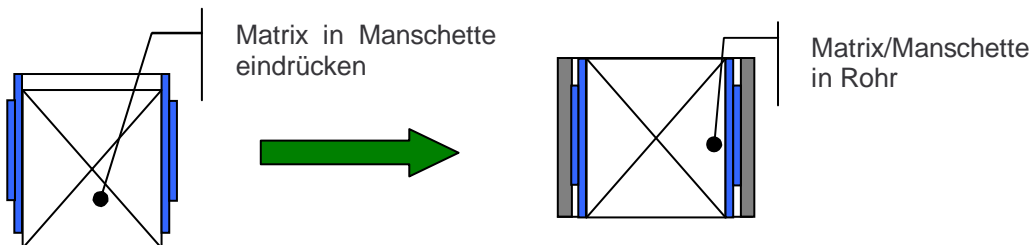


Bild 6. Fertigungsalternative Version 2

Fertigungsversuche mit beiden Varianten zeigten, dass zum Teil erhebliche Probleme mit unerwünschten Anbindungen zwischen Wellmantel und Verbindungselement bestehen. Diese sind in erster Linie auf Lotverschleppung während dem Beloten und Chargieren der Träger zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde eine dritte Variante aufgelegt, bei der die Matrix in einem Hilfsrohr beleimt und belotet wird und anschließend in das bereits im Mantelrohr eingesetzte Verbindungselement umgedrückt wird.

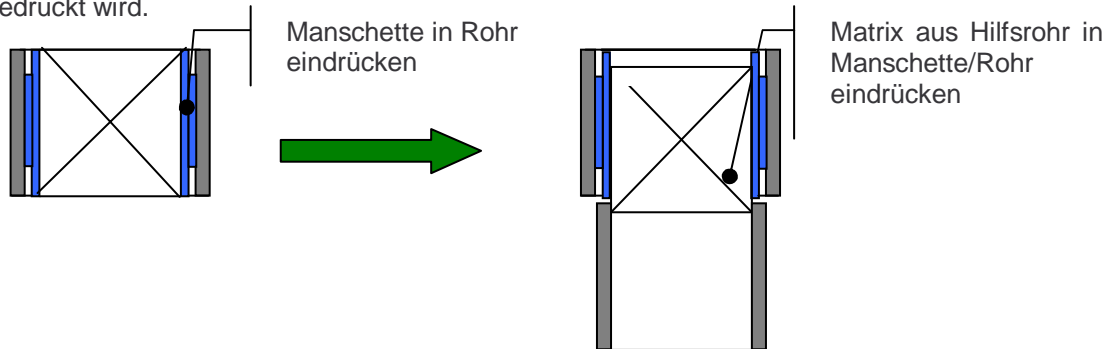


Bild 7. Angewendete Fertigungsalternative

Somit kommt das eigentliche Verbindungselement in keinem Prozessschritt mehr direkt in Verbindung mit Beloteinrichtungen, wodurch das Risiko der Lotverschleppung deutlich reduziert werden konnte. Bei der Fertigung von Testchargen wurden bei der anschließenden Analyse der Teile keine Fehlanbindungen festgestellt. Im weiteren Verlauf traten jedoch immer wieder Diffusionsverbindungen zwischen den beiden Welllagen auf, die wirkungsvoll nur durch eine physikalische Trennung der Oberflächen (z.B. durch eine keramische Beschichtung) zu vermeiden ist. Diese ist prozesstechnisch jedoch sehr aufwendig und somit teuer, so dass eine wirtschaftliche Fertigung von HX-Trägern deutlich erschwert wird.

3. DAUERHALTBARKEITSUNTERSUCHUNGEN

3.1.1 Auslagerungstest NiCroFer 6025HT

Die Auslagerungsergebnisse der NiCroFerfolie in 50µm zeigen eine deutlich höher Oxidation als eine Standardfolie in 50µm. Jedoch ist auch nach 400 Stunden noch kein Oxidationsdurchbruch (Break-Away-Point) festzustellen. Die Flächenbezogene Oxidation der 130µm-Folie ist der 50µm-Folie vergleichbar. Die Schlifffbilder der ausgelagerten Träger zeigen deutlich Oxidation im Randbereich der 130µm-Folie mit Verästelungen in die Folienmitte. Die 50µm-NiCroFer-Folie zeigt eine deutliche Oxidation bis hin zur kompletten Durchoxidation der Folie.

Die Längenänderung der NiCroFer-Folie in 130µm entspricht im etwa der der Standard-Folie in 50µm. Die NiCroFer-50µm-Folie zeigt ein größeres Längenwachstum.

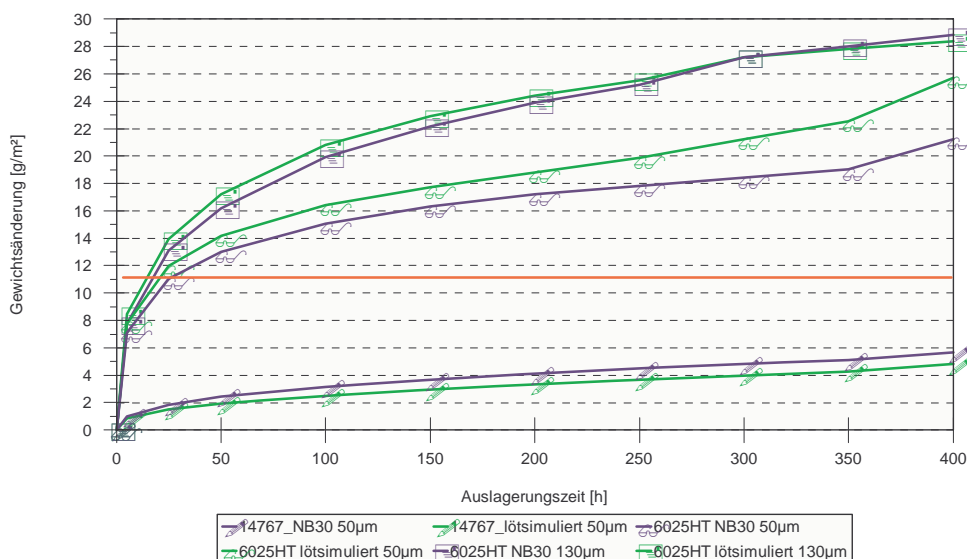


Bild 8. Oxidationsverhalten, Qualifizierung NiCroFer 6025HT

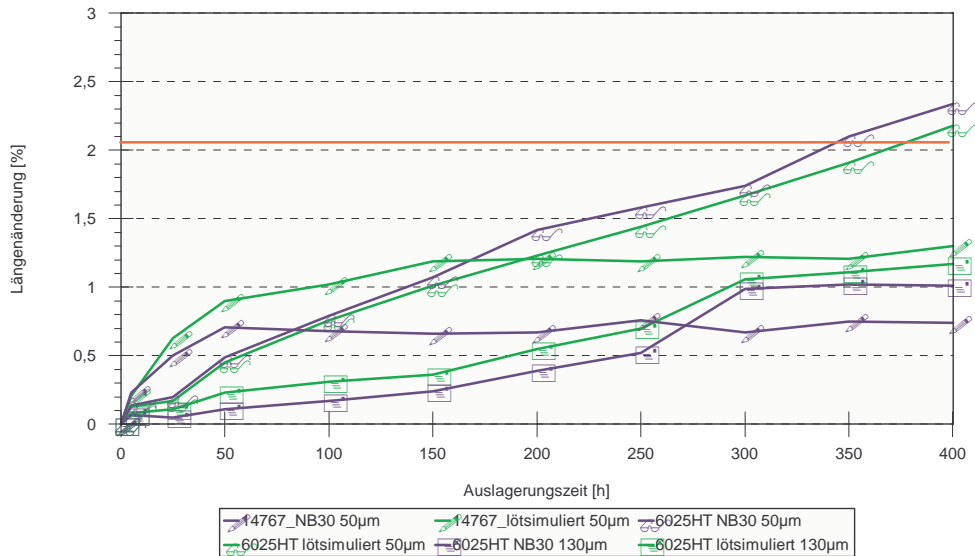


Bild 9. Formstabilität, Qualifizierung NiCroFer 6025HT

3.1.2 Auslagerungstest Lotfolie MBF51-50µm

Der Auslagerungstest mit der Lotfolie MBF51-50µm zeigt eine extrem starke Gewichtszunahme beim Auslagerungstest der Standardfolie anhand der Messwerte gegenüber der Probe mit NB30-Lot. Diese starke Gewichtszunahme durch die Lotfolie ist bei den NiCroFer-Folien nicht erkennbar. Der Effekt wird von der starken Oxidation der Folie selbst überdeckt.

Auch bei der Längenänderung ist außer bei der Standardfolie kein signifikanter Unterschied zwischen der Lotfolie und dem Standardlot erkennbar.

Die Schlibfbilder der Lotfolienproben zeigen deutlich, dass bei den beiden 50µm-Materialien die Folie in weiten Bereichen komplett oxidiert / korrodiert ist. Bei der 130µm-NiCroFer-Folie ist dieser Effekt nicht zu erkennen. Hier zeigt sich keine negative Beeinträchtigung der Oxidation durch die Lotfolie.

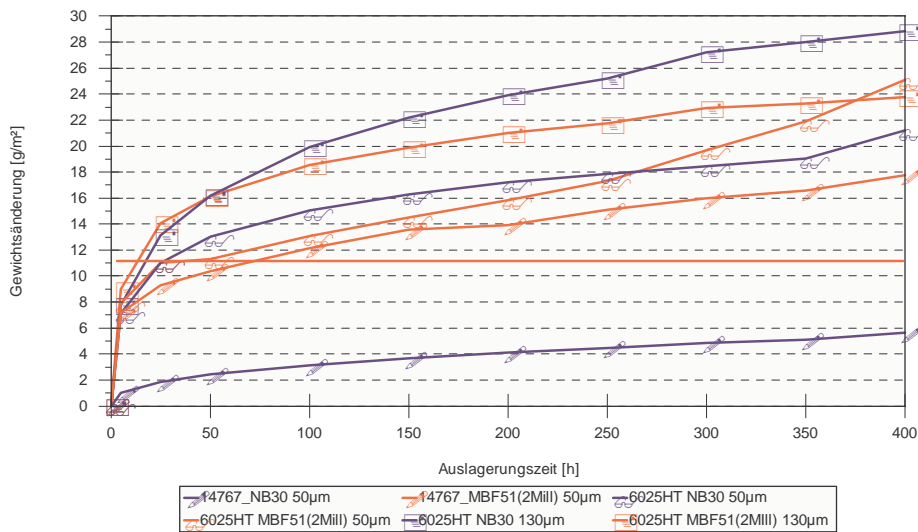


Bild 10. Oxidationsverhalten, Qualifizierung Lotfolie

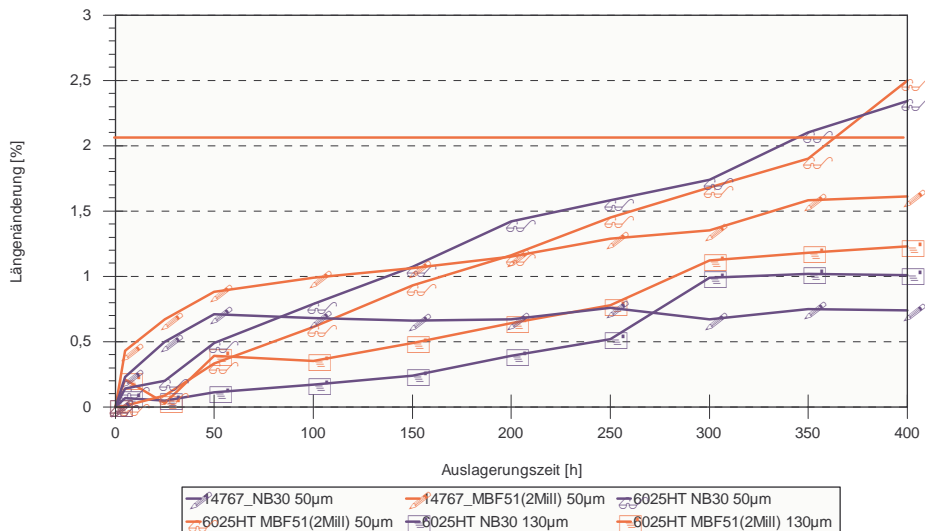


Bild 11. Formstabilität, Qualifizierung Lotfolie

3.1.3 Scherzugversuch

Beim Scherzugversuch werden 2 Folien durch Lötten, Schweißen o.ä. miteinander verbunden und anschließend in tangentialer Richtung belastet. Dadurch wird zum einen die Materialfestigkeit, zum anderen die Festigkeit der Verbindung überprüft.

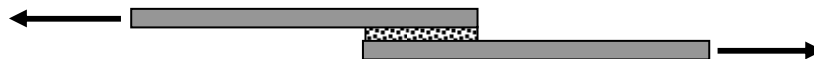


Bild 12. Prinzip des Scherzugversuchs

Nr.	Grundmaterial [N]	Lotpulver [N]	Lötfolie MBF50 1Mill [N]	Lötfolie MBF51 1Mill [N]
1	1906	2414	2147	1592
2	2149	1948	1864	1595
3	2126	2444	1896	1923
4	1845	1878	1981	2207
5	1722	2342	1944	1678
6	1806	1864	2090	1995
7			2213	2206
8			1997	2211
9				1973
10				2058
xquer	1926	2148	2017	1944

Bild 13. Tabelle: F_{max}

Nr.	Grundmaterial [N/mm ²]	Lotpulver [N/mm ²]	Lötfolie MBF50 1Mill [N/mm ²]	Lötfolie MBF51 1Mill [N/mm ²]
1	504	619	543	393
2	532	490	489	405
3	527	610	477	493
4	467	491	489	557
5	437	585	495	426
6	481	484	524	508
7			556	534
8			519	567
9				521
10				533
xquer	491	547	511	494

Bild 14. Tabelle: Rm

Nr.	Grundmaterial [mm]	Lotpulver [mm]	Lötfolie MBF50 1Mill [mm]	Lötfolie MBF51 1Mill [mm]
1	11,3	7,0	5,8	5,4
2	11,7	6,4	5,7	5,4
3	10,5	6,7	5,6	6,0
4	9,1	6,2	5,8	6,7
5	8,6	6,9	5,6	5,7
6	10,2	5,7	6,5	5,9
7			6,5	6,5
8			6,7	7,0
9				6,7
10				6,6
xquer	10,2	6,5	6,0	6,2

Bild 15. Verformungsweg

Die Zugfestigkeiten der gelöteten Proben liegen insgesamt etwas höher als die einer Standard-Zugprobe. Alle Materialrisse erfolgten dabei im Grundwerkstoff, die Verbindungsstellen selbst zeigten keine Beschädigungen. Dieses Verhalten ist u.U. auf eine Versprödung des Matrixmaterials zurückzuführen, verursacht durch Umlegierungen des Grundwerkstoffes in der Nähe der Lötverbindungen bedingt durch die Legierungselemente des Lotes. Dies spiegelt sich auch deutlich in den aufgenommenen Verformungswegen wieder.

Die Ergebnisse bei Raumtemperatur zeigen, dass die Festigkeit der Lötverbindungen mit Lotfolie den Werten des Standardlotes entspricht.

4. MOTORPRÜFSTANDSDAUERLÄUFE

--- Vertraulich ---

4.1. WEITERENTWICKLUNG DES DESIGNS

Beim bisherigen PZEV-Design (nachfolgend HX genannt) traten bei der Umsetzung in der Fertigung wiederholt Probleme mit unerwünschten Anbindungen vor allem im Bereich zwischen den beiden Welllagen auf. Diese sind auf Lotverschleppungen während der Trägerpräparation zurückzuführen und lassen sich bei den bestehenden Fertigungsverfahren nicht wirkungsvoll vermeiden. Hierzu wären Zusatzmaßnahmen notwendig (z.B. partielle Beschichtung), die einen stark erhöhten Kostenaufwand bedeuten.

Aus diesem Grund wurde aus dem bestehenden Design ein etwas vereinfachtes Design abgeleitet, das nur noch eine zusätzliche Welllage verwendet, die mit der Matrix vollflächig, mit dem Mantel nur über einen schmalen Mittenlotstreifen verbunden ist (Bild 15). Durch den Wegfall der Verbindungslage

zum Mantel hin verringert sich die Komplexität des Trägers deutlich, so dass durch eine Beschichtung der Mantelinnenseite (ähnlich wie sie bereits bei TEC-C Trägern in Serie verwendet wird) die geforderte Prozesssicherheit erreicht werden kann.

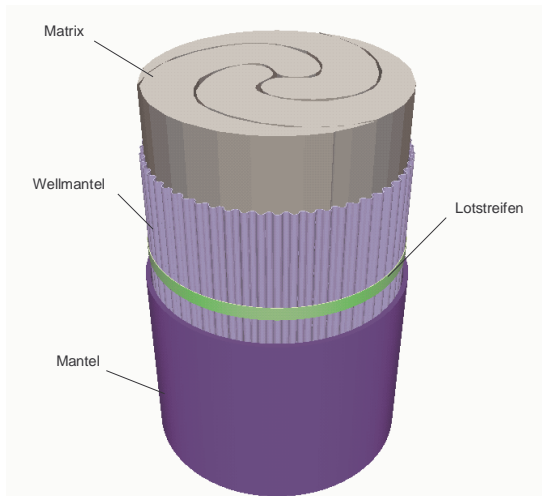


Bild 16. Aufbau HD-Design

4.2. AUSDRÜCKVERSUCH

Durch die starre Verbindung zwischen Wellmantel und Mantel verringert sich die Flexibilität des Wellmantels. Um die notwendige Flexibilität im besonders belasteten Gaseintritts- und Gasaustrittsbereich zu erhalten, muss die Verbindung so kurz wie möglich ausgeführt werden. Dies wird vor allem durch die erhöhte Warmfestigkeit des Nicrofer-Materials als auch durch die hohe Folienstärke ermöglicht.

Um zu überprüfen, ob die mechanische Festigkeit tatsächlich vergleichbar einem Standardträger oder aber einem HX-Träger ausfällt, wurden Ausdrückversuche an der mechanischen Presse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der gewählten Auslegung die Festigkeit der bekannten Designs deutlich überschritten wird (Bild 16). Da die Versuche mit einem kleinen Stempel durchgeführt wurden, der sich nicht auf dem Wellmantel, sondern auf der Matrixstirnfläche abstützt, ist die Verbindung Matrix/Wellmantel ebenfalls in diesem Ergebnis enthalten. Hier wirkt sich die deutlich vergrößerte Anbindungslänge gegenüber dem Standardträger aus.

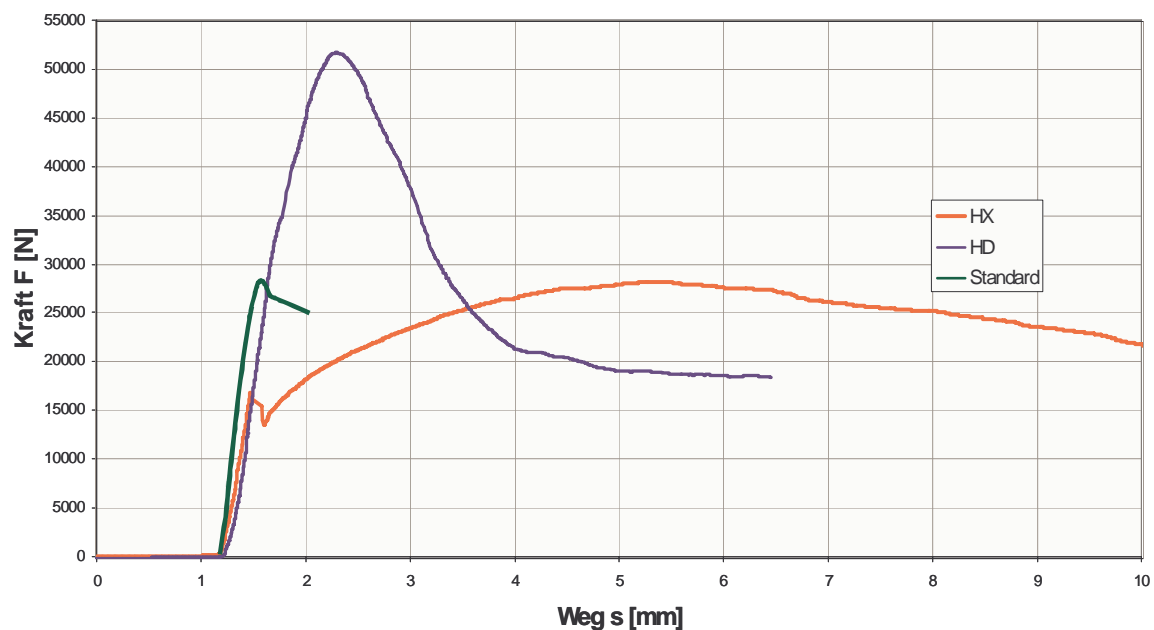


Bild 17. Ausdrückkräfte unterschiedlicher Designs

4.3. MOTORPRÜFSTANDSVERSUCHE

--- Vertraulich ---

5. EMISSIONSMESSUNGEN

--- Vertraulich ---

6. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE

Basierend auf den Untersuchungen in den Teilberichten B (Katalysatorisolation) und C (Reduktion der thermischen Masse) wurde das oben beschriebene Design erstellt. Ziel war, einen Träger zu entwickeln, der motornah herrschenden Bedingungen optimal angepasst ist und die Einhaltung zukünftige Abgasgrenzwerte unterstützt. Mit dem HD-Design konnte eine Lösung gefunden werden, die die Möglichkeit bietet, auch bei sehr dünnen Folien hohe wechselnde Temperaturbelastungen dauerhaft zu kompensieren. Noch nicht erklärbar sind die widersprüchlichen Ergebnisse zwischen den Temperaturmessungen am Strömungsprüfstand und den Emissionsergebnissen im EU3-Test. Hier sind weitere Untersuchungen geplant.