

## “Abgasnachbehandlung - moderne Katalysortechnologien”

Wolfgang Maus, Rolf Brück; Emitec GmbH

1. Einleitung
2. Katalysatorkonzepte
  - 2.1 Katalytische Effektivität
  - 2.2 Kaltstart; Thermodynamische Optimierung
    - 2.2.1 Kohlenwasserstoff Adsorber
    - 2.2.2 Elektrisch Heizbarer Katalysator
  - 2.3 Warmstartverhalten; Isolation
3. Applikation
4. Zusammenfassung

### 1. Einleitung

Weltweit werden seitens des Gesetzgebers die bestehenden Emissionsgesetze in den nächsten Jahren weiter verschärft. Erst Mitte 1996 beschloß die Europäische Gemeinschaft die für 1999 gültigen Abgasgrenzwerte Euro Stufe III. Gleichzeitig wurde eine weitere Reduzierung für das Jahr 2005, die sogenannte Euro Stufe IV vorgeschlagen. In Diskussion sind zur Zeit steuerliche Vergünstigungen für Kraftfahrzeuge die vor dem Jahr 2005 Stufe IV Grenzwerte erreichen. Diese neuen Grenzwerte in Verbindung mit einer Modifizierung des europäischen Abgastests führen zu einer weiteren Annäherung bzw. Verschärfung der Anforderungen bezogen auf die amerikanische und kalifornische Abgasgesetzgebung. Vergleichbar mit dem amerikanischen FTP Test (Federal Test Procedure) wird im neuen Europatest die 40 Sekunden andauernde Leerlaufphase auf 11 s verkürzt und die Abgasmessung unmittelbar mit Motorstart beginnen. Bild 1 zeigt einen Vergleich der ersten 150s der beiden Abgastests und die entsprechenden Gastemperaturen vor Katalysator.

Bild 1: Kaltstartphase des MVEG III und FTP Abgaszyklus und Abgastemperaturen vor Katalysator

Deutlich ist die aufgrund der langsameren Geschwindigkeiten im ersten Fahrhügel des Europatests niedrigere Gaseintrittstemperatur zu erkennen. Dieser Faktor führt zu einem späteren "Anspringen des Katalysators" und damit zu einer Verschärfung der Kaltstartproblematik. Darüberhinaus wirkt sich in Europa verschärfend aus, daß sämtliche Neufahrzeuge den Abgasvorschriften genügen müssen, wohingegen in Kalifornien aufgrund des "Phase-in" bzw. des Flottenstandards zunächst die größeren Motoren mit kälterem Abgas ausgespart bleiben können. Tabelle 1 zeigt eine Auflistung der amerikanischen, kalifornischen und europäischen Abgasgrenzwerte.

Tabelle 1: Abgasgrenzwerte Europa, USA und Kalifornien

	<b>Abgasgrenzwert</b>	<b>HC</b>	<b>NOx</b>	<b>CO</b>
Europa	EG Stufe II [g/km]	0.5		3.4
	EG Stufe III [g/km]	0.2	0.15	2.3
	EG Stufe IV* [g/km]	0.1	0.08	1.0
USA / Kalifornien	TIER 1 [g/m]	0.25	0.4	3.4
	TIER 2 [g/m]	0.125**	0.2	1.7
	TLEV [g/m]	0.125**	0.4	3.4
	LEV [g/m]	0.075**	0.2	3.4
	ULEV [g/m]	0.04**	0.2	1.7
	ZEV [g/m]	0	0	0
	EZEV* [g/m]	0.004**	0.02	0.17

\* geplant; \*\* NMOG

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich, auch wegen der Arbeitsschwerpunkte der Firma Emitec, im wesentlichen auf die thermodynamisch, strömungstechnisch beeinflussten Phänomene und Potentiale zukünftiger Abgasnachbehandlungskonzepte.

Zur Einhaltung der zukünftigen Abgasgrenzwerte sind zwei Hauptanforderungen zu erfüllen:

- Optimierung der Kaltstartphase
- Steigerung der Effektivität im betriebswarmen Zustand

### **Optimierung der Kaltstartphase**

Ein für die heutigen Emissionsgrenzwerte zugelassenes Fahrzeug emittiert bis zu 80% der während des gesamten Testzyklus anfallenden Emissionen in den ersten 100 - 150 Sekunden nach Motorstart. Diese Zeit benötigt das Abgas um den Katalysator auf seine Arbeitstemperatur von  $>300\text{ °C}$  aufzuheizen. In Abhängigkeit der Motorrohmission ergeben sich theoretische minimale "Anspringzeiten" für den Katalysator um zum Beispiel die kalifornische ULEV (Ultra Low Emission Vehicle) bzw die europäische Stufe IV Grenzwerte zu erfüllen. Bild 2 zeigt exemplarisch Beispiele für notwendige Anspringzeitpunkte wenn man voraussetzt das, nachdem der Katalysator angefangen hat die Schadstoffe zu konvertieren, eine Umsatzrate von annähernd 100 % erreicht wird.

Bild 2:           Erforderliche Anspringzeitpunkte in Abhängigkeit von der Fahrzeugrohmission und des Testzyklus

Vergleicht man die erforderlichen Anspringzeiten der ähnlichen Fahrzeuge B im FTP (47 Sekunden) und C im EG Stufe IV Test (84 Sekunden) mit den in Bild 1 dargestellten Gaseintrittstemperaturen, so ist zu erkennen, daß die gewisse Erleichterung durch das mögliche spätere Anspringen im Europatest, durch die Erschwernis der niedrigeren Gaseintrittstemperaturen (späteres Anspringen) kompensiert wird.

Aus dem obigen Zusammenhang wird offensichtlich, daß das größte Emissions-Senkungspotential zunächst in der Kaltstartphase liegt. Um den zusätzlichen technischen Aufwand minimal zu halten, konzentrieren sich die Entwicklungen im ersten Schritt auf die Optimierung von passiven Katalysatorsystemen [1-4]. Verschieben der Katalysatoren in Richtung Motor, Reduzierung der thermischen Massen vor Katalysator und nicht zuletzt Optimierung der katalytischen Beschichtung und des Katalysatorträgers für den Kaltstart (frühes Anspringen) und die höhere thermische Belastung, werden hier wesentliche Maßnahmen sein. Eine zusätzliche

Erhöhung der Abgastemperaturen vor Katalysator kann durch Motorsteuerungsmaßnahmen wie Spätzündung, erhöhte Leerlaufdrehzahl oder Nockenwellenverstellung erreicht werden [1, 3].

In Abhängigkeit der Grenzwerte und der Fahrzeugapplikation werden in Zukunft jedoch aktive Systeme erforderlich werden. Unter aktiven Systemen sind zum Beispiel Kraftstoffbrenner, Abgaszündsysteme, Kohlenwasserstoff-Fallen und elektrisch heizbare Katalysatoren zu verstehen [5-10]. HC-Fallen sind heute deshalb als aktive Systeme anzusehen, da sie entweder in Kombination mit E-Kats oder mit Strömungsschaltern arbeiten. Der Entwicklungsstand und die Anerkennung des Heizkatalysators durch die Behörden läßt den Einsatz dieser Technik, auch in Kombination mit dem HC Adsorber, für die nahe Zukunft am wahrscheinlichsten erscheinen.

### **Steigerung der Effektivität im betriebswarmen Zustand**

Eine zusätzliche Aufgabe liegt in der Verbesserung der Umsatzrate im betriebswarmen Zustand. Bild 3 zeigt die kumulierten Kohlenwasserstoffemissionen eines heutigen Fahrzeuges im EG III Test.

Bild 3: Kumulierte Kohlenwasserstoff-Emissionen eines heutigen Serienkatalysatorsystems im Vergleich zu einem optimierten System im EG III Test

Deutlich sind die in den Beschleunigungsphasen aufgrund des höheren Massendurchsatzes und einer nicht optimal arbeitenden Gemischregelung Emissionsanstiege zu erkennen.

Eine Verbesserung des Stofftransportes in den Kanälen des Katalysators verbunden mit einer optimierten Kraftstoff-/Luft Gemischregelung, vor allem im instationären Betriebszustand, sollen zu Umsatzraten bis nahezu 100% führen. Eine solche Verbesserung des Konvertierungsverhaltens bedeutet eine Effektivitätssteigerung von 80 - 90 % im Vergleich zu heutigen Serien-Abgasnachbehandlungssystemen. Dies bezieht sich auf eine absolut saubere Umgebungsluft. Schon heute ist es bei realen, hohen Schadstoffumgebungskonzentrationen und mit ausgesuchten Entwicklungskonzepten möglich, negative Emissionen, also eine Reinigung der Umgebungsluft, zu erreichen.

Diese Betrachtungsweise, in Verbindung mit den bei der Stromerzeugung anfallenden Emissionen, führt vor allem in Amerika zu immer neuen Diskussionen bezüglich Elektrofahrzeugen und der sogenannten ZEV (Zero Emission Vehicle) Gesetzgebung. Vorschläge, sogenannte EZEV (Equal Zero Emission Vehicle) mit Elektrofahrzeugen gleichzusetzen, die bei Inversionswetterlage einen positiven Beitrag zur Schadstoffminimierung

beitragen würden, wurden bereits in Kalifornien gemacht.

Bild 4: Vergleich der Kohlenwasserstoffemissionen eines EZEV und eines Elektrofahrzeuges bei einer HC Umgebungskonzentration von 1.5 ppm im Betrieb

Betrachtet man die zur Zeit weltweit in Entwicklung befindlichen Katalysatorsysteme, so ist, wegen der thermodynamischen Vorteile, ein eindeutiger Trend in Richtung motornaher Katalysatorsysteme zu erkennen. Diese Maßnahme zeigt das bei weiten größte Emissions- und Kostennutzungspotential. Der in der nachfolgenden Abbildung gezeigte Vergleich des Anspringzeitpunktes in Abhängigkeit der Katalysatorlage zeigt eindeutig die Richtigkeit dieses Vorgehens.

Bild 5: HC Anspringzeitpunkt in Abhängigkeit der Katalysatorlage

Der Einsatz solcher motornaher Konzepte bewirkt jedoch erhöhte Anforderungen an den Konverter bzg. Bauraum, Motorraumtemperatur und mechanischer und chemischer Dauerhaltbarkeit.

## **2. Katalysatorkonzepte**

Als Katalysatorkonzepte, die diesen Anforderungen genügen, kommen sowohl motornahe Startkatalysatoren mit zusätzlichen Unterbodenhauptkatalysatoren als auch motornahe Hauptkatalysatoren in Frage. Hierbei haben, aus thermodynamik- und aus Kostengründen, motornahe Hauptkatalysatoren zwangsläufig den größten Vorteil. Der meist eingeschränkte Bauraum in der Nähe des Motors führt jedoch zu der Notwendigkeit von vergleichsweise kleinen hochaktiven Katalysatoren. Katalysatorvolumina von 60-70 % des Hubraumvolumens werden angedacht und wurden bereits mit positivem Ergebnis getestet [2,3].

Bild 6: Schematische Darstellung verschiedener motornaher Katalysatorsysteme

### **2.1 Katalytische Effektivität**

Die Aktivität eines Katalysators ist neben der Beschichtung auch zu einem erheblichen Teil von der katalytischen Fläche und dem für den Stofftransport mit entscheidenden Faktor dem hydraulischen Durchmesser abhängig. Die folgende Darstellung zeigt die HC, CO und NOx Umsatzrate eines Katalysators mit 0,47 l Volumen für einen Massenstrom von 250 kg/h.

Bild 7: HC, CO, NOx Umsatzrate in Abhängigkeit der Zelldichte

Vergleicht man die Umsatzraten des 400 cpsi Katalysators mit denen des 600 cpsi Katalysators sind Steigerungen in der Umsatzrate von 10% im HC, 6% im CO und 10% im NOx festzustellen. Dies bedeutet eine Absenkung der Restemissionen und damit eine Effektivitätssteigerung von HC um 62%, CO um 46% und Nox um 77%.

Diese Effektivitätssteigerungen bei hohen Massenströmen sind vor allem für den EUDC des europäischen Testzyklus und für die zukünftige Hochgeschwindigkeitsphase US06 im neuen amerikanischen Testzyklus von Bedeutung. Die Edelmetallmenge in Gramm und damit die Beschichtungskosten sind für alle Varianten identisch. Diese Verbesserung der Effektivität ist durch den bei höheren Zelldichten dünneren Washcoatdicken (Washcoatmasse war hier volumenabhängig) und die für den Stofftransport positiven kürzeren Diffusionswege durch den Washcoat erklärbar (s. Bild 8).

Bild 8: Beschichtungsdicke und Stofftransportwege zweier Zelldichten (schematische Darstellung)

Der Stofftransport innerhalb der Zellen geschieht bei laminarer Strömung durch Diffusion. Da die treibende Kraft der Diffusion das Konzentrationsgefälle zwischen Schadstoffen im Kanal und Konzentration an der katalytisch beschichteten Wand ist, wird die Stofftransportgeschwindigkeit mit zunehmender Umsatzrate immer kleiner. Da das Konzentrationsgefälle bei sehr hohen Umsatzraten gegen Null läuft, wäre zur Erzielung einer Umsatzrate von 100 % theoretisch ein endlos langer Katalysator notwendig.

In der Realität werden heute für eine Umsatzrate von 80-90% nur 10-20% des Katalysatorvolumens benötigt. Das restliche Volumen wird für die stofftransportlimitierte weitere Umsetzung der Schadstoffe benötigt. Zur Verbesserung des Stofftransportes im Kanal stellt neben der Verkleinerung der Kanalquerschnitte (höhere Zelldichten) die Strukturierung und damit eine Beeinflussung der Strömung, eine weitere wichtige Möglichkeit dar [11].

Die sogenannte TS-Struktur (Transversale Struktur) macht es möglich, eine Erhöhung der Effektivität, durch Einbringung einer Querströmungs-Komponente zu erreichen. [12, 13]

Bild 10: TS-Struktur in einem Metallkatalysator

Die folgende Darstellung zeigt die HC Umsatzrate und die Druckverluste eines Katalysators der Größe Ø105x150mm 400cpsi mit und ohne TS Struktur und eines gleichgroßen Katalysators mit einer Zelldichte von 500 cpsi. Alle Katalysatoren sind mit der gleichen Beschichtung und Edelmetallbeladung versehen.

Bild 11: Druckverlust und HC Umsatzrate eines 400cpsi Katalysators mit und ohne TS Struktur und eines 500 cpsi Katalystors

Vergleicht man die Katalysatoren zueinander, zeigt die TS-Struktur eine Erhöhung der Umsatzrate von 3.9 % im Vergleich zum Standard 400 cpsi Katalysator und liegt damit ähnlich dem 500 Zeller. Damit konnte die Effektivität des 400 cpsi Katalysators durch die TS-Struktur um 56% gesteigert werden. Der Druckverlust wird durch die TS Struktur um 12% erhöht, liegt im Vergleich zum 500 cpsi Katalysator jedoch um 12 % niedriger. Dies macht deutlich, welches Potential alleine durch optimierte Kanalgeometrien erschlossen werden kann.

In der Vergangenheit wurde ein größeres Katalysatorvolumen als Reserve für den gealterten Katalysator genutzt. Die sehr niedrigen zukünftigen Grenzwerte erfordern hier jedoch ein Umdenken. Eine starke Katalysatoralterung, die verstärkt im Gaseintrittsbereich des Katalysators z.B. durch Temperaturspitzen ( HC-Ausstoß bei Lastwechsel) oder Ablagerungen stattfindet, muß in Zukunft deutlich verringert werden. Die nachfolgende Berechnung zeigt die kumulierten HC Emissionen eines neuen Katalysators und zweier Varianten bei denen ausschließlich der Gaseintrittsbereich mit einer Katlänge von 74.5 mm von 194.5 mm Gesamtlänge gealtert wurde. Die Anspringtemperatur wurde für alle Varianten konstant gehalten, wobei in der Realität für die gealterten Katalysatoren höhere Anspringtemperaturen zu erwarten sind. Als Input Daten für die Berechnung wurden die Rohemissionen eines 3.0l 4 Zylinder Motors und die Gaseintrittstemperaturen einer motornahen Katalysatoranwendung gewählt.

Bild 12: Berechnete HC Umsatzrate eines Katalysatorsystems mit unterschiedlichen Alterungsraten im 1. Monolith

Bild 12 zeigt das selbst bei nicht gealtertem hinteren Teil des Katalysators der LEV (Low Emission Vehicle) Grenzwert - bei einer Reduktion der Katalysatoreffektivität im vorderen Bereich um 50 % - nicht eingehalten werden kann. Ein größeres Katalysatorvolumen würde in

diesem Fall nichts nützen, da er in diesem Zeitraum nicht aufgeheizt würde. Der Test wurde bereits im Kaltstart entschieden.

## 2.2 Kaltstart; Thermodynamische Optimierung

Für den Kaltstart passiver Katalysatorsysteme ist neben den Gaseintrittstemperaturen und der Ansprungtemperatur der katalytischen Beschichtung, der Katalysatorträger thermo-hydraulisch als strömungsführendes Element und Wärmesenke mit von entscheidender Bedeutung. Unterhalb der katalytischen Zündtemperatur wirkt der Katalysator wie ein Wärme-Kollektor. Ziel ist es, die Energie vom Abgas wie bei einem Wärmetauscher in die Katalysatorstruktur zu übertragen und dabei die Masse des Katalysators gering zu halten, so daß die beschichtete Struktur sich mit der zu Verfügung stehenden Energie möglichst schnell aufheizt. Der Wärmetauscherwirkungsgrad – also der Ausnutzungsgrad der thermischen Abgasenergie – ist primär von der Zelldichte abhängig. Größere Zelldichten (kleinere Kanalquerschnitte) bedeuten hierbei einen höheren Wirkungsgrad. Dieser Effekt läßt sich jedoch nicht beliebig steigern, da mit wachsender Zelldichte die Katalysatormasse und der Druckverlust steigt. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Masse bietet der Einsatz von dünneren Katalysatorwänden. Die nachfolgenden Abgasergebnisse zeigen den Einfluß der Zelldichte und der Foliendicke auf das Kaltstartverhalten eines motornahen metallischen Katalysators.

Bild 13: HC Kaltstartverhalten im FTP Test in Abhängigkeit der Zelldichte und der Foliendicke

Der 600 cpsi Katalysator erzielte im Vergleich der Katalysatoren mit einer Foliendicke von 0.05mm das beste Ergebnis. Er stellte für die hier getestete Applikation den optimalen Kompromiß zwischen Wärmetauscherqualität und Masse dar. Eine Reduktion der Foliendicke beim 600 cpsi Katalysator zeigt deutlich den positiven Einfluß einer verringerten Masse. Im Vergleich zum 600 cpsi, 0.05mm Katalysator konnte eine Verbesserung um 27% erzielt werden.

Neben der Zelldichte und der Foliendicke, beeinflußt der Katalysatordurchmesser das Kaltstartverhalten. Eine Verringerung des Durchmessers bedeutet eine "Fokussierung" der Abgasenergie und damit ein beschleunigtes Aufheizen der Gaseintrittsseite des Katalysators. Die

folgende Darstellung zeigt Kaltstartergebnisse verschiedener Katalysatordurchmesser. Alle Katalysatoren hatten eine Länge von 74.5 mm und eine Zelldichte von 400 cpsi.

Bild 14: Kumulierte HC Emissionen über die ersten 125 Sekunden des FTP Tests in Abhängigkeit des Katalysatordurchmessers

Es ist zu erkennen das mit Ausnahme des Katalysatordurchmessers 60mm sich das Kaltstartverhalten mit abnehmendem Durchmesser verbessert. Der Katalysator  $\text{Ø}60 \times 74,5\text{mm}$  ist für den Massenstrom der Testapplikation zu klein und aufgrund der hohen Raumgeschwindigkeit nicht in der Lage die Emissionen umzusetzen.

### **2.2.1 Kohlenwasserstoff Adsorber**

Für emissionskritische Applikationen, bzw. bei einer weiteren Verschärfung der Abgasgrenzwerte, wird es jedoch notwendig, zusätzliche Maßnahmen einzuführen. Hier ist, wie bereits erwähnt, neben dem elektrisch heizbaren Katalysator vor allem der Kohlenwasserstoffadsorber (HC-Falle) zu nennen. Dabei handelt es sich um mit Zeolithbeschichtung versehene monolithische Katalysatorträger. Die HC-Falle ist in der Lage, bei Temperaturen  $< 200^\circ\text{C}$  Kohlenwasserstoffe aus dem Abgas zwischenzuspeichern, die dann bei höheren Temperaturen wieder desorbiert werden. Idealerweise müßte ein nachgeschalteter Katalysator zum Zeitpunkt der Desorption katalytisch aktiv sein um eine katalytische Umsetzung der Kohlenwasserstoffe zu bewirken. Bei der einfachen Serienschaltung – also einem passiven System – gibt es jedoch, vor allem bei gealterten Katalysatoren, einen zu großen Temperaturbereich in dem bereits HC desorbiert wird und der Katalysator jedoch noch nicht katalytisch aktiv ist.

Bild 15: Desorbti onstemperaturen der HC-Falle und Light-Off Temperaturen neu und gealtert einer modernen katalytischen Beschichtung

Aus den in Bild 15 dargestellten beispielhaften Adsorbti ons- und Desorbti onstemperaturen der HC-Falle und Light-Off Temperaturen ist somit die Temperaturdifferenz zu erkennen, die für unvermeidliche Kaltstartemissionen verantwortlich wäre. Durch eine Kombinationsbeschichtung mit Adsorber- und Oxidationkatalysatorfunktion ist es möglich, einen Teil der desorbierten Kohlenwasserstoffe bereits in der HC-Falle umzusetzen.

Technisch machbar, wenn auch aufwendig, ist die Kombinationen aus HC-Adsorber und Rekuperator. Bei diesem passiven System wird die Desorption durch Wärmeentzug verlangsamt und gleichzeitig der Kat mit der gewonnenen Wärme schneller aufgeheizt.

Eine weitere mögliche Lösung des Problems stellt ein im Bypass angeordneter HC-Adsorber mit vorgeschaltetem Startkatalysator dar. Beim Erreichen der Light-Off Temperatur des Katalysators wird die HC Falle durch Umschalten von Abgasklappen aus dem Hauptabgasstrom genommen. Die Regenerierung erfolgt entweder durch Teildurchströmung nachdem der nachgeschaltete Hauptkatalysator aktiv ist, oder durch Teildurchströmung mit Abgas und Rückführung zum Ansaugtrakt des Motors.. Bypasslösungen mit Abgasklappen stellen jedoch einen hohen technischen Aufwand dar. Darüberhinaus wird die Gemischregelung einer sich über längere Zeit erstreckenden Desorption problematisch, da das Abgasgemisch mit Beginn der Desorption "angefettet" wird. Um eine vollständige katalytische Umsetzung zu gewährleisten ist es notwendig Sekundärluft in das Abgassystem zuzuführen. Sekundärluft verschiebt das Abgasgemisch in Richtung Lambda größer 1, wobei die Stickoxidkonvertierung negativ beeinflusst wird. Eine schnelle Desorption, verbunden mit einer die Stickoxidemissionen nicht wesentlich verschlechternden Sekundärlufteinspeisung, ist erforderlich.

Eine Kombination aus HC-Falle und Heizkatalysator in relativ motornaher Position stellt eine Thermodynamisch logische Lösung dar. Die HC-Falle ist dem Heizkatalysator vorgeschaltet und speichert während der ersten Sekunden nach Kaltstart die HC-Emissionen. Der Heizkatalysator bewirkt ein Aufheizen des Abgasstromes und damit ein frühzeitiges Anspringen des nachgeschalteten Hauptkatalysators. Bild 16 zeigt schematisch verschiedene Systemansätze mit HC-Falle.

Bild 16: Schematische Darstellung verschiedener Abgassysteme mit HC-Falle.

### 2.2.2 Elektrisch heizbarer Katalysator (E-Kat)

Passive Katalysatorsysteme lassen sich zwar durch geeignete Motormanagement Maßnahmen beschleunigt auf die erforderliche Anspringtemperatur bringen; es bleibt jedoch der grundsätzliche Nachteil, daß der Kat, entsprechend der zu erwärmenden Massen, der Abgastemperatur nachläuft und damit ggf. Kaltstartemissionen nicht frühzeitig genug begrenzt werden können (s. Bild 2). Beim Heizkatalysator (E-Kat) wird die Wabenstruktur mit der Beschichtung aufgeheizt, so daß ein Anspringen erfolgen kann indem das Abgas nur oberflächennah erwärmt werden muß. Verglichen mit einem Brenner, wird aus diesem Grund auch nur ca. ein viertel der Aufheizenergie benötigt.

Erstmals wurde er Ende 1995 im BMW ALPINA B12 (V12 5,7l 285 kW) in Serie eingeführt [14]. Bild 17 zeigt als Beispiel die E-Kat Konstruktion des ALPINA B12.

Bild 17: Heizkatalysatorkonstruktion des BMW ALPINA B12

Der Heizkatalysator besteht aus einer kurzen (12mm) Heizescheibe mit geringer Masse und einem nachgeschaltetem Startkatalysator. Die Aufgabe des E-Kat Heizelements ist es, den katalytisch beschichteten Wabenkörper aufzuheizen, um die exothermisch chemische Umsetzung der Schadstoffe des noch kalten Abgases zu starten. Der E-Kat bewirkt hierbei die Initialzündung für das gesamte Katalysatorsystem. Die Aufheizzeit des E-Kats hat damit eine große Bedeutung für die Gesamteffektivität eines Abgastests, da wie vorher erwähnt, kürzere Aufheizzeiten eine Reduzierung der in den Tests dominierenden Kaltstartemissionsanteile bedeuten. Die Masse der Heizkatalysatorscheibe und der Beschichtung bestimmen bei konstanter Heizenergie die Aufheizgeschwindigkeit. Geringere Massen bedeuten kürzere Aufheizgeschwindigkeiten. Die Masse des Heizkatalysators ist von der Zelldichte und vor allem von der verwendeten Wand/Foliendicke abhängig.

Das Heizkatalysatorsystem besteht neben dem Heizkatalysator selbst aus einem speziellen Steuergerät mit integriertem Leistungsschalter zum Schalten der Heizströme und der Energieversorgung. Die Höhe des Heizstromes ist neben der Masse der Heizescheibe von der Abgastemperatur und dem Massenstrom der jeweiligen Applikation abhängig. Im Falle des ALPINA B12 wird mit einer Stromstärke von 200 A geheizt. Die Art der Energieversorgung hängt von dem erforderlichen Heizstrom ab. Bild 18 zeigt die unterschiedlichen, möglichen

Energieversorgungen des E-Kat in Abhängigkeit des Heizstromes [15].

Bild 18: Art der E-Kat Energieversorgung in Abhängigkeit des notwendigen Heizstromes

Heizströme bis zu 200 A können mit einer unter Umständen vergrößerten Fahrzeugbatterie in Verbindung mit dem herkömmlichen 12V Bordnetz abgedeckt werden. Die Lichtmaschine unterstützt das Bordnetz. Bei Heizströmen größer 200 A müssen alternative Systeme wie zum Beispiel eine 2. Batterie oder Energieversorgung mit unregelter Lichtmaschine und getrenntem Bordnetz eingeführt werden [15].

### **2.3 Warmstartverhalten; Isolation**

Neben dem Kaltstartverhalten ist für den amerikanischen Testzyklus auch das Warmstartverhalten nach einer 10 minütigen Pausenzeit von Bedeutung. War beim Kaltstart ein schnelles Anspringen infolge möglichst kleiner aufzuheizender Masse bzw. Wärmekapazität erforderlich, so ist im Gegensatz dazu für das Warmstartverhalten eine große Katalysatormasse und Wärmekapazität vorteilhaft, da diese die Wärmespeicher Eigenschaften vorgeben. Zukünftige kaltstartoptimierte Katalysator-Konzepte (mit geringer Wärmekapazität) müssen daher zunehmend durch externe Isolationsmaßnahmen auf Betriebstemperatur gehalten werden. Möglichkeiten hierfür sind Luftspalt- oder Keramikfaserisolationen. Bild 10 zeigt schematisch den Vergleich eines Metallkatalysators mit Luftspaltisolierung zu einem Keramik-katalysator mit Quellmattenisolierung. Beim Keramik-katalysator erfüllt die den Träger

fixierende Quellmatte zusätzlich eine Isolier- und Wärmespeicherfunktion. Beim Metallkatalysator kann die Isolation durch Luft erfolgen. Der Katalysatormantel befindet sich innerhalb der Isolation und wirkt neben dem Katalysatorträger als zusätzlicher Wärmespeicher. Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Wärmekapazitäten der unterschiedlichen Systeme.

Tabelle 2: Vergleich der effektiven Wärmekapazitäten eines Metall- und Keramik Konverters [16].

Es ist zu erkennen, daß die dem Abgasstrom zugängliche aktive Oberfläche bzw. Wärmekapazität des Metallkatalysators geringer ist. Allerdings ist die für die Abkühlung wirksame Wärmekapazität aufgrund des innerhalb der Isolierung liegenden Metallträger-Mantels, ähnlich der des Keramik-katalysators einschließlich der Matte. Bild 19 zeigt den Vergleich eines Metallkatalysators ohne Isolation, mit Luftspaltisolation über dem Katalysatorträger und eines Metallkatalysators mit Luftspaltisolation über Träger und Konen im Vergleich zu einem Keramik-katalysator mit Quellmatten und Konenisolation. Der Abkühlversuch wurde auf einem speziellen Prüfstand durchgeführt, indem die Katalysatorzentrumstemperatur und der äußere Wärmeübergang aller Systeme konstant gehalten wurde. Die Zentrumstemperatur zum Beginn der Abkühlung betrug 530 °C und entspricht einer typischen Katalysatortemperatur in mittlerer Katalysatorlage am Ende des Beutel 2 im FTP Test.

Bild 19: Vergleich der radialen Temperaturverteilung verschiedener Katalysatorvarianten nach 10 minütiger Abkühlung

Es ist zu erkennen, daß nach der 10 minütigen Pausenzeit, der Metallkatalysator ohne Isolation eine Zentrumstemperatur von 455°C hat. Bei Verwendung einer Luftspaltisolation im Bereich des Katalysators erhöht sich die Zentrumstemperatur um 10K auf 465°C. Der Metallkatalysator mit Luftspalt und Konusisolation zeigt eine Zentrumstemperatur von 475°C. Vergleicht man dagegen die Katalysatorstrukturtemperatur der einzelnen Varianten in der Nähe des Mantels (Radiale Position 57 mm) zeigt die Mantelisolierung eine Erhöhung von 295°C unisoliert auf 355°C. Die zusätzliche Konusisolation bewirkt eine weitere Erhöhung um 20K auf 375°C.

Vergleicht man den mantel- und konusisolierten Metallkatalysator mit dem entsprechend isolierten Keramik-katalysator, erkennt man, daß die Zentrumstemperatur des Keramik-katalysators etwa 25 K heißer ist. Im Randbereich hingegen zeigt der Metallkatalysator höhere Temperaturen. Dies wird durch die bessere interne Wärmeleitfähigkeit des Metallträgers verursacht. Vergleicht man die jeweiligen heißeren Querschnitte des Metall- und Keramik-katalysators zueinander stellt man fest daß beim Metallkatalysator 56% des Querschnittes heißer sind. Die maximale Manteltemperatur des Metallkatalysators bei diesem Versuch war 23K kälter als die des Keramik-katalysators.

Im nächsten Versuch wurde der mantel- und konusisolierte Metall- und Keramik-katalysator über eine halbe Stunde abgekühlt. Nach dieser Zeit wurden beide Katalysatoren wieder aufgeheizt. Bild 20 zeigt prozentual den Katalysatorquerschnitt im axialen Zentrum des Katalysators der heißer als 300°C ist.

Bild 20: Prozentualer Anteil der Matrixfläche über 300°C nach einer 30minütigen Abkühlzeit und anschließender Aufheizung

Bis zur Minute 24 ist ein größerer Anteil des Metallkatalysatorquerschnittes heißer. Nach dieser Zeit zeigt der Keramik-katalysator einen Vorteil. Beim anschließenden Wiederaufheizen erhitzt sich der Metallkatalysator aufgrund seiner geringeren thermischen Masse schneller.

### 3. Applikation

Der Grund für die beschriebenen Untersuchungen war, in Zukunft Katalysatorsysteme entsprechend der Anforderung der jeweiligen Applikation, optimal bezüglich katalytischer Effektivität, Bauraum und Kosten auszulegen.

Zur Verifizierung wurden an einer motornahen Applikation verschiedene Katalysatorsysteme untersucht [3].

Tabelle 3: Testkatalysatoren

Katalysator	Größe	Zelldichte/ Wanddicke	Katalysator- volumen	Edelmetall- kosten
	[mm]	[cpsi]	[l]	[%]
1.Keramikkatalysator	RT 101.6*150*150	400/0.165	1.85	100
2.Metallkatalysator	Ø105*150	400/0.05	1.3	70
2.Metallkatalysator	Ø105*120	600/0.04	1.04	56

Alle Katalysatoren waren mit einer Trimetallbeschichtung (Beladung 105g/ft<sup>3</sup>; 1:14:1) beschichtet. Die folgenden Testergebnisse im Europa Stufe III Testzyklus verstehen sich als Mittelwert mehrerer Tests. Zusätzlich zu den Beutelergebnissen wurden die Abgasergebnisse modal aufgezeichnet, um insbesondere das Kaltstartverhalten besser beurteilen zu können. Bei allen Messungen wurden zusätzlich Thermoelemente zur Bestimmung der Gastemperatur vor Katalysator installiert und das Luftverhältniss vor Katalysator gemessen, sodaß die Reproduzierbarkeit der Eingangsgrößen überwacht werden konnte.

Bild 21 zeigt die kumulierten HC Emissionen über die ersten 150 s des EGIII Testzyklus. Die Ergebnisse verstehen sich als Mittelwert von je 2 Abgastests.

Bild 21: Kumulierte HC Emissionen der einzelnen Testvarianten über die ersten 150 s des Europa Stufe III Tests

Die beiden Metallkatalysatorvarianten "springen" aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität deutlich besser an, als der im Querschnitt größere Keramik-katalysator. Der 600 cpsi Metallkatalysator zeigt nach 150 Sekunden etwa 8% bessere HC Emissionen als der im Querschnitt gleiche 400 cpsi Metallkatalysator. Der Keramik-katalysator zeigt mit 0.7 g HC das schlechteste Kaltstartergebnis. Dies ist sowohl auf die höhere spezifische Wärme als auch auf die geringere spezifische katalytische Fläche und den großen Katalysatorquerschnitt zurückzuführen. Die folgende Darstellung zeigt die gewichteten Gesamtergebnisse der einzelnen Testvarianten nach einer 4-stündigen (entspricht ~80.000km) Ofenalterung.

Bild 22: Europa Stufe III Testergebnisse der einzelnen Testkatalysatoren, ofengealtert.

Es konnte gezeigt werden daß kleine optimierte Katalysatoren mit großen katalytischen Flächen in der Lage sind heutige Standardsysteme abzulösen

#### **4. Zusammenfassung**

Mittels der hier vorgestellten Komponenten, Konzepten und Technologien ist es möglich eine deutliche Verbesserung der Katalysatorgesamteffektivität zu erzielen. Für zukünftige motornahe Katalysatorsysteme ist neben einer für das Kaltstartverhalten vorteilhafte geringe Wärmekapazität, eine stoffübergangsbegünstigende Kanalform und eine möglichst große katalytische Fläche von großer Bedeutung.

Das Verhältnis von katalytischer Fläche und Wärmekapazität und damit das Kaltstartpotential ist in der folgenden Darstellung aufgezeigt.

**Bild 23: Katalytische Fläche/Wärmekapazität verschiedener Katalysatorträger**

Diese Verknüpfung zweier, für den Kaltstart wichtiger physikalisch/chemisch Einflußgrößen, läßt den zukünftigen Applikationstrend klar erkennen. Erst durch den Einsatz von Metallträgern bzw. sehr dünnwandigen Keramikträgern können die besten Kaltstartergebnisse mit niedrigstem Aufwand erzielt werden.

Diese Darstellung konnte durch den Vergleich verschiedener Katalysatorsysteme nachgewiesen werden. (600/0.04 besser als 400/0.05 besser als 400/0.165; Abbildung 21)

Desweiteren wurde festgestellt das,

- Größere katalytische Flächen und kleinere hydraulische Durchmesser führen bei gleicher Edelmetallbeladung zu einer Steigerung der Effektivität auch bei erhöhtem Massendurchsatz.
- kleinere Katalysatordurchmesser begünstigen das Ansprungsverhalten
- TS-strukturierte Metallkatalysatoren die Katalysatoreffektivität steigern
- Die Luftspaltisolierung beste Voraussetzungen zur Isolation von Katalysatorträgern bietet
- eine zusätzliche Konen-Isolation das Abkühlen in Pausenzeiten wesentlich verringert
- Eine weitere deutliche Verringerung der Abgasemissionen wird durch aktive Kat-Systeme möglich.
  - o Das E-Kat-System beweist seine Serientauglichkeit und Effektivität im BMW ALPINA B12
  - o Die Kombination E-Kat mit HC-Falle bietet das Potential weitere Emissionsenkungen für "kältere Motoren" und/oder EZEV Grenzwerte zu realisieren.

**Literatur**