

# **Diesel-Katalysator mit Hybrid-Trägerstruktur**

*Katrin Schaper  
Roman Konieczny  
Rolf Brück*

## **Inhaltsverzeichnis**

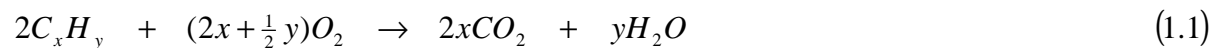
1. Einleitung
2. Positionierung des Katalysators
  - 2.1 Temperatureinfluß auf Schadstoffkonvertierung
3. Katalysator-Simulationsprogramm
4. Betrachtung des Kaltstartverhaltens eines Katalysators mit Dieselantrieb
5. Betrachtung des betriebswarmen Zustands eines Katalysators mit Dieselantrieb
6. Hybrid-Trägerstruktur
7. Hybrid- und Referenzträger mit Konuskatalysator
8. Zusammenfassung
9. Literaturverzeichnis

## 1. Einleitung

### Abgase von Otto- und Dieselmotoren

Die prinzipbedingten Unterschiede von Otto- und Dieselmotoren führen zu diversen Differenzen sowohl was die Zusammensetzung der Abgaskomponenten als auch deren Nachbehandlung betrifft. Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal ist dabei die Art der Gemischregulierung, die aus den unterschiedlichen Brennverfahren resultiert. Beim Otto-Motor handelt es sich um eine Quantitätsregelung, während beim Dieselmotor eine Qualitätsregelung vorgenommen wird. Dies hat zum einen Einfluß auf den Wirkungsgrad, der beim Diesel durch die drosselfreie Strömung der Ansaugluft vor allem im unteren Lastbereich deutlich über dem des Otto-Motors liegt, zum anderen aber auch auf die Verbrennung und die dabei entstehenden Schadstoffe sowie deren Nachbehandlung.

Zur Reinigung der Hauptschadstoffkomponenten Kohlenwasserstoff (HC), Kohlenmonoxyd (CO) und Stickoxyd (NO<sub>x</sub>) wird beim Ottomotor ein 3-Wege Katalysator im geregelten Lambda=1 Betrieb eingesetzt. Folgende katalytische Reaktionen laufen nebeneinander ab:



Voraussetzung hierfür ist eine Mindesttemperatur (Zündtemperatur) und eine definierte  $\lambda$ -Regelung des Katalysators, die je nach Beschichtung und Alterungsgrad zwischen 220 und 280°C liegt und je nach Position im Abgassystem innerhalb weniger Sekunden erreicht werden kann. Aufgrund der hohen Abgastemperatur am Auslaß (Leerlauf ca. 300°C, Vollast ca. 900°C) arbeitet der Katalysator nach einmaligem Überschreiten der Kaltstartphase effektiv und kontinuierlich [1].

Die Abgasnachbehandlung des Dieselmotors stellte bisher keine großen Anforderungen an das Katalysatorsystem, da die Rohemissionen der meisten Dieselmotoren unterhalb der momentan gültigen EU-Abgasvorschrift (Stufe 2) liegen. Zur Einhaltung der Stufe 3 (gültig ab Januar 2000) müssen die Schadstoffe jedoch durch Zusatzverfahren reduziert werden. Der Einsatz eines geregelten 3-Wege Katalysators ist hierbei nicht möglich, da der Dieselmotor ausschließlich unter Luftüberschuß betrieben wird und für Reaktion 1.3 eine reduzierende Atmosphäre notwendig ist. Eine gängige Lösung die Stickoxyde zu reduzieren ist der Einbau einer Abgasrückführung oder eines Denox-Katalysators, auf deren Funktionsweise hier nicht näher eingegangen wird.

Zur Minderung der HC- und CO-Emission wird beim Dieselmotor ein Oxidationskatalysator eingesetzt. Die Zündtemperatur liegt im Neuzustand generell zwischen 130 und 200°C. Aufgrund des hohen Luftmassenstromes und zumeist hohen Luftüberschuß bei der Verbrennung sowie des hohen Wirkungsgrades sind die Abgastemperaturen des Dieselmotors relativ niedrig (Leerlauf: T~100-200°C, Vollast: T~550-750°C am Auslaß [2]). In Verzögerungs- bzw. Leerlaufphasen können sie teilweise unter die Zündtemperatur absinken, was die Effektivität des Katalysators stark beeinflusst. Die Positionierung des Trägers im Abgassystem ist daher von großer Wichtigkeit. Je weiter der Katalysator vom Motor entfernt ist, desto niedriger

sind die Abgastemperaturen und desto mehr Zeit benötigt der Träger nach Motorstart, um sich aufzuheizen.

Die Reaktionsgeschwindigkeit der heterogenen Katalyse wird durch Stofftransport in der Gasphase, Porendiffusion und Anzahl der aktiven Zentren (Reaktion mit den Edelmetallen) bestimmt. Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, daß bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliche Prozesse dominierend sind. Für die Konvertierung der Schadstoffe im Dieselabgas sind daher die Kinetik und die Porendiffusion geschwindigkeitsbestimmend.

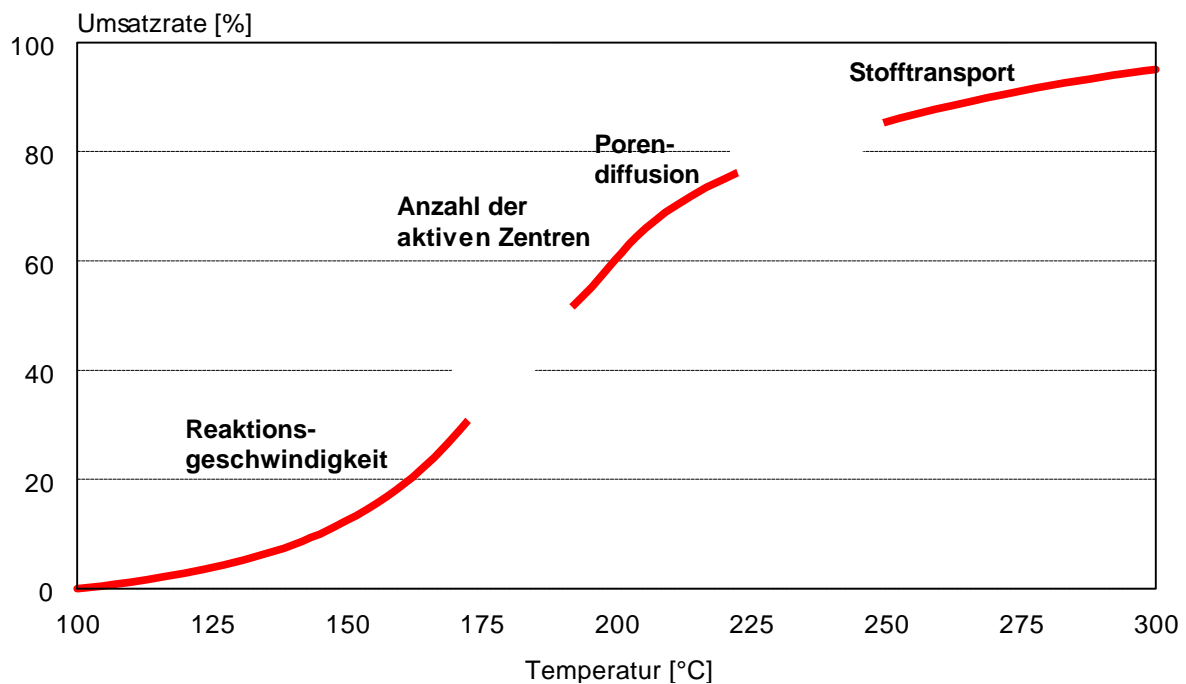


Abbildung 1: Geschwindigkeitsbestimmende Größen der heterogenen Katalyse in Abhängigkeit der Katalysatortemperatur

Die Kinetik der Oxidation der Kohlenwasserstoffe kann vereinfacht mit Gleichung 1.5 beschrieben werden. Die Geschwindigkeitskonstante  $k$  ist laut Arrhenius exponentiell von der Temperatur abhängig (Gleichung 1.6):



$$r = k(HC)^x(O_2)^y \quad (1.5)$$

$$k = k_0 e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} \quad (1.6)$$

Bei niedrigen Temperaturen reagieren die Schadstoffe mit den Edelmetallen folglich nur sehr langsam. Um aber auch bei jenen geringen Abgastemperaturen einen hohen Umsatz zu erzielen muß eine ausreichende Verweilzeit der Schadstoffe im Träger, die durch großes Katalysatorvolumen kompensiert werden kann, gewährleistet sein.

## 2. Positionierung des Katalysators

Eine temperaturtechnisch ideale Positionierung des Katalysators wäre möglichst nah am Motorauslaß. Da jedoch der Bauraum am Auslaß sehr begrenzt ist bietet sich eine integrierte Lösung im Krümmer an. Eine Alternative wäre der Einsatz von Zylinderkopfkatalysatoren, dargestellt in Abbildung 2.



Abbildung 2: Photo eines Zylinderkopfkatalysators

Die Geometrie der Zylinderkopfkatalysatoren ist vom Krümmer und vom Motor abhängig, die Herstellung und das Canning sehr spezifisch. Zudem kann auch mit mehreren Zylinderkopfkatalysatoren, abhängig von der Zylinderanzahl, kein ausreichendes Katalysatorvolumen erreicht werden, um die Schadstoffe angemessen zu reduzieren. Ferner wird jeder Zylinderkopfkatalysator nur von einem Zylinder beaufschlagt was periodisch zu sehr hohen Raumgeschwindigkeiten während des Auslaßtaktes führt. Ein weiterer problematischer Punkt der Zylinderkopfkatalysatoren ist die Veränderung des Druckes im Abgas, was sich negativ auf den Abgasturbolader (ATL), der bei den meisten modernen Diesellaggregaten eingesetzt wird, und das Fahrverhalten auswirken kann. Aus motor- und emissionstechnischer Sicht wäre folglich der Einbau des Katalysators vor Turbolader die beste Lösung (Abbildung 3). Dies ist jedoch bisher nicht realisiert worden, da Schädigung sowie Funktionsbeeinträchtigung des TL durch den Katalysator befürchtet werden. Plaziert man den Katalysator hinter dem TL, entzieht der TL dem Abgas zusätzlich Wärme und die Abgastemperatur fällt um weitere 60-110°C ((je nach Turbine und Verdichter bzw. Kennfeldpunkt), was die Effektivität des Konverters mindert.

Zum Erreichen der EU3 Grenzwerte könnte eine Umplazierung des Katalysators vor den TL hilfreich sein. Bis zum Jahre 2000 ist die Entwicklungszeit allerdings sehr kurz und eine Modifizierung des herkömmlichen Systems ist von größerem Interesse. In dieser Veröffentlichung wird eine mögliche Alternative dargestellt.



Abbildung 3: Photo eines Turboladerkatalysators

## 2.1 Temperatureinfluß auf Schadstoffkonvertierung

Ein Beispiel für den Temperatureinfluß auf die Konvertierung der Schadstoffe zeigt Abbildung 4. Ein in Serie laufender Keramik-katalysator mit einem Volumen von 1,68 Liter in Unterbodenposition wurde mit einem Metallträger, dessen Volumen weniger als einem Fünftel des Keramikträgers entspricht, positioniert nach Turbolader, verglichen.

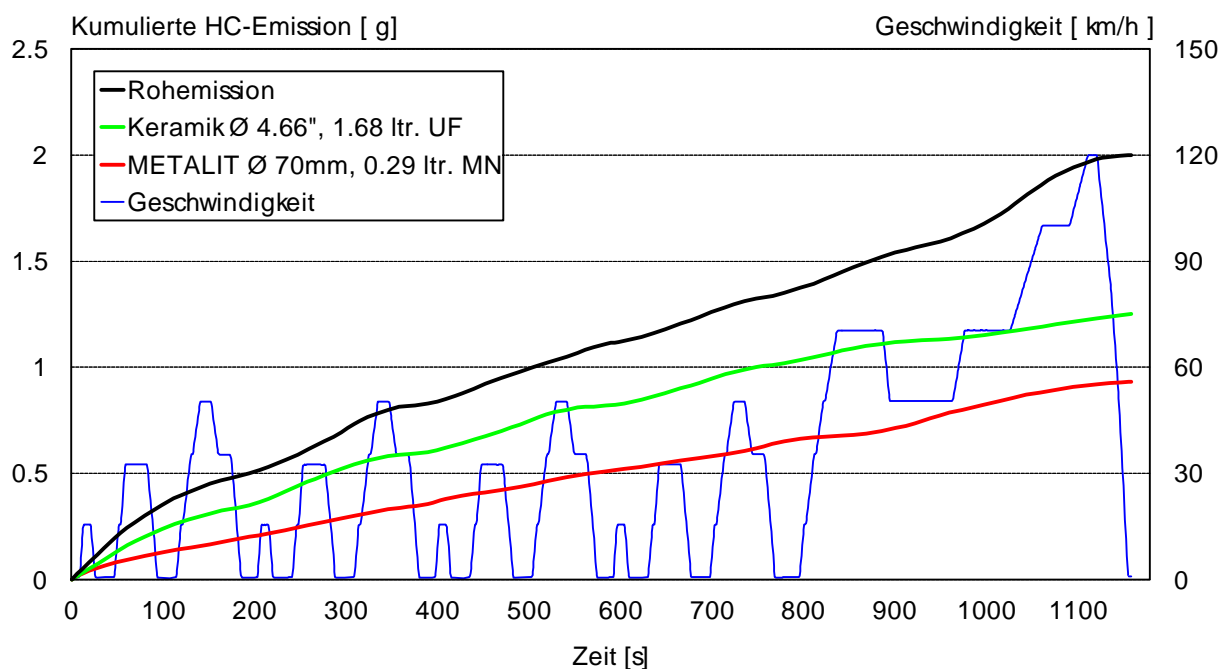


Abbildung 4: Kumulierte HC Emission eines 4- –Dieselmotors im EGII Zyklus

Die kumulierten HC-Emissionen konnten aufgrund der motornaheren Positionierung um 25% reduziert werden.

Abbildung 5 zeigt einen Abgastemperaturverlauf eines 6 Zylinder Dieselmotors, 200 mm nach Abgasturbolader, im EG-II Zyklus.

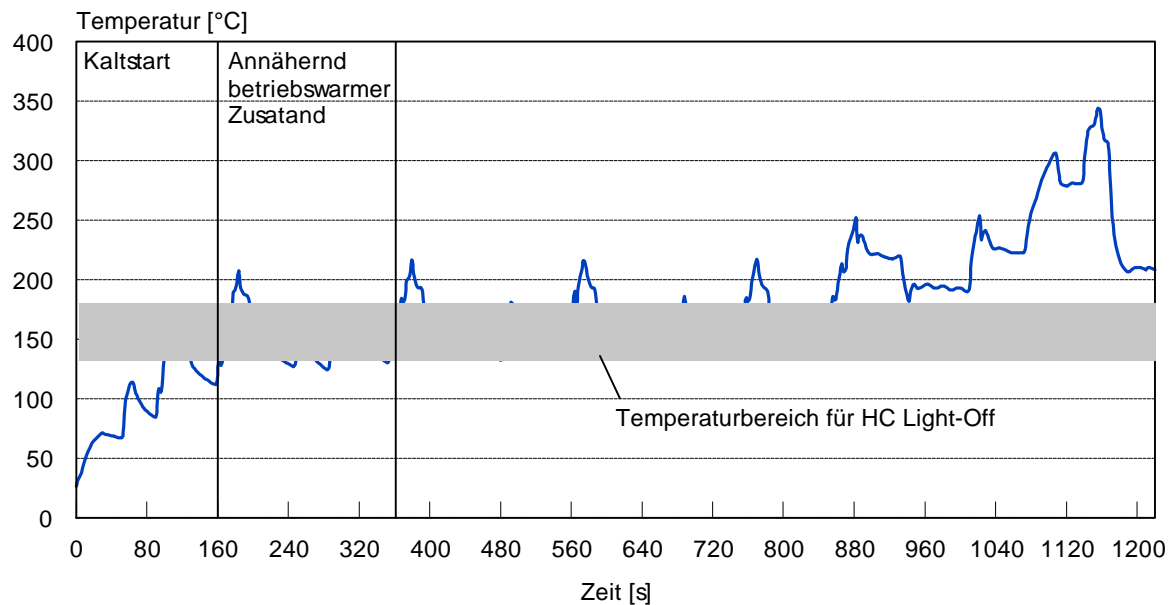


Abbildung 5: Abgastemperaturverlauf im EGII-Zyklus eines 6 Zylinder Dieselmotors ca. 200mm nach ATL, Zündbereich:  $T=130-180^{\circ}\text{C}$

Es ist ersichtlich, daß der Temperaturverlauf oft gegen die untere Grenze des Zündtemperaturbereiches läuft und somit der Katalysator in seiner Effektivität eingeschränkt ist. Abbildung 6 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

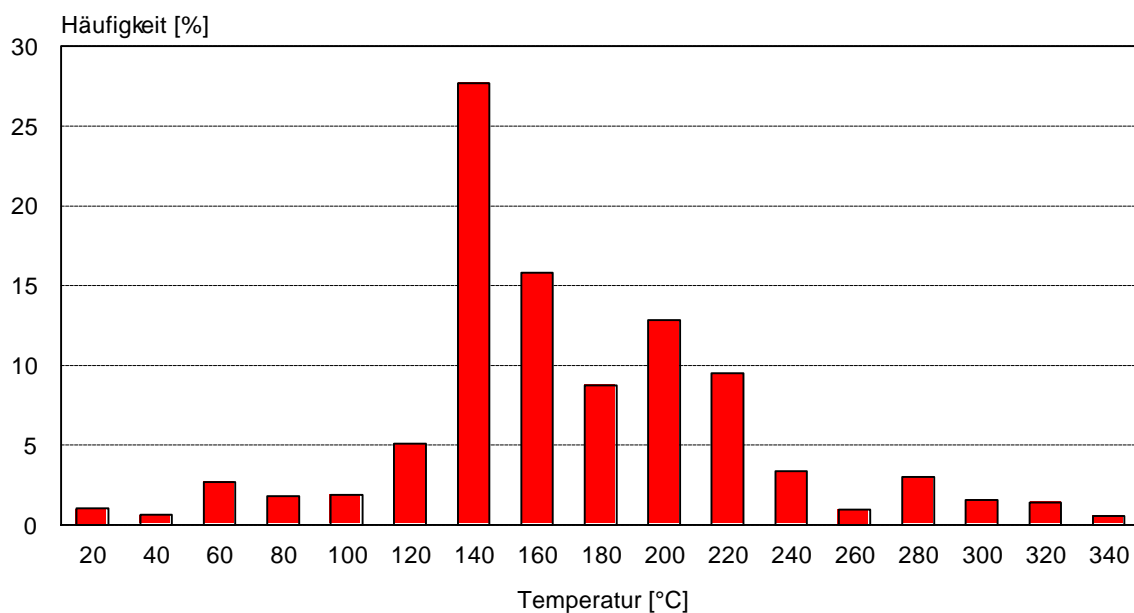


Abbildung 6: Häufigkeit der Temperaturverteilung im Bereich  $\pm 10$  des x-Skalenwertes im EGII-Zyklus eines 6 Zylinder Dieselmotors

auf. Da der Zündbereich aber zwischen 130-  
frequentiertesten Bereiches sehr klein.

Betrachtet man die HC und CO-  
entsprechenden Temperaturen auftreten, zeigen sich folgende Bilder:

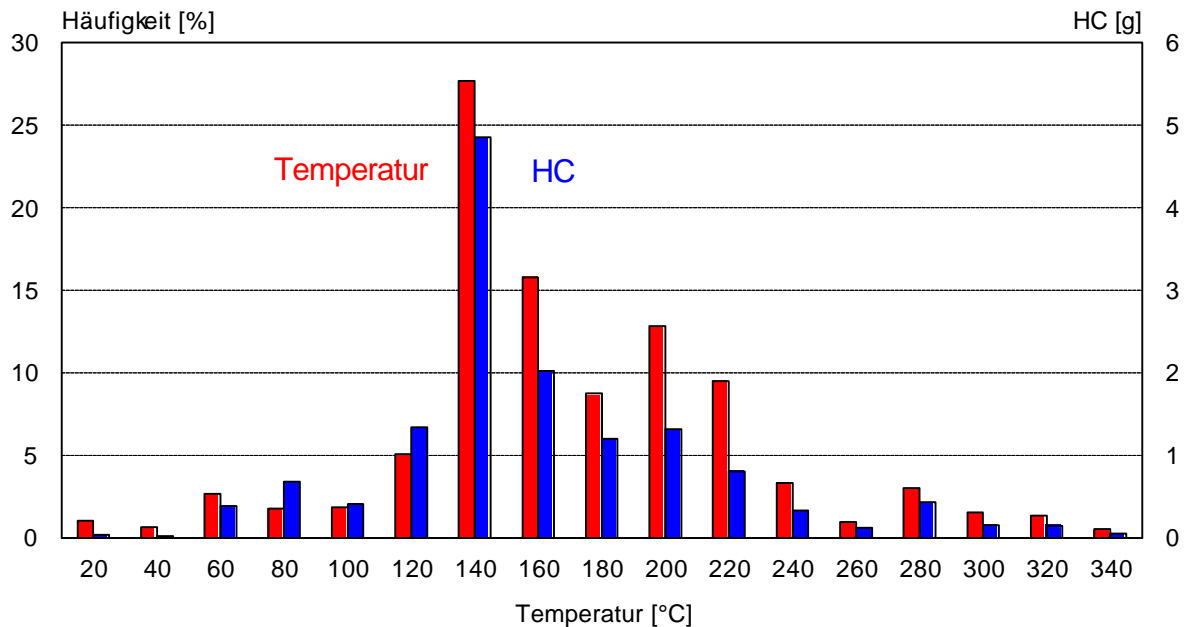


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung der Gastemperatur sowie entsp  
Emissionswerte vor Katalysator im Bereich 10 des x-

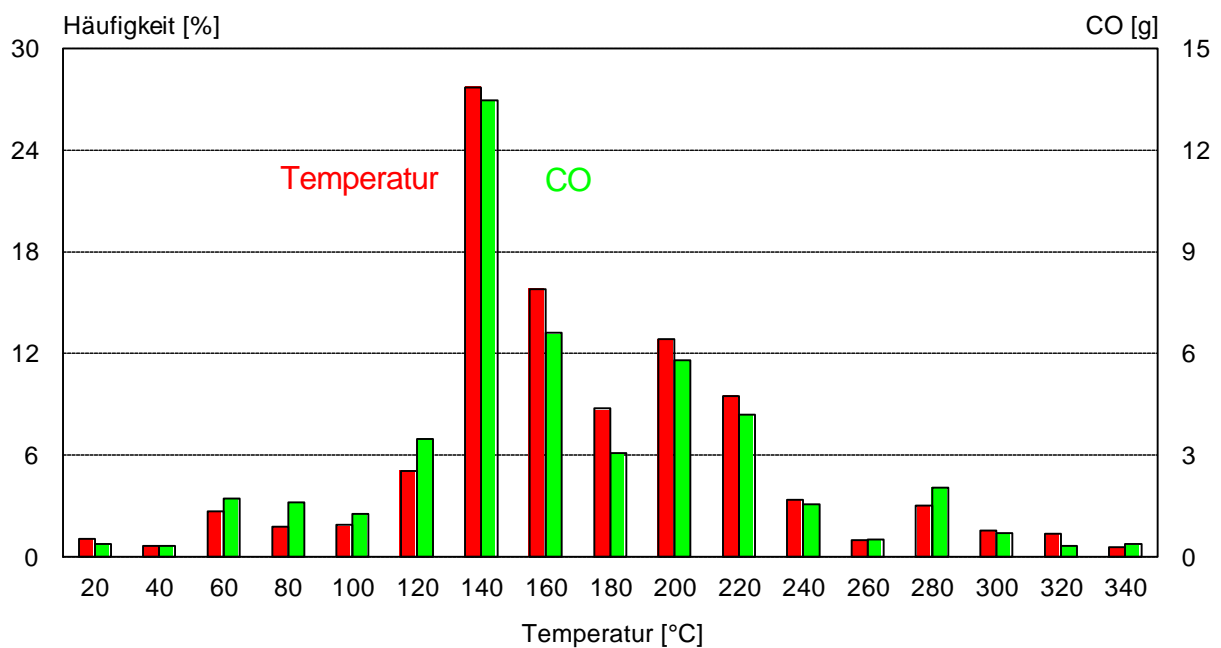


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Gastemperatur sowie entsprechender CO-  
±10 des x Skalenwertes

56 % der HC- und 49 % der CO-Emissionen werden in einem Temperaturbereich erzeugt, der mit dem Zündbereich übereinstimmt, wobei die Extremwerte der Schadstoffe im unteren Light-off Bereich liegen. Emissionen die sich im Abgas bei Temperaturen unterhalb  $T=130^{\circ}\text{C}$  befinden (20% HC und 18% CO), werden ohne Nachbehandlung in die Umgebung abgegeben, da der Katalysator noch nicht aktiv ist. Je höher die Abgastemperatur steigt, desto wärmer wird der Katalysator und desto schneller kann die chemische Reaktion laut Arrhenius (Gleichung 1.6) ablaufen. Bei periodischem Abfall der Abgastemperatur auf die minimale Reaktionstemperatur wird die Effektivität des Katalysators durch den axialen Wärmeabtransport von den Matrixfolien und der geringen Exothermen beträchtlich beeinflusst.

### Problematik

Bei Positionierung des Katalysators nach Turbolader kann die Abgastemperatur unter die Zündtemperatur fallen und die katalytische Effektivität mindern. Da eine Erhöhung der Abgastemperatur nur unter Kraftstoffverbrauchsnachteilen zu erreichen ist, muß das Katalysatordesign auf diese Konditionen abgestimmt werden. Mit Hilfe eines Katalysator-Simulationsprogramms wurden verschiedene Bauweisen auf ihre Effektivität hin überprüft.

### **3. Katalysator-Simulationsprogramm KatProg**

Zur Abschätzung der quantitativen Schadstoffreduzierung wurde von Emitec ein Katalysator-Berechnungsprogramm entwickelt, das auf das Kaltstartverhalten abgestimmt ist. Ein-, Zwei- oder Mehrmonolithen – Systeme können kalkuliert werden wobei zwischen Keramik-, Metall- und Mischsystemen zu unterscheiden ist. Designparameter wie Abmaße, Zelldichte, Wandstärke, Beschichtung, Foilienstruktur und Isolation können einzeln variiert werden. Radial ist der Träger in 6, axial in 6+7+6 Maschen unterteilt, siehe Abbildung 9 und 10. Die Größe der einzelnen Maschen wird durch die Geometrie der Träger bestimmt, wobei sie einer gleichmäßigen Aufteilung unterliegen. Eingabedaten sind: Massenstrom, Abgastemperatur vor Katalysator, Kohlenwasserstoffe (HC) sowie Kohlenmonoxyd (CO) im Sekundenraster. Der Schwerpunkt der Einflußfaktoren liegt bei diesem Berechnungsprogramm auf der Trägergeometrie. Der chemische Reaktionsablauf wird dabei nur vereinfacht berücksichtigt.

### Einflußfaktoren auf den Katalysator im Kaltstart am Beispiel eines Metallträgers

Das Kaltstartverhalten des Katalysators hängt hauptsächlich von der Wärmekapazität  $c_p$  und dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ab. Der  $c_p$ -Wert des Trägers wird durch die Folienstärke und die Washcoatmenge bestimmt. Je dicker die Folie und der Washcoat, desto höher die Wärmekapazität des Trägers und desto schlechter das Ansprungsverhalten.

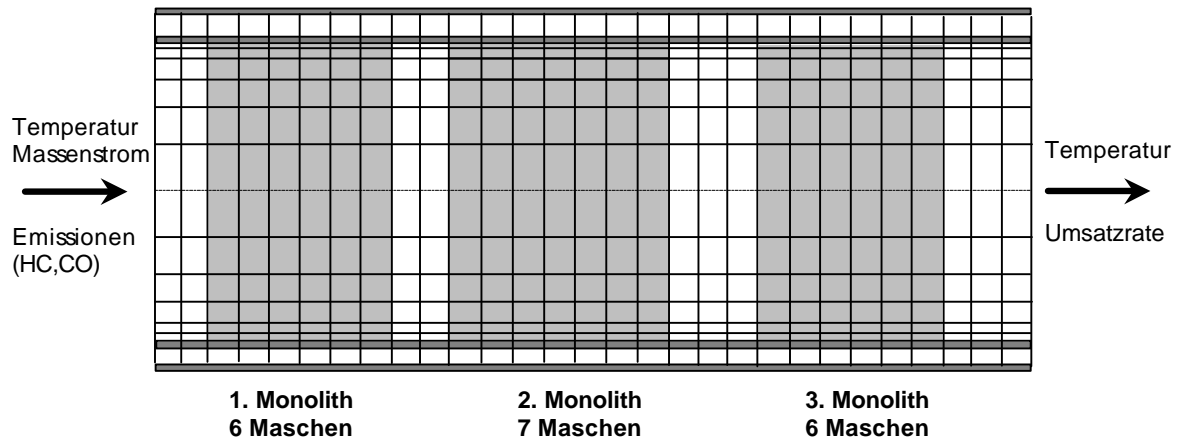
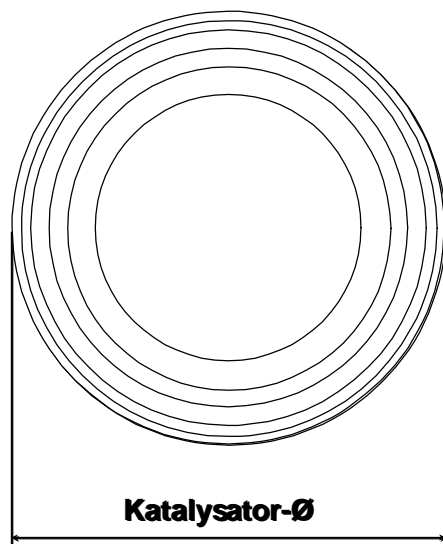


Abbildung 9: Axiale Maschenaufteilung der Katalysatorkonstellation zur Berechnung



**Berechnung der Radien:**

$$Ra(l) = \left( \frac{RKAT}{6} + RA(l-1) \right)^{5/5}$$

**Flächen- / Massenstromverteilung:**

<b>Innen:</b>	<b>48,8%</b>	<b>55%</b>
	<b>15,7%</b>	<b>16%</b>
	<b>11,4%</b>	<b>11%</b>
	<b>9,2%</b>	<b>8%</b>
	<b>7,9%</b>	<b>6%</b>
<b>Außen:</b>	<b>7,0%</b>	<b>4%</b>

Abbildung 10: Radiale Maschenaufteilung der Berechnung mit KatProg

α  
 Durchmesser und die Zelldichte des Trägers beeinflusst. Hohe Zelldichte bedeutet große Wärmeaustauschfläche und große katalytische Anspringverhalten und den Umsatz, führt aber auch zu hohem Druckverlust. Zum Durchmesser ist zu sagen, daß kleinere Durchmesser das Anspringverhalten [3].

Einen Überblick über die Wärmekapazität unterschiedlicher Zelldichten und

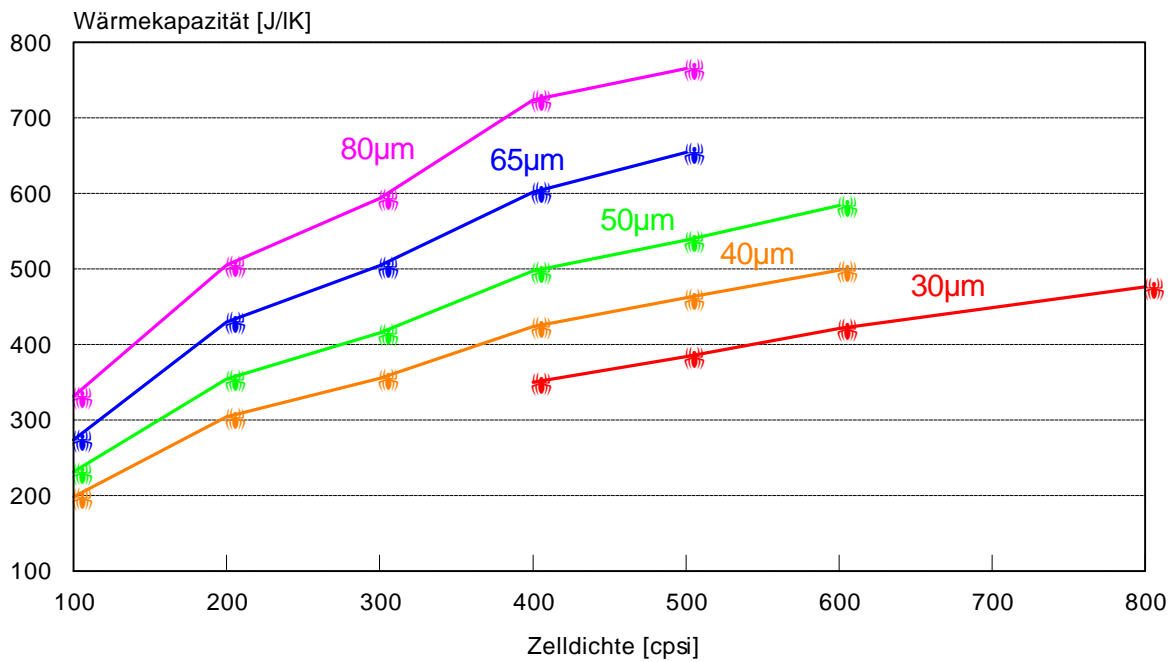


Abbildung 11: Wärmekapazität verschiedener Zelldichten und Folienstärken bei einer Beschichtungsdicke von 25µm, T=200°C

Es ist ersichtlich, daß die Wärmekapazität durch Erhöhung der thermischen Masse, also durch Erhöhung der Folienstärke oder der Zelldichte ansteigt.

#### 4. Betrachtung des Kaltstartverhaltens

Als Rohdaten für die folgenden Berechnungen dienen die Werte eines 6-Zylinder Dieselmotors. Die Abgastemperaturen des kompletten EGII-Zyklus sind bereits in Abbildung 5 dargestellt. Für die Kaltstartberechnungen wurden die Werte bis 160sec des EGII-Zyklus verwendet (Abbildung 12), wobei der Zündbereich zwischen 130 und 180°C lag. Die berechneten Emissionen entsprechen einem Abgasstrang.

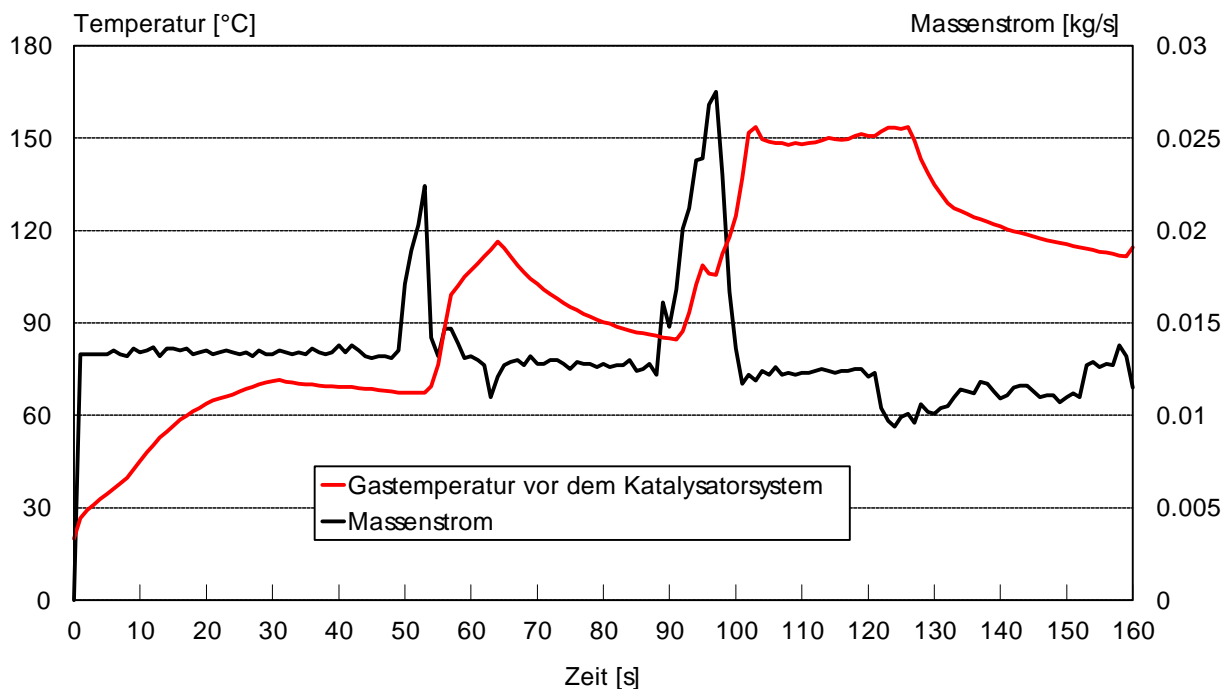


Abbildung 12: Gastemperatur vor Katalysator und Massenstrom eines Stranges

Als Referenzkatalysator für die Berechnungen diene ein Metallträger mit folgender Geometrie:  $\varnothing$  100x130 mm; 400 cpsi; 40  $\mu$ m. Die Länge des Trägers wurde in drei Metalite® unterteilt, 40+50+40mm.

### Einfluß des Durchmessers auf die katalytische Effektivität im Kaltstart

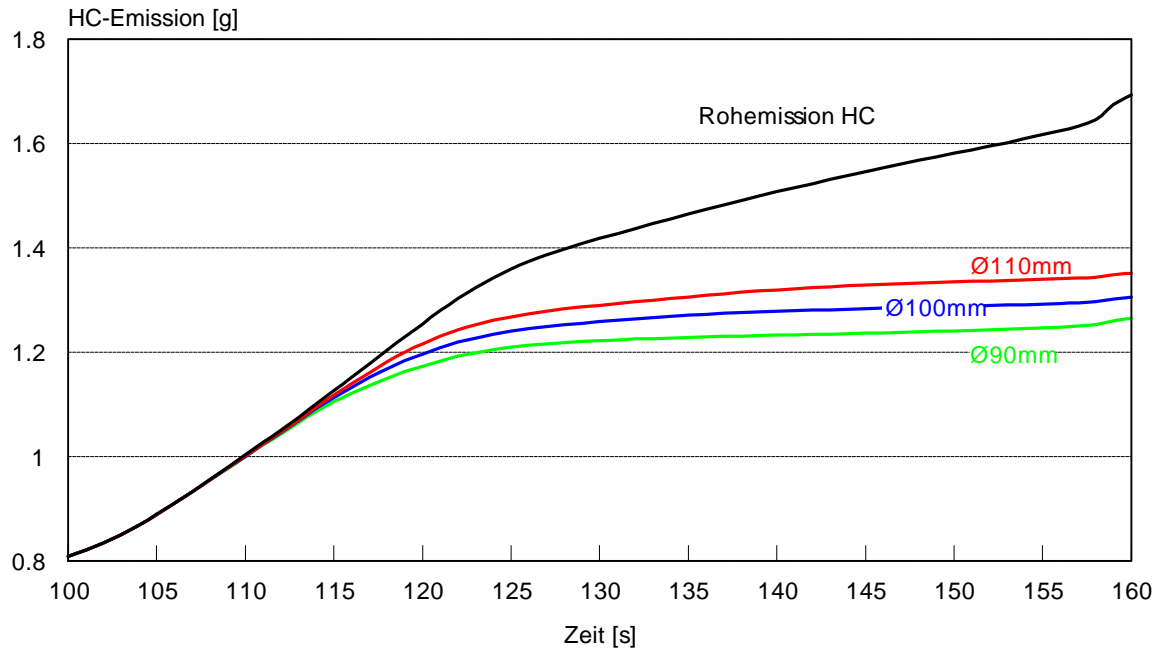


Abbildung 13: Kumulierte HC-Emission, Einfluß des Durchmessers beim Kaltstart, Trägermaße: Länge 130mm, 400cpsi, 40 $\mu$ m

Beim Träger mit kleinerem Durchmesser findet im Kaltstart eine bessere Konvertierung statt.

### Einfluß der Zelldichte auf die katalytische Effektivität im Kaltstart

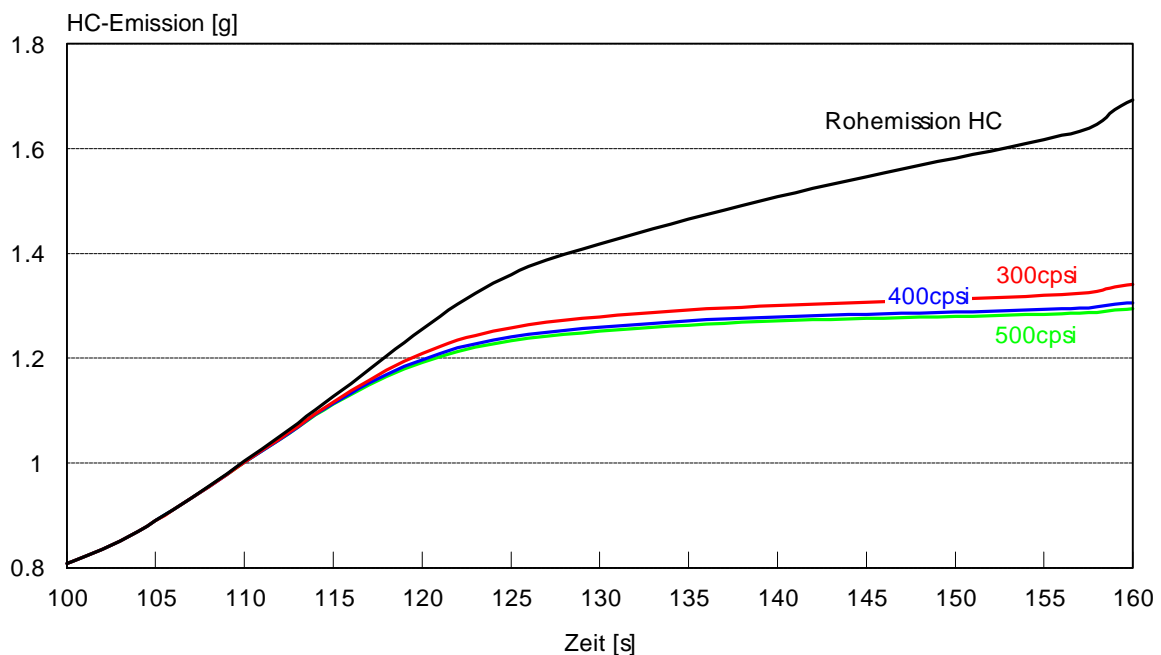


Abbildung 14: Kumulierte HC-Emission, Einfluß der Zelldichten beim Kaltstart Trägermaße:  $\varnothing$ 100x130mm, 40 $\mu$ m

Der Träger mit höchster Zelldichte konvertiert die meisten Kohlenwasserstoffe. Dies ist begründet in dem besseren Wärmeübergang und der besseren Porendiffusion bei dünnem Washcoat (siehe Abb. 1). Von Nachteil ist bei hohen Zelldichten das größere  $c_p$  durch mehr Materialeintrag. Generell gilt, daß die Differenz der kumulierten Emissionswerte mit steigender Zelldichte (GO steigt proportional mit der Zelldichte) kleiner wird.

### Einfluß der Folienstärke auf die katalytische Effektivität im Kaltstart

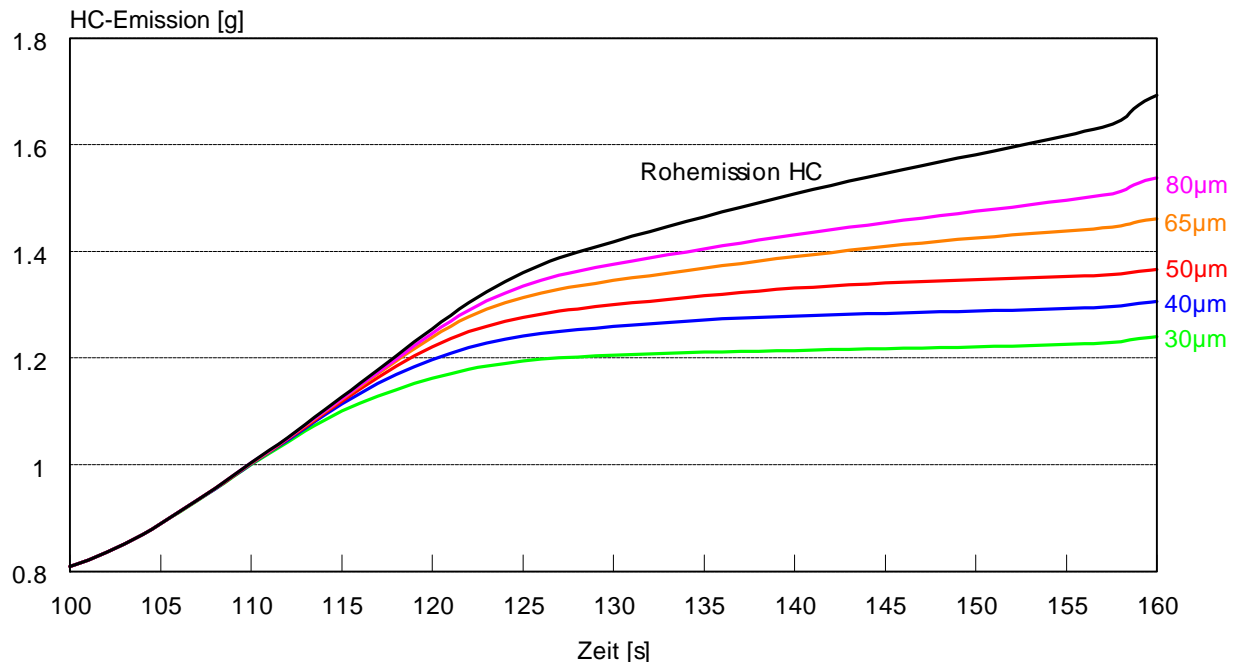


Abbildung 15: Kumulierte HC-Emission, Einfluß der Folienstärken beim Kaltstart  
Träger: Ø100x130mm, 400cps

In Abbildung 15 ist deutlich zu erkennen, daß Träger mit dünner Matrixfolie die niedrigsten Emissionsergebnisse aufgrund der geringeren Wärmekapazität im Kaltstart aufweisen.

### Zusammenfassung

Aus Abbildung 13 – 15 ist ersichtlich, daß die Folienstärke und damit die Wärmekapazität den größten Einfluß auf das Kaltstartverhalten hat.

## **5. Betrachtung des annähernd betriebswarmen Zustands**

Zur Berechnung der Effektivität des Katalysators im annähernd betriebswarmen Zustand wurden die Werte aus Abbildung 4 von Sekunde 160 bis 360 gewählt. Diese Periode beschreibt eine typische Aufheiz- und Abkühlphase des Diesels im EG-II Zyklus. Aufgrund der „Temperaturberge“ und „-täler“ kann auch hier das Berechnungsprogramm für den Kaltstart angewendet werden. Temperatur und Massenstrom sind in Abbildung 16 dargestellt.

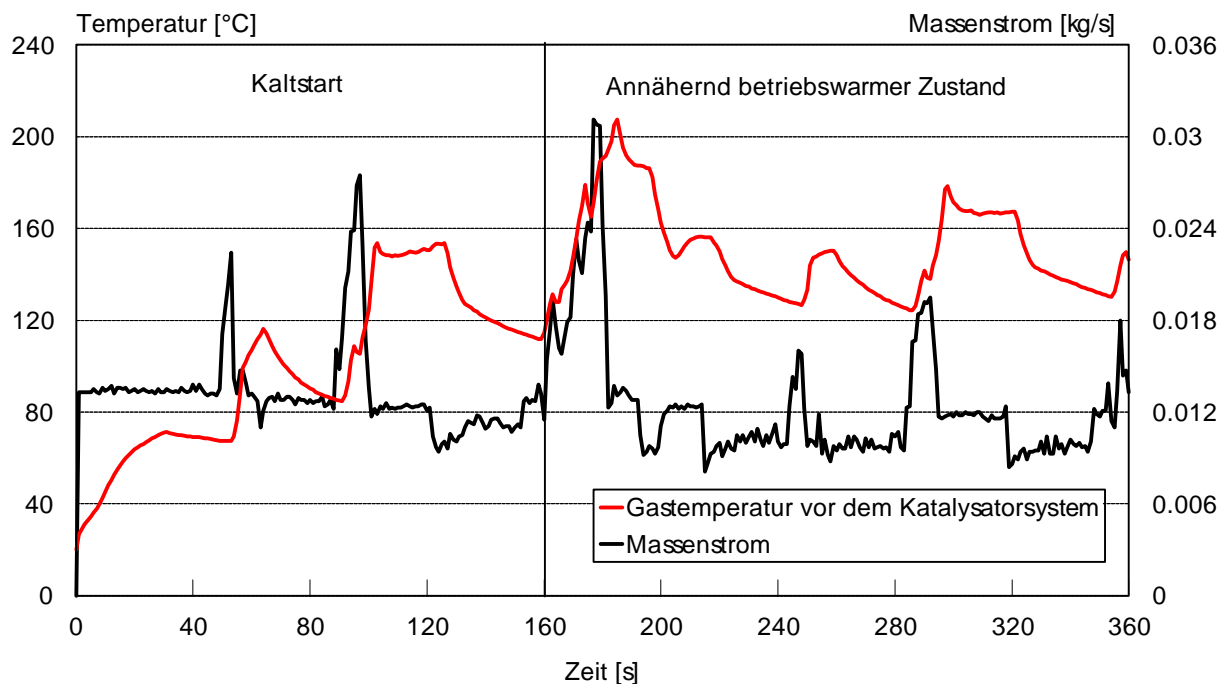


Abbildung 16: Gastemperatur vor Katalysator und Massenstrom eines Stranges

Wie auch im Kaltzustand wird der Einfluß des Durchmessers, der Zelldichte und der Folienstärke untersucht. Die folgenden drei Abbildungen präsentieren die Ergebnisse.

#### Einfluß des Durchmessers auf die katalytische Effektivität im „Warmzustand“

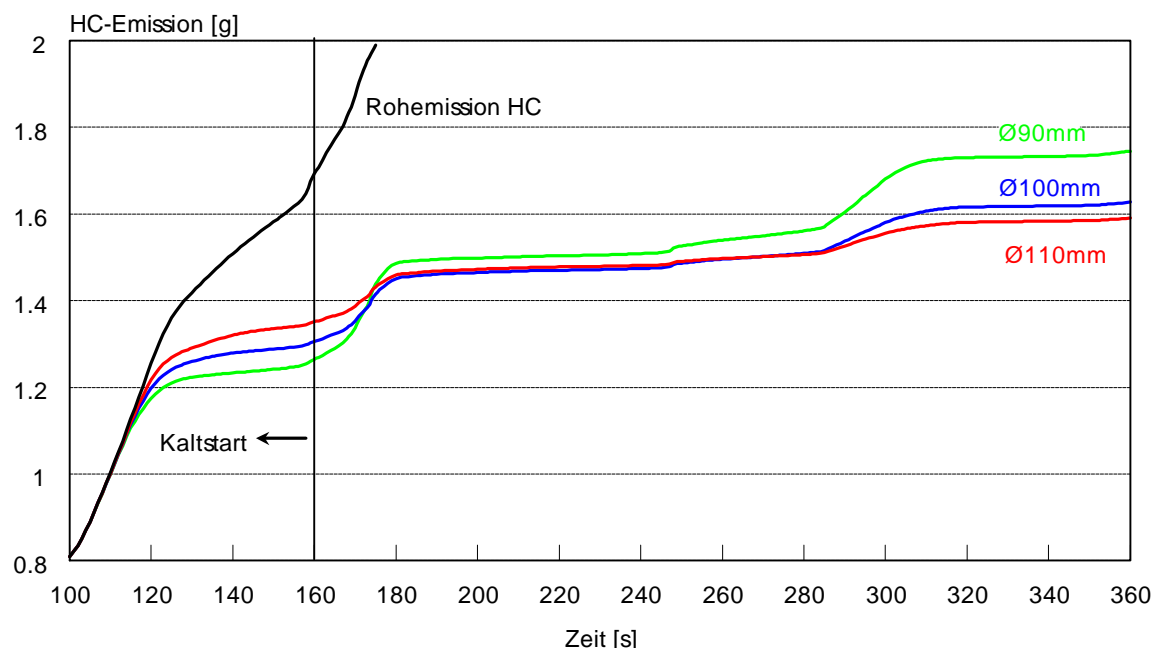


Abbildung 17: Kumulierte HC-Emission, Einfluß des Durchmessers im „Warmzustand“, Trägermaße: Øx130mm, 400cps, 40µm

Im Vergleich zu Abbildung 13 hat sich die Reihenfolge der kumulierten HC-Linien im annähernd betriebswarmen Zustand umgedreht. Der Träger mit der größten katalytischen Fläche, Ø110x130mm, bringt im „Warmzustand“ den höchsten Umsatz. Die Vorteile bezüglich des Durchmessers im Kalt- und Warmzustand lassen sich mit Hilfe eines Kaskadensystems kombinieren.

### Einfluß der Zelldichte auf die katalytische Effektivität im „Warmzustand“

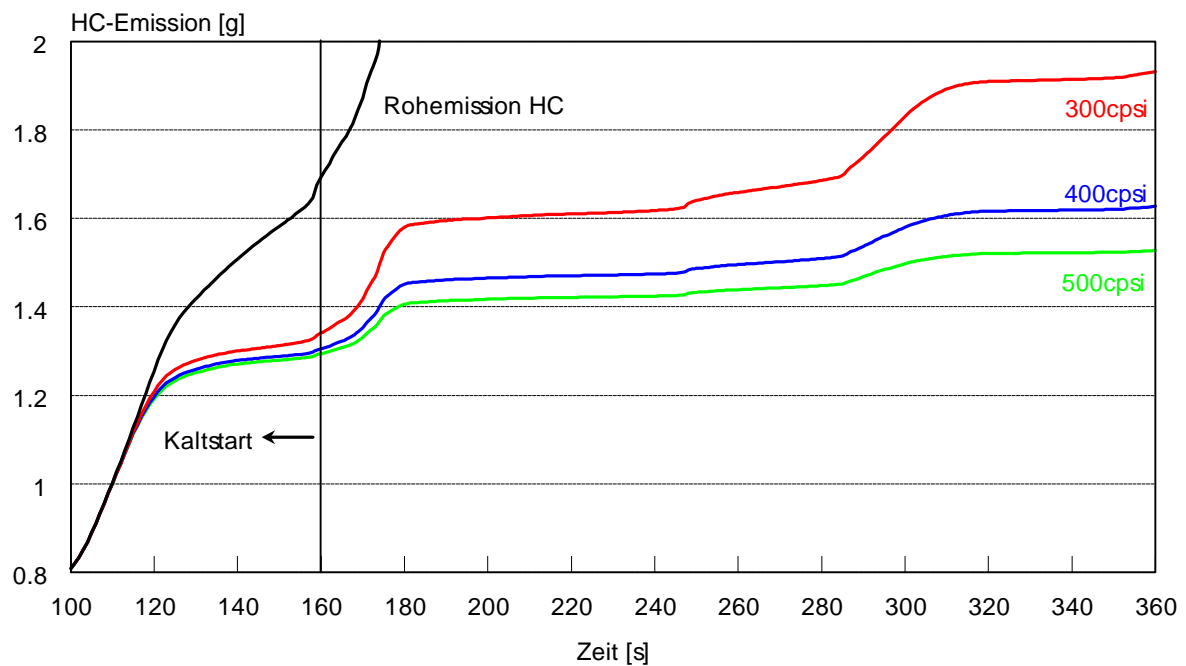


Abbildung 18: Kumulierte HC-Emission, Einfluß der Zelldichten im „Warmzustand“  
Trägermaße: Ø100x130mm, 40µm

Der Einfluß der katalytischen Fläche ist beim Zelldichtenvergleich im annähernd betriebswarmen Zustand wesentlich deutlicher zu erkennen als während der Aufheizphase. Begründet ist dies im verbesserten Stofftransport bei höherer Temperatur (siehe Abbildung 1). Ein Träger mit 500cps macht mit Abstand die beste Konvertierung, bringt aber auch den größten Druckverlust mit sich.

### Einfluß der Folienstärke auf die katalytische Effektivität im „Warmzustand“

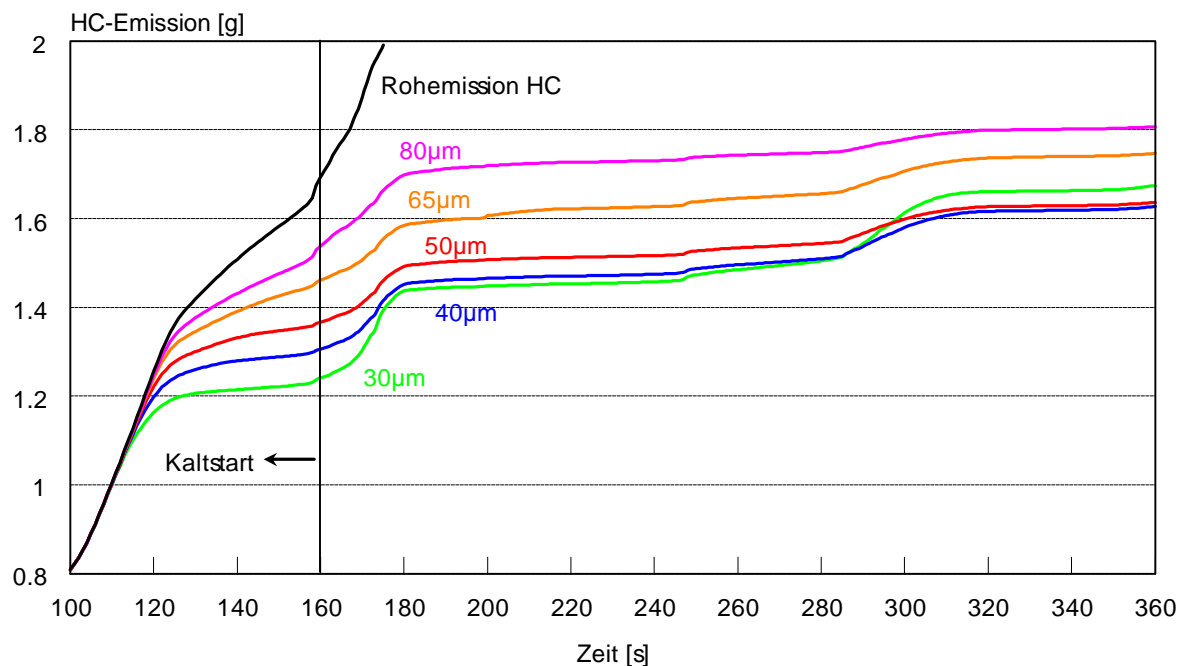


Abbildung 19: Kumulierte HC-Emission, Einfluß der Folienstärken im „Warmzustand“,  
Träger: Ø100x130mm, 400cps

Wie bereits bei der Beschreibung des Kaltstartverhaltens erwähnt springt die 30µm Folie aufgrund der geringeren Wärmekapazität früher an. Im Verlauf des Testes kühlt sich die dünne Folie durch die Dynamik jedoch teilweise beträchtlich ab. Träger mit höherer Wärmespeicherfähigkeit, wie zum Beispiel Matrizen aus 80µm Folie, haben bei Abkühlphasen einen deutlichen Vorteil. Generell kann man sagen, daß mit dickerer Folienstärke der stufenweise Anstieg der HC-Emissionen, der aus dem geminderten Umsatz resultiert, kleiner wird.

In Abbildung 20 ist das Auf- und Abkühlverhalten von Trägern mit unterschiedlichen Folienstärken mittels der HC-Umsatzraten dargestellt.

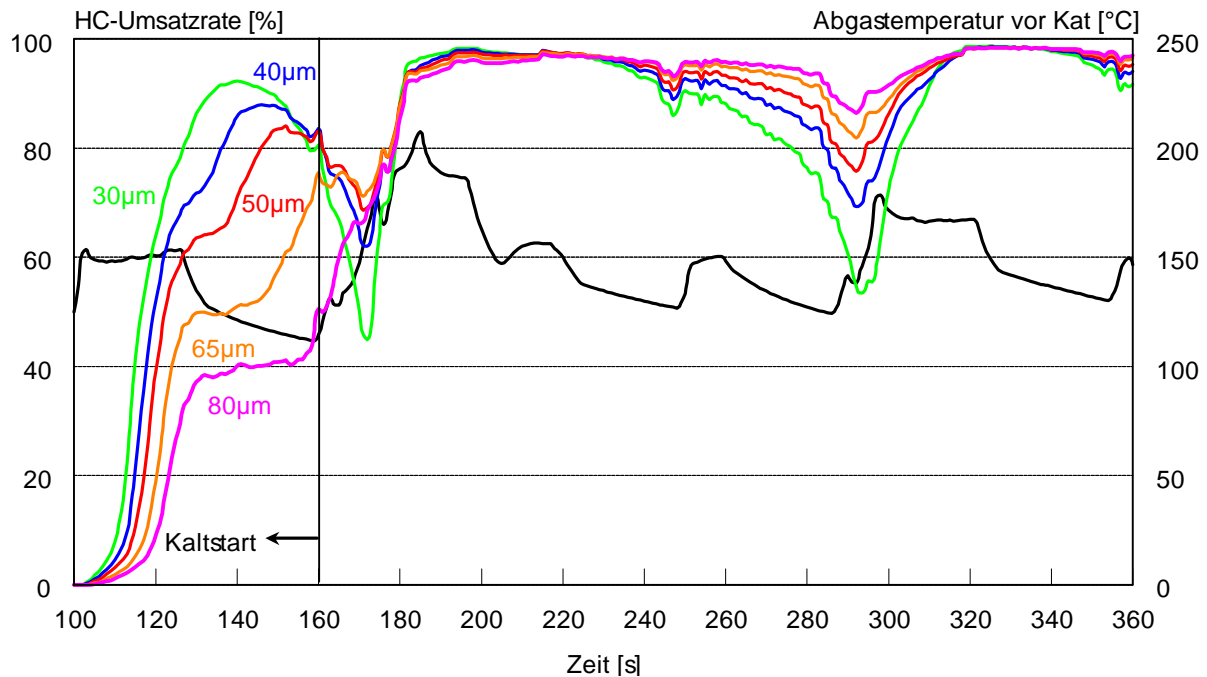


Abbildung 20: HC-Umsatzraten, Einfluß der Folienstärken im „Warmzustand“  
Träger: Ø100x130mm, 400cps

Es zeigt sich, daß bei steigender bzw. fallender Abgastemperatur die HC-Umsatzrate leicht zeitverzögert steigt bzw. sinkt.

### Zusammenfassung

Je dünner die Matrixfolie desto besser das Aufheizverhalten und desto extremer die Temperaturabhängigkeit. Hohe Folienstärken hingegen verzögern das Anspringen, halten aber auch ein hohes Umsatzratenniveau im annähernd betriebswarmen Zustand durch die bessere Wärmespeicherfähigkeit.

Aus Abbildung 17-20 ist ersichtlich, daß die Zelldichte und die Folienstärke den größten Einfluß im annähernd betriebswarmen Zustand haben.

## **6. Hybrid-Trägerstruktur**

Unter einer Hybrid-Trägerstruktur versteht man einen Träger mit geteilter Matrix, wobei der Abstand der beiden Monolithen relativ klein ist [4]. In Abschnitt 4 und 5 wurde gezeigt, daß die Folienstärke und die Zelldichte den größten Einfluß auf das Temperaturniveau des Katalysators und somit die Konvertierung haben. Um nun

einen Vorteil im Kaltzustand und im betriebswarmen Zustand zu erzielen, wird bei einem Hybridsystem der erste Monolith (Kaltstart optimiert) aus dünnen und der zweite Monolith (Abkühl optimiert) aus dicken Folien, gegebenenfalls mit unterschiedlicher Zelldichte, hergestellt.

### Längenvariation der Bereiche mit unterschiedlicher Folienstärke

Zu Beginn wurde das Längenverhältnis dünner zu dicker Folie im Hybridträger untersucht. Um eine gleichmäßige Maschenaufteilung für die Berechnung des Systems beibehalten zu können, wurden zwei Varianten kalkuliert. Als dünne Folie wurde 30µm und als dicke 80µm eingesetzt

Tabelle1: Längenaufteilung der Folienstärken im Hybridsystem

System	Länge des Metaliten® mit 30µm	Länge des Metaliten® mit 80µm
Standard	130 mm	
Hybrid 1	90 mm	40 mm
Hybrid 2	40 mm	90 mm

Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt

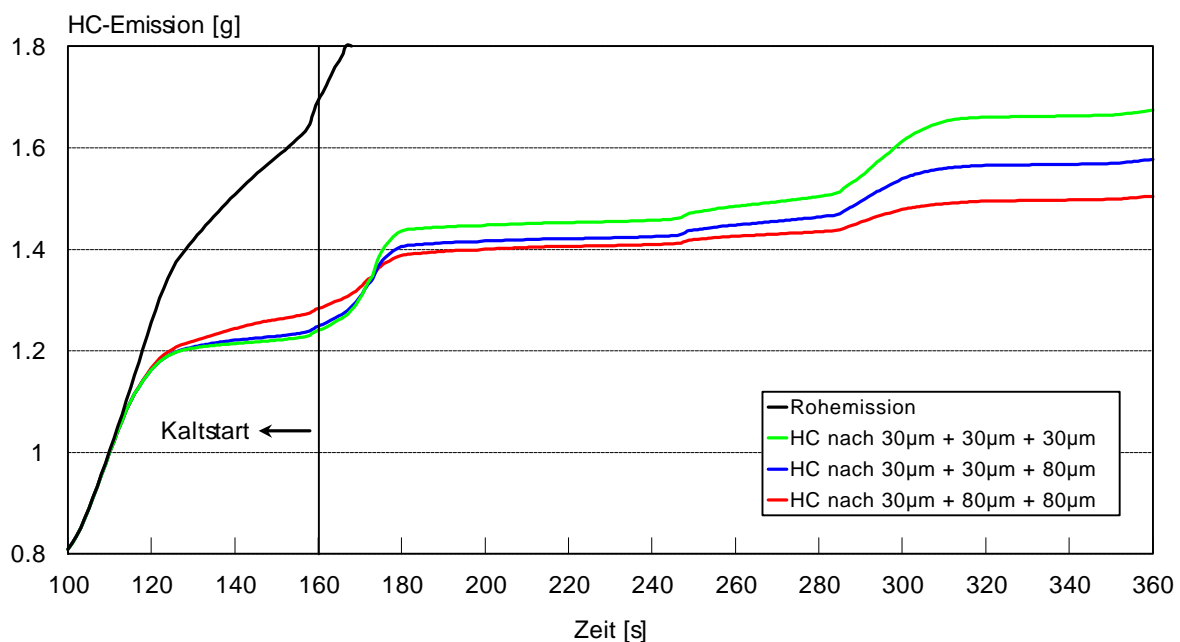


Abbildung 21: Kumulierte Emission bei unterschiedlichen Längenverhältnissen dünner zu dicker Folie im Hybridträger, Trägermaße: Ø100x40mm+Ø100x50mm+Ø100x40mm; 400cpsi

Im Vergleich zum Standardträger mit 30µm zeigen beide Hybridsysteme eine Verbesserung der Konvertierung. Ist bei dem Hybridträger der Anteil der 30µm Folie länger, wird der Kaltstart begünstigt, beim größeren Anteil der 80µm Folie das Absinken der Trägertemperatur im betriebswarmen Zustand verzögert. Der wärmespeichernde Effekt überwiegt bei den verwendeten Eingabedaten stark. Das optimierte System ist daher stark applikationsabhängig.

In Abbildung 22 wird mittels der HC-Umsatzraten der stufenweise Anstieg der kumulierten Emissionswerte erklärt.

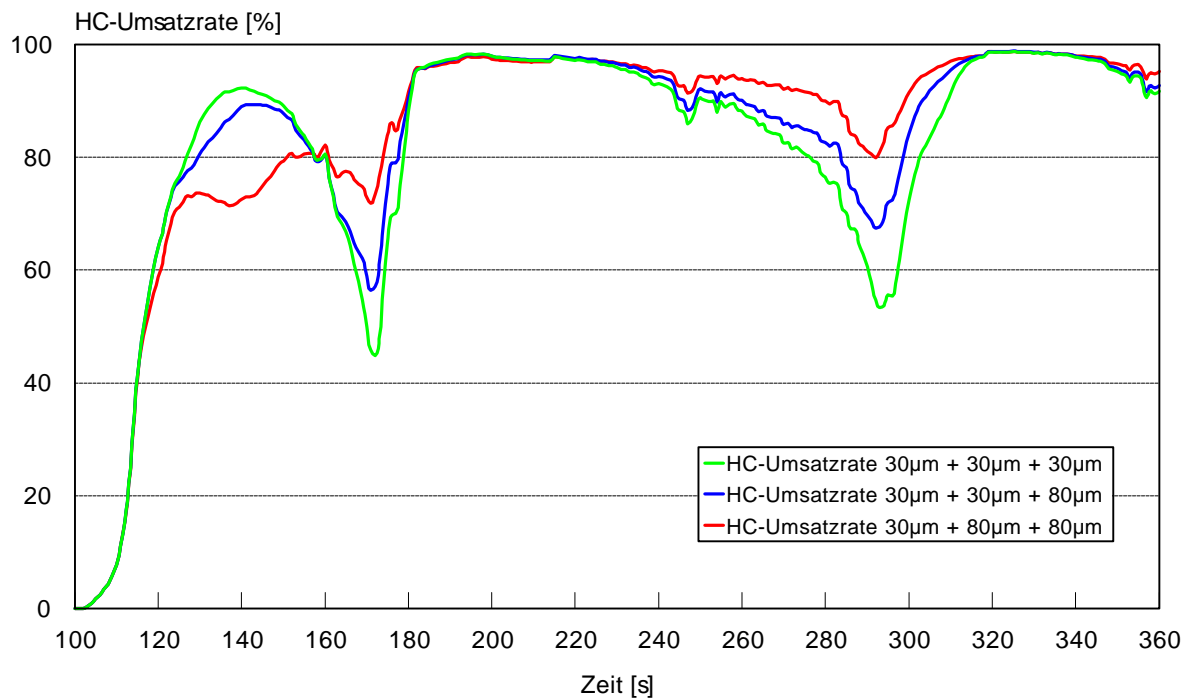


Abbildung 22: HC-Umsatzraten bei unterschiedlichen Längenverhältnissen dünner zu dicker Folie im Hybridträger  
 Trägermaße: Ø100x40mm+Ø100x50mm+Ø100x40mm; 400cps

Bei fallender Abgastemperatur sinkt die Umsatzrate des Hybrid 1 beträchtlich und es kommt zu einem relativ steilen Anstieg bei den kumulierten HC-Emissionswerten. Durch die größere Wärmekapazität des Hybrid 2 kühlt dieser weniger schnell aus und der Anstieg in kumulierten Emissionen erfolgt sanfter. Dies führt zu den niedrigsten Emissionsergebnissen bis 360sec des EU-II Zyklus. Alle Hybridträgervarianten wurden folglich mit der Längenaufteilung der Folienstärken von Hybrid 2 berechnet.

#### Verbesserung des Referenzträgers durch eine Hybridstruktur

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich zwischen Referenz-, Standard- und Hybridträger. Die bereits erwähnten Vorteile der 30µm Folie im Anspringverhalten aber auch deren Nachteile im Abkühlverhalten sind daraus ersichtlich. Der Träger mit 40µm Folie besitzt durch seine höhere Wärmekapazität letztendlich ein größeres Konvertierungspotential. Beim Hybridsystem werden die Vorteile beider Systeme vereinigt, so daß die Schadstoffumsetzung erheblich verbessert werden konnte.

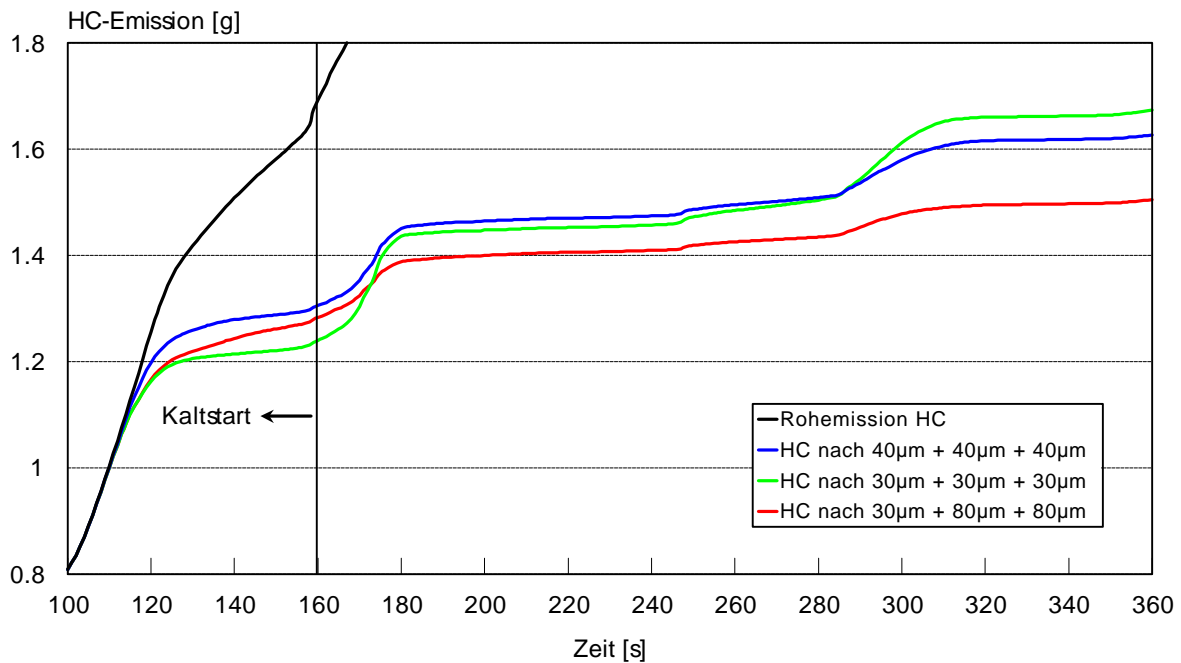


Abbildung 23: Kumulierte Werte des Referenz-, Standard- und Hybridträgers  
 Trägermaße: Ø100x40mm+Ø100x50mm+Ø100x40mm; 400cps

#### Wärmeverteilung im Referenz- und Hybridträger

Zur Erklärung des in Abbildung 23 präsentierten Resultates dient Abbildung 24 und 25. In beiden Diagrammen sind die Festknotentemperaturen (Matrixtemperaturen) im Zentrum des 30µm Standardträgers und des Hybridträgers über die Katalysatorlänge bei verschiedenen Zeitpunkten aufgetragen.

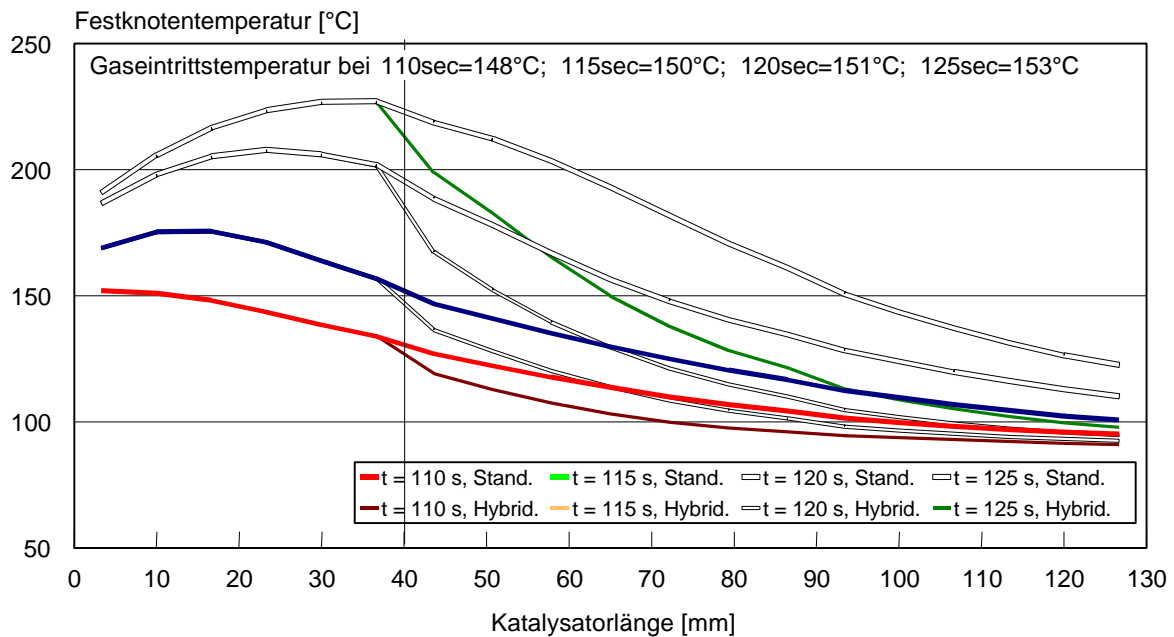


Abbildung 24: Festknotentemperatur der Zentrumsmasche über der Katalysatorlänge, Trägervarianten: Ø100x40mm + Ø100x50mm + Ø100x40mm, 400cps, 30µm und 80µm; t=110, 115, 120, 125sec

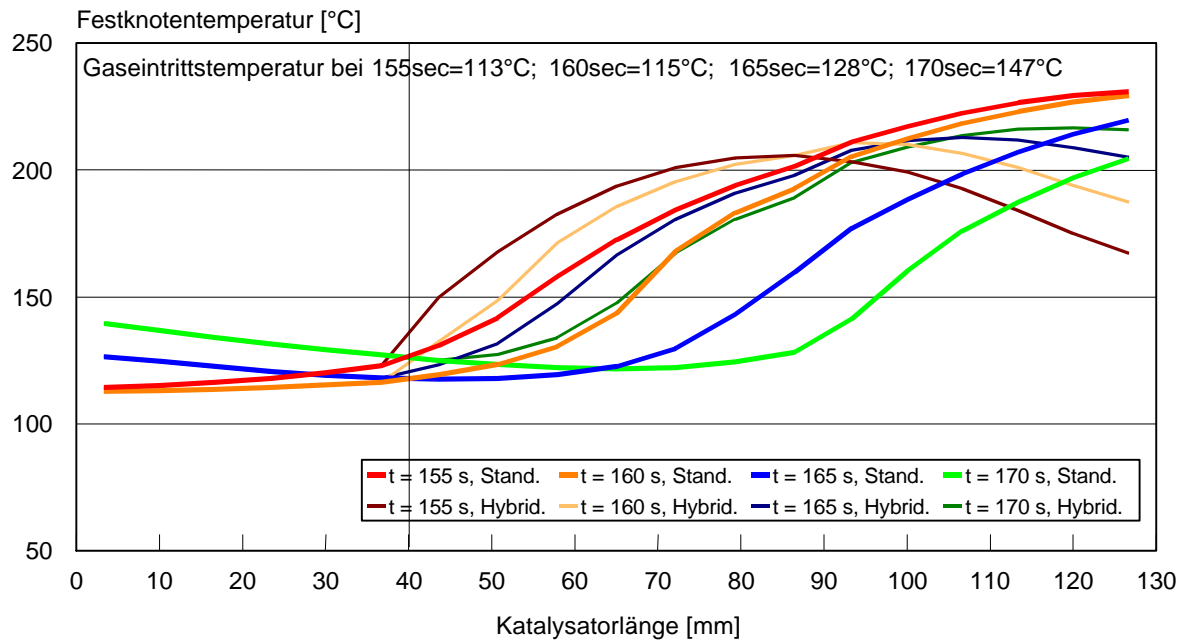


Abbildung 25: Festknotentemperatur der Zentrumsmasche über der Katalysatorlänge, Trägervarianten: Ø100x40mm + Ø100x50mm + Ø100x40mm, 400cpsi, 30µm und 80µm; t=155, 160, 165, 170sec

In beiden Diagrammen ist zu erkennen, daß sich der Temperaturverlauf mit der Zeit nach hinten verschiebt. Die Wärme läuft wie eine Art Welle durch den Träger. Der zweite und dritte Monolith mit 80µm dient bei sec 110-125 im Vergleich zum 30µm Monolithen als Wärmesenke, Abbildung 24. Bei sec 155-170, Abbildung 25, hat sich die Wärmewelle des 30µm Monolithen fast gänzlich aus dem Träger geschoben. Der Vorteil der höheren Wärmekapazität der 80µm Folie kommt dann deutlich zum Tragen. Die gespeicherte Energie wird bei einem Temperaturabfall wesentlich langsamer abgegeben und die Reaktionstemperatur nähert sich verzögert der Zündgrenze. Mit fortschreitender Zeit vergrößert sich die Festknotentemperaturdifferenz zwischen Standard- und Hybridträger.

#### Einfluß des Durchmessers auf die Effektivität des Hybridträgers

Um den Einfluß des Durchmessers beurteilen zu können wurden je drei Hybrid- und Standardträger mit unterschiedlichen Durchmessern und konstanter Länge von 130mm berechnet und in Abbildung 26 präsentiert. Beim Standardträger mit 40µm Folie hat ein kleiner Durchmesser aufgrund der geringeren Wärmekapazität und des besseren Wärmeübergangs im Träger den Vorteil des schnellen Anspringens. Dieser geht ihm bereits während der ersten Abkühlphase verloren. Beim Hybridsystem ist der Abkühleffekt durch die höhere thermische Masse deutlich abgemildert. Zwar ist grundsätzlich ein ähnlicher Verlauf wie beim Standardträger zu beobachten, die „Stufen“ während der Abkühlphasen sind jedoch wesentlich flacher, so daß nach 360 Sekunden mit 100 mm und selbst mit 90 mm Durchmesser niedrigere kumulierte Werte erreicht werden als mit 110 mm Durchmesser.

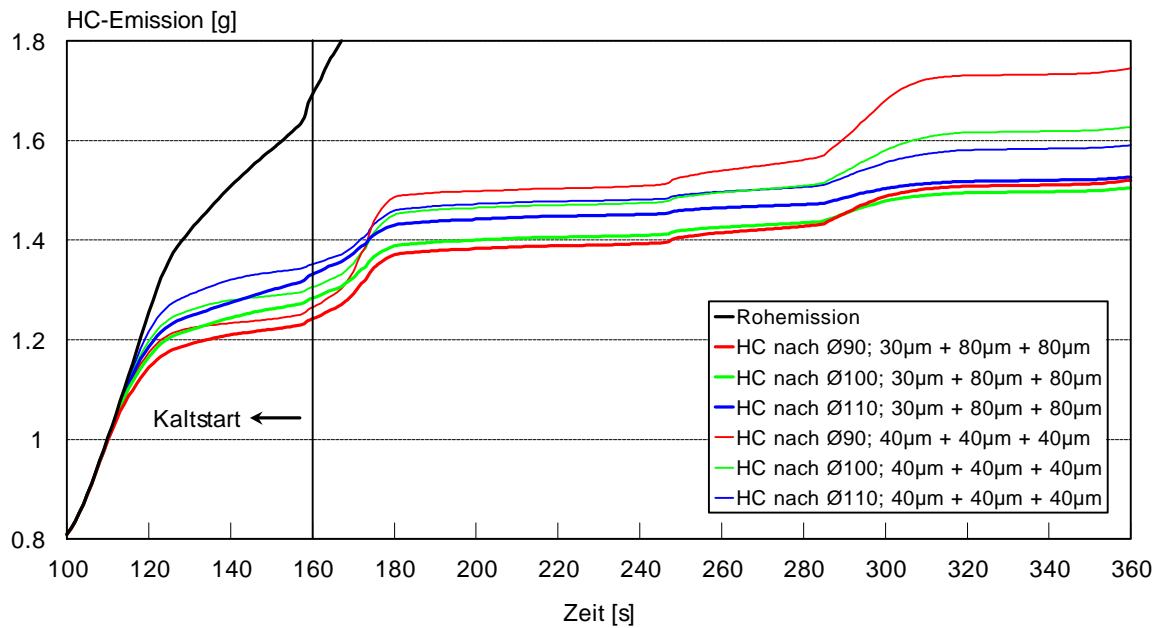


Abbildung 26: Kumulierte HC-Emission von Systemen mit unterschiedlichen Durchmessern, Gesamtlänge=konst=130mm

Als Ergebnis dieses Diagramms kann festgehalten werden, daß besonders bei Reduktion des Katalysatorvolumens ein weitaus besseres Ergebnis an kumulierten HC-Emissionen mit einem Hybridsystem erzielt werden kann.

#### Einfluß der Zelldichte auf die Effektivität des Hybridsystems

Zur Verbesserung des Wärmeübergangs und der Porendiffusion im Hybridträger wurde die Zelldichte des vorderen Monolithen variiert. Im hinteren Bereich des Trägers blieb die Zelldichte hinsichtlich des Referenzträgers konstant. Abbildung 27 zeigt das Ergebnis.

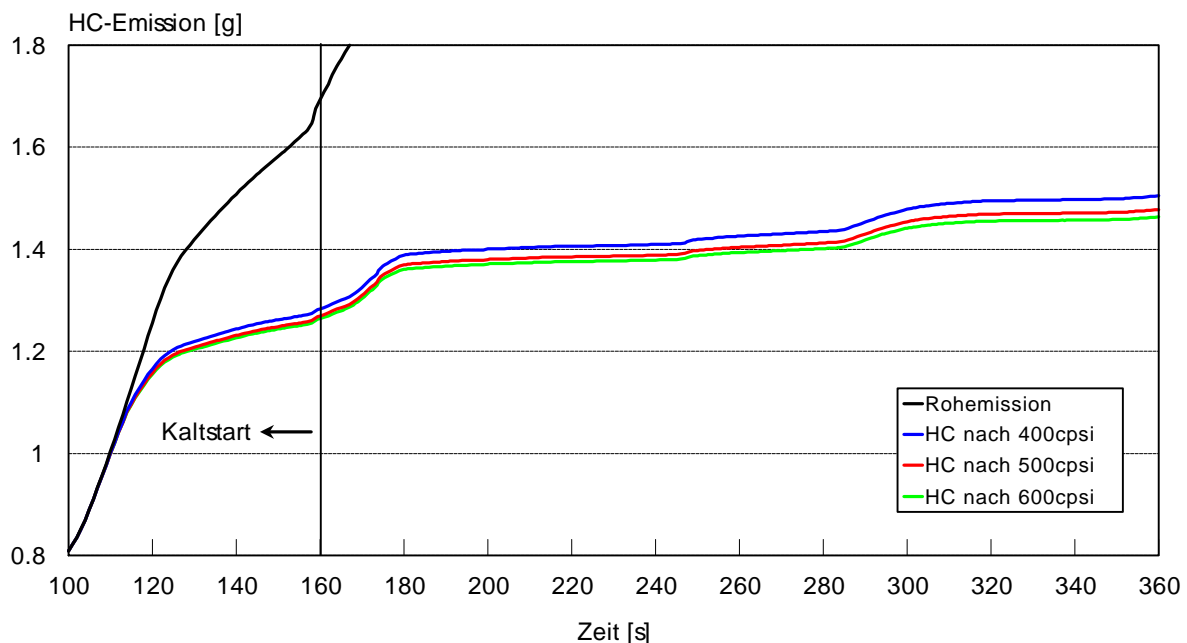


Abbildung 27: Kumulierte HC-Emission, Einfluß der Zelldichte des 30µm Monolithen Trägermaße: Ø100x40mm, 30µm + Ø100x50mm, 400cpsi, 80µm, + Ø100x40mm, 400cpsi, 80µm

Eine Zelldichte von 600cpsi erzeugt im Vergleich zum 500 und 400 Zeller ein geringfügig besseres Ansprungsverhalten. Dieser Vorteil kommt durch diverse Abkühlphasen im Test immer wieder zur Geltung und führt zu wachsenden Unterschieden in den kumulierten Endemissionswerten der drei Varianten. Einen geringen Einfluß auf die bessere Umsatzrate hat auch die größere GO des 600 Zeller.

## 7. Hybrid- und Referenzträger mit Konuskatalysator

Eine Verkleinerung des Katalysator-Systems kann auch mit Hilfe eines Katalysators im Einströmkegel erreicht werden [5]. Der erste Monolith des Katalysatorsystems wurde daher volumengleich als Konuskatalysator mit einem Einströmwinkel von  $36^\circ$  gerechnet.



Abbildung 29: Konischer Katalysator

Der Vergleich des Referenzträgers mit Hybridträger, Standardträger mit Konuskatalysator sowie Hybridträger mit Konuskatalysator ist in Abbildung 30 dargestellt. Die korrelierenden Katalysatorsysteme, mit und ohne Konuskatalysator zeigen identische Emissionsergebnisse nach 360 Sekunden. Der Konuskat führt durch seinen kleinen Einströmdurchmesser zu besserem Ansprungsverhalten. Da die GO des Konuskats im Vergleich zum ersten Monolithen des Referenz- bzw. Hybridträgers um 21% kleiner ist, nähert sich die Konuskatlinie der Linie des Vergleichsystems an.

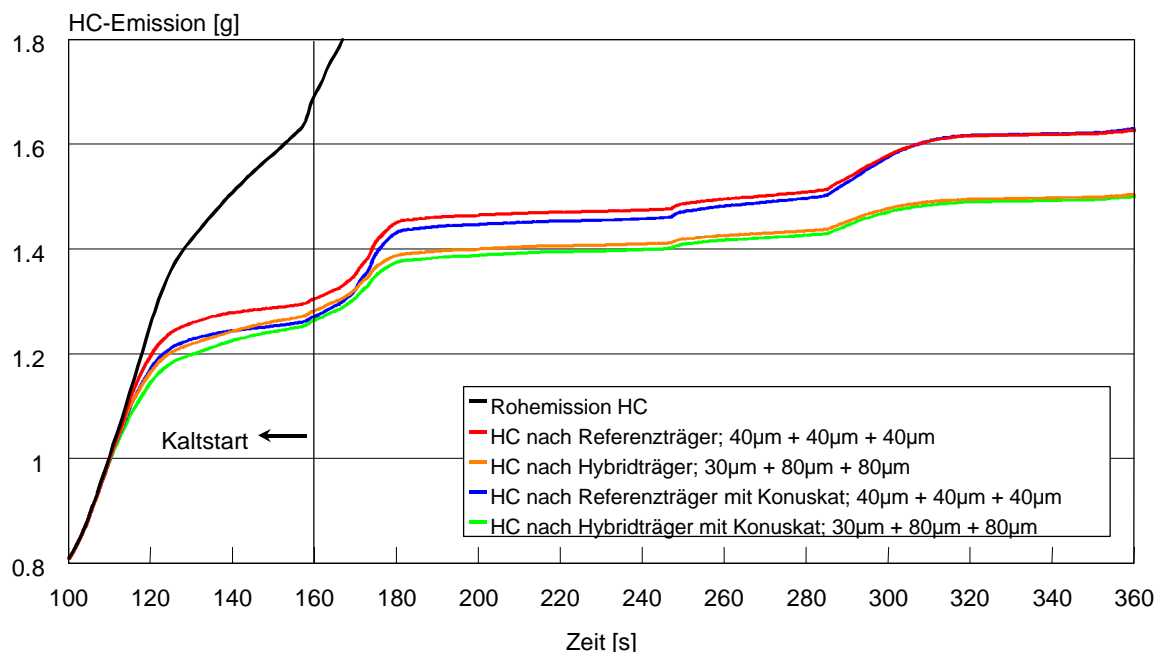


Abbildung 30: Kumulierte HC-Emission von Referenzträger und Hybridträger ( $\varnothing 100 \times 130 \text{mm}$ , 400cps) sowie Standardträger mit Konuskat, und Hybridträger mit Konuskat ( $\varnothing 60/98, 4 \times 62 \text{mm} + \varnothing 100 \times 90 \text{mm}$ , 400cps)

Die Berechnungsergebnisse zeigen, daß bei volumengleichen Katalysatorsystemen das Konuskat-Hybridsystem (grüne Linie) trotz geringerer GO wesentlich bessere Resultate in kumulierten Werten erzielt als das Referenzsystem (rote Linie). Dabei ist der Platzbedarf in der Länge des Konuskat-Hybridsystems im Vergleich zum Referenzträger um 40mm, das heißt um 30% geringer.

## 8. Zusammenfassung

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus beim Dieselmotor ist eine motornaher Positionierung des Katalysators für dessen Effektivität von entscheidender Bedeutung. Da selbst bei einer solchen Anordnung die Abgastemperatur teilweise in den Bereich der Light-Off-Temperatur absinken kann, wurden unterschiedliche Einflußgrößen sowohl während der Aufheizphase als auch im betriebswarmen Zustand untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß die Folienstärke den mit Abstand größten Einfluß auf das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Trägers besitzt.

Um günstiges Anspringverhalten und gutes Wärmespeichervermögen miteinander zu verbinden, wurde ein Träger mit Hybridstruktur entwickelt, der im vorderen Bereich der Matrix eine geringere Folienstärke aufweist als im hinteren. Die durchgeführten Berechnungen zeigen für diesen Hybridträger deutliche Vorteile bei den kumulierten HC-Emissionen. Zudem ist mit diesem Konzept eine Volumenreduktion bei gleichbleibender Konvertierungsleistung möglich. Dies wurde durch Berechnungen von Trägern mit kleinerem Durchmesser bei konstanter Länge gezeigt.

Eine weitere Möglichkeit der Volumenreduktion besteht durch den Einsatz eines konischen Katalysators, der anstelle des leeren Eintrittskonus Verwendung findet. Trotz einer geringfügig kleineren GSA verglichen mit dem Standardhybridsystem kann durch das nochmals verbesserte Anspringverhalten die gleiche Gesamtkonvertierung erreicht werden.

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] Öser, P., Brandstetter, W., „Grundlagen zur Abgasreinigung von Ottomotoren mit der Katalysatortechnik“, MTZ, 45 (1984) 5
  
- [2] Robert Bosch GmbH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 21. Auflage 1991, S. 513
  
- [3] Maus, W., Brück, R.: „Motornahe Katalysatorkonzepte; Neue technische Herausforderungen“, 18. Internationales Motorensymposium, Wien, 24. - 25. April 1997
  
- [4] Weltens, H., Bressler, H., Terres F., Neumaier, H., Rammoser, D., „Optimisation of Catalytic Gas Flow Distribution by CFD Prediction“, SAE-Paper No. 930780
  
- [5] Maus, W., Brück, R.: „Der konische Katalysator – Potential zur Steigerung der Katalysatoreffektivität“, 19. Internationales Motorensymposium, Wien, 7. - 8. April 1998