

**Dipl. Ing. G. Faltermeier, Dipl. Ing. B. Pfalzgraf, AUDI AG, Ingolstadt**  
**Dipl. Ing. R. Brück, Dipl. Ing. C. Kruse, Dipl. Ing. W. Maus,**  
**Emitec GmbH, Lohmar**  
**Dipl. Ing. A. Donnerstag, Volkswagen AG, Wolfsburg**

# **Katalysatorkonzepte für zukünftige Abgasgesetzgebungen am Beispiel eines 1,8 l 5V-Motors**

## **Zusammenfassung**

Die Einführung der verschärften Abgasgrenzwerte in Europa und in den USA verlangt eine wesentlich effektivere Abgasreinigung. Die Kaltstartphase liefert bei Ottomotoren den größten Beitrag zur Gesamtemission, da Katalysatoren eine Mindesttemperatur zum Starten der chemischen Reaktionen benötigen und diese heute durch das Motorabgas nicht schnell genug erreicht werden kann. Der Einsatz eines motornahen Hauptkatalysators, dessen Ausführung auf den Motor genau abgestimmt ist, bietet das Potential zum Erreichen des europäischen Abgasgrenzwerts. Der Vorgang der Auslegung wird detailliert beschrieben und die Vor- und Nachteile eines solchen Systems werden diskutiert.

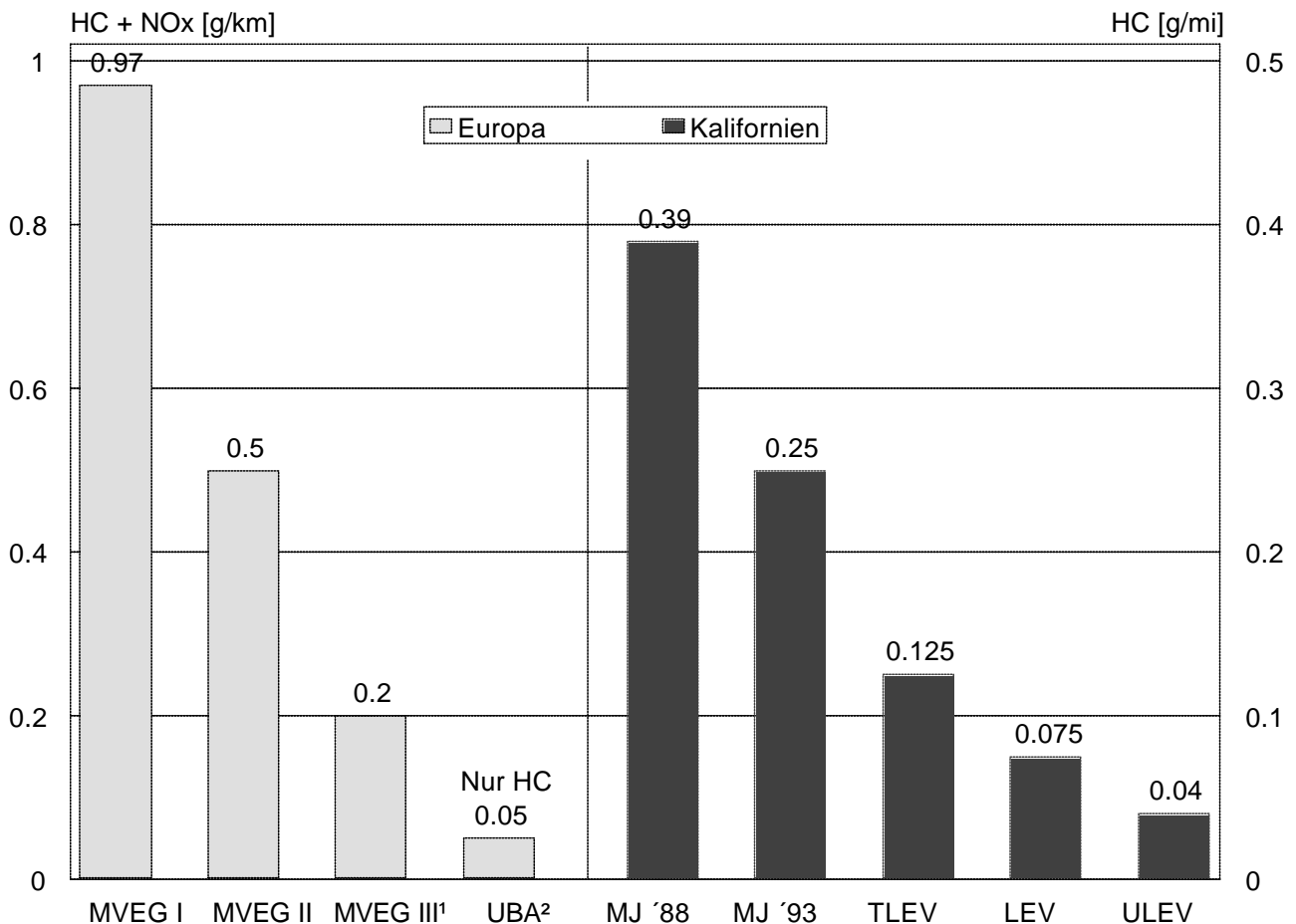
## **Abstract**

The introduction of more stringent exhaust emission standards in Europe and in the USA demands substantially more effective exhaust gas treatment than standards have required hitherto. In SI engines the cold start phase is responsible for contributing by far the greatest proportion of overall emissions; to begin the chemical reaction, catalytic converters require a minimum temperature which at present cannot be achieved quickly enough by the engine exhaust gas. The application of close-coupled main catalytic converter accurately coordinated with the engine offers the potential necessary for compliance with European emission standards. A detailed description for the layout procedure is given here, together with a discussion of the advantages and disadvantages of such systems.

# 1. Einleitung

## 1.1 Randbedingungen

Ebenso wie in den USA schreibt auch die EU zeitlich gestaffelt immer schärfere Abgasgrenzwerte vor (vgl. Abbildung 1). So ist ab 1998 mit der Einführung der dritten Stufe in Europa zu rechnen. Es liegt ferner ein eigener Vorschlag des Umweltbundesamtes vor, der eine Kohlenwasserstoffmessung wie für den "TLEV"-Standard vorsieht.



<sup>1</sup> bisheriger Vorschlag, <sup>2</sup> UBA-Vorschlag

Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der HC-Standards für die EU und Kalifornien

Die bislang noch als Summengrenzwert für HC + NOx angegebenen 0,2 g/km werden eventuell je hälftig zum Einzelgrenzwert aufgeteilt.

Dieser zukünftige MVEG III-Standard bedingt, ebenso wie die Low-Emission-Gesetzgebung (Transitional Low Emission Vehicle, Low Emission Vehicle, Ultra Low Emission Vehicle) in Kalifornien außerordentlich große Anstrengungen in der Abgasnachbehandlung von Ottomotoren. Die Verschärfung der Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe stellt sich dabei als Hauptproblem heraus. Für die kalifornischen Standards ab TLEV werden der Methan-Anteil abgezogen und ab LEV alle sauerstofffreien und -haltigen Kohlenwasserstoffe summiert.

Die Prüfzyklen in der EU und den USA weichen stark voneinander ab. Unter Betrachtung der

Katalysator-Zulauftemperatur kann beim amerikanischen Zyklus von einem relativ warmen und beim europäischen von einem kalten Zyklus gesprochen werden. Insbesondere der synthetische Europa-Zyklus mit seinem großen Leerlaufanteil und den für alle Fahrzeuge gleichen Schaltpunkten bedingt Zusatzmaßnahmen über die bloße Abgasreinigung hinaus zur Erfüllung der Vorschrift. Obwohl jeder Fahrzeughersteller bestrebt sein muß, die Variantenzahl seiner Produkte zu minimieren, machen die unterschiedlichen Testprozeduren meist die sehr kosten- und zeitaufwendige Entwicklung einer eigenen Europa- und einer USA-Variante nötig, obwohl die benötigte Reinigungswirkung in etwa gleich ist. Eine weitere Verschärfung dieser Problematik ergibt sich aus den in Zukunft stark unterschiedlichen Kraftstoffzusammensetzungen in der EU und den USA, die insbesondere Auswirkungen auf die Motorsteuerung und eventuell auch auf die Katalysatorbeschichtung hat.

Der über den gesamten Testzyklus notwendige HC-Konvertierungsgrad wächst also weltweit im Vergleich über die Modelljahre von ca. 80 % auf über 95 % an. Da mit betriebswarmem Katalysator die Schadstoffe nahezu vollständig umgesetzt werden, bildet die Kaltstartphase den Hauptansatzpunkt, um einen so großen Zuwachs in der Effizienz der Abgasreinigung zu erzielen. Bekanntlich kann ein heute üblicher Drei-Wege-Katalysator erst ab einer Temperatur von mehr als 300 °C Kohlenwasserstoffe hinlänglich umsetzen. Durch den sich allmählich erwärmenden Abgasstrom dauert es bis zu einer Minute, bis diese Temperatur erreicht wird.

Der Motor wird aus Gründen der Fahrbarkeit während dieser Zeit mit einem fetten Gemisch betrieben und arbeitet ohnehin unter schwierigen Bedingungen wie kalten Saugrohr- und Brennraumwänden. Motorische Maßnahmen, die während des Warmlaufs eine Verringerung der Rohemissionen bewirken, wirken sich direkt auf das Gesamtergebnis aus. So ist ein weniger fetter Warmlauf, bedingt durch einen schnell durchbrennenden Motor und durch verbesserte Gemischaufbereitung sogar von zweifachem Vorteil: zum einen verringert sich der HC-Ausstoß und zum anderen können wegen des höheren Sauerstoffanteils mehr Schadstoffe aufoxidiert werden. Ein optimierter Motor kann aber nur eine flankierende Maßnahme sein, wie die oben angeführten Zahlen zeigen. Wollte man den Schritt von 80% auf 95 % Reinigungswirkung nur durch Verringerung der Rohemission bei Beibehaltung der ursprünglichen Konvertierungsrate nachvollziehen, müßte man die Rohemission vierteln. Dies scheint technisch kaum darstellbar.

## 1.2 Entwicklungstendenzen

Das zentrale Entwicklungsziel ist die Verringerung der Warmlaufemissionen. Entweder kann die Zeitspanne zwischen Motorstart und Wirksamwerden des Drei-Wege-Katalysators durch eine schnell wirkende Beheizungsmaßnahme (aktive Systeme: Elektrisch beheizter Katalysator, Kraftstoffbrenner, Abgasnachverbrennung) verkürzt oder der Austritt unverbrannter Abgasbestandteile durch eine Zwischenspeicherung (Adsorber) bis zur Betriebsbereitschaft des Katalysators verzögert werden. Derart aufwendige Systeme werden nur dann zum Einsatz kommen, wenn passive Systeme nicht ausreichen. Unter passiven Systemen sind Vorkatalysatoren, motornahe Katalysatoren, optimierte Trägersysteme, motorische Katheizmaßnahmen und beliebige Kombinationen hieraus zu verstehen.

Motornahe Katalysatoren sind die logische Weiterentwicklung von schon lange bekannten Vorkatalysatoren. Die Vermeidung der Wärmeverluste der Abgasanlage durch Verkürzung der Abgaslaufänge erhöht die Zulauftemperatur im Warmlauf und verkürzt damit die Anspringzeit. Durch Verbesserungen am Motor, hauptsächlich in der Gemischaufbereitung und der Motorsteuerung, und am Katalysator werden direkt am Krümmer angebrachte Katalysatoren zukünftig in der Lage sein, auch höchsten Beanspruchungen wie Anhängerbetrieb und Hochgeschwindigkeit standzuhalten. Unabhängig von der Lage bietet eine auf den Einsatzfall angepaßte Auslegung des Katalysators großes Potential.

Motorische Katheizmaßnahmen, wie Spätzündung, erhöhte Leerlaufdrehzahl, etc. sind ebenfalls geeignet, ein schnelleres Anspringen zu fördern.

Das hier besprochene Fahrzeug als Beispiel der Mittelklasse läßt wegen seiner günstigen Ausgangsbasis die erfolgreiche Entwicklung eines passiven Systems erwarten.

### 1.3 Zielkonflikte

Für den Fahrzeugbenutzer ist der Vorzug einer aufwendigen Abgasreinigung nicht unmittelbar erkennbar. Der Vorteil für die Umwelt ist nicht erfahrbar. Auch wirtschaftliche Vorteile, wie etwa durch eine in Europa durchaus mögliche Steuervergünstigung, sind momentan nicht in Aussicht. Daraus folgt, daß der Fahrzeughersteller nur ungünstige Einflüsse im Sinne des Kunden auf den Fahrzeugnutzen, die durch die Abgasreinigung auftreten könnten, verhindern muß, ohne sein Produkt positiv herausstellen zu können.

Ein probates Mittel, die Effektivität eines Katalysators zu erhöhen, ist die Vergrößerung der vom Abgas bestrichenen geometrischen Oberfläche. Dies kann durch Erhöhung des Volumens und durch eine Erhöhung der Zellzahl geschehen. Nachteilig ist dabei die Erhöhung des Abgasgedrucks, die Nachteile bezüglich Drehmoment, Leistung und Verbrauch nach sich ziehen kann. Durch die Verwendung geringerer Wandstärken im Katalysatorträger, etwa durch den Übergang von Keramik auf Metall, kann durch Verringerung der Versperrung des Strömungsquerschnitts Abhilfe geschaffen werden.

Eine motornahe Katalysatorposition beansprucht naturgemäß Bauvolumen im Motorraum, das beim Grundentwurf des Fahrzeugs vorgehalten werden muß. Ferner gibt der Katalysator eine große Wärmemenge ab, die im Motorraum durch eine entsprechende Durchströmung abzuführen ist. Vor dem Hintergrund der zukünftigen Verschärfung der Geräuschemissionen auf 71 dB und den damit nötigen Schallschutzmaßnahmen ist gerade dieser Punkt zu beachten.

Um trotz des zwangsläufig verkürzten Vorrohrs keine Einbußen im Leistungs- und damit auch Verbrauchsverhalten des Motors zu erleiden, ist beim motornahen Katalysator eine sehr sorgfältige strömungsmäßige Optimierung durchzuführen und gegebenenfalls eine aufwendigere Ausführung der Abgasanlage nötig.

Die Übernahme der in den USA gerade eingeführten Überwachung des Abgasverhaltens jedes einzelnen Fahrzeugs im Betrieb, On Board Diagnose II, wird auch für Europa diskutiert. Heute eingeführte Verfahren bewerten die Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators durch eine Lambda-Sonde vor und hinter dem Kat und schließen daraus auf den Alterungszustand. Ist das zu überwachende Volumen und damit die absolute Sauerstoffspeicherfähigkeit zu klein, wird die Auflösung des Signals schwierig, ist das Volumen zu groß, überlagert das gute Speichervermögen nicht gealterter Teile das Meßsignal. Das bedeutet, daß auch die Überwachung einen maßgeblichen Einfluß auf die Auslegung der Katalysatoranlage hat. Insbesondere kleine Vorkats sind problematisch in diesem Zusammenhang, da wegen der Bedeutung des Anspringverhaltens auf das Gesamtergebnis grundsätzlich die vorderste Katscheibe zu überwachen ist.

Wie oben dargestellt, beeinflußt eine große Zahl von Parametern die Auswahl der Abgasreinigungsstrategie. Unter Beachtung der Kosten für das Gesamtsystem Fahrzeug, Motor und Abgasreinigung, die aufzuwenden sind, um die neue europäische Abgasnorm zu erfüllen, wurde dem motornahen Hauptkatalysator der Vorzug gegeben. Den Hauptausschlag gab dabei, daß die Turbo-Variante des

Fünfventil-Motors bereits mit einem motornahen Katalysator in Serie läuft und damit die kostenintensiven Probleme Bauraum und Motorraumtemperatur als gelöst zu betrachten sind.

## 2. Katalysatorkonzepte

### 2.1 Fahrzeug / Motorbeschreibung (Audi A4, R4 1,8 ltr., 5V-S-Motor)

Neben der Voraussetzung des günstigen Package für einen motornahen Hauptkatalysator fiel die Wahl auch deshalb auf den R4 1,8 ltr. 5V-Saug-Motor im A4, weil diese aktuelle Fahrzeug/Motor-Kombination für die EU III-Grenzwerte zu entwickeln ist und in der Großserie mit dem geringsten und kostengünstigsten Maßnahmenumfang realisiert werden soll.

Der Reihenvierzylinder motor weist bei einem Hub von 86,4 mm und einer Bohrung von 81 mm einen Hubraum von 1781 cm<sup>3</sup> auf. Das maximale Drehmoment beträgt 173 Nm bei 3950 U/min und die Nennleistung von 92 kW wird bei 5800 U/min erreicht.

Der Kraftstoffverbrauch liegt bei 10,1 im Stadtzyklus, 5,8 bei 90 km/h konstant und 7,5 bei 120 km/h konstant, jeweils in l/100 km.

Der Motor ist mit einem 5-Ventil-Zylinderkopf mit 3 Einlaß-, 2 Auslaßventilen und hydraulischen Tassenstößeln ausgestattet und im A4 längs eingebaut.

Als aktuelles Serienkonzept ist er für die EU II-Gesetzgebung ausgelegt und wird im A4 ohne Nockenwellen-Verstellung und Saugrohr-Umschaltung angeboten.

Als EU II-Konzept ist er mit einem im Unterbodenbereich angeordneten runden Keramik-Katalysator mit den Abmessungen Ø 118 mm x 152 mm und 62 Zellen/cm<sup>2</sup> (400 cpsi) ausgerüstet.

Für das Entwicklungsziel HC+NO<sub>x</sub> < 50% des EU II-Grenzwertes kamen neben einer weiter optimierten Applikation der Lambdaregelung und der Dynamikabläufe auch moderate Katalysator-Heizfunktionen in der Motorsteuerung zum Einsatz. Dabei lagen die Schwerpunkte der Entwicklung - neben der Erfüllung der EU II-Grenzwerte bei der Erzielung eines gleichmäßig hohen, kundenrelevanten Drehmomentverlaufes und der weiteren Verringerung des Kraftstoffverbrauchs.

### 2.2 Studie der Randbedingungen für das Serienfahrzeug im MVEG III-Test

Der europäische Abgastest besteht zur Zeit aus zwei Teilen. Nach einer vierzigsekündigen Leerlaufphase, in der keine Emissionen gemessen werden, folgt der City-Test mit einer Länge von 4,052 km bei einer maximalen Geschwindigkeit von 50 km/h. Unmittelbar nach dem City-Test erfolgt der EUDC (Extra Urban Driving Cycle) mit einer Länge von 6,955 km bei einer maximalen Geschwindigkeit von 120 km/h, der eine Überland- bzw. Autobahnfahrt simulieren soll. Der neue EG-Stufe-III-Test ist in den Testteilen identisch, es entfällt jedoch die vierzigsekündige Leerlaufphase vor Beginn des eigentlichen Test. Der Entfall dieser 40 Sekunden Leerlauf beeinflusst die Gaseintrittstemperatur vor Beginn der Abgasmessung und damit die Katalysatoreffektivität. Der Beginn der Abgasmessung im Stufe III Test erfolgt somit unmittelbar mit Motorstart. In der folgenden Tabelle sind die Abgasgrenzwerte für die MVEG-Stufe II und -Stufe III dargestellt.

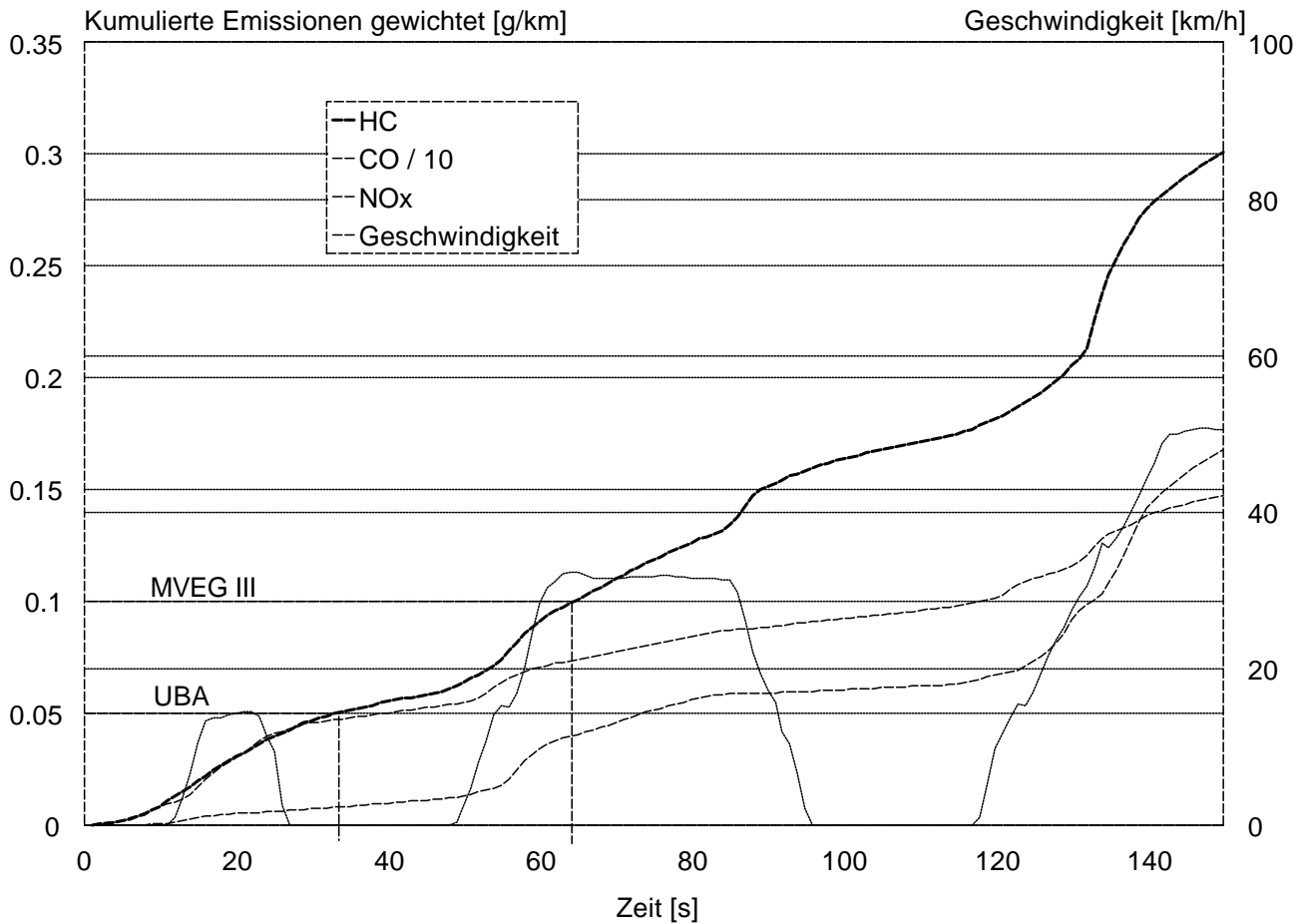
	HC	NO <sub>x</sub>	HC + NO <sub>x</sub>	CO
<b>EG-Stufe II</b>	-	-	0,5 g/km	2,2
<b>EG- Stufe III<sup>1</sup></b>	0,1	0,1	-	2,2
<b>EG-Stufe III<sup>2</sup></b>	0,05	0,14	-	2,2

<sup>1</sup> bisheriger Vorschlag, <sup>2</sup> UBA-Vorschlag

Tabell 1: Abgasgrenzwerte MVEG-Stufe II und MVEG III

Zunächst wurden die einzelnen Parameter wie Abgastemperatur, Luftverhältnis und Rohemission des serienmäßigen AUDI A4 untersucht.

Rohemission:



Vergleicht man die Rohemission eines Serienfahrzeuges und die zukünftigen Grenzwerte (Abbildung 2), so ist erkennbar, daß zum Einhalten der Abgasgrenzwerte theoretisch nach 34 s (UBA-Vorschlag) bzw nach 65 s (bisheriger Vorschlag) eine Umsatzrate von 100 % erreicht werden muß.

Abbildung 2: Rohemission des AUDI A4 während der ersten 150 s des MVEG III-Tests.

Abgastemperatur:

Die folgende Darstellung zeigt die Abgastemperaturen vor Serienkatalysator und den Verlauf des Luft-/Kraftstoffgemisches während des Kaltstarts in MVEG Stufe II und III Test.

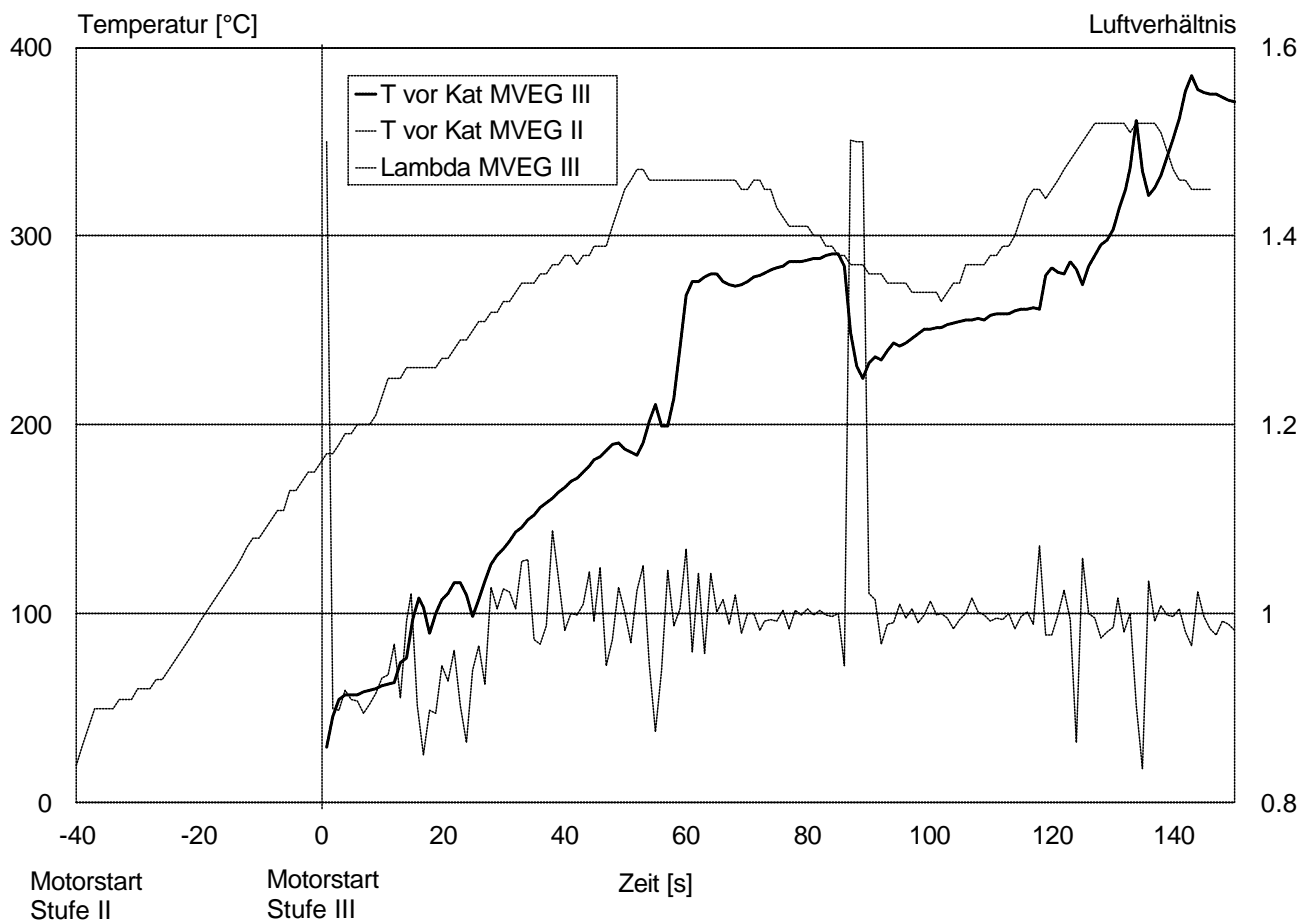


Abbildung 3: Abgastemperaturen vor Serienkatalysator und Luftverhältnis während des Kaltstarts in MVEG-II- und MVEG-III-Test.

Es ist zu erkennen, daß die Serienkatalysatoranlage im Stufe-III-Test eine Temperatur von 300 °C vor Kat, und damit Light-off auch in gealtertem Zustand nicht vor 130 Sekunden erreicht. Entsprechend Abbildung 2 würde damit der neue Grenzwert nicht eingehalten. Die Lambdaregelung setzt nach 80 s und damit für optimale HC- und NO<sub>x</sub>-Werte während der ersten Fahrhügel des Tests zu spät ein.

## 2.3 Parameter zur Optimierung der Randbedingungen

Die folgenden Parameter beeinflussen primär das Kaltstartverhalten eines Katalysatorsystems.

### a) Katalysatorlage

Der Abstand der Katalysatorlage zum Motor bestimmt die Vorrohrlänge und damit den Wärmeverlust. Zur Erhöhung der Abgastemperatur und damit zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens muß der Katalysator in Richtung Motor vorverlegt werden.

#### b) Krümmerkonstruktion

Heutige leistungs- und drehmomentoptimierte Krümmer- und Vorrohrkonstruktionen stellen aufgrund ihrer großen Rohroberflächen und Massen keine optimalen Voraussetzungen für den Kaltstart des Katalysators dar. Gemeinsam mit der Katalysatorlage kann durch den Einsatz von Rohrkrümmern mit geringen Wandstärken und Rohrdurchmessern die Abgastemperatur deutlich angehoben werden. Es muß diskutiert werden, ob geringe Leistungs- und Drehmomenteinbußen zugunsten der Katalysatoreffektivität in Kauf genommen werden müssen. Alternativen stellen geteilte Katalysatorsysteme, z.B. Startkatalysatoren oder geteilte motornahe Hauptkatalysatoren dar. Hierbei ist jedoch ein erhöhter Regel- bzw. Diagnoseaufwand zu berücksichtigen.

#### c) Katalysatorheizmaßnahmen

Durch Spätzündung, erhöhte Leerlaufdrehzahl oder Nockenwellenverstellung ist es möglich, die Abgastemperatur anzuheben. Eine andere Möglichkeit ist der Einsatz von Sekundärluft, eingespeist in die Auslaßkanäle. Gemeinsam mit einem fetten Motorluftverhältnis ist es dann möglich, im Abgassystem eine Vorreaktion des CO, H<sub>2</sub> und HC und damit eine Erhöhung der Abgastemperatur zu erreichen.

Die Sekundärluft stellt eine Vergrößerung des Potentials dar, zukünftige Abgasgrenzwerte einzuhalten, bevor aktive Heizmaßnahmen zum Tragen kommen.

#### d) Luftverhältnis

Zur optimalen Umsetzung aller Schadstoffe, HC, CO und NO<sub>x</sub>, ist eine möglichst frühe Lambdaregelung anzustreben.

## 2.4. Anforderungen an den Katalysatorträger

### 2.4.1 Kaltstartverhalten

Ähnlich wie bei den Krümmern bzw. Vorrohren beeinflusst auch beim Katalysatorträger die Wärmekapazität und die Zelldichte das Kaltstartverhalten [1,2,3,4]. Zur optimalen Ausnutzung der Abgasenergien ist ein Träger mit möglichst geringer Wärmekapazität, hohem Wärmeübergang und einer möglichst großen katalytischen Fläche erforderlich.

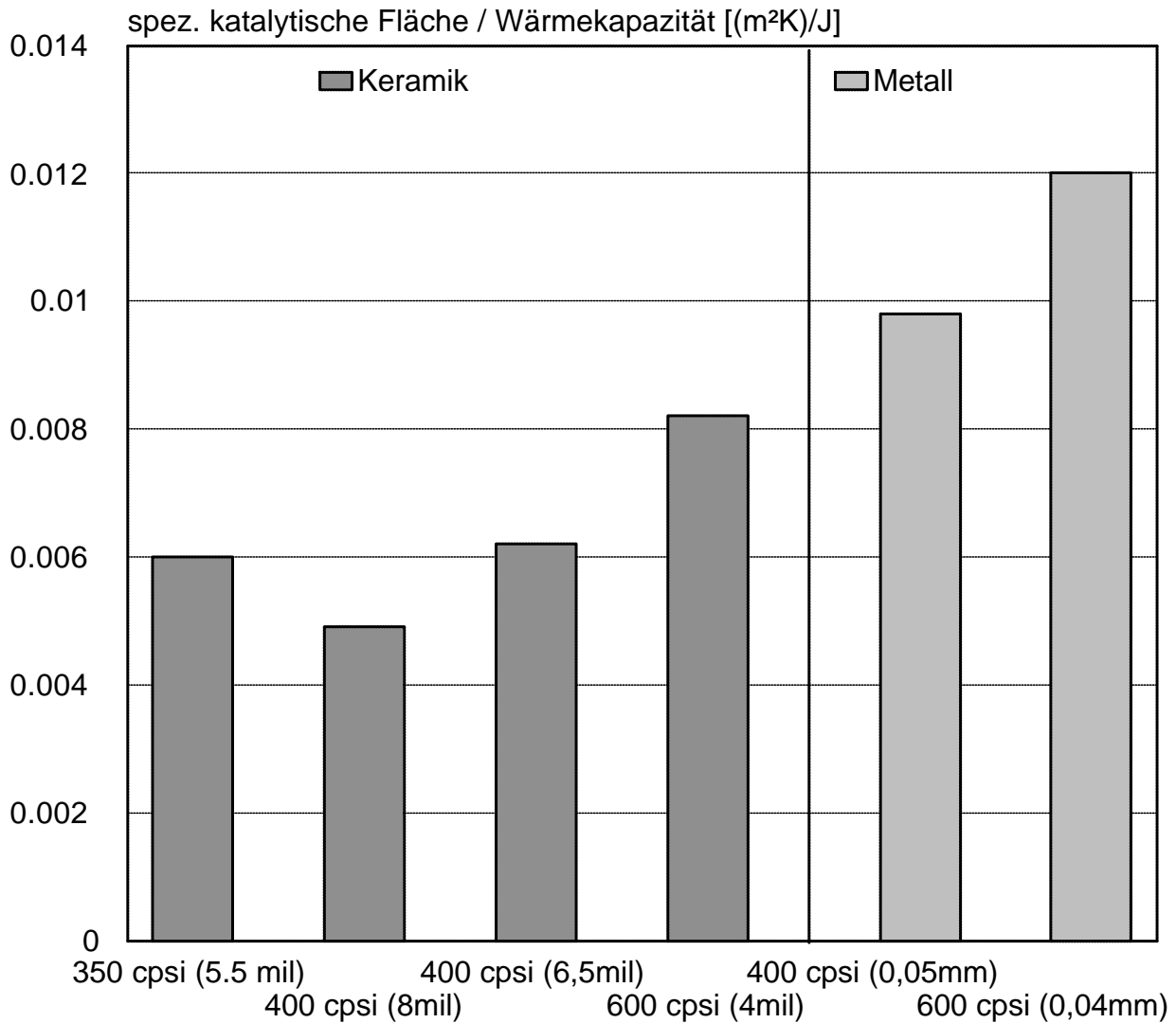
Die nachfolgende Tabelle zeigt technische Daten von verschiedenen Katalysatorträgern.

	Wand- / Foliendicke [mm]	Katalytische Fläche GO [m <sup>2</sup> /l]	Wärme- kapazität [J/l/K]	Wärme- übergang * [W/m <sup>2</sup> /K]
Keramik 350 cps	0,14	2,64	440	81
Keramik 400 cps	0,2	2,67	550	92
Keramik 400 cps	0,16	2,79	451	89
Keramik 600 cps	0,11	3,45	418	104
Metall 400 cps	0,05	3,68	375	94
Metall 600 cps	0,04	4,29	357	111

\* berechnet bei T = 500 °C und m = 50 kg/h Quelle: Herstellerangaben

Tabelle 2: Technische Daten von verschiedenen Katalysatorträgern

Das Verhältnis von katalytischer Fläche und Wärmekapazität und damit der Effektivität im Vergleich



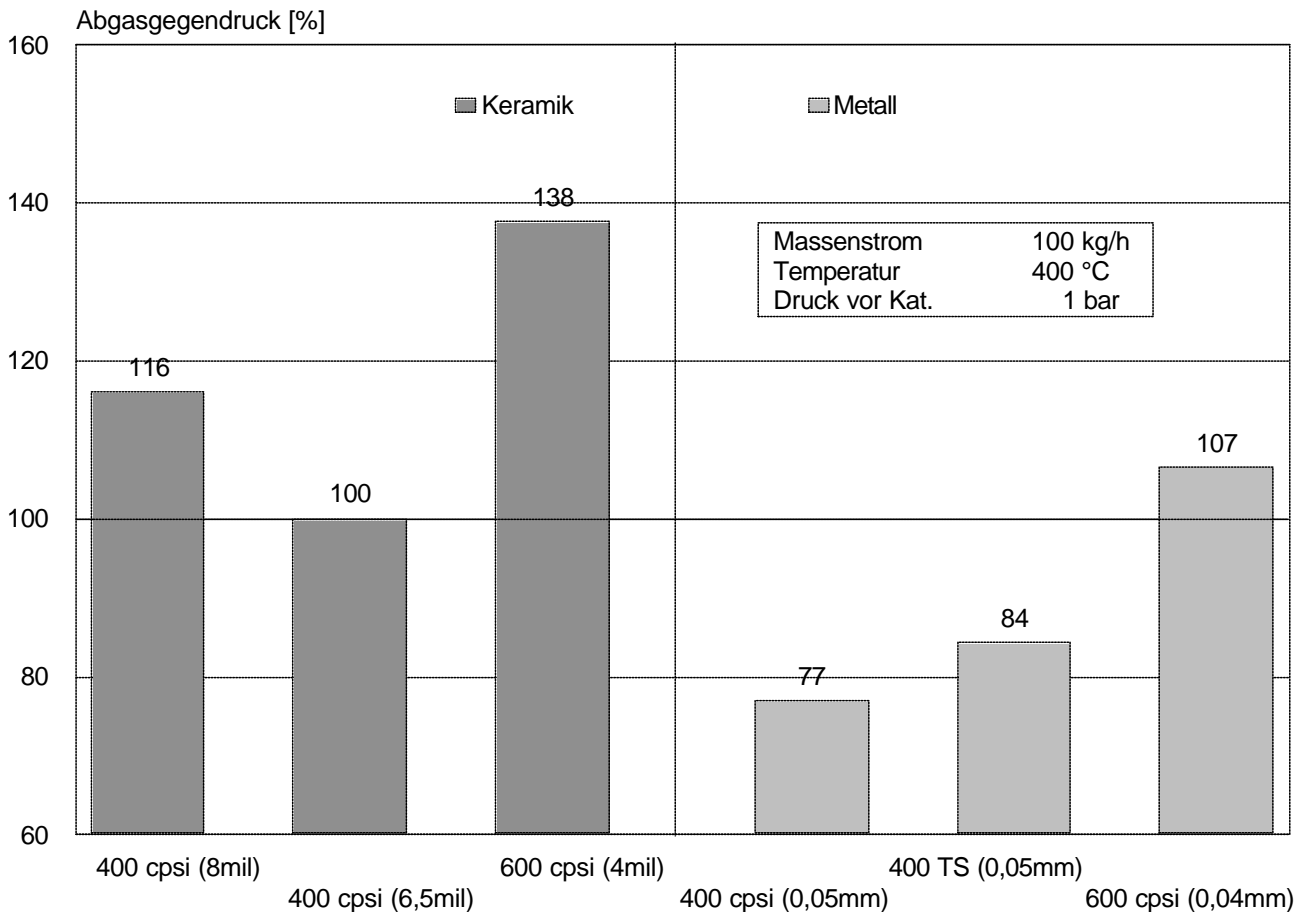
zum Kaltstartverhalten ist in der folgenden Darstellung aufgezeigt. Kaltstartoptimierte Katalysatorträger sollten eine möglichst große Fläche bezogen auf die Wärmekapazität besitzen.

Abbildung 4: Katalytische Fläche / Wärmekapazität verschiedener Katalysatorträger.

Es ist zu erkennen, daß durch den Einsatz von Metallträgern bzw. dünnwandigen Keramikträgern die günstigsten Werte zu erzielen sind.

#### 2.4.2 Gesamteffektivität

Neben dem Kaltstart ist bei der schärfer werdenden Gesetzgebung auch die Effektivität im betriebswarmen Zustand von ausschlaggebender Bedeutung. Es müssen Umsatzraten nahe 100 % erzielt werden können. Bei zukünftigen, motornahen Applikationen ist aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse besonderer Wert auf eine hohe volumenspezifische Effektivität und damit auf eine große katalytische Fläche pro Volumen zu legen. Auch hier zeigen Katalysatorträger mit hohen Zelldichten Vorteile.



Dieser katalytische Vorteil muß jedoch mit einem höheren Druckverlust erkaufte werden. Die folgende Darstellung zeigt die berechneten Druckverluste von verschiedenen Katalysatorträgern mit einer angenommenen Beschichtungsstärke von 0,025 mm.

Abbildung 5: Abgasgegendruck verschiedener Katalysatorträger

Der Einsatz von Metallträgern würde den geringsten Druckverlustnachteil und damit Beeinflussung der maximalen Leistung mit sich bringen. Maßgeblich für die hohen Umsatzraten ist neben der katalytischen Fläche der Massentransport in den Kanälen. Eine Strukturierung der Kanäle zur Verbesserung des Stofftransportes z. B. durch eine Sekundärwellung in 90° zur Strömungsrichtung (TS-Struktur) bedeutet damit eine Erhöhung der Umsatzrate. Die Effektivität der niedrigen Zelldichten (400 TS) wird dadurch an das Niveau der höheren Zelldichte (600 cpsi) angeglichen. Aufgrund solcher Strukturierungen beim Metallträger ist es möglich, niedrige Zelldichten einzusetzen und damit den Druckverlustnachteil zumindest teilweise zu kompensieren.

### 3. Applikation

#### 3.1 Systembeschreibung

Gegenüber der Serienversion für EU II wurde die motornahe Hauptkatalysator-Position des

Saugmotors so gewählt, daß sie exakt der Anordnung der serienmäßigen Katalysatorposition beim R4 1,8 l 5V-Turbo-Motors im A4 entspricht. Diese Anordnung wurde durch einen neu ausgelegten Rohrkrümmer mit einer 4-in-1-Zusammenführung im Anschlußflansch zum Katalysator ermöglicht.

Bis auf wenige Änderungen in der Motorsteuerung wurde die serienmäßige Motorabstimmung beibehalten. Die Modifikationen beschränkten sich auf motorische Katalysator-Heiz-Funktionen und beinhalteten eine moderate Leerlauf-Drehzahlanhebung und Zündwinkel-Spätverstellung sowie eine geringe Anpassung des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses während der ersten 30 Sekunden.

Der Übergang vom gesteuerten auf den geregelten Motorbetrieb erfolgte unverändert wie bei der Serienversion.

Eine wichtige Voraussetzung bei der Auswahl der Testkatalysatoren war die Einhaltung der Bauraum-Anforderungen im A4; das Katalysatorvolumen des R4 1,8l 5V-Turbo-Motors sollte nicht wesentlich überschritten werden.

Weiterhin sollte der Abgasgegendruck der verschiedenen Varianten auf gleichem oder geringerem Niveau liegen.

Um den Ansprüchen an erhöhtem Drehmomentverlauf und geringerem Kraftstoffverbrauch bei der Erfüllung der zukünftigen Emissionsstandards weiter verstärkt Rechnung zu tragen, stellt die geeignete Synthese aus motornaher Katalysatoranordnung, optimaler Anströmung, geringem Druckverlust, hoher Umsatzrate und gleichzeitiger Kostenminimierung des Gesamtsystems das wesentliche Entwicklungsziel dar.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen erfolgte die Auswahl geeigneter Testkatalysatoren, die in Zelldichte, Oberfläche, Zellstruktur und Trägermaterial variieren.

### 3.2 Testkatalysatoren

Unter Berücksichtigung der in 1.3 (und der in 3.1 genannten Entwicklungsziele) aufgeführten Einschränkungen und der Fertigungsmöglichkeiten für den Katalysatorträger wurden die unten aufgeführten Trägervarianten festgelegt.

Die Wahl metallischer Substrate hat mehrere Gründe. Einmal lassen sich große geometrische Oberflächen gut durch eine Erhöhung der Zellzahl in einem gegebenen Volumen unterbringen. Dabei bleibt der Leerraumanteil recht hoch, weil bei 600 cpsi sich die Materialstärke der Folie von 50 auf 40µm verringern läßt. Weiter haben Metallträger in der Vergangenheit schon bei Quermotoren mit relativ motornaher Lage ihre gute Dauerhaltbarkeit unter Beweis gestellt. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß Metallträger in Folge ihrer guten Wärmetransporteigenschaften lokal auftretende Spitzentemperaturen gut räumlich verteilen können.

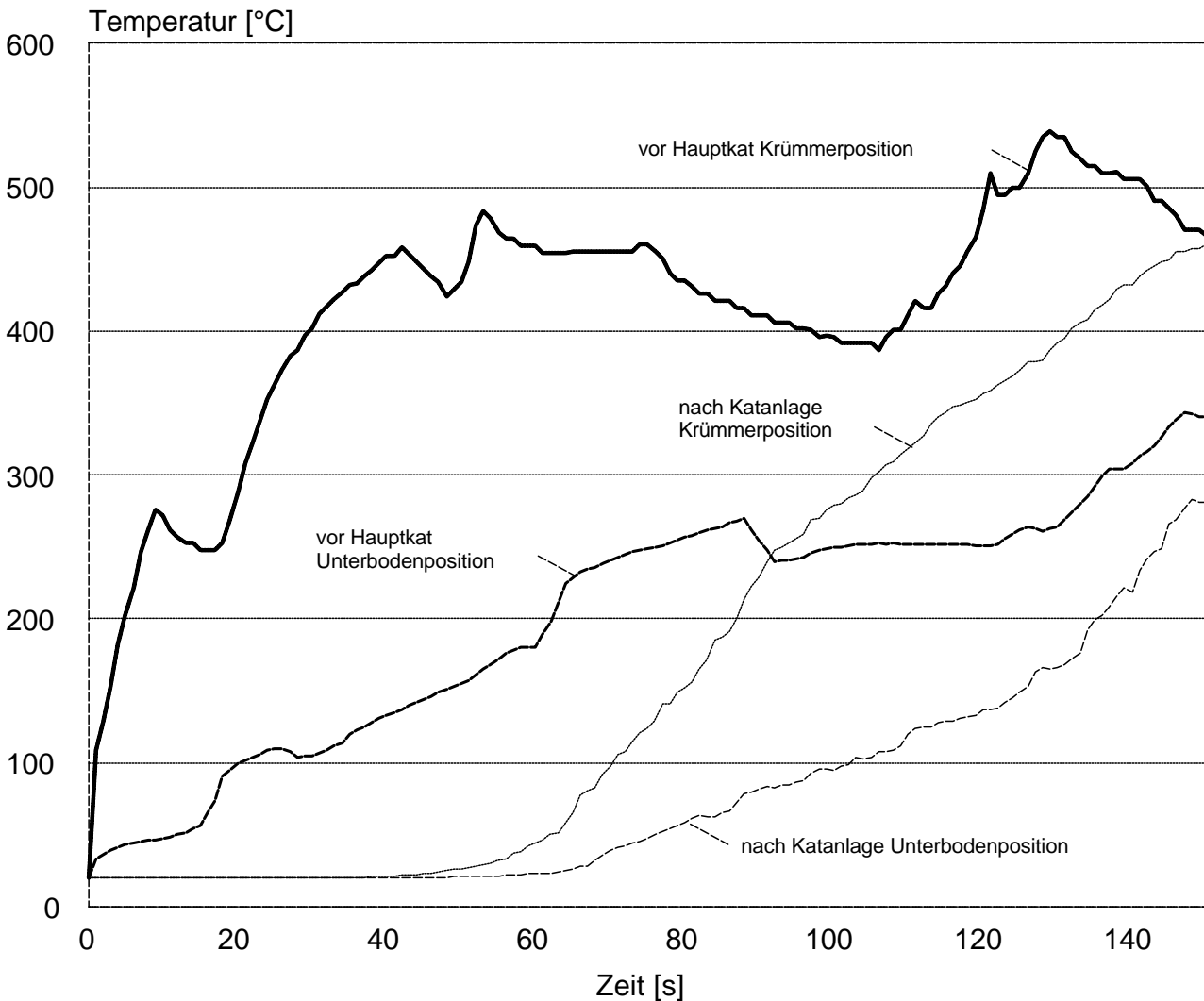
In Tabelle 2 sind die aus Gründen der Einbauverhältnisse in Frage kommenden Katalysatoren sowie der Serienkatalysator aufgeführt.

Nummer	Hauptkatalysator	Katalysatorvolumen (l)	Geometr. Oberfläche GO (m <sup>2</sup> )
1 (Serienkatalysator)	Ke Ø 118x152, 400 cpsi	1,66	4,24
2	Ke 4" x 6" x 6" 400 cpsi	1,85	4,73

3	Me Ø 105 x 150, 400 cpsi	1,30	4,16
4	Me Ø 105 x 150, 300 cpsi TS	1,30	3,92*
5	Me Ø 105 x 120, 600 cpsi	1,04	3,85

\* Der Vorteil der TS-Struktur (Transversal Structure) wird hier durch einen Zuschlag von 10% auf die Fläche berücksichtigt [5]

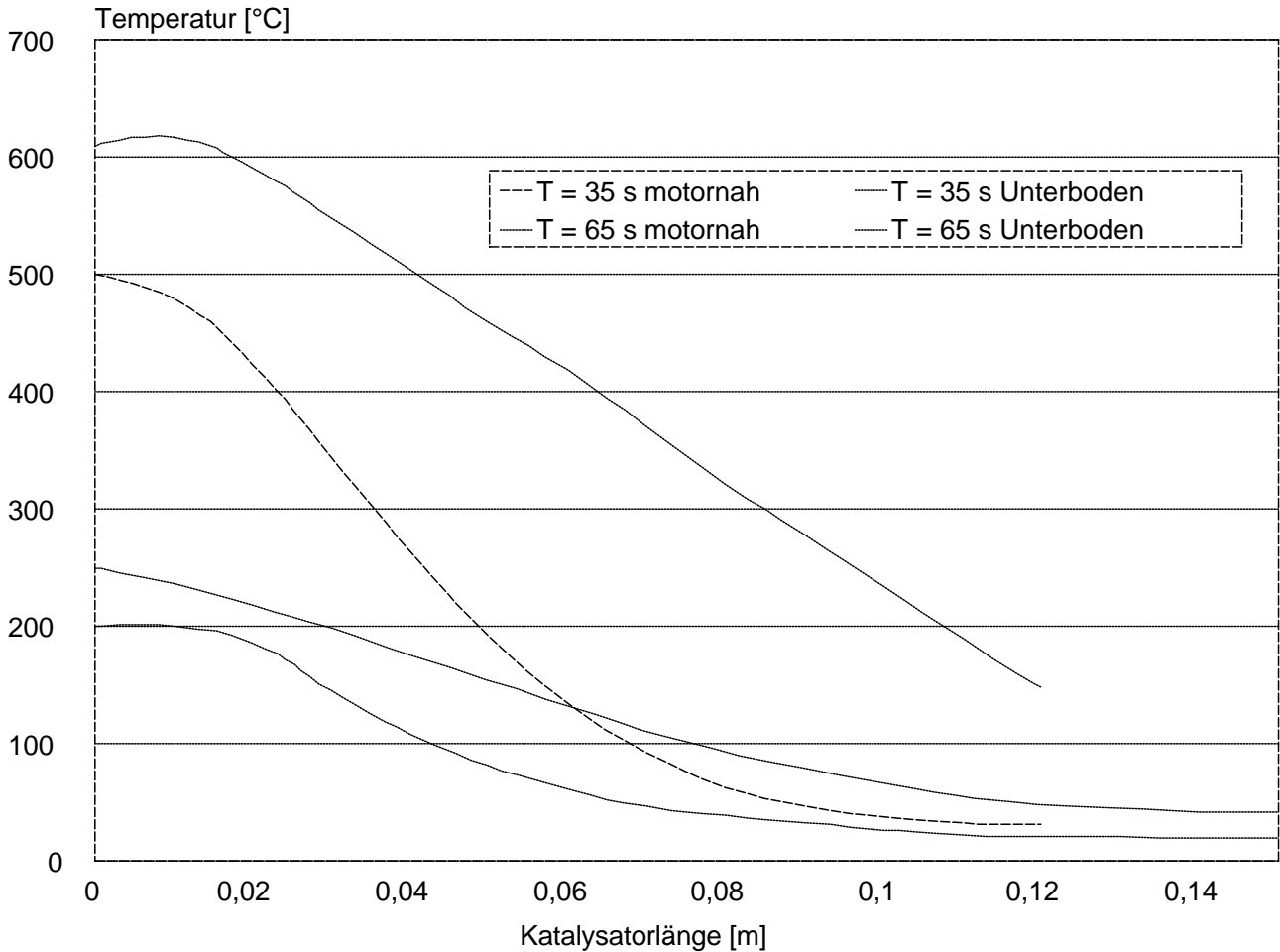
Tabelle 3: Testkatalysatoren



### 3.3 Katalysatorberechnungen

Mit dem in [6] vorgestellten Rechenprogramm wurden Simulationen des Aufheizverhaltens durchgeführt, um die günstigste Katalysatorkonfiguration zu ermitteln. Als Eingangsdaten wurden modale Messungen des Abgasmassenstroms, seiner Zusammensetzung und der Temperatur im Zulauf des Katalysators herangezogen. Durch die motornahe Katalysatorposition erhöhte sich die Zulauftemperatur wie in Abbildung 6 gezeigt. Die Temperaturerhöhung von bis zu 300 K bewirkt ein deutlich früheres Anspringen.

Abbildung 6: Vergleich der Zulauftemperaturen des Abgases und der berechneten Ablauftemperaturen der



#### Varianten 1 und 5

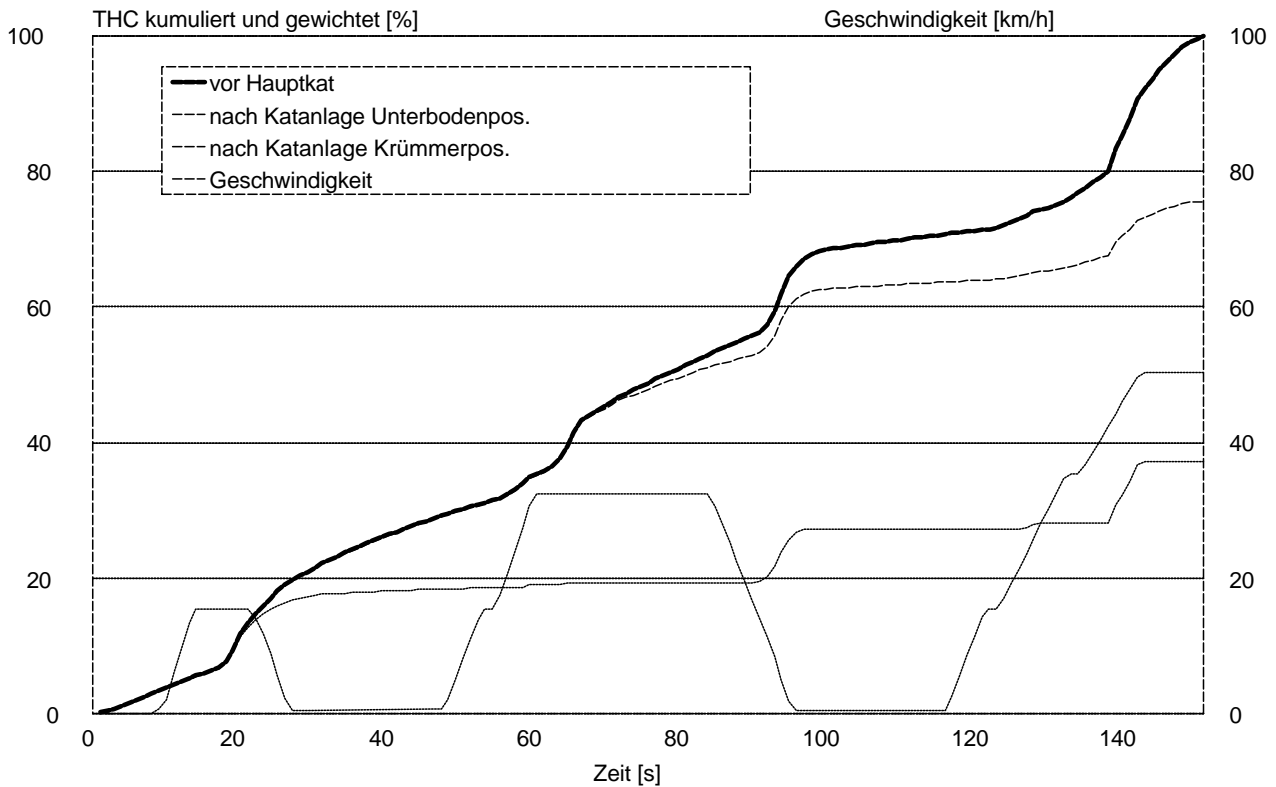
Da aber die Darstellung der Ein- und Ausströmtemperaturen nur einen unvollkommenen Eindruck vom Geschehen auf dem Substrat liefert, ist der zeitlich örtlich aufgelöste Verlauf der Materialtemperaturen im Katalysatorträger Gegenstand intensiver Betrachtung. In Abbildung 7 ist das Ergebnis der Simulation des Ausgangszustands zu sehen.

Es wurden die zum Erreichen des MVEG III-Grenzwertes theoretisch notwendigen Light-Off-Zeitpunkte zugrunde gelegt (siehe Abbildung 2).

Abbildung 7: Substrattemperaturen im MVEG III, Serien-Katalysator  $\varnothing 118 \times 152$ , 400 cps, Keramik (Variante 1) und des Metallkatalysators  $\varnothing 105 \times 120$ ; 600 cps (Variante 5)

In der Unterbodenlage werden nach 35 Sekunden maximal 200 °C und nach 65 Sekunden 250 °C am Katalysatoreintritt erreicht. Durch die motornaher Katalysatorlage und den Einsatz von Metallträgern ist zum Zeitpunkt 35 Sekunden bereits 30 % des Katalysatorvolumens heißer als 300 °C und damit katalytisch aktiv. Nach 65 Sekunden sind in der motornahen Lage bereits 70 % des Gesamtkatalysatorvolumens durchgeheizt. Erreicht werden konnte dies durch die Verkürzung des Vorrohrs und damit einer Verringerung der Wärmesenke.

Das schnelle Anspringen im motornahen Bereich zeigt sich ebenfalls deutlich im Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentrationen wie in Abbildung 8 dargestellt. Deutlich ist das Auseinanderdriften



der Kurve für die Krümmerposition bereits in der ersten Fahrphase, während dies für die Unterbodenposition erst ab ca. 70 Sekunden zu beobachten ist. Zwischen zweiter und dritter Fahrphase liefert die motornahe Variante bereits Vollumsatz, während die Unterboden-Variante noch nicht vollständig konvertieren kann. Auch dies ist ein Hinweis auf die Problematik des MVEG-Zyklus, der oft dazu führt, daß die Katalysatoren längere Zeit im “Anspringbereich” betrieben werden. Da das Serienfahrzeug nach 150 Sekunden etwa 90 % seines Gesamttestergebnisses erreicht hat, erübrigt sich die Simulation über diesen Zeitpunkt hinaus.

Abbildung 8: Vergleich der berechneten HC-Emissionen (Varianten 1 und 5).

Mit den in Tabelle 2 beschriebenen Katalysatoren ergaben sich die in Abbildung 9 gezeigten Ergebnisse in der Simulation der ersten 150 Sekunden des MVEG III-Zyklus. Die Simulation erfolgte unter der Annahme eines gealterten Katalysators mit einer  $T_{50}$  Temperatur (50 % Umsatzrate) von 300 °C.

Abbildung 9: Übersicht der Simulations-Ergebnisse im MVEG III nach 150 Sekunden

## 4. Abgastests MVEG III

Auf einem dynamischen Rollenprüfstand wurden im nächsten Schritt Abgastests mit den oben berechneten Katalysatoren durchgeführt. Als Testfahrzeug diente ein Audi A4 1.8 l, ausgerüstet mit einem 4-in-1 Krümmer, motorseitigen Katalysatorheizfunktionen und motornaher Katalysatorlage (Kapitel 2.3). 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 Luftverhältnis vor Katalysator gemessen, so daß die Reproduzierbarkeit der Eingangsgrößen überwacht werden konnte.

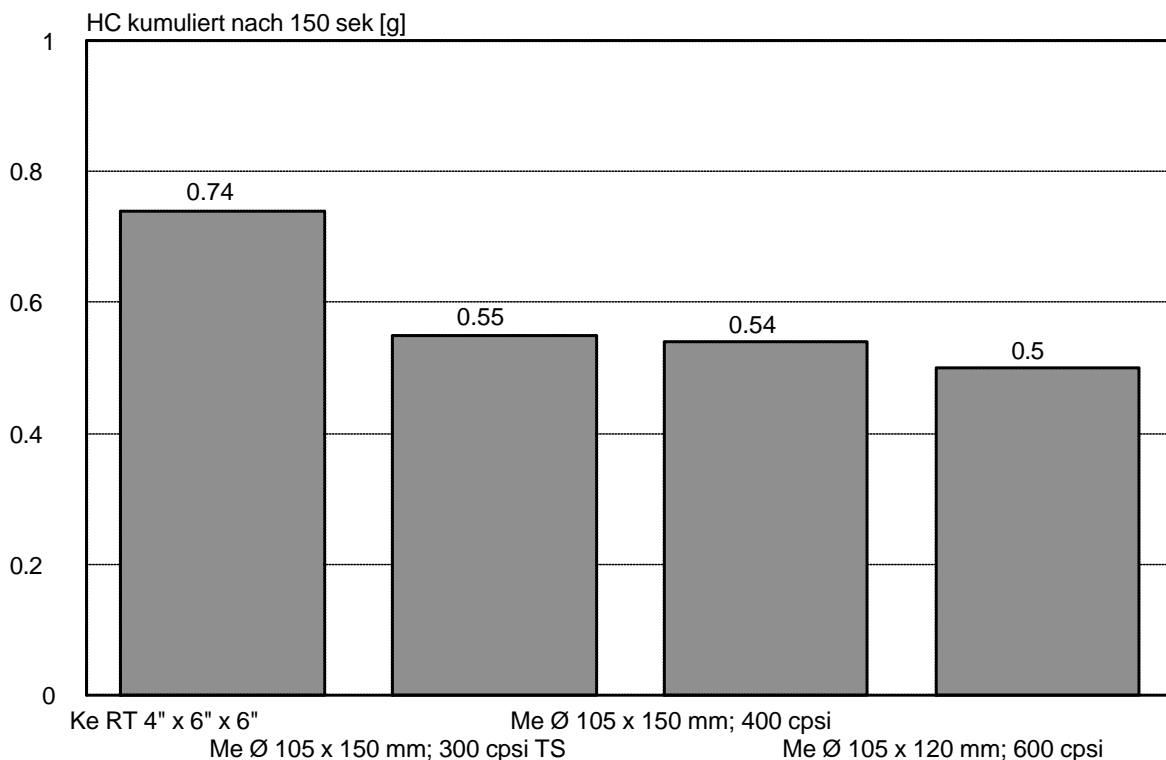
Es wurden je zwei MVEG-Tests Stufe III im neuen und gealterten Zustand gefahren. Die nachfolgenden Ergebnisse sind jeweils aus dem Mittelwert mehrerer Messungen gebildet.

### 4.1 Ergebnisse mit neuen Katalysatoren

#### 4.1.1 Kaltstart

Bild 10 zeigt die kumulierte THC-Emission in den ersten 150 Sekunden des Fahrzyklus im Neuzustand.

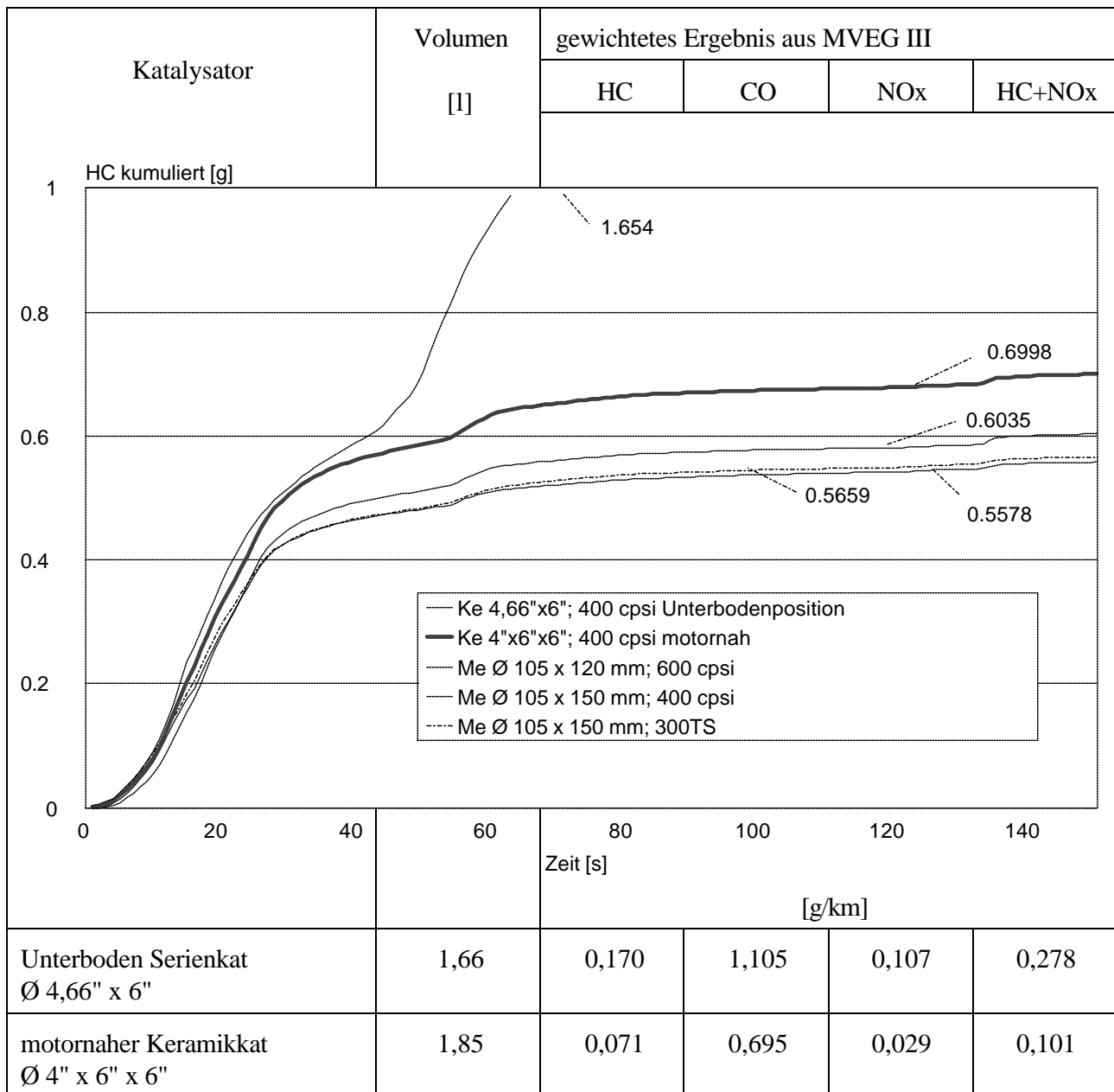
Abbildung 10: Kumulierte Kohlenwasserstoffe im MVEG III nach 150 Sekunden



Die motornaher Katalysatorposition in Verbindung mit moderaten Katalysatorheizmaßnahmen bewirkt eine Verringerung der HC-Kaltstartemissionen um  $\approx 60\%$ . Der Metallkatalysator mit 600 cpsi und einem Katalysatorvolumen von 1.04 l (58 % des Motorhubraumvolumens) und der 1.3 l große 300 cpsi TS Katalysator zeigen im Ansprungsverhalten die besten Ergebnisse. Der 400 cpsi Metallträger emittiert innerhalb der ersten 150 Sekunden  $\approx 8\%$  HC mehr. Der Keramik-katalysator (400 cpsi) zeigt mit 0.7 g HC das schlechteste Kaltstartergebnis. Dies ist wahrscheinlich auf die höhere spezifische Wärmekapazität bei geringerer spezifischer katalytischer Fläche und den größeren Katalysatorquerschnitt zurückzuführen.

#### 4.1.2 Gesamttestergebnisse

Die Gesamttestergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.



motornaher Metallkat Ø 105 x 150 300 cpsi TS	1,30	0,064	0,639	0,046	0,11
motornaher Metallkat Ø 105 x 150 400 cpsi	1,30	0,063	0,683	0,037	0,10
motornaher Metallkat Ø 105 x 120 mm 600 cpsi	1,04	0,064	0,746	0,033	0,097

*Tabelle 4: Ergebnisse aus MVEG III mit Katalysatoren im Neuzustand*

Im Neuzustand unterschreiten alle vier Katalysatorvarianten in Krümmerposition die Abgasgrenzwerte des MVEG III (bisheriger Vorschlag).

## **4.2 Ergebnisse mit gealterten Katalysatoren**

Alle Katalysatoren wurden entsprechend der VW-Spezifikation bei 980 °C für 4 Stunden im Ofen gealtert. Die Atmosphäre bestand aus 2 % Sauerstoff und 10 % Wasser in Stickstoff. Die Katalysatoren wurden mit 300 l/h durchströmt.

### **4.2.1 Kaltstart**

In Abbildung 11 sind die kumulierten HC-Emissionen der ersten 150 Sekunden von neuen und gealterten Katalysatoren gegenübergestellt.

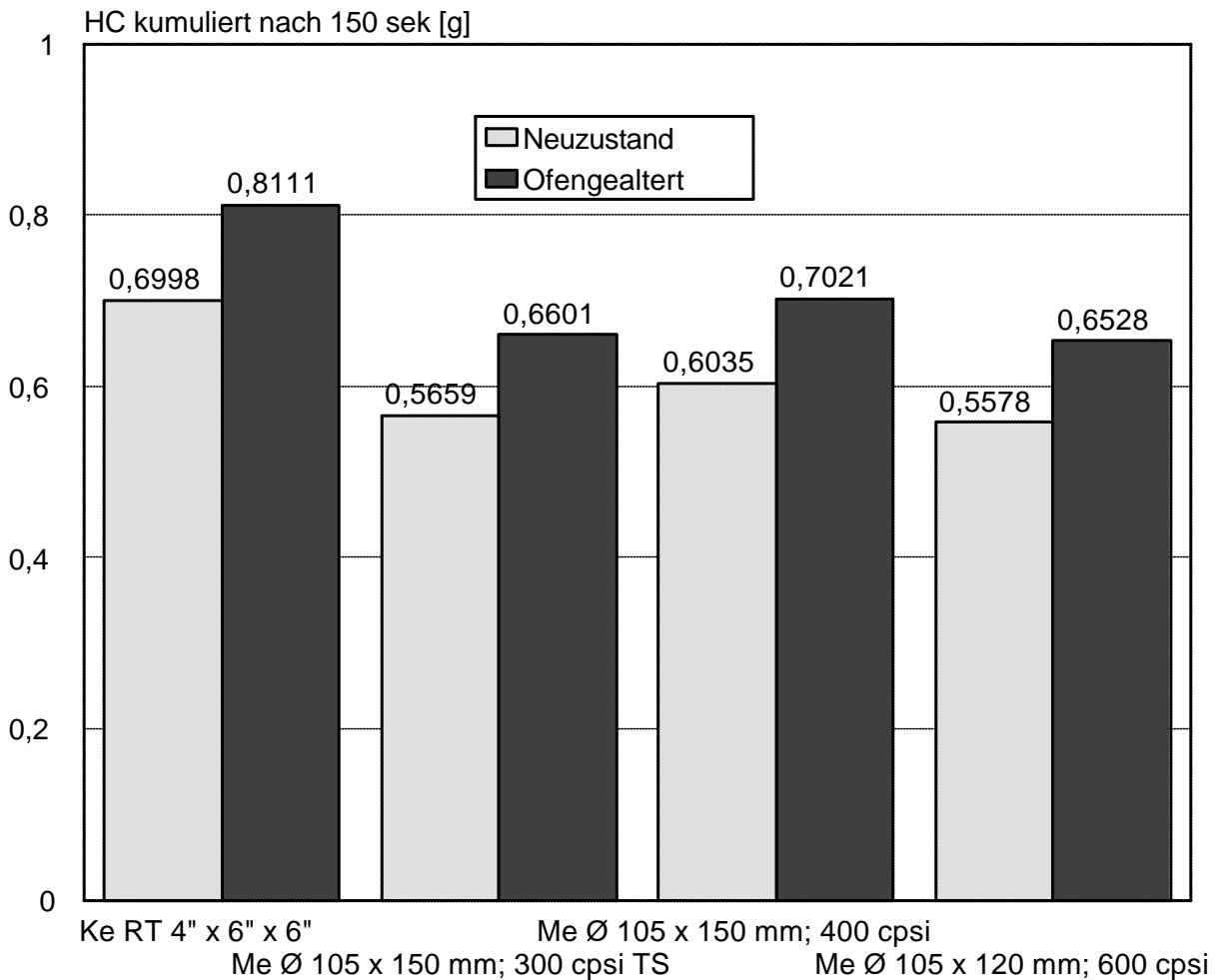


Abbildung 11: Kumulierte Kohlenwasserstoffe im MVEG III nach 150 Sekunden neu und gealtert

Im Kaltstart zeigt sich bei den gealterten Katalysatoren durch eine Verschiebung der Light-Off-Temperatur eine Verschlechterung um etwa 16 %.

#### 4.2.2 Gesamtergebnis

Katalysator	Volumen [l]	gewichtetes Ergebnis aus MVEG III [g/km]			
		HC	CO	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>
motornaher Keramikkat Ø 4" x 6" x 6"	1,85	0,0933	0,902	0,086	0,18
motornaher Metallkat Ø 105 x 150 300cps TS	1,30	0,0908	0,974	0,110	0,201
motornaher Metallkat Ø 105 x 150 400cps	1,30	0,083	0,981	0,092	0,175
motornaher Metallkat Ø 105 x 120 mm 600cps	1,04	0,084	1,070	0,115	0,199

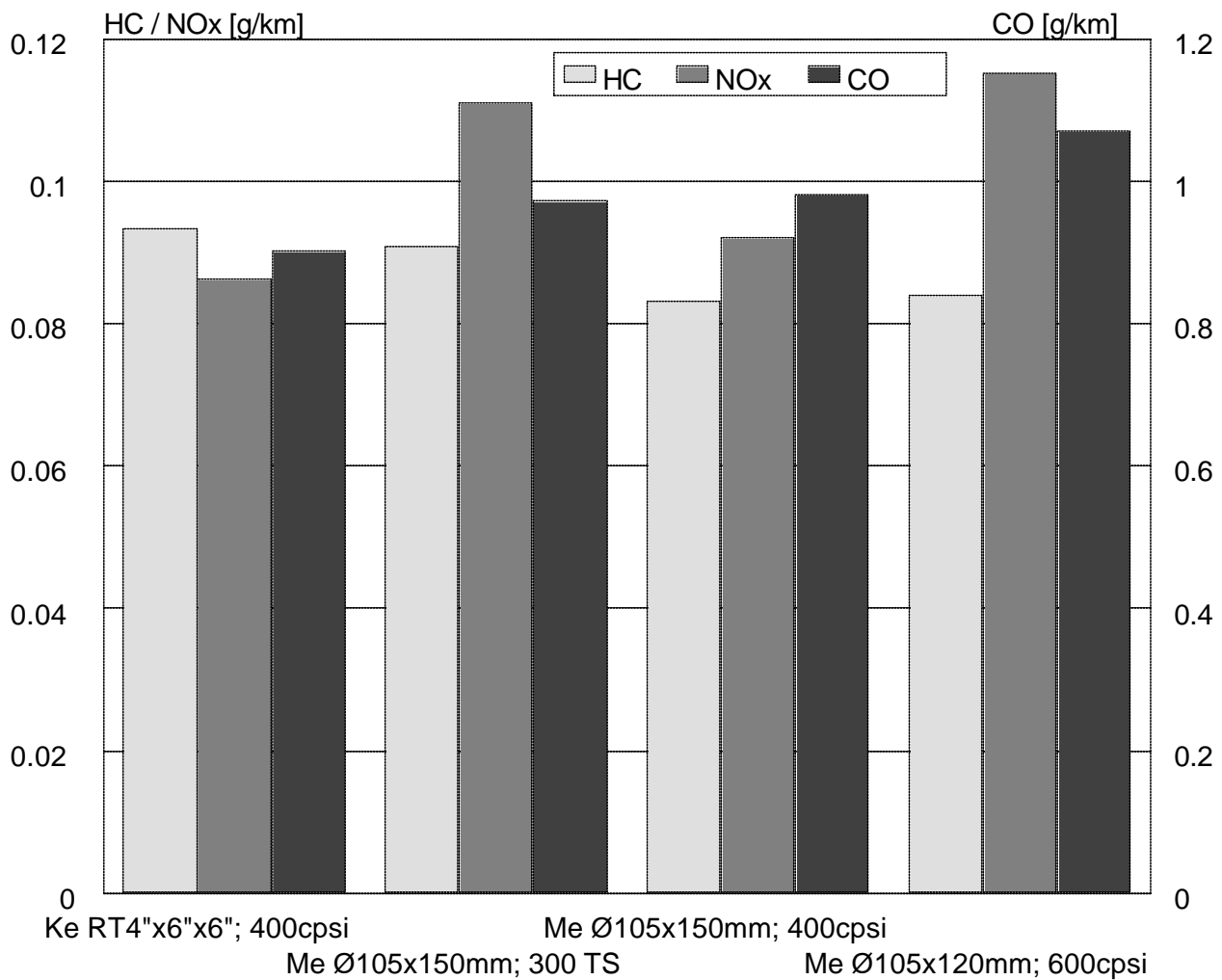


Tabelle 5: Ergebnisse aus MVEG III mit gealterten Katalysatoren

Bild 12: Gesamtergebnis aller Testvarianten im gealtertem Zustand

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Mittels der hier vorgestellten Katalysatorkonzepte ist das gesteckte Ziel der Erfüllung des MVEG III-Vorschlags (Grenzwert für Kohlenwasserstoffe und Stickoxide jeweils 0,1 g/km) erreicht worden. Die Entscheidung, ein rein passives System mit einem motornahen Hauptkatalysator zu verwenden, bietet offenbar genügend Entwicklungspotential für die künftigen europäischen Grenzwerte. Dieses Ergebnis ist auch aus wirtschaftlicher Sicht positiv zu bewerten, da der Fahrzeugpreis wegen des zusätzlichen Aufwands für die Abgasreinigung deutlich geringer als bei aktiven Systemen belastet wird.

Durch eine umfassende theoretische Optimierung konnten Trägersysteme gefunden werden, die in ihrer gemessenen Wirksamkeit dem deutlich voluminöseren Serienkatalysator in motornaher Position mindestens ebenbürtig sind. Dies unterstützt die Vermutung, daß nicht das Bruttovolumen des Trägers sondern dessen geometrische Oberfläche sowie das Verhältnis dieser Fläche zur Wärmekapazität bessere Beurteilungsmaßstäbe sind. Gerade die Verwendung von Metallträgern läßt diesen Quotienten in günstiger Weise ansteigen, da große Zellenzahlen bei geringen Wandstärken realisierbar sind.

Weiter haben Metallkatalysatoren ihre gute Dauerhaltbarkeit auch unter großem thermischen Streß

bereits unter Beweis gestellt. Die Erfüllung der angestrebten Grenzwerte mit gealterten Katalysatoren bestätigt diese Erfahrungen.

Der Ansatz, durch eine quergewellte Struktur den Stofftransport im Träger aus der Strömung heraus auf die katalytisch wirksame Oberfläche zu verbessern und im Gegenzug kleinere Zelldichten bei gleicher Wirksamkeit, aber geringerem Druckverlust zu realisieren, konnte ebenfalls verifiziert werden. Sowohl im frischen, wie auch im gealterten Zustand stimmen die Ergebnisse der TS-Struktur gut mit den als flächengleich angenommenen glatten Trägern überein.

Der vermutete geringe Leistungsverlust lag innerhalb der Serienstreuung und auch der befürchtete Drehmomentverlust infolge der Krümmer- und Vorrohränderung stellte sich als nicht so gravierend heraus. Dennoch müssen hier weitere Optimierungsarbeiten durchgeführt werden, um diese Nachteile zu vermeiden.

Obwohl bisher kein Fahrzeugdauerlauf mit dem Nachweis der mechanischen und thermischen Haltbarkeit vorliegt, kann dem geschilderten Konzept seine Tauglichkeit für die neuen europäischen Grenzwerte bescheinigt werden. Mittelfristige Entwicklungen werden daher eher die Vermeidung von Wärmeverlusten sowie die optimale Trägergestaltung in den Vordergrund stellen, als sich mit komplexen aktiven Systemen zu befassen.

## Literaturverzeichnis

- [1] R. Brück, R. Diewald, P. Hirth, F.-W. Kaiser:  
Design Criteria for Metallic Substrates for Catalytic Converters  
SAE Paper 950789
  
- [2] L. S. Socha, Jr., Suresh T. Gulati, R. J. Locker, P. M. Then, U. Zink:  
Advances in Durability and Performance of Ceramic Preconverter Systems  
SAE Paper 950407
  
- [3] M. Machida, T. Yamadu, M. Makino:  
Study of Ceramic Catalyst Optimization for Emission Purification Efficiency  
SAE Paper 940784
  
- [4] J. P. Day, L. S. Socha:  
Impact of Catalyst Support Design Parameters on Automotive Emissions  
SAE 881590
  
- [5] W. Held, M. Rohlf, W. Maus, H. Swars, R. Brück, F.-W. Kaiser:  
Improved Cell Design for Increased Catalytic Conversion Efficiency  
SAE Paper 940932
  
- [6] A. Donnerstag, A. Degen, Dr. W. Held, K. Korbel:  
Erfüllen der ULEV-Norm durch elektrisch beheizten Katalysator  
16. Internationales Wiener Motorensymposium  
VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nr. 239, Band 2

# Inhaltsverzeichnis

## **1. Einleitung**

- 1.1 Randbedingungen
- 1.2 Entwicklungstendenzen
- 1.3 Zielkonflikte

## **2. Katalysatorkonzepte**

- 2.1 Fahrzeug / Motorbeschreibung (Audi A4,R4 1,8 ltr., 5V-S-Motor)
- 2.2 Studie der Randbedingungen für das Serienfahrzeug im MVEG III-Test
- 2.3 Parameter zur Optimierung der Randbedingungen
- 2.4 Anforderungen an den Katalysatorträger
  - 2.4.1 Kaltstartverhalten
  - 2.4.2 Gesamteffektivität

## **3. Applikation**

- 3.1 Systembeschreibung
- 3.2 Testkatalysatoren
- 3.3 Katalysatorenberechnung

## **4. Abgastests MVEG III**

- 4.1 Ergebnisse mit neuen Katalysatoren
  - 4.1.1 Kaltstart
  - 4.1.2 Gesamtergebnisse

## 4.2 Ergebnisse mit gealterten Katalysatoren

### 4.2.1 Kaltstart

### 4.2.2 Gesamttestergebnisse

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**