

## PM-KAT: Nichtblockierende Lösung zur Minderung von Dieselruß für EuroIV-Nutzfahrzeugmotoren

---

### *PM-KAT: a Non-Blocking Solution to Reduce Carbon Particle Emissions of EuroIV Engines*

Dr. E. Jacob, Dr.-Ing. N. D'Alfonso, Dipl.-Ing. A. Döring,  
Dipl.-Ing. S. Reisch, Dipl.-Chem. D. Rothe, MAN Nutzfahrzeuge AG  
Dipl.-Ing. R. Brück, Dr. P. Treiber, Emitec GmbH

#### Kurzfassung

Rußpartikel in Dieselabgasen stehen in zunehmender Kritik wegen des Gesundheitsgefährdungspostulats. Die Absenkung der Partikelemission ist daher eine wichtige Aufgabe für die Nfz-Dieselmotorenentwicklung und die Abgasnachbehandlung.

Die Unterschreitung von **EuroV**-Grenzwerten gelang bereits 2000 mit  $b_e$ -optimiertem und PM-minimiertem Motor und filterlosem GD-KAT-System (**VHRO**-Typ mit **V**oroxidations-, **H**ydrolyse-, **S**CR- und **N**achoxidations-Kat) durch simultane PM-Verminderung und  $\text{NO}_x$ -Reduktion [1]. An einem verbesserten GD-KAT-System mit Teilstrom-Hydrolyse-Kat [2], wird eine 40-60%ige Verminderung von Ruß mit einem  $\text{Li}_2\text{SA}$ - Rußsensor detektiert [3]. Durch zusätzliche Absenkung der motorischen Rußemission wird damit der **EEV**-Emissionsbereich erreicht [4].

Ist lediglich die Unterschreitung der **EuroIV**-Grenzwerte gefordert, wird ein  $\text{NO}_x$ -optimierter und PM-minimierter Versuchsmotor (3,0/3,3 g/kWh  $\text{NO}_x$ ; 0,03/0,06 g/kWh PM, ESC/ETC) [5] mit einem PM-KAT-System gekoppelt. Hiermit werden PM-Werte von 0,011/0,030 g/kWh (ESC/ETC) erzielt. Messungen der Rußemission mit einem Photoakustiksensoren zeigen Kohlenstoffreduktionen von ca. 70 % in ESC und ETC Tests [6].

Filterlose PM-KAT-Systeme [7] bestehen aus Platinoxidationskatalysator und strukturierten Katalysatorträgern aus Metall mit offenen Kanälen zur Rußabscheidung und -oxidation. Die hier untersuchten Metallwaben mit 3D-Gasmischeffekt sind besonders wirksam und aus Welllagen mit Mischerschaukeln und gasdurchlässigen Planlagen gefügt. Die Rußpartikel werden durch gezielte Umlenkung der Strömung an einer porösen Schicht abgelagert und mit  $\text{NO}_2$  zu  $\text{CO}_2$  oxidiert [8]. Katalysatoren auf Basis derartiger Trägerstrukturen wird wegen ihrer Multifunktionalität (Rußfalle, Verbesserung Stofftransport, Gasmischung, Strömungsausgleich) die Zukunft der Abgasnachbehandlung gehören.

Die signifikanten Vorteile des PM-KAT-Systems gegenüber Partikelfiltern sind durch deren offene Kanalstruktur bedingt und durch niedrigen Gegendruck, selektive Abscheidung von Ruß und Durchlässigkeit für Motorenöl gekennzeichnet. Ein Test mit sehr hoher Rußemission (Boschzahl 5) zeigt minimale Gegendrucksteigerung und keine Verblockung. Der bei Partikelfiltern übliche  $b_e$ -Anstieg wird vermieden. Eine Absenkung des Nicht-Rußanteils der PM ist über die Qualität der Motorenbetriebsstoffe (S-Gehalt und Sulfatanteile) [9] erreichbar.

PM-KAT-Systeme in Verbindung mit PM-minimierten Motoren können Partikelfilter auf der Basis von Oberflächen- und Tiefenfiltration mit ihrer eingeschränkten Fahrzeugtauglichkeit ersetzen.

**Gegenüber einem GD-KAT-System verbleibt beim PM-KAT-System wegen der innermotorischen  $\text{NO}_x$ -Reduktion ein prinzipbedingter Kraftstoffmehrverbrauch, sodass die Entscheidung für das wirtschaftlichste EuroIV-Konzept auf der Basis der Einsatzart bzw. Jahreskilometerleistung des Fahrzeugs zu treffen ist.**

## **Abstract**

*Soot particles in the exhaust of Diesel engines are increasingly criticized for being a potential risk to the public health. The reduction of the emission of particulate matter (PM) therefore is a most important aspect for the development of heavy duty Diesel engines and exhaust emission control systems.*

*In 2000 EuroV-standards were already met by an engine developed for low specific fuel consumption and PM-emission, equipped with a GD-KAT-system (VHRO type, consisting of “Vor”(pre)oxidation-, Hydrolysis, SCR- and Postoxidation catalyst,) without a particulate filter by means of a simultaneous reduction of particulate and NO<sub>x</sub>-emissions [1]. With an optimised GD-Kat-system (V/H-RO type) using a partial flow H-catalyst [2] a 40-60 % reduction of soot (elementary carbon, EC) was measured by means of Laser Induced Incandescence Soot Sensor (LI<sup>2</sup>SA) [3]. By an additional reduction of the engine EC raw emission the range of the EEV-standards is met [4].*

*If only the EuroIV-standards should be met a NO<sub>x</sub>- and PM-optimised engine (3.0/3.3 g NO<sub>x</sub>/kWh; 0.03/0.06 g PM/kWh; ESC/ETC) [5] will be equipped with a PM-catalyst system. With this combination PM-emissions of 0.011/0.030 g/kWh (ESC/ETC) could be achieved measured in the standard gravimetric procedure. Direct measurements of EC-emissions by means of a photoacoustic soot sensor showed soot removals of about 70 % ESC and ETC [6].*

*The PM-catalyst-system [7] consists of a Platinum oxidation catalyst and metallic catalyst substrates with open cells especially designed for a temporary storage and oxidation of soot. The metallic substrates used in this project were made from corrugated foils with small blades and flat foils through which exhaust gas can pass [8].*

*This structure designed for a 3D gas mixing process is very effective. Catalysts with these substrate structures will prove to be the best for the future of emission control due to their multifunctionality (e. g. soot removal, improvement of mass transfer, gas mixture effect etc.).*

*The remarkable advantage of the PM-catalyst-system compared to standard particulate filters is caused by the open cell structure and the relatively low level of flow resistance, a selective removal of soot (EC) and the effect, that ashes from engine lubrication oil are passing. A test with high smoke emission of the engine (BSN about 5) led to a small increase of the back pressure only. No blocking of the device was observed. The loss of fuel efficiency to be seen with standard particulate filters is avoided. A further reduction of the Non-EC-fraction of the PM can be achieved by using fuel and lube oil with improved quality (e. g. lower S-content and sulphate ashes) [9].*

*PM-optimised engines equipped with PM-catalysts have the potential to replace particulate filters which are using the principles of surface or depth filtration and which are known to have a restricted suitability for vehicle application.*

***Compared to the GD-KAT-system a PM-catalyst-system, because of the engine controlled NO<sub>x</sub> reduction, will show an on principle higher fuel consumption, so that the decision for the most economic EuroIV-concept has to be made with respect to the mode of vehicle operation and the annual mileage respectively.***

## 1. Einleitung

---

### 1.1 Zielsetzung

Rußpartikel in Dieselabgasen stehen wegen des Gesundheitsgefährdungspostulats in der Kritik. Der Gesetzgeber hat deshalb sehr niedrige PM (Particulate Matter)-Grenzwerte für die Abgasstufen EuroIV/V und EEV festgelegt. Der Absenkung der PM-Emissionen gilt darum die besondere Aufmerksamkeit der Entwickler von Motoren und von Abgasnachbehandlungssystemen.

Die PM-Emissionen setzen sich aus einem Kohlenstoffrußanteil (Elemental Carbon, EC) und aus Metallsulfaten und -phosphaten (Motorenölasche, ASH), Schwefelsäure/Wasser (Sulfuric Acid, SA) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (Organic Carbon, OC) zusammen. Die typische differenzierte PM-Emission eines EuroV-Motors mit GD-KAT beträgt z. B. bei einer gravimetrisch bestimmten PM von 12 mg/kWh: 7 mg/kWh EC, 2 mg/kWh SA und 3 mg/kWh ASH [10].

Ein Partikelfilter in Form eines CRT-Systems, derzeit der bei Bussen am häufigsten eingesetzte Typ, scheidet die EC- und ASH-Anteile der PM meist quantitativ ab, oxidiert die OC-Anteile und bildet SA. Da sich die ASH-Anteile bei der Filterregeneration nicht beseitigen lassen, verblockt das System während des Gebrauchs und muss daher gereinigt oder ausgetauscht werden [11]. Entwicklungsziel ist es deshalb, ein kontinuierliches System zur selektiven Total Carbon (TC)-Verminderung zu entwickeln, wobei TC die Summe von EC und OC ausmacht.

Die Bildung von ASH und SA lässt sich nur durch die Verwendung von möglichst schwefelfreiem Kraftstoff, die Verwendung von phosphor- und aschearmen Motorenölen und die Absenkung des Ölverbrauchs vermeiden [9].

### 1.2 PM-Verminderung bei PM-minimierten Motoren mit GD-KAT-Systemen

Bereits im Jahre 2000 konnte gezeigt werden, dass es mit einem GD-Kat-System nicht nur möglich ist, die Stickoxide mit Hilfe von Harnstoff nach dem SCR-Prinzip zu reduzieren, sondern auch die Partikelemissionen von 40/47 mg/kWh (ESC/ETC) um ca. 22 mg/kWh abzusenken. Dies gelingt durch das hochreaktive NO<sub>2</sub>, das an einem Vorkatalysator gebildet wird, und mit dessen Hilfe eine Oxidation der an den Katalysatoroberflächen sich abscheidenden Rußpartikel gemäß:  $2\text{NO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{NO} + \text{CO}_2$  möglich wird. Dadurch konnten in Kombination mit einem PM-minimierten Motor Partikelemissionen von 17/25 mg/kWh (ESC/ETC) erzielt werden (siehe Abbildung 1.2.1).

Leider war es in [1] nicht möglich, die Partikelverminderung eindeutig einer Oxidation der kohlenstoffhaltigen Partikel zuzuordnen. So wird auch an konventionellen SCR-Systemen ohne Vorkatalysator bzw. NO<sub>2</sub> eine Partikelverminderung beobachtet. Diese ist allerdings auf die Oxidation von Kohlenwasserstoffen (OC) zurückzuführen. Messungen mit dem Rußmessgerät LI<sup>2</sup>SA (Laser Induced Incandescence Soot Analyser) [3] an einem 380 kW D2876 LF-Motor (12,82 l Hubvolumen) mit CR-Einspritzsystem und einer PM-Emission von 16 mg/kWh (ESC) bestätigen die Rußoxidationsaktivität des GD-Kat-Systems.

Um die Aufbereitung des Harnstoffs zu verbessern, wurde der Hydrolysekatalysator parallel zum Vorkatalysator betrieben [2]. Diesen beiden Katalysatoren war der SCR-Katalysator (R-Kat) nachgeschaltet. Der Nachoxidationskatalysator (O-Kat) wurde für diesen Versuch weggelassen. Mit Harnstoffwasser wurde NO<sub>x</sub> auf < 2 g/kWh reduziert.

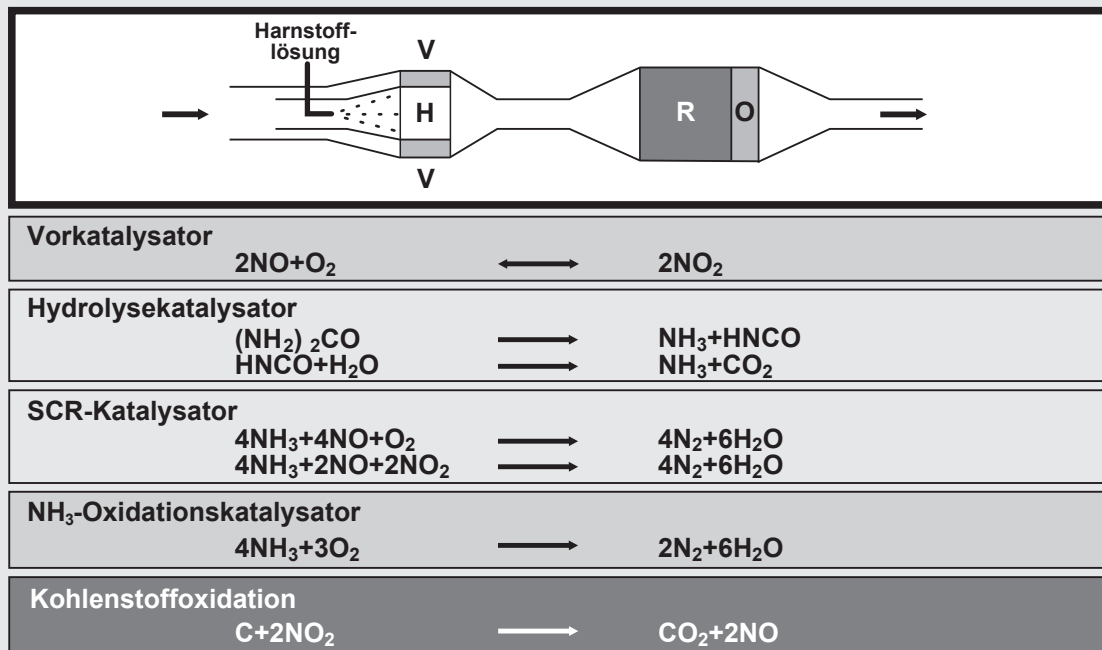


Abbildung 1.2.1: Aufbau und Chemismus eines GD-KAT-Systems vom Typ V/H-RO [2]

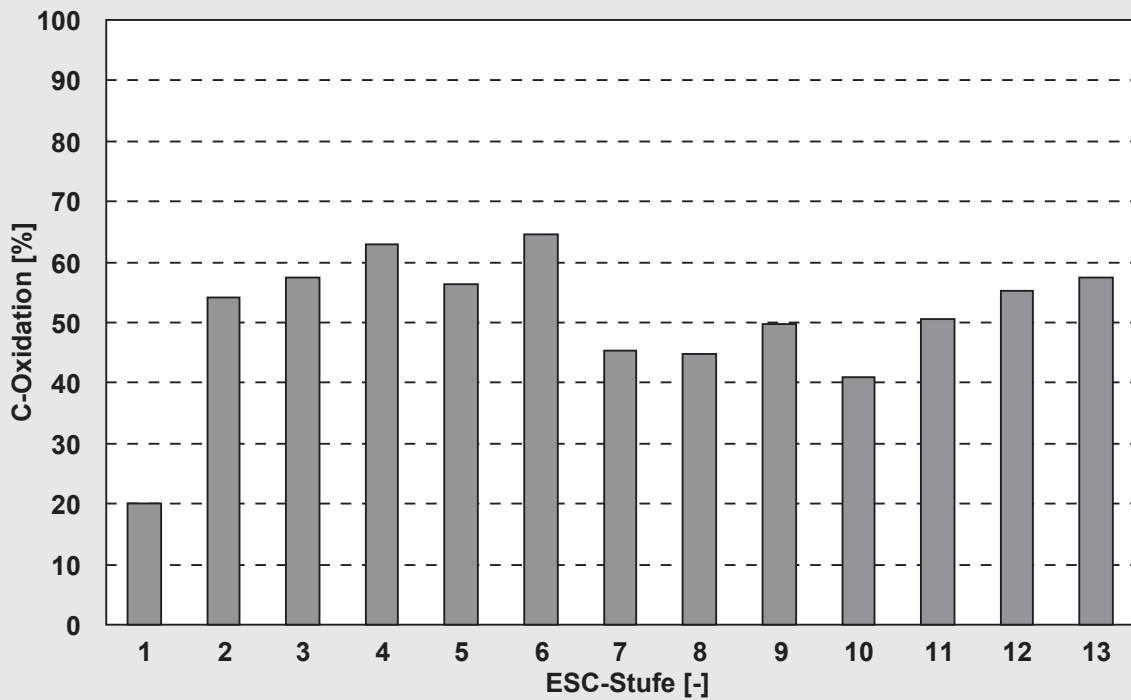


Abbildung 1.2.2: Prozentualer Rußumsatz über das GD-KAT-Sytem vom Typ V/H-R

Wie aus Abbildung 1.2.2 hervorgeht, ist über das GD-KAT-System ein deutlicher Umsatz der kohlenstoffhaltigen Partikel festzustellen. Abgesehen von der Leerlaufstufe (1), bewegen sich die Rußumsätze um die 50 % (zwischen 41 und 65 %). Der Grund für die geringe Rußoxidationsaktivität des Systems im Leerlauf ist auf die zu niedrigen Abgastemperaturen an diesem Punkt zurückzuführen, die sehr geringe NO<sub>2</sub>-Konzentrationen zur Folge haben. So liegt der NO<sub>2</sub>-Anteil in diesem Punkt bei 2 %, während er sich bei den anderen zwischen 10 und 20 % bewegt.

Parallel zu der mit dem LI<sup>2</sup>SA-Messgerät bestimmten Verminderung der kohlenstoffhaltigen Partikel, ist ein 45%iger Rückgang der gravimetrisch bestimmten Gesamtpartikelmasse auf 11 mg/kWh (ESC) festzustellen. In Kombination mit weiterführenden motorischen Maßnahmen besteht das Potenzial, die Partikelemissionen auf das EEV-Niveau von 20 mg/kWh im ETC abzusenken [4].

### 1.3 Filterlose PM-Verminderung bei NO<sub>x</sub>-optimierten Motoren

Bei NO<sub>x</sub>-optimierten Motoren liegt die PM-Emission generell höher als bei den PM-optimierten Motoren. Damit werden erhöhte Anforderungen an das Rußabscheidesystem gestellt, die mit konventionellen Wabenkatalysatoren nicht mehr zu erfüllen sind.

Die am GD-KAT-System bevorzugt im Eingangsbereich des R-Kats beobachtete Rußabscheidung lässt sich durch den Übergang von Wabenkatalysatoren mit planparallelen und geschlossenen Strömungskanälen auf Metallstrukturen deutlich verbessern, wenn deren Wabenkanäle vielfach strukturiert sind. Besonders wirkungsvoll sind Metallwaben, deren Kanäle zwischen Ein- und Austritt nicht in sich geschlossen, sondern vielfach aufgespalten und durchbrochen sind und damit einen inneren Strömungsausgleich ermöglichen. Schaltet man derartigen Wabenstrukturen einen Pt-Oxidationskatalysator vor oder beschichtet man diese Strukturen mit geträgertem Platin zur NO<sub>2</sub>-Erzeugung, kann eine filterlose Rußentfernung demonstriert werden [7].

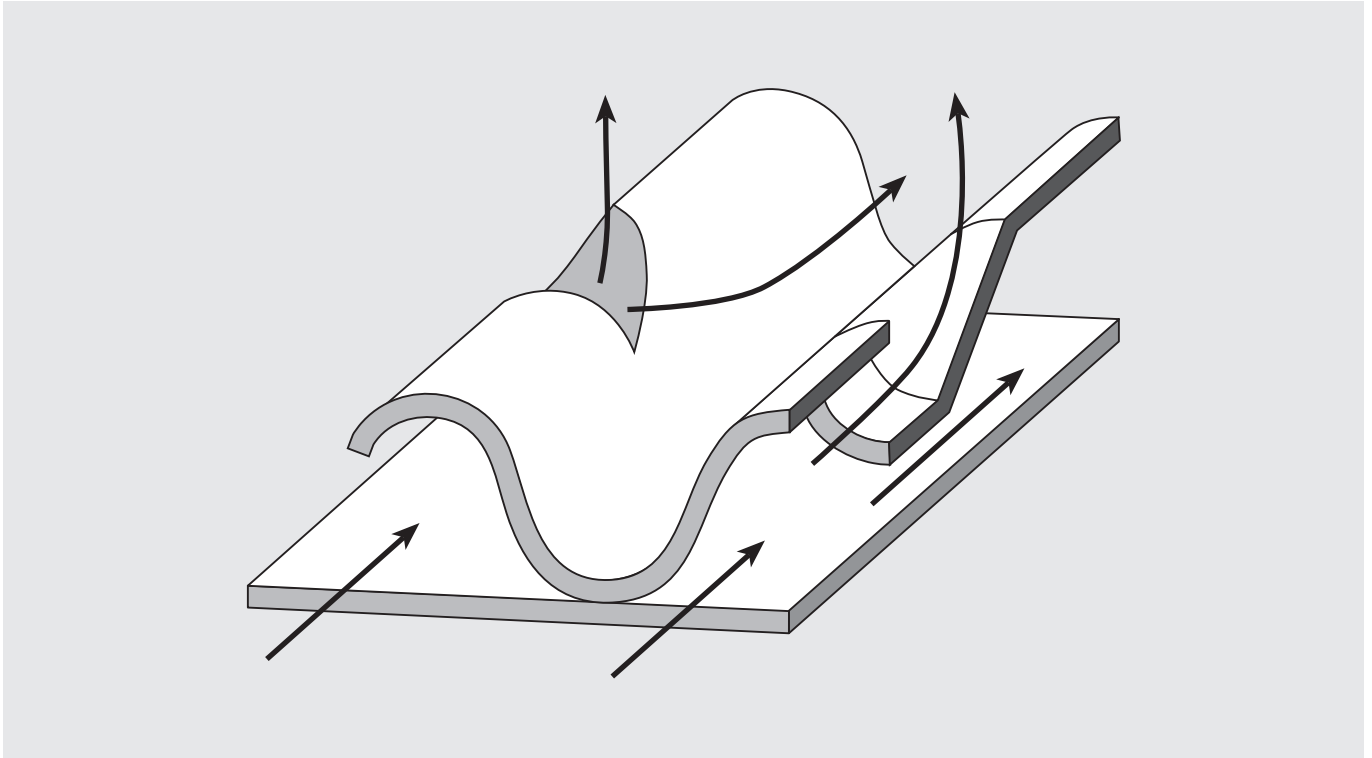
## 2. Das offene Partikelabscheidersystem

---

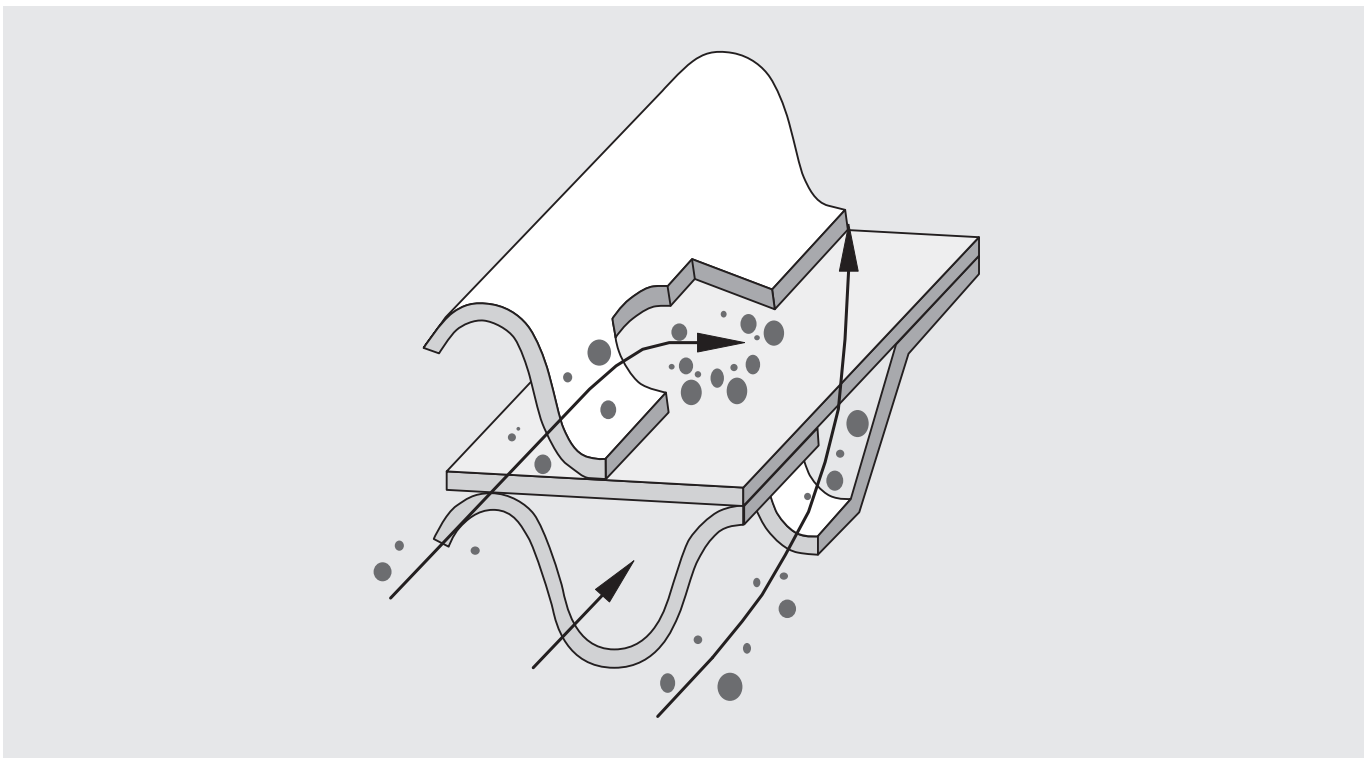
### 2.1 Aufbau, Funktion

Die Ablagerung von Partikeln in herkömmlichen Katalysatorträgerstrukturen vollzieht sich fast ausschließlich an der Eintrittsfläche durch Kollision mit den Stirnwänden der Kanalwände. Eine Ablagerung in den glatten Kanälen selbst ist aufgrund hoher laminarer Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu beobachten. Das Ziel der Entwicklung war, Partikel abzuscheiden in einer im Prinzip immer noch offenen Struktur. Dabei muss dafür gesorgt werden, dass die eingelagerten Partikel bei einer plötzlichen Erhöhung des Massenstroms aufgrund der aerodynamischen Kräfte nicht losgerissen werden können.

Eine ursprünglich als Mischer konzipierte Struktur, die entwickelt wurde, um Harnstofflösung in einer SCR-Anlage vor dem Eintritt in den eigentlichen Katalysator besser zu verteilen, hatte den Weg zur Auslegung eines Partikelabscheiders gewiesen. Dieses System ist in der Lage, den Abgasstrom so zu teilen, dass ein Teilstrom in benachbarte Kanäle geleitet wird. Die Konstruktion der Zellen ist ähnlich der üblicher Metallträger, wie in Darstellung 2.1.1 gezeigt wird. Durch schaufelartige Einschnitte in den gewellten Folien ist es möglich, einen Abgasteilstrom zu zwingen, in die Nachbarkanäle zu strömen. Ist die Glattlage als Lochfolie ausgebildet, so ist es möglich, dass der Teilstrom auch noch die Lagenebene wechselt und somit je nach Orientierung der Schaufel in die darüber oder darunter liegende Lagenebene geleitet wird.



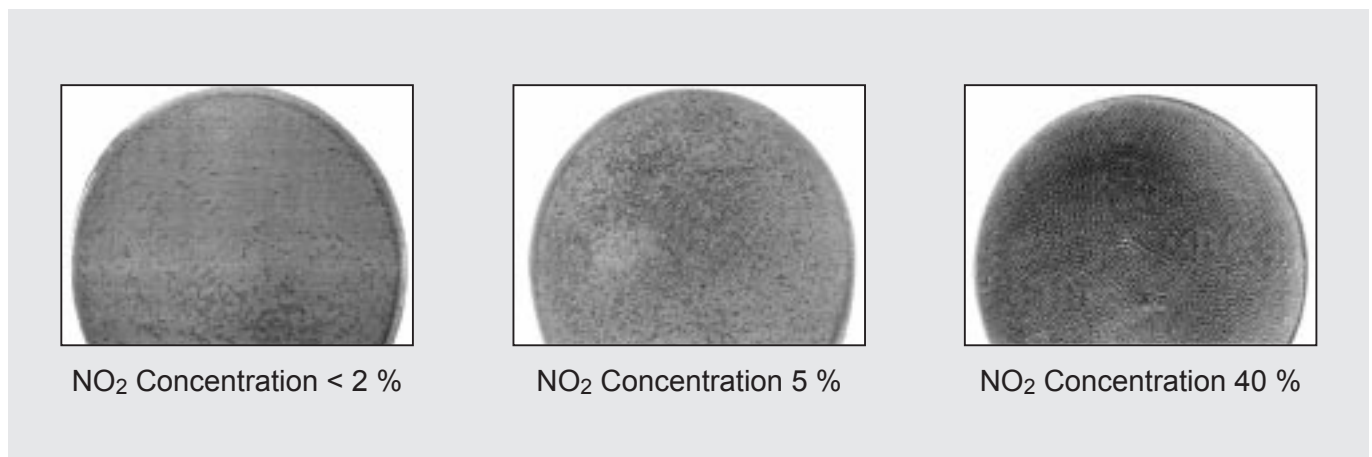
**Abbildung 2.1.1:** Konstruktive Ausbildung der gewellten Folie



**Abbildung 2.1.2:** Ablagerung der Partikel in einer Glattlage aus porösem Material

Ist die Glattlage statt als Lochfolie als dünne poröse Schicht aus Drahtgestrick oder Fasermaterial ausgebildet, so ist sie in der Lage, Partikel abzuscheiden (Abbildung 2.1.2). In dem Maße, in dem sich diese poröse Schicht mit Partikeln füllt, erhöht sich der Strömungswiderstand, sodass schließlich ein Punkt erreicht wird, bei dem der vorher abgeleitete Abgasteilstrom an der Schaufel vorbei nun doch weiter durch den ursprünglichen Kanal strömt.

Damit weitere Partikel abgeschieden werden können, müssen die eingelagerten wieder abgebaut werden. Dies geschieht z. B. durch die Oxidation des Kohlenstoffs mit  $\text{NO}_2$ . Dazu ist dem Abscheider ein Oxidationskatalysator vorgeschaltet, in dem  $\text{NO}_2$  gebildet wird. Dieses  $\text{NO}_2$  reagiert mit den abgeschiedenen Partikeln bei Temperaturen über  $200\text{ }^\circ\text{C}$  kontinuierlich. Das sei am Beispiel einer Untersuchung demonstriert, bei der an den Stirnseiten von Katalysatoren im Dieselabgasstrang Ruß abgelagert wurde, welcher mit  $\text{NO}_2$  je nach Konzentration reagiert. Abbildung 2.1.3 zeigt die Stirnseiten von Katalystorträgern nach Betrieb in einem Niedriglastpunkt mit verschiedenen Konzentrationen von  $\text{NO}_2$  im Abgas.



**Abbildung 2.1.3:** *Ansammlung von Ruß an den Stirnflächen von Katalysatoren in Abhängigkeit des  $\text{NO}_2$  Gehaltes des Abgas*

Die Auslegung der porösen Glattlage hinsichtlich Porosität, Druckverlust und Dicke wurde mit Hilfe von Simulationsprogrammen an den Universitäten von Rom und Karlsruhe durchgeführt.

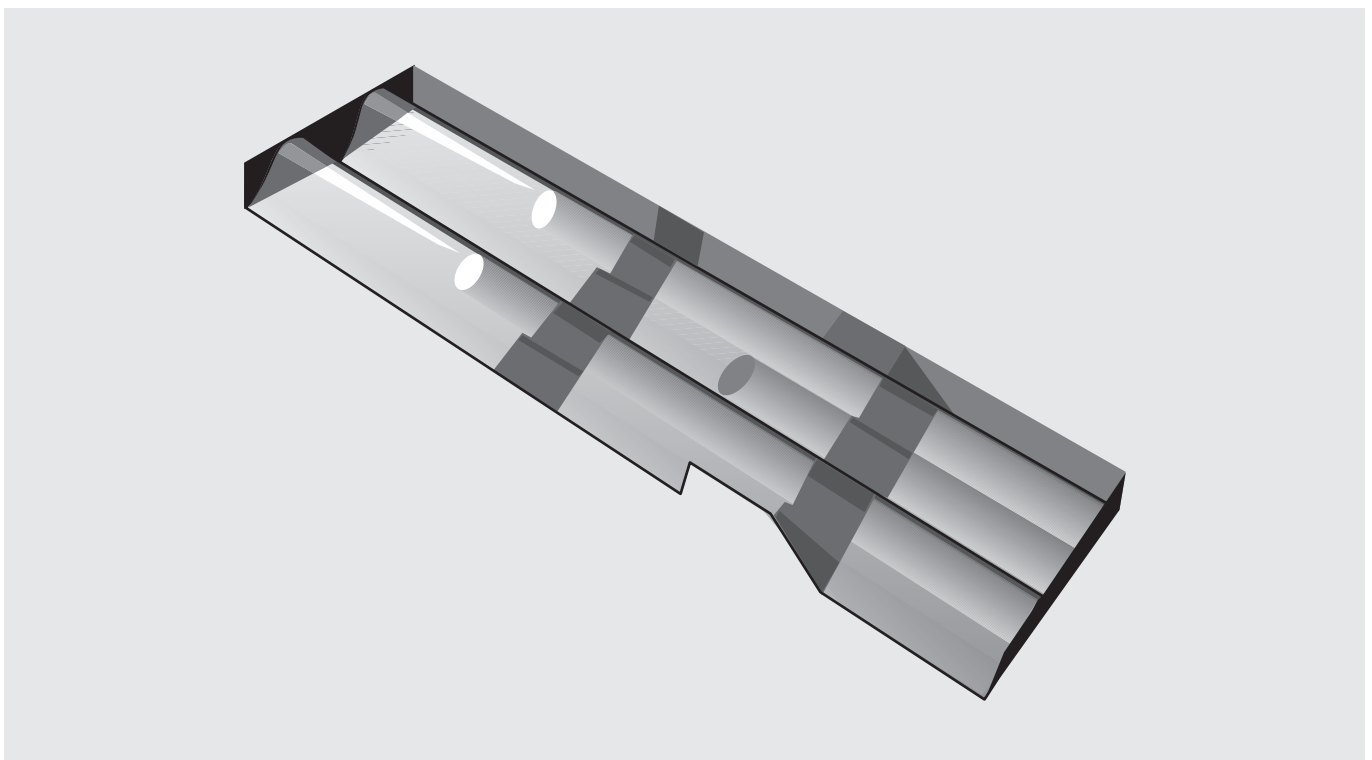
## **2.2 Simulation der Strömung und der Abscheidung in einem offenen Partikelabscheidersystem**

Das Schaufeldesign bestimmt bei gegebener Metallfaservliesporosität die Druckverhältnisse in der Struktur und damit die Größe des Teilstroms, der die poröse Schicht passiert. Ziel der Simulationsprozesse ist, den besten Kompromiss zwischen Systemgedruck und Abscheideeffektivität vorzuberechnen, da der Gegendruck sich auf das Leistungs- und Verbrauchsverhalten des Motors auswirkt. Bei diesem Ansatz ist zu berücksichtigen, dass sich mit zunehmender Einlagerung von Partikeln in die poröse Schicht deren Permeabilität ändert, womit auch eine Verringerung der Durchströmung einhergeht. Zur Beschreibung dieser Vorgänge wurden sowohl dreidimensionale als auch zweidimensionale Ansätze gewählt. Aus Effizienzgründen wurde die 3D-Beschreibung auf die Vorgänge bei der Durchströmung der porösen Schicht beschränkt, während 2D-Ansätze für die Strömungsvorgänge in den Kanälen der Gesamtstruktur verwendet wurden.

### **Durchströmung der porösen Schicht**

Die Beschreibung erfolgte als 3D-Ansatz einer strömungsdynamischen Analyse. Dieser Ansatz wurde mit einem Modell für die Abscheidung von Partikeln in porösen Medien gekoppelt, womit sich dann die Vorgänge bei der Abscheidung berechnen lassen. Dazu wurde eine „Elementarzelle“ definiert, mit deren Hilfe man durch Vervielfachung dann in der Lage ist, die Gesamtstruktur zu beschreiben. Die Elementarzelle wurde dabei für die Simulation als Gitternetzstruktur mit symmetrischen und sich wiederholenden Übergängen ausgebildet (Abbildung 2.2.1).

Die Simulation der Abscheidvorgänge erlaubt dabei Schlüsse auf das Verhalten von Partikeln verschiedener Größenklassen (Abbildung 2.2.2). Unter den gegebenen Bedingungen stellt sich als Einfluss größter Wirksamkeit das Metallfaservliesmaterial dar, bzw. dessen charakteristische Kenngrößen wie Faserdurchmesser, Permeabilität, Schichtdicke usw..



**Abbildung 2.2.1: Elementarzelle mit Gitternetzstruktur**

Neben dem geschilderten Vorgang des Abscheidungsprozesses sind weitere Prozesse der Partikelabscheidung zu erkennen, wie Diffusions- oder thermophoresebedingte Abscheidung. Deren Anteil an der Gesamtabseidung ist allerdings deutlich geringer.

### **Vorgänge in der Gesamtstruktur**

Mit Hilfe des bei dieser Betrachtung verwendeten 2D-Ansatzes ließen sich in relativ kurzer Zeit eine größere Anzahl unterschiedlicher konstruktiver Auslegungen der Struktur bewerten. Dieses Verfahren bot sich weiterhin dazu an, mit überschaubarem Aufwand das Verhalten bei zunehmender Beladung mit Partikeln oder auch bei pulsierender Abgasströmung zu untersuchen. Die Resultate der Berechnungen mit den verwendeten Modellen wurden durch Messungen an entsprechenden Strukturen ergänzt (Abbildung 2.2.3). So konnte demonstriert werden, dass die Voraussagen der Modelle zuverlässig sind.

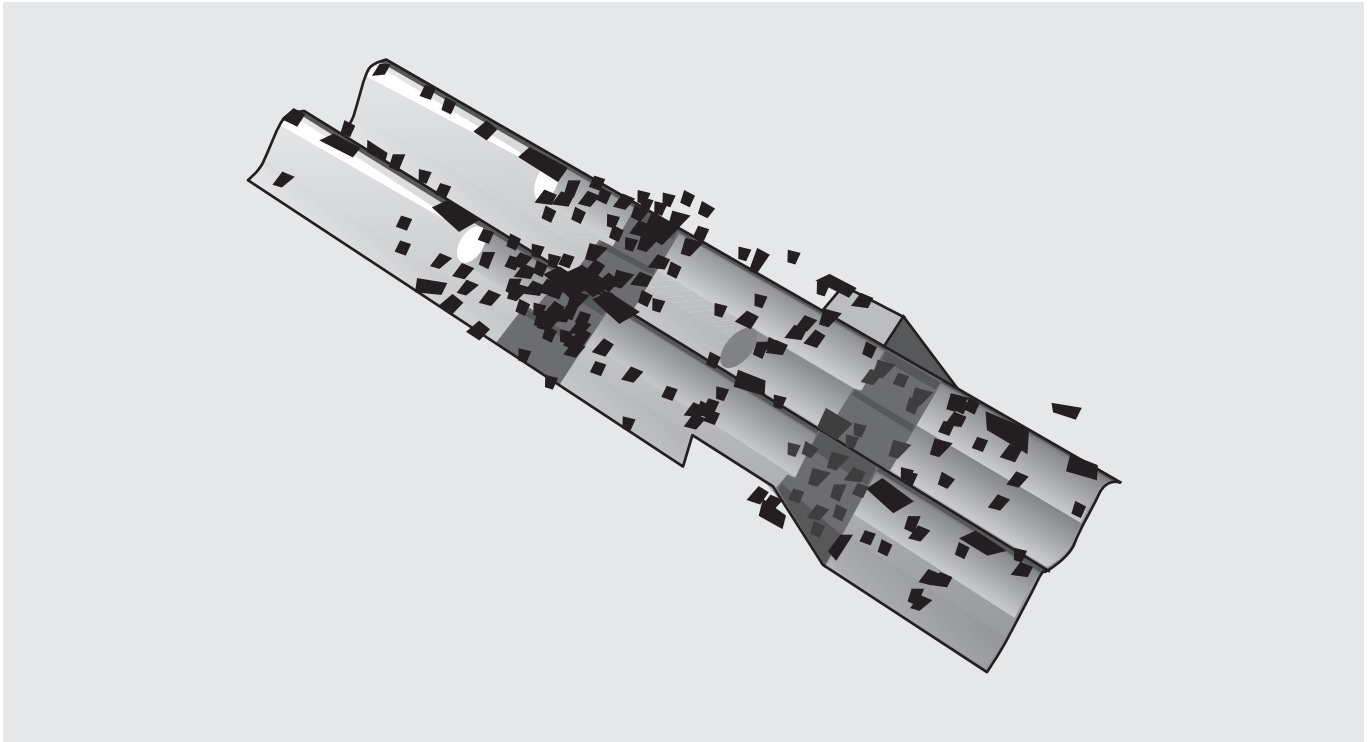


Abbildung 2.2.2: Abscheidungsprozess mit einem Wirkungsgrad von 85 % von Partikeln mit einem aerodynamisch wirksamen Durchmesser von 100 nm

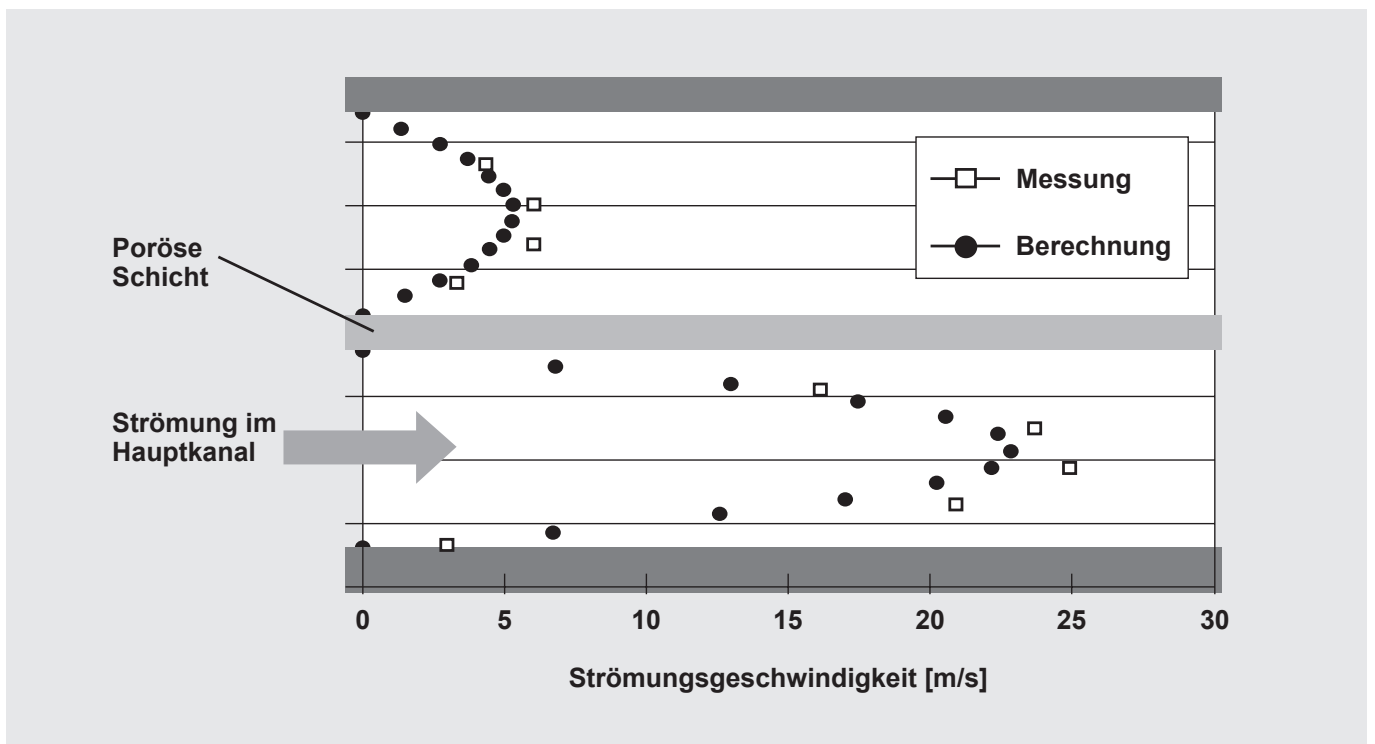
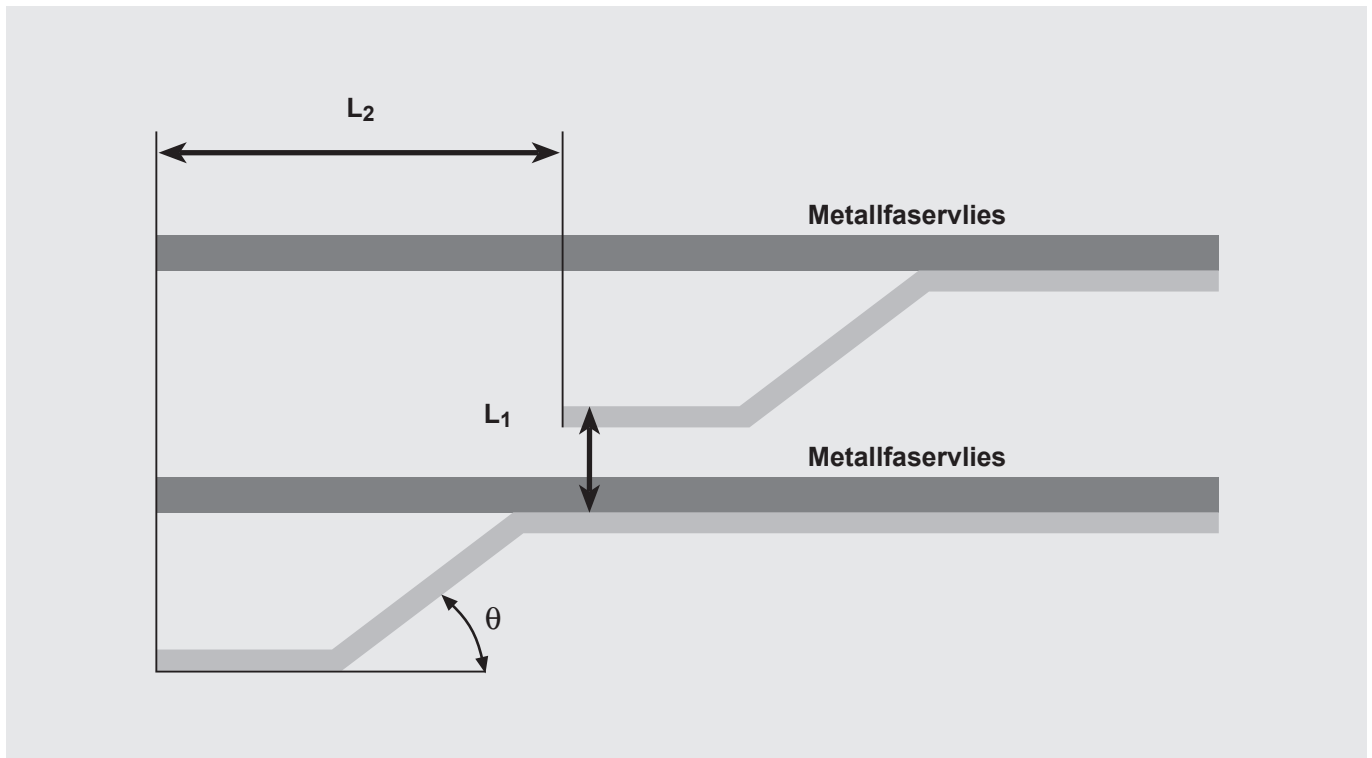


Abbildung 2.2.3: Vergleich von gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeitsverteilungen in zwei benachbarten Kanälen, die durch eine poröse Schicht getrennt sind



**Abbildung 2.2.4:** Festlegung der Parameter der Gesamtstruktur für die Optimierungsberechnungen

### Optimierung der Struktur

Mit Variationen des Abstandes zwischen Schaufel und benachbarter Kanalwand (Abbildung 2.2.4 Abstand  $L_1$ ), Anstellwinkel der Schaufel ( $\theta$ ) und des Versatzes zwischen zwei Schaufeleintrittsebenen ( $L_2$ ) wurde eine optimale Auslegung berechnet.

Diese Struktur wurde hergestellt (Abbildung 2.2.5) und dann bezüglich des von der Durchströmung verursachten Gegendruckes vermessen. Es ergab sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Abhängigkeit (Abbildung 2.2.6). Dabei wurde ein Volumenstrom von  $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$  und ein 200 cpsi Träger mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Abscheiderelementlänge von 74,5 mm zugrunde gelegt.

Die Anwendung der dargestellten Modelle erlaubt weiterhin die Voraussage, mit welchem Gegendruck zu rechnen ist, wenn die poröse Schicht sich doch einmal zusetzen sollte. Es zeigt sich, dass der Gegendruck zwar ansteigt, dennoch aber auch unter diesen Bedingungen ein ungefährdeter Motorbetrieb möglich ist.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Versuche wurden mit Strukturen durchgeführt, für die die oben beschriebenen Modelle und Berechnungen zum Einsatz kamen.

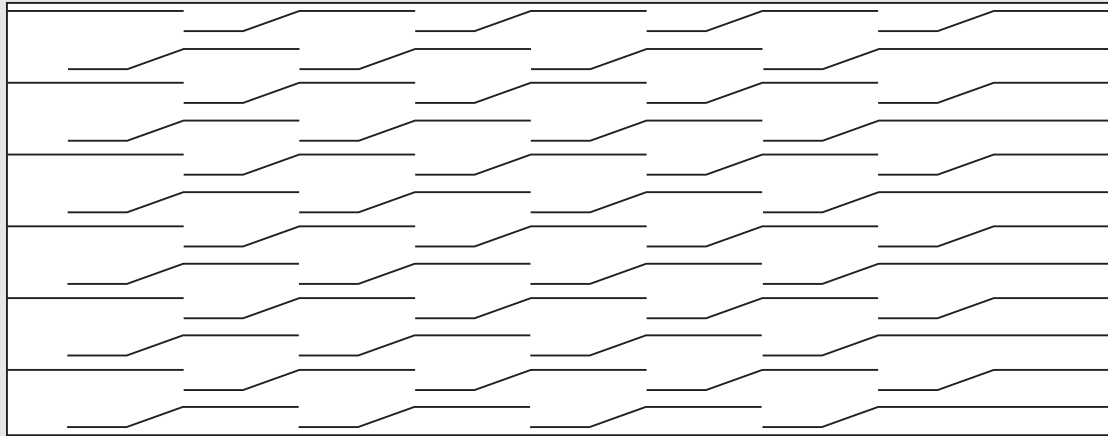


Abbildung 2.2.5: Schematische Darstellung der rechnerisch ermittelten optimalen Struktur

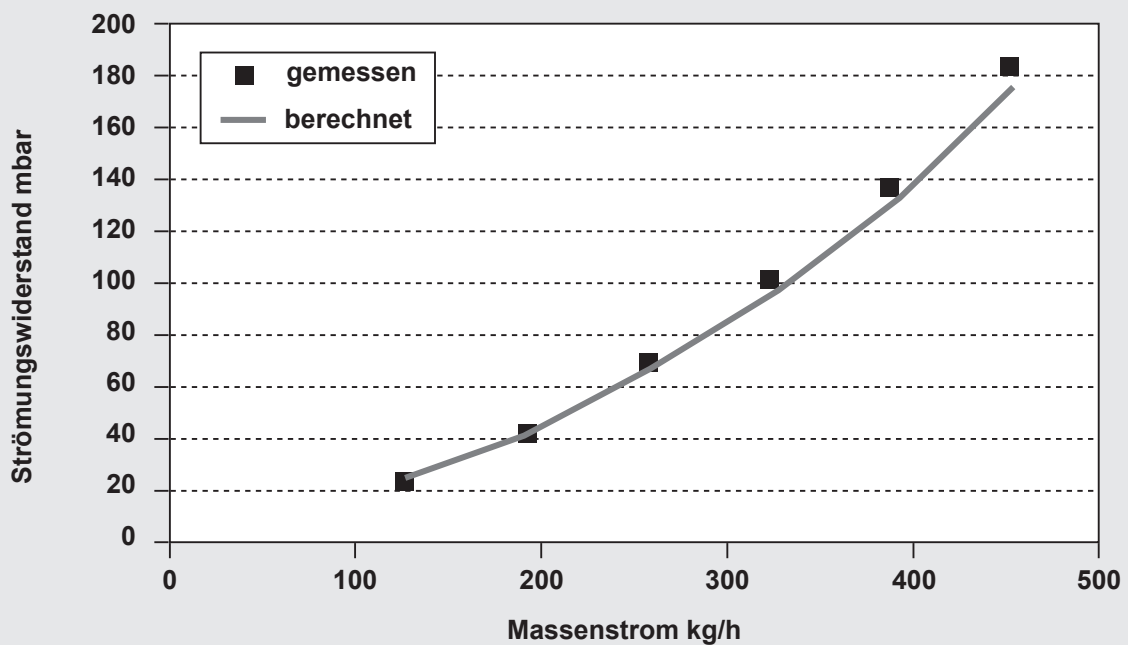


Abbildung 2.2.6: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Massenfluss für die optimierte Struktur

## 3. Experimentelles

### 3.1 Motorkonzept und innermotorische Maßnahmen

#### 3.1.1 Übersicht

Als Versuchsträger dient ein modifizierter MAN D0836 LF-4V-Sechszylindermotor (6,6 l Hubraum, 228 kW) mit zweistufiger geregelter Aufladung, einer externen, steuerbaren gekühlten AGR und einem CR-Einspritzsystem (Abbildung 3.1.1). Die Einspritz-, Auflade- und AGR-Systeme des Motors werden auf eine  $\text{NO}_x$ -Emission  $< 3,5 \text{ g/kWh}$  und eine PM-Emission  $0,03/0,06 \text{ g/kWh}$  (ESC/ETC) ausgelegt. Der max. Abgasvolumenstrom bei Nenndrehzahl und Volllast beträgt  $1.200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

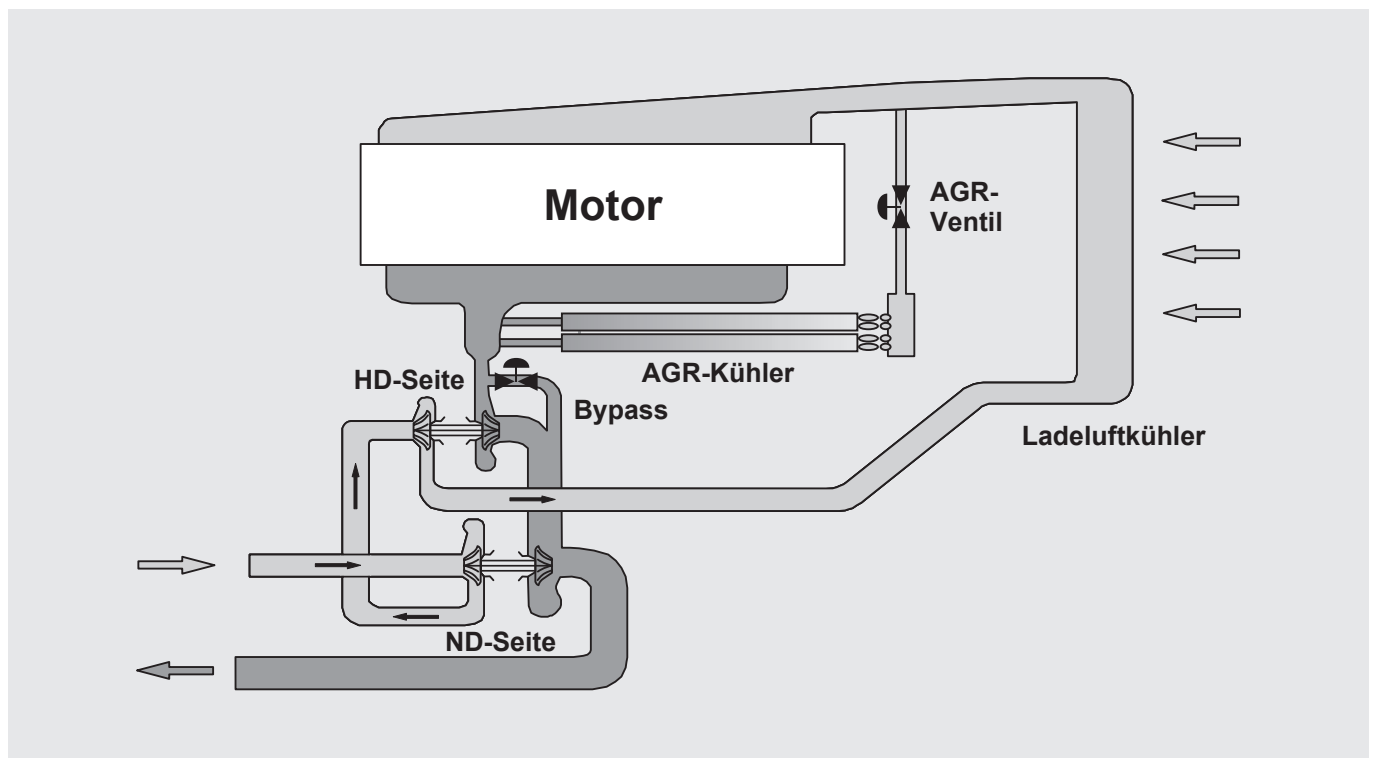


Abbildung 3.1.1: Auflade- und AGR-System des Versuchsmotors

#### 3.1.2 Einspritzsystem

Die Verwendung eines PM-Kats für das Erreichen der EuroIV-Grenzwerte stellt hohe Anforderungen an die motorische Verbrennung und die dazu benötigten Komponenten. Es sind hohe AGR-Raten (15-25 %, je nach Drehzahl- und Lastzustand) erforderlich, um den  $\text{NO}_x$ -EuroIV-Grenzwert bei akzeptablem Kraftstoffverbrauch darzustellen. Damit sich die Partikelemissionen trotz der hohen Rückführaten im zulässigen Rahmen bewegen, muss ein leistungsfähiges und flexibles Einspritzsystem appliziert werden. Es ist unumgänglich, dass in den Drehzahl-Last-Bereichen, in denen die AGR aktiv ist, pro Arbeitstakt mindestens dreimal eingespritzt werden kann. Damit das Verbrennungsgeräusch den heutigen Anforderungen entspricht, wird der sonst durch die notwendig hohen Einspritzdrücke (max. 1.600 bar) verursachte große Zylinderdruckgradient mittels Voreinspritzung vermieden. Wegen des erheblichen Abgasanteils in der Frischladung benötigt man eine Nacheinspritzung, um eine optimale Ausnutzung der Rußabbrandphase zu gewährleisten.

### 3.1.3 Aufladesystem

Eine weitere Herausforderung für den Entwickler stellt das Aufladesystem dar. Allein mit hohen Einspritzdrücken kann wegen der sich gegenseitig beeinflussenden Größen Ruß-, NO<sub>x</sub>-Emission und AGR-Rate kein ausreichend niedriges Partikelniveau dargestellt werden. Weiter gesteigerte Einspritzdrücke würden wegen der dadurch analog zunehmenden NO<sub>x</sub>-Emissionen eine nochmals angehobene AGR-Rate benötigen. Diese wiederum erfordert, wegen des sinkenden Luftüberschusses und der damit verbundenen, steigenden Rußemissionen, abermals höhere Einspritzdrücke usw.. Es entsteht damit ein „circulus vitiosus“, der durch die Erhaltung eines ausreichenden Luftüberschusses zu durchbrechen ist. Dies und die heute selbstverständlichen Forderungen nach hoher Leistungsdichte und souveräner Fahrdynamik macht nach derzeitigem Kenntnisstand eine zweistufige Aufladung notwendig.

Betrachtet man zunächst den Stationärbetrieb, so sind die Vorteile der zweistufigen Aufladung gegenüber einer auf hohen AGR-Raten gut angepassten einstufigen Aufladung noch gering. Das leicht reduzierte Rußniveau resultiert aus dem höheren Luftangebot im Brennraum. Im dynamischen Betrieb sind die Vorteile der zweistufigen Aufladung eindeutig zu erkennen. Neben dem erhöhten Luftangebot steht hier vor allem das bessere Ansprechverhalten im Vordergrund. Da zwei Turbolader für den gesamten Drehzahl-Lastbereich zur Verfügung stehen, kann die HD (Hochdruck)-turbine sehr klein ausgelegt werden. Dadurch ist der HD-Verdichter während der Beschleunigung leichter in der Lage, den geforderten Luftbedarf schnell zur Verfügung zu stellen. Bei höherem Abgasmassenstrom wird die Hochdruckturbine mittels Bypass zum Teil umgangen (Abb.3.1.1). Auf diese Weise kann der Beschleunigungsruß gering gehalten werden. Die Wirkungsgradeinbußen durch das Umblasen der Hochdruckturbine bei höheren Massenströmen und die phasenweise ungleiche Verteilung der Verdichtungsarbeit während der Beschleunigung, werden aufgrund der beschriebenen positiven Auswirkung auf die Partikelemission in Kauf genommen.

Lässt die mechanische Belastbarkeit des Motorkonzeptes entsprechende Spitzendrücke zu (gegenüber einer EuroIII-Auslegung ca. 15 % höher), so liegen die spezifischen Kraftstoffverbräuche auf dem Niveau der EuroIII-Motoren.

### 3.1.4 AGR-System

Betrachtet man allein das AGR-System, kann der Einfluss des nicht optimalen Gesamtwirkungsgrades der Ladegruppe als durchweg positiv angesehen werden. Der ungünstige Wirkungsgrad der Ladegruppe verursacht in großen Bereichen des Motorkennfeldes ein negatives Spülgefälle, welches es ermöglicht, ausreichend hohe AGR-Raten mittels einer serienmäßigen MAN-Hochdruck-AGR darzustellen. Damit kann der EuroIV-NO<sub>x</sub>-Grenzwert ohne besondere Maßnahmen zur Anhebung des AGR-Massenstromes erreicht werden. Um ein möglichst spontanes Ansprechen der Ladegruppe während der Beschleunigungsphasen im instationären Betrieb zu gewährleisten, wird in diesen Zeitabschnitten die AGR abgeschaltet. Auf diese Weise steht der Ladegruppe während der Beschleunigung der volle Abgasmassenstrom zur Verfügung. Gleichzeitig werden extreme AGR-Spitzen im Ladeluftrohr vermieden. Zu lange und zu häufige Schließphasen im transienten Betrieb (ETC-Test) sind allerdings aufgrund des angestrebten niedrigen NO<sub>x</sub>-Niveaus nicht möglich.

## 3.2 Prüfstand und Messtechnik

### 3.2.1 Motorenprüfstand und Messprogramm

Die Versuche werden auf einem hydraulischen, elektronisch geregelten Prüfstand durchgeführt. Der ETC-Zyklus wird dadurch näherungsweise dargestellt, indem die Schleppphasen durch Nulllastphasen ersetzt werden. Aus Abgleichversuchen ist jedoch bekannt, dass vor allem der Partikelmesswert auf dem hochdynamischen Prüfstand tendenziell günstiger ausfällt.

### 3.2.2 Betriebsstoffe

Diesekraftstoff: „Cleanlife Diesel“ (Fa. MVW-Öl) mit 6 ppm Schwefelgehalt.

Motorenöl: Shell Rimula Ultra 5W-30 mit 0,32/0,10 % Schwefel/Phosphorgehalt; 1,9 % Sulfatasche.

Für Referenzmessungen der Partikelgrößenverteilung diente ein Versuchsdiesekraftstoff von Shell mit 4 ppm Schwefelgehalt in Verbindung mit einem Shell-Gasmotorenöl mit 0,12/0,02 % S/P und 0,45 % Sulfatasche.

### 3.2.3 Messtechnik für gasförmige Komponenten

Horiba MEXA 9100. NO- und NO<sub>2</sub>- Messungen nach PM-KAT mit Peus Sesam3-FTIR-Spektrometer

### 3.2.4 PM- und Rußmesstechnik

#### Gravimetrische Partikelmassenbestimmung:

Die Partikelmassenbestimmung erfolgte nach der gesetzlich vorgeschriebenen Prozedur (ESC, EU 1999/96/EG) mittels Mikrotunnel (NOVA, Mikrotrol 4). Der Mikrotunnel basiert auf dem Verfahren der Teilstromverdünnung. Hierbei wird ein Teil des Motorenabgases entnommen, definiert verdünnt und über den Messfilter geleitet. Die Gesamtpartikelmasse auf diesem Messfilter wird gravimetrisch bestimmt.

#### SMPS-System zur Größenverteilungsmessung

Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung wurde ein SMPS-System (TSI, 3936) mit den Komponenten (DMA 3081, CPC 3025A) eingesetzt. Unter einem SMPS-System (Scanning Mobility Particle Sizer) versteht man die Kombination eines DMA (Differential Mobility Analysers) mit einem CPC (Condensation Particle Counter). Zur Selektion einer ausgewählten Partikelgröße dient der DMA. Durch kontinuierliche Variation der Spannung wird jeweils eine Partikelgrößenklasse ausgewählt. Diese selektierte Klasse wird im CPC gezählt. Dies erfolgt durch Detektion des Streulichts der Einzelpartikel. Optisch nicht sichtbare kleine Partikel werden durch Aufkondensation von Butanoldampf auf eine detektierbare Größe gebracht.

#### Rußmesstechnik (PASS)

Zur direkten Messung der Rußkonzentration im Motorenabgas wird ein PASS-System (Photoacoustic Soot Sensor) verwendet. Bei dieser Messmethode werden gezielt Rußpartikel durch Absorption von Licht, das durch einen modulierten Laser erzeugt wird, erhitzt. Die dabei resultierende akustische Welle wird detektiert. Das erfasste PASS Signal ist hierbei linear proportional der Rußkonzentration [6]. Eine Kalibrierung mittels Verbrennungsanalyse (VDI 2465, Bl. 2) ist zur Zeit in Arbeit.

#### Probennahme:

Die Probennahme erfolgt mittels des bereits erwähnten Mikrotunnels. Hierbei wird ein Teilstrom von 1.5 l/min entnommen und nach Durchlaufen des SMPS-Systems bzw. PASS-Systems zurückgeführt.

#### Messablauf:

Die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung erfolgt im ESC, indem die einzelnen Stufen auf je 8 min ausgeweitet wurden. Hierbei dienen die ersten 5 min einer Stufe der Konditionierung. Nach dem Erreichen eines stabilen Zustands erfolgt die Messung der Größenverteilung durch einen Scan über 3 min. Das PASS-System kann demgegenüber bei den Standard ESC bzw. ETC Zyklen zur Rußdetektion eingesetzt werden.

### 3.3 PM-Katsystem

#### 3.3.1 Versuchsaufbau

Es wird ein zweiteiliges System untersucht mit einem Vorkatalysator V zur NO<sub>2</sub>-Erzeugung und den PM-Abscheidern P in einem Wechselgehäuse.

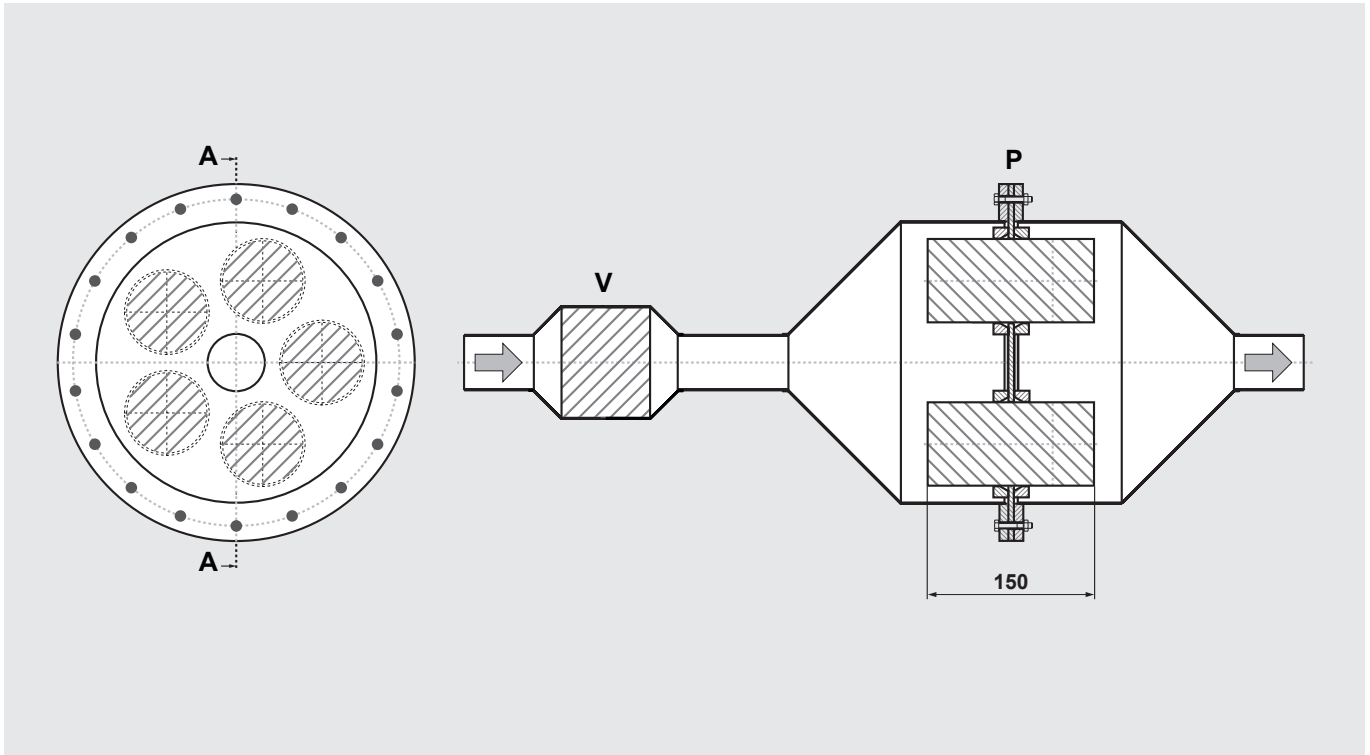


Abbildung 3.3.1 PM-Katsystem mit PM-Abscheidern im Wechselgehäuse

#### 3.3.2 Voroxidationskatalysator

Beschichtung Typ DC 600 mit 40 g Pt/ft<sup>3</sup> (OMG dmc<sup>2</sup>) auf Metallträger 200 cpsi, Durchmesser 220 mm, 102 mm lang, 3.85 l, max. RG 310.000 h<sup>-1</sup>.

#### 3.3.3 PM-Katabscheider

5 Träger Typ BC mit Durchmesser 150 mm, Länge 74,5 mm werden parallel durchströmt. Es werden zwei Einheiten hintereinandergeschaltet, sodass die Gesamtlänge 150 mm beträgt (BC 150).

## 4. Ergebnisse der Motorenprüfstandstests

### 4.1 Emissionen limitierter Abgaskomponenten

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen vor Kat liegen bei 3,0/3,3 g/kWh (ESC/ETC). Sie werden durch das Katsystem nicht nennenswert beeinflusst.

HC- und CO-Emissionen des Motors liegen bereits sehr niedrig. Das PM-KAT-System oxidiert HC und CO fast vollständig dank des vorgeschalteten Oxidationskatalysators.

Die Abscheiderate für die gravimetrisch bestimmte PM liegt bei 54 % im ESC. Der entsprechende Umsatz im ETC beträgt 47 % (Tabelle 4.1.1 und Abbildung 4.1.1).

Der maximale Abgasgedruck im ESC des Vorkats beträgt 24 mbar, der des PM-Abscheiders 30 mbar.

Emissionen mg/kWh	ESC vor Kat	ESC nach Kat	ETC vor Kat	ETC nach Kat
PM	24	11	57	30
HC	80	10	110	15
CO	200	10	450	50

**Tabelle 4.1.1: Motoremissionen vor PM-Kat und Emissionen nach dem PM-KAT-System**

### 4.2 Rußemissionen

Mit dem PASS-System wurde die Rußemission im ETC-Zyklus (Abbildung 4.2.1), sowie im ESC-Zyklus (Abbildung 4.2.2) jeweils vor und nach dem PM-Kat System erfaßt. Das erhaltene PASS Signal ist hierbei direkt proportional der Rußkonzentration im Abgas.

Der Wert der Stufe 1 (Leerlauf) war aufgrund der hohen Verdünnung nicht eindeutig feststellbar.

Einen Vergleich der Kohlenstoffverminderung im ESC Test zeigt Abbildung 4.2.3. Als mittlere Kohlenstoffreduktion über den ESC erhält man 68 % und im ETC Zyklus 67 %. Diese Kohlenstoffreduktion ist selbstverständlich nicht direkt mit den gravimetrisch ermittelten Partikelmassenreduktionen im ESC- und ETC-Test vergleichbar.

### 4.3 Messungen der PM-Größenverteilung und -anzahl

Die ermittelten Partikelgrößenverteilungen im ESC bei Drehzahl A (1.450 min<sup>-1</sup>) vor dem PM-Kat zeigt Abbildung 4.3.1. Das Maximum des Akkumulationsmodes (Rußmodes) liegt in allen Stufen zwischen 50 und 60 nm.

Die Messungen nach einem PM-Kat (EMITEC BC 150) für die Drehzahl A im ESC zeigt Abbildung 4.3.2. Das Maximum des Akkumulationsmodes liegt in allen Stufen ebenfalls zwischen 50 und 60 nm. Dies widerlegt die Befürchtung einer Verkleinerung der Rußpartikel durch das PM-Kat System. Alle Messungen erfolgten mit Referenzbetriebsstoffen.

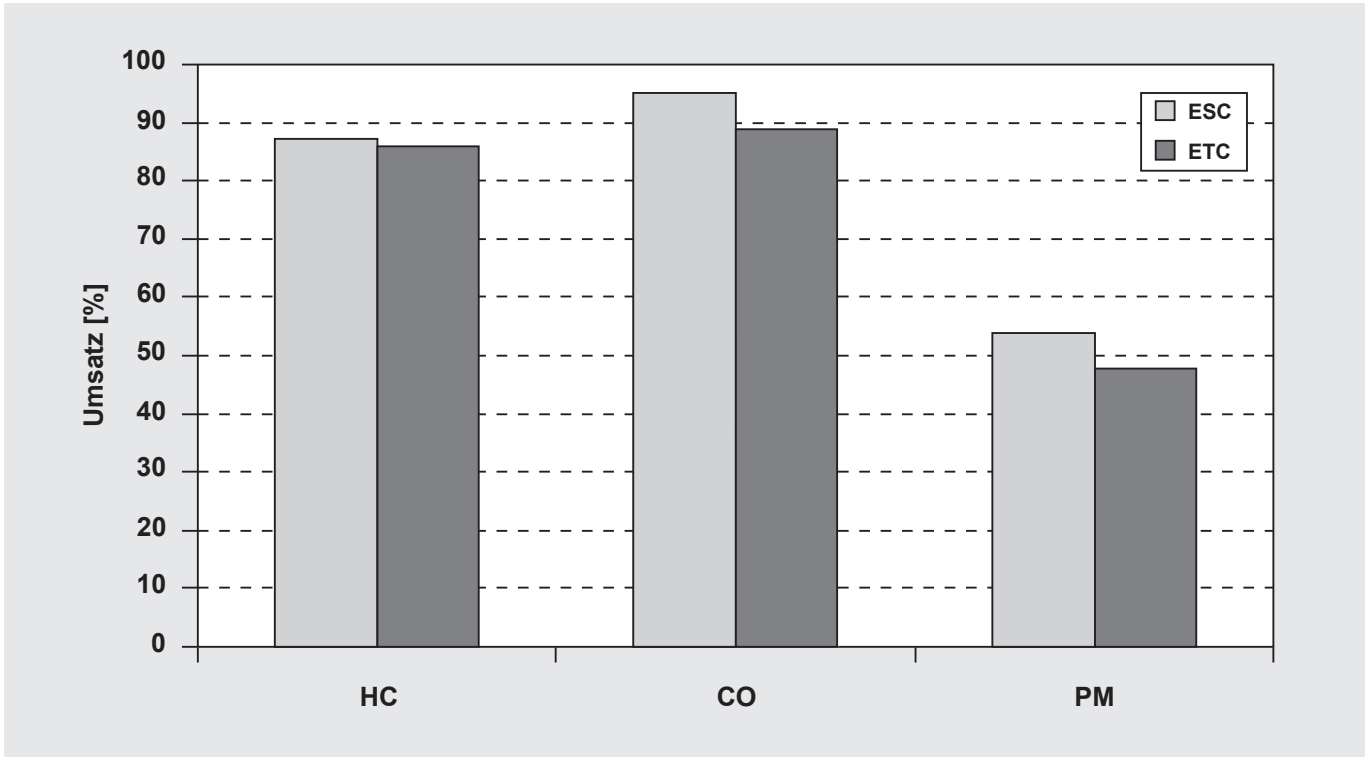


Abbildung 4.1.1: Umsätze des PM-Kat

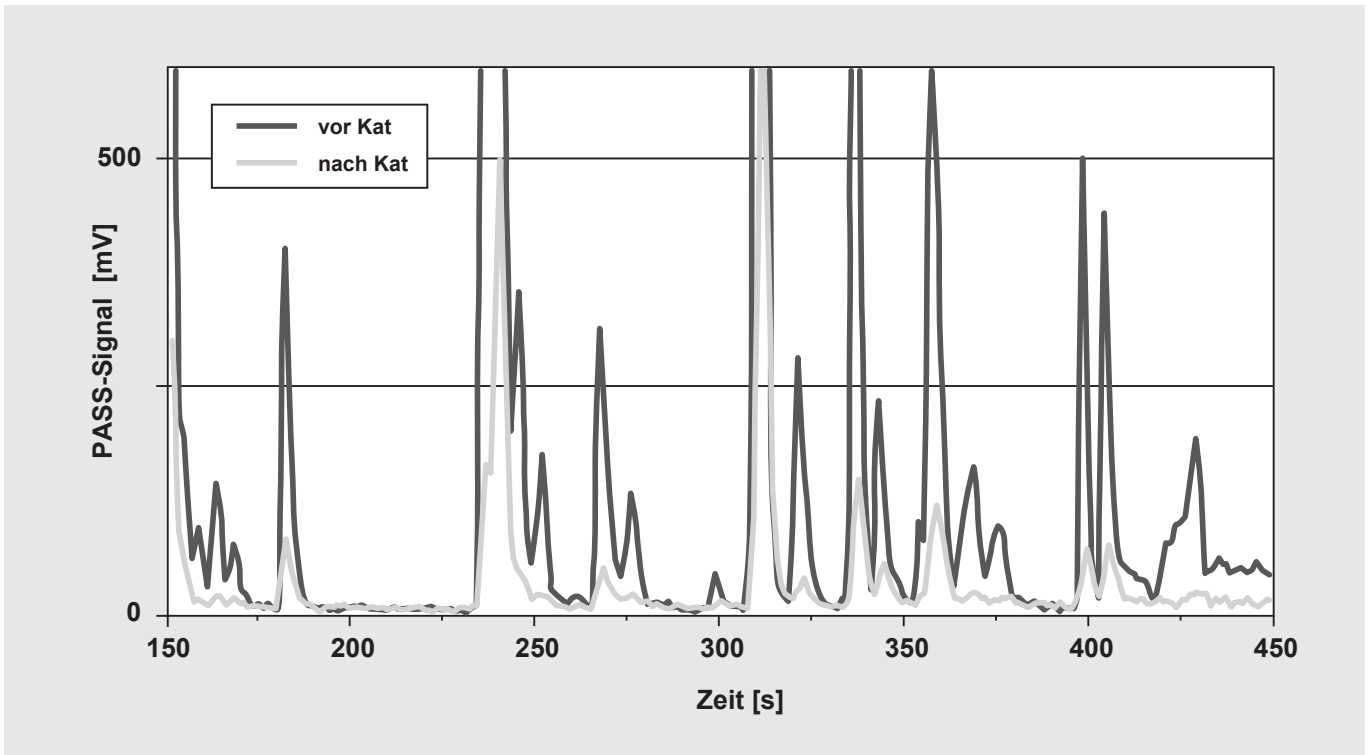


Abbildung 4.2.1: ETC Vergleich des Kohlenstoffsignals ohne und mit einem PM-Kat (EMITEC BC 150) Auswahl Teil des Stadtzyklus

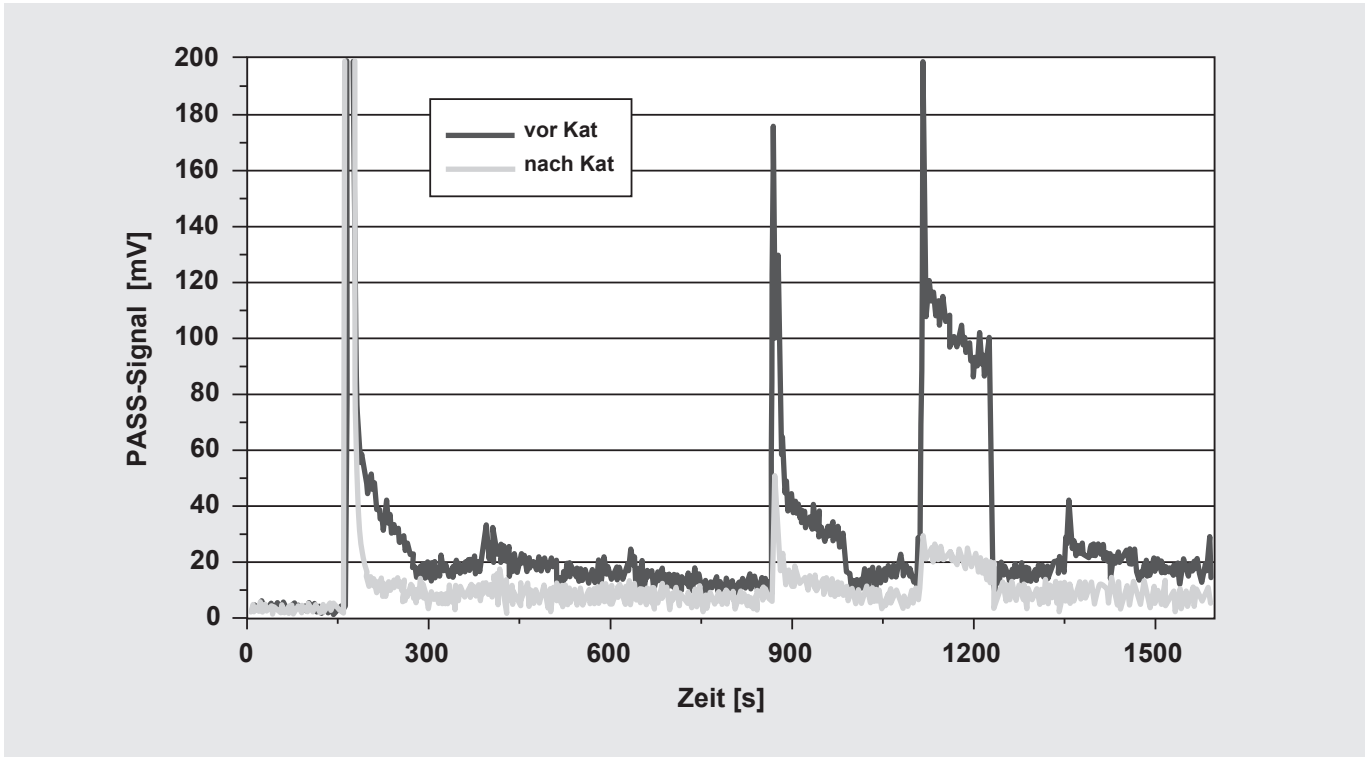


Abbildung 4.2.2: ESC Vergleich des Kohlenstoffsignals ohne und mit einem PM-Kat (EMITEC BC 150) Auswahl der ESC Stufen 8-11

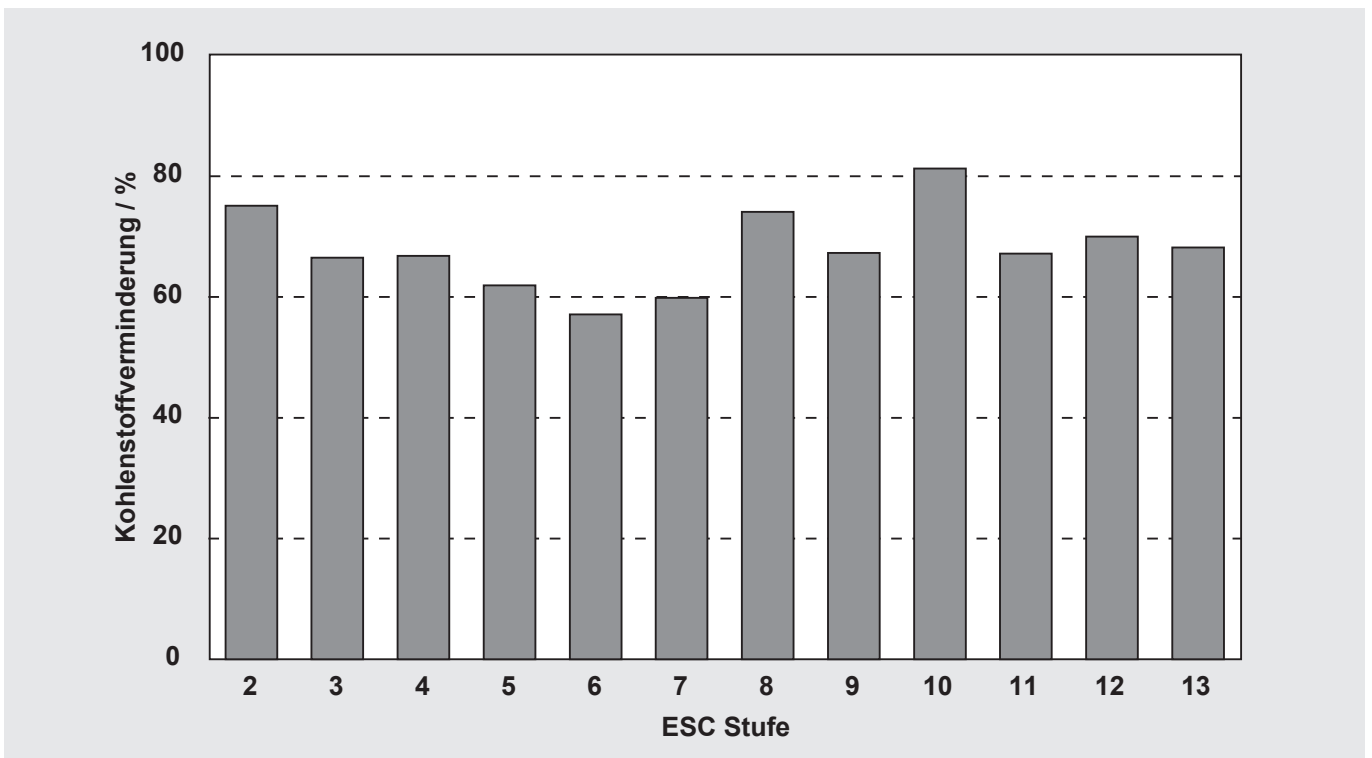


Abbildung 4.2.3: Vergleich der Kohlenstoffverminderung in % in einem ESC Test

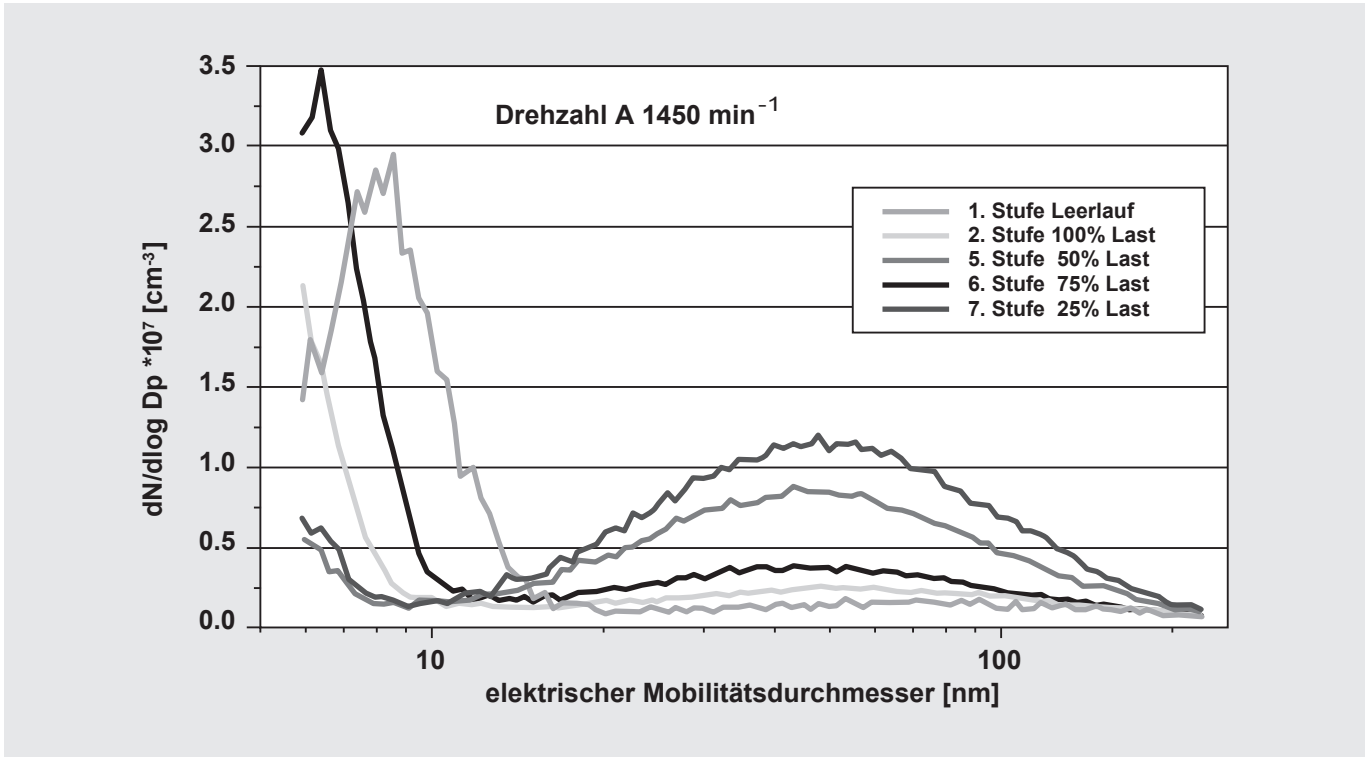


Abbildung 4.3.1.: Partikelgrößenverteilungsmessung bei Drehzahl A vor Kat im ESC

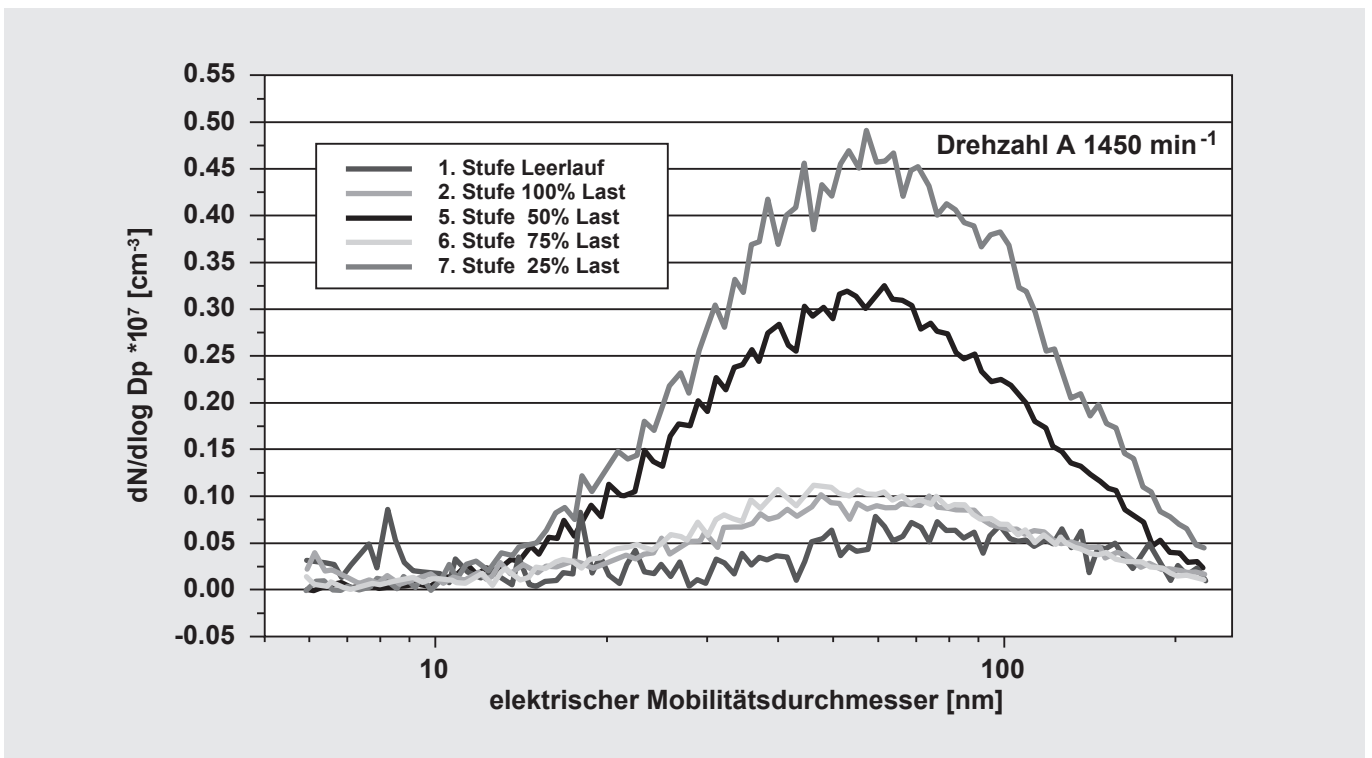


Abbildung 4.3.2.: Partikelgrößenverteilungsmessung bei Drehzahl A nach Kat im ESC

## 5. Diskussion der Ergebnisse

Die signifikanten Vorteile des PM-KAT-Systems gegenüber Partikelfiltern sind durch dessen offene Kanalstruktur bedingt und durch niedrigen Gegendruck, selektive Abscheidung von Ruß und Durchlässigkeit für Motorenölasche gekennzeichnet.

Es bestätigt sich, dass eine Absenkung des Nicht-Rußanteils der PM über die Qualität der Motorenbetriebsstoffe (S-Gehalt und Sulfatasche) [9] erreichbar ist. Der PM-KAT bewirkt nach bisheriger Kenntnis keine Verminderung des Ascheanteils (ASH) der PM.

PM-KAT-Systeme in Verbindung mit PM-minimierten Motoren können Partikelfilter ersetzen, die auf dem Prinzip von Oberflächen- und Tiefenfiltration beruhen, von denen bekannt ist [11], dass sie eine nur eingeschränkte Fahrzeugtauglichkeit besitzen.

Gegenüber einem GD-KAT-System verbleibt beim PM-KAT-System wegen der innermotorischen  $\text{NO}_x$ -Reduktion ein prinzipbedingter Kraftstoffmehrverbrauch, sodass die Entscheidung für das wirtschaftlichste EuroIV-Konzept auf der Basis der Einsatzart bzw. Jahreskilometerleistung des Fahrzeugs zu treffen ist.

## 6. Schlussfolgerungen und Ausblick

### 6.1 PM-KAT-Schalldämpfer für Nfz

Eine mögliche Applikation eines PM-KAT-Systems für ein Fahrzeug ist in Abb. 6.1.1 gezeigt. Es wird eine Kompaktmodulanordnung realisiert, um einen separaten Vorkatalysator (V-Kat) zur  $\text{NO}_2$ -Erzeugung zu vermeiden. Durch diese Maßnahme kann der Abgasgegendruck um ca. ein Drittel gesenkt werden. Da

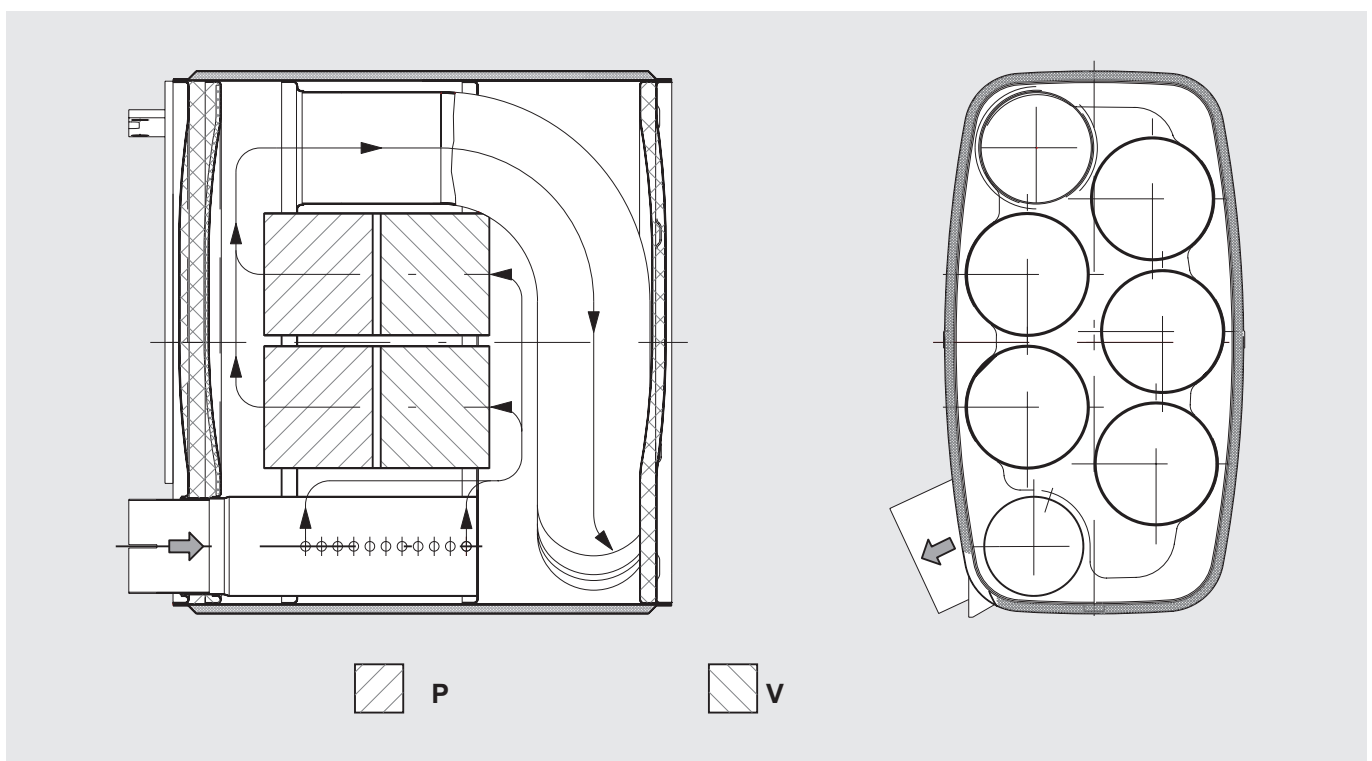


Abbildung 6.1.1: Aufbau eines PM-Kat-Hauptschalldämpfers für MAN TG-A-Fahrzeuge

sich die Abscheider P vom Typ BC wegen der aus Faservlies bestehenden Planlage noch nicht katalytisch beschichten lassen, werden derzeit andere Trägertypen z. B. der Typ BB (Welllage wie Typ BC, Planlage aus Lochfolie) erprobt. Ziel ist es, NO<sub>2</sub>-Erzeugung und Rußabscheidung durch einen katalytisch beschichteten Abscheider V zu kombinieren. Dadurch entsteht aus einem zweiteiligen PM-KAT-System der eigentliche PM-KAT, dem ein zusätzlicher Abscheider P strömungsabwärts hinzugefügt werden kann. Eine solche Anordnung wird sowohl den klassischen Oxidationskatalysator, als auch den Partikelfilter (bei niedrigem Rußemissionsniveau) zukünftig ersetzen.

## 6.2 Weiterentwicklungspotential

Nachdem bereits bei den ersten Versuchen gute Ergebnisse bei der Rußverminderung erzielt werden, bestehen gute Aussichten, die Wirkungsgrade der Rußabscheidung durch eine Reihe von Maßnahmen zu erhöhen. Dazu gehören eine Verminderung der Raumgeschwindigkeit unter 50.000 h<sup>-1</sup>, geometrische Variationen der Mischerschaukeln, strukturelle Änderungen der Planlagen und katalytische Beschichtungen des Trägers. Entwicklungsziel ist eine Rußkonvertierung von mehr als 70 %.

## 6.3 Ausblick

Katalysatoren auf Basis derartiger Trägerstrukturen wird wegen ihrer Multifunktionalität (Rußverminderung, Verbesserung Stofftransport, Strömungsgleichverteilung, Mischwirkung) die Zukunft der Abgasnachbehandlung gehören. Es ist denkbar, diese Trägerstrukturen im GD-KAT-Systems für alle Katalysatortypen einzusetzen, um dessen weitere Miniaturisierung zu ermöglichen.

## 7. Literaturverzeichnis

---

- [1] E. Jacob, A. Döring, 21. Intern. Wiener Motorensymp., Fortschrittberichte VDI Reihe 12, Nr. 420, Band 2, 2000, 311 - 329
- [2] A. Döring, E. Jacob in: A. Leipertz (Hrsg.) Motorische Verbrennung (V. Tagung), BEV Heft 2001.1, Esytec, Erlangen 2001, S. 513 - 528
- [3] Messungen mit LI<sup>2</sup>SA (Laser Induced Incandescence Soot Analyzer), Esytec, Schraml, S., et al., Application of a New Soot Sensor for Exhaust Emission Control Based on Time Resolved Laser Induced Incandescence (TIRE - LII) SAE Technical Paper Series. 2000
- [4] A. Döring, unveröffentlichte Ergebnisse 2002
- [5] N. D'Alfonso, S. Reisch, unveröffentlichte Ergebnisse 2001/2
- [6] Messungen mit PASS (Photoacoustic Soot Sensor), H. A. Beck, C. Haisch, R. Niessner, ABEME-Projektbericht, Dezember 2001, IWC, TU München
- [7] A. Döring, E. Jacob, DE 199 34 932 (1999)
- [8] R. Brück, P. Hirth, M. Reizig, P. Treiber, J. Breuer, SAE paper 2001-01-1950
- [9] E. Jacob, W. Gotre, D. Rothe, F. Rammer, K. Richter, 22. Intern. Wiener Motorensymposium, 28./29. April 2001, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 455, Band 1 (2001), S. 286 - 301
- [10] E. Jacob in: FVV-Workshop: „Abgasnachbehandlung“, Stuttgart, November 2001, erschienen als CD, FVV e.V., Frankfurt
- [11] F. I. Zuther, G. Emmerling in: A. Leipertz (Hrsg.) Motorische Verbrennung (V. Tagung), BEV Heft 2001.1, Esytec, Erlangen 2001, S. 543 - 558