

# **PM-Metalit Advanced – Der innovative Partikelfilter zur Reduktion der Nanopartikel**

Autoren:

Wolfgang Maus  
Jan Hodgson  
Christian Vorsmann  
Rolf Brück

## **Kurzfassung:**

Zukünftige PKW (Otto und Diesel) sowie Heavy-Duty Emissionsgesetzgebungen fordern neben der Partikelmassenreduktion auch eine Verminderung der Partikelanzahl. Herkömmliche Filter, mit heute üblichen Porositäten und in Verbindung mit neuen niedrig Ruß emittierenden Motoren, können aufgrund des fehlenden Rußfilterkuchens die Feinstpartikel nicht mit ausreichender Effektivität filtern. Eine notwendige Verkleinerung der Porengröße resultiert in höheren Druckverlusten.

Der PM-Metalit Advanced stellt eine neue Generation von Partikelfiltern für den automobilen Einsatz dar. Aufbauend auf dem bewährten Nebenstrom Tiefbettfilter-Konzept wird vor allem die Abscheidung der Nanopartikel durch elektrostatische Kräfte als „Diffusions- und Adhäsionsverstärker“ verbessert. Die in einem elektrischen Feld aufgeladenen Partikel können zu weit über 90 % ohne Gegendruckerhöhung abgeschieden werden.

Der Vortrag beschreibt die theoretische Auslegung, den Aufbau und Testergebnisse mit dem PM-Metalit Advanced.

## **Abstract:**

In addition to a reduction in particle mass, future emission legislation for passenger cars (petrol and diesel) and heavy-duty vehicles will also require a reduction in particle numbers. Conventional filters that combine current levels of porosity with new, low soot-emitting engines are unable to filter nanoparticles with sufficient effectiveness due to the lack of a soot filter cake. The necessary reduction in pore size would lead to greater pressure loss.

The PM Metalit Advanced represents a new generation of particulate filters for the automotive industry. Building on the proven partial-flow deep-bed concept the separation of nanoparticles in particular is improved by the application of electrostatic forces, which act as a diffusion and adhesion booster. The system is able to separate well over 90% of particles that have been charged in an electric field without any increase in backpressure.

This paper describes the theoretical design, the construction and test results using the PM Metalit Advanced.

## 1. Einleitung

Mit der Gesetzgebung EU 6 für PKW und EU VI für Nutzfahrzeuge wird neben den gasförmigen Emissionen und der Partikelmasse erstmalig auch die Partikelanzahl vom Gesetzgeber limitiert. Hierbei steht insbesondere die Reduktion der als gesundheitsgefährdend angesehenen Nanopartikel im Fokus. In Tabelle 1 sind die betreffenden Grenzwerte für Dieselmotoren aufgelistet.

Grenzwert	PKW			Heavy Duty (ETC)		
	PM [mg/km]	PN [#/#km]	NOx [g/km]	PM [mg/kWh]	PN [#kWh] (in Diskussion)	NOx [g/kWh]
EU 5 / V	5	-	0,18	30	-	2,0
EU 6 / VI	4,5	6 x 10 <sup>11</sup>	0,08	10	6 X 10 <sup>11</sup>	0,4

*Tabelle 1.1: Heavy Duty EU V/VI und PKW EU 5/6 Grenzwerte [1]*

Die Anzahlgrenzwerte für Partikelemissionen aus Nutzfahrzeugen und für PKW mit Ottomotor werden derzeit noch diskutiert. Der ursprüngliche Ansatz zur Limitierung der Partikelanzahl beinhaltete folgende Merkmale.

Der Anzahlgrenzwert sollte mit dem Massengrenzwert korrelieren und sollte zusätzlich durch die sogenannte Best Available Technology bestimmt werden.

Es muß jedoch die Frage gestellt werden welches die Best Available Technology ist und ob sie auch für den neuen Anspruch der Partikelanzahlreduktion die beste Technologie darstellt.

Mit den EU PMP-Vorhaben (Particulate-Measurement-Program) wurde eine Datenbasis sowohl für PKW- als auch für Nutzfahrzeug-Motoren geschaffen. Allerdings wurden bei den Messungen und den Vergleichen zwischen Partikelmasse und -Anzahl nicht zwischen Roh- und Tailpipe-Emissionen unterschieden. Insbesondere aber wurden bei der Korrelation der Tailpipe-Emissionen nicht die unterschiedlichen Filterraten bei den Anzahl- und Massenmessungen berücksichtigt.

Zum Beispiel entspricht bei einem typischen Nutzfahrzeug Dieselmotor ein Massengrenzwert von 10 mg/kWh bezogen auf die Motorrohmissionen einem Anzahlgrenzwert von etwa  $1 \times 10^{13}$  Partikeln pro kWh [2]. Dem gegenüber würde der momentan diskutierte Heavy-Duty-Grenzwert von  $6 \times 10^{11}$  Partikel / kWh einem Rohmissions-Massengrenzwert von kleiner 1 mg/kWh entsprechen. Damit schreibt die Partikelanzahlgesetzgebung einen um ca. Faktor 10 verschärften Massengrenzwert vor. Innermotorische Maßnahmen und Optimierung der Brennverfahren führen in der Folge zu Verbrauchs- und Emissionsabsenkungen und damit auch zu einer Partikelmassenreduzierung.

Mit überhastet eingeführten scharfen Partikelanzahlgrenzwerten werden motorische Weiterentwicklungen, die zu einem Wettbewerbsvorteil der europäischen Motorenindustrie in der Welt führen könnten, behindert oder gar verhindert, da man mit solchen innovativen Motoren zwar die Massengrenzwerte erreichen könnte, aber durch den Anzahlgrenzwert gezwungen ist, trotzdem einen Partikelfilter, auch zu Lasten des Kraftstoffverbrauchs und damit der CO<sub>2</sub> Emissionen (aufgrund des erhöhten Druckverlustes und der aktiven Regenerationsmaßnahmen), einzusetzen.

Das Ziel muß es also sein die zukünftigen Grenzwerte mit geringst möglichem Druckverlust und ohne aktive Regenerationsmaßnahmen einzuhalten. Dabei versteht es sich von selbst, dass hierin gleichzeitig ein erhebliches Kostenreduktionspotential auf der Abgasnachbehandlungsseite erarbeitet werden muss.

## 2. Filtertechnologien

Die technischen Anforderungen an einen Partikelfilter für den automobilen Einsatz sind aufgrund der hohen Temperaturen und raschen Temperaturwechseln sehr hoch. Die Abscheideleistung für Partikel mit einer Größe zwischen 10 und 500 nm sollte deutlich über 90% betragen und gleichzeitig der Druckverlust möglichst gering sein. Abbildung 1 zeigt den Abscheidegrad technischer Filtersysteme als Funktion des Partikeldurchmessers im Bereich 0,1 – 100 µm.

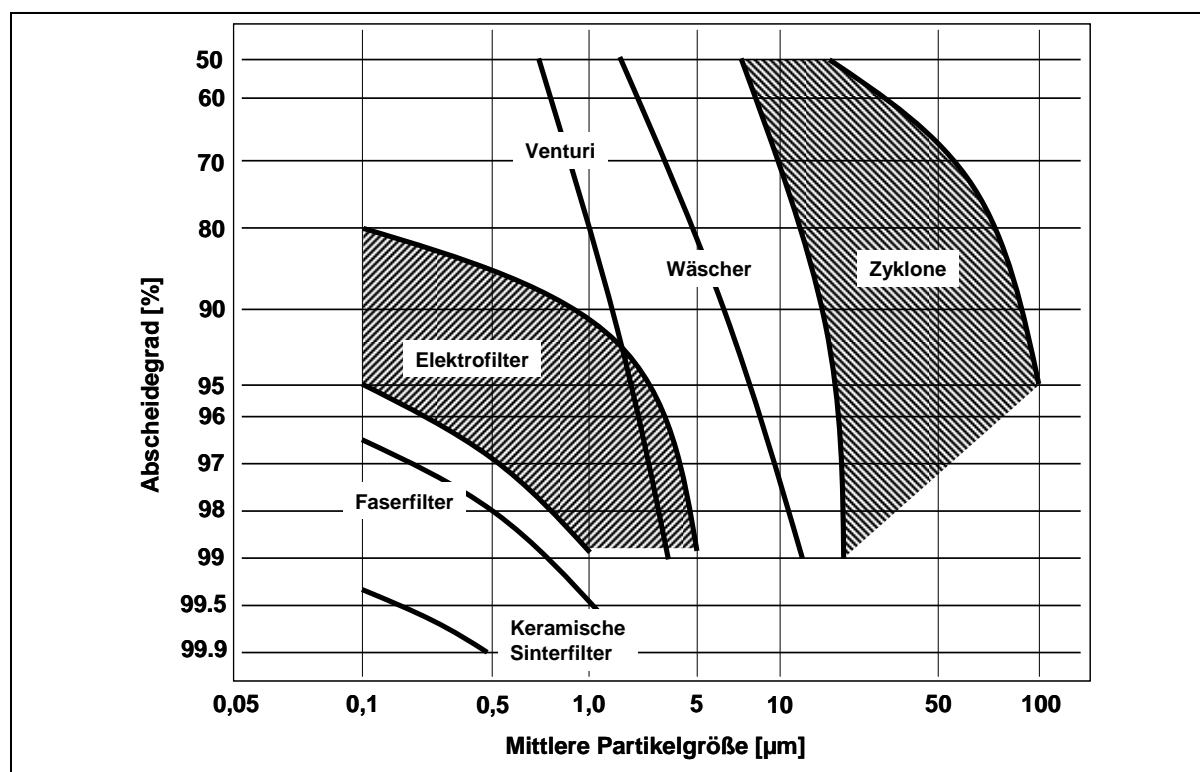


Abbildung 1: Abscheidegrad technischer Filtersysteme als Funktion des Partikeldurchmessers. [3]

Der Überblick zeigt dass vor allem oberflächenreiche Strukturen aus hochwarmfesten Materialien in Frage kommen. Aber auch klassische Elektrofilter zeigen hohe Filterraten bei kleinen Partikelgrößen.

### 2.1 Wirkungsweise von Partikelfiltern (Tiefenfilter)

Die Abscheidung von Partikeln, Feststoffen oder Tröpfchen erfolgt bei kleinen Partikeldurchmessern nicht durch einen Sperreffekt (Siebeffekt) sondern aus einer Kombination von Trägheitsabscheidung (Impaktion) durch Abfangen aus einer Grenzpartikelbahn (Interzeption) oder durch Molekularbewegung der extrem kleinen

Partikel (Diffusion). Abbildung 2 zeigt die Wirkungsbereiche der Filtermechanismen in Abhängigkeit der Partikeldurchmesser.

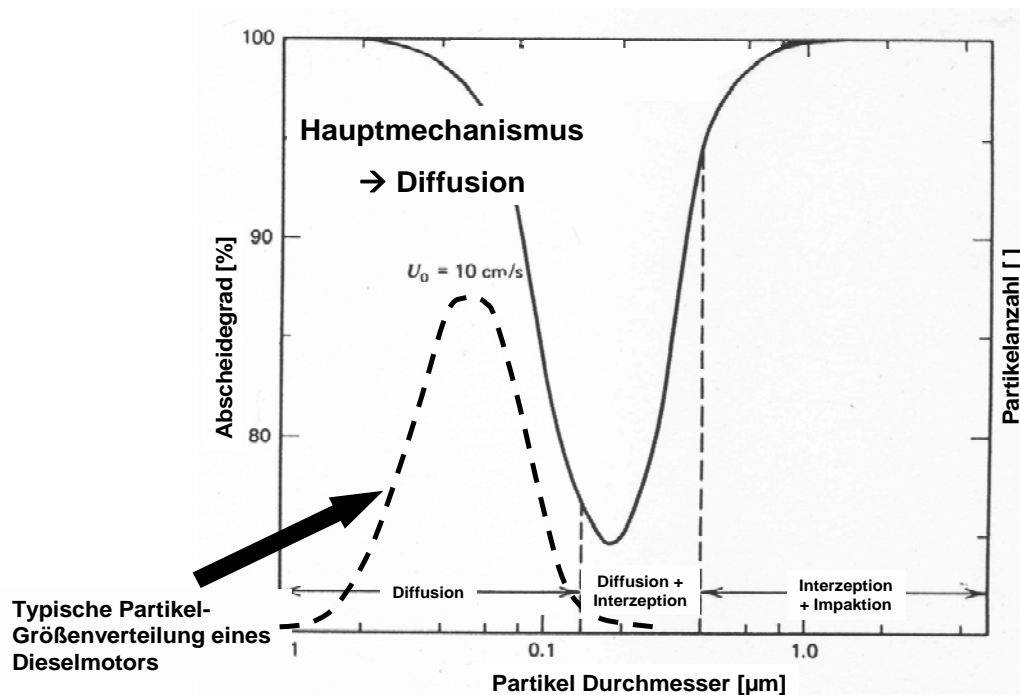


Abbildung 2: Filterwirkungsgrad eines Tiefenfilters als Funktion vom Partikeldurchmesser und den Filtermechanismen [7]

Die Wahrscheinlichkeit dass ein Partikel gefiltert wird hängt von der Filterstruktur, Porengröße der inneren Oberfläche, der Durchströmgeschwindigkeit und von der Filterdicke und damit der Verweilzeit ab. Die Bindung an den Oberflächen erfolgt in der Regel durch van der Waal'schen Kräfte.

Wichtig ist dass die Filter neben der Fähigkeit zur Abscheidung auch die Fähigkeit zur Rückhaltung der abgeschiedenen Partikel aufweisen.

Auf Filteroberflächen bereits abgeschiedene Partikel agglomerieren und bilden einen Filterkuchen. Dieser Filterkuchen aus locker abgelagertem Ruß erhöht die innere Oberfläche und verbessert damit den Abscheidegrad. Parallel erhöht sich der Druckverlust. Aus einem Tiefenfilter wird also im Laufe der Russabscheidung ein Oberflächenfilter mit steigendem Filterwirkungsgrad. Nebenstrom-Filter tragen diesem Umstand Rechnung indem immer nur ein Teilstrom ( $\Rightarrow$  niedrigere Geschwindigkeit  $\Rightarrow$  höherer Filterwirkungsgrad), dafür aber mehrfach hintereinander durch das Filtermedium geleitet wird.

## 2.2 Elektrofilter

Elektrofilter oder elektrostatische Abscheider sind Anlagen zur Abscheidung von Partikeln aus Gasen die auf dem elektrostatischen Prinzip beruhen. Nach dem coulombschen Gesetz übt jede Ladung auf jede andere Ladung eine abstoßende oder anziehende Kraft aus. Bereits 1906 führten Versuche von F. Cottrell zur ersten erfolgreichen kommerziellen Anwendung bei der Abscheidung von Schwefelsäurenebel in den Pulverfabriken von Pinole und der Selby-Hütte.

Die Abscheidung im Elektrofilter kann in 5 Phasen unterteilt werden [4]:

### 1. Erzeugung der elektrischen Ladungen

Die elektrischen Ladungen werden in einem elektrischen Feld erzeugt. Unter einem elektrischen Feld versteht man den Raum zwischen zwei ungleich geladenen Objekten. Die elektrische Feldstärke in dem Feld wird von der Spannung und dem Abstand zwischen den Objekten bestimmt. Das elektrostatische Feld ist zeitlich unverändert wodurch kein Magnetfeld existiert.

### 2. Aufladung der Partikel im elektrischen Feld

Die Aufladung eines Partikels mit seinem Eintritt in den vom Sprühstrom durchflossenen Raum erfolgt durch die Anlagerung von negativen Ladungen, wenn diese mit dem Partikel zusammentreffen. Der Aufladeprozess geschieht durch eine Feld- und Diffusionsaufladung, wobei die Felddaufladung primär Partikel  $> 1\mu\text{m}$  betrifft. (Abbildung 3)

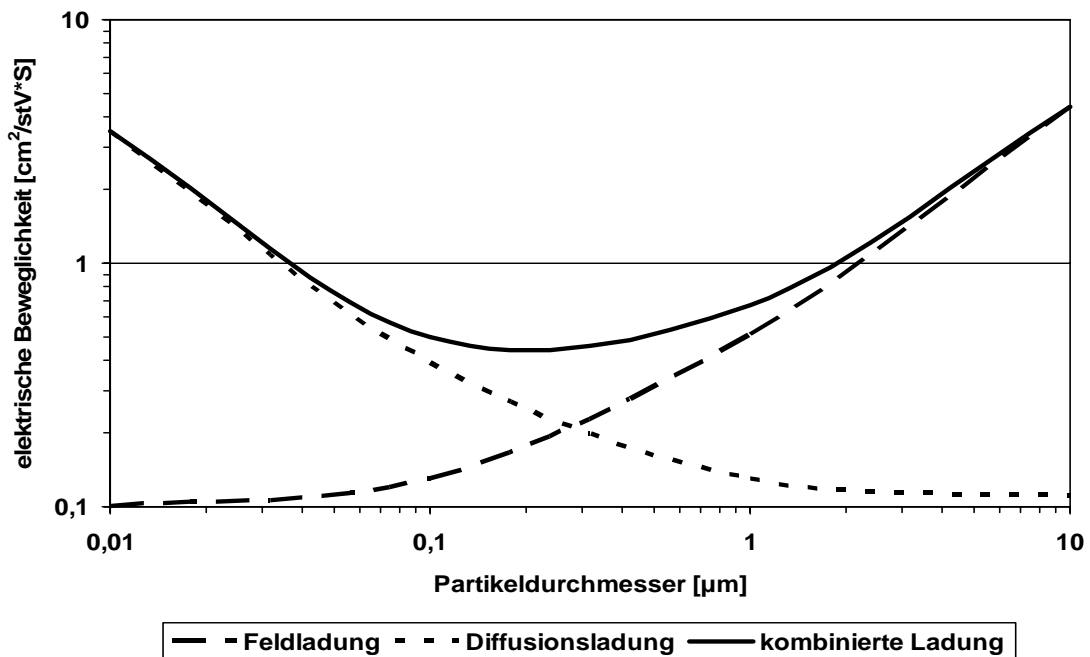


Abbildung 3: Aufladeprozess eines Partikels im elektrischen Feld als Funktion des Partikeldurchmessers [4]

### 3. Transport der geladenen Partikel zur Niederschlagselektrode

Die aufgeladenen Partikel wandern gemäß dem Stokeschen Gesetz zur Niederschlagselektrode wo sie ihre Ladung abgeben.

### 4. Anhaftung der Partikel an der Niederschlagselektrode

Nachdem die Partikel ihre Ladung abgegeben haben haften sie durch Haftkräfte hervorgerufen durch die elektrische Feldstärke in der abgelagerten Partikelschicht und durch Adhäsionskräfte der Partikel untereinander und zur

Filterwand. Partikel gelten als abgeschieden wenn die Haftkräfte größer als die Strömungskräfte sind.

## 5. Abreinigung der Partikel

Das Abreinigen erfolgt bei Industrieelektrofilter meist durch Abklopfen der Partikel von der Sammelelektrode. Die abgeklopften Partikel fallen in einen Bunker und können dort entsorgt werden. Beim Einsatz von Elektrofiltern für den automobilen Bereich muß eine kontinuierliche Regeneration angestrebt werden.

Aus der Rauchgasreinigung von Kraftwerken sind Filterwirkungsgrade von bis zu 99,9% bekannt.

### 2.3 Elektrofilter für den automobilen Einsatz

Im automobilen Einsatz sollen primär Russpartikel abgeschieden werden. Aus der Vergangenheit sind bereits Elektrofilterverfahren für den automobilen Bereich bekannt. Zum einen handelt es sich um die sogenannte „Russweiche“ bei der Partikel in einem elektrostatischen Abscheider abgeschieden, aber dort nicht regeneriert werden. Nach Erreichen einer kritischen Größe werden die agglomerierten Partikel aufgrund der Gaskräfte wieder abgelöst. Die agglomerierten Partikel können dann durch den Einfluß der Massenträgheit in einen gereinigten und einen angereicherten Teilstrom getrennt werden. Der angereicherte Teilstrom kann dann in einem Partikelfilter klassisch gefiltert und diskontinuierlich ähnlich einem Wall-flow Filter regeneriert werden, oder in einem Zyklon abgeschieden werden.

Das Ziel bei Elektrofiltern für den mobilen Einsatz muß es sein eine kontinuierliche Regeneration an der Abscheideelektrode zu erreichen. Die kontinuierliche Regeneration geschieht mit dem im Abgas enthaltenen  $\text{NO}_2$ . Um die Reaktion vor allem bei niedrigen Temperaturen vollständig ablaufen zu lassen sind große Flächen notwendig um die Zugänglichkeit des  $\text{NO}_2$  zu den Partikeln zu gewährleisten und zu erhalten. Es ist also notwendig die Partikel möglichst auf eine große Abscheidefläche zu verteilen um die Reaktion mit  $\text{NO}_2$  zu ermöglichen.

Aufgrund der üblicherweise auftretenden Vergrößerung der Partikeldurchmesser muß der Partikelmesstechnik besonderer Aufmerksamkeit gewidmet werden, da u. a. die Probenentnahmestellen eine mit steigendem Partikeldurchmesser ansteigende „Durchlässigkeit“ zeigen.

### 3. Berechnung der elektrostatischen Abscheidung von Russpartikeln [5] [6]

Die Koronaentladung besteht aus einem aktiven und einem passiven Bereich. Im aktiven Bereich werden die Elektronen freigesetzt.

In dem passiven Bereich der Koronaentladung werden die Partikel durch negative Ionen geladen. Dieser Prozess läuft über zwei Mechanismen ab. Der erste Mechanismus ist die Feldladung. Hier werden die Partikel über Ionen geladen, die sich in Richtung des elektrischen Feldes bewegen. Die Ladung der Partikel hängt hierbei von der elektrischen Feldstärke  $E$  ab. Bei der Diffusionsaufladung, dem

zweiten Mechanismus, erfolgt die Aufladung der Partikel durch zufällige Zusammenstöße mit thermisch bewegten Ladungsträgern (s. a. Abbildung 3)

Die Elektrische Feldstärke E für einen Draht / Zylinder – Elektrofilter berechnet sich nach folgender Formel.

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_t}{r_w}\right)} \quad (1)$$

E	=	elektrische Feldstärke	[V/m]
U	=	Spannung	[V]
r	=	radiale Lage des Partikels	[m]
r <sub>t</sub>	=	Durchmesser des Rohres	[m]
r <sub>w</sub>	=	Durchmesser der Drahtelektrode	[m]

Die Partikel die sich durch das elektrische Feld bewegen erfahren eine Ladung. Um die Sättigungsladung für die Partikel, unter Berücksichtigung beider Ladungsmechanismen zu bestimmen, kann diese nach Cochet berechnet werden.

$$q_{sat} = \left[ \left(1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{\left(1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_p}\right)}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right) \right] \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (2)$$

q <sub>sat</sub>	=	Sättigungsladung	[C]
λ	=	freie Weglänge der Gasmoleküle	[m]
d <sub>p</sub>	=	Partikeldurchmesser	[m]
ε <sub>r</sub>	=	relative Dielektrizitätskonstante der Partikel	[-]
ε <sub>0</sub>	=	Dielektrizitätskonstante des freien Raumes	[C/Vm]

Durch dividieren von q<sub>sat</sub> durch die Elementarladung e erhält man die Anzahl der Ladungsträger n<sub>e, sat</sub>.

$$n_{e, sat} = \frac{q_{sat}}{e} \quad (3)$$

n <sub>e, sat</sub>	=	Anzahl aufgenommene Elementarladung	[-]
e	=	1,6 * 10 <sup>-19</sup>	[C]

In Abbildung 4 ist für typische Spannungswerte eines elektrostatischen Filters die Abhängigkeit der Ladung von der elektrischen Feldstärke und des Partikeldurchmesser dargestellt.

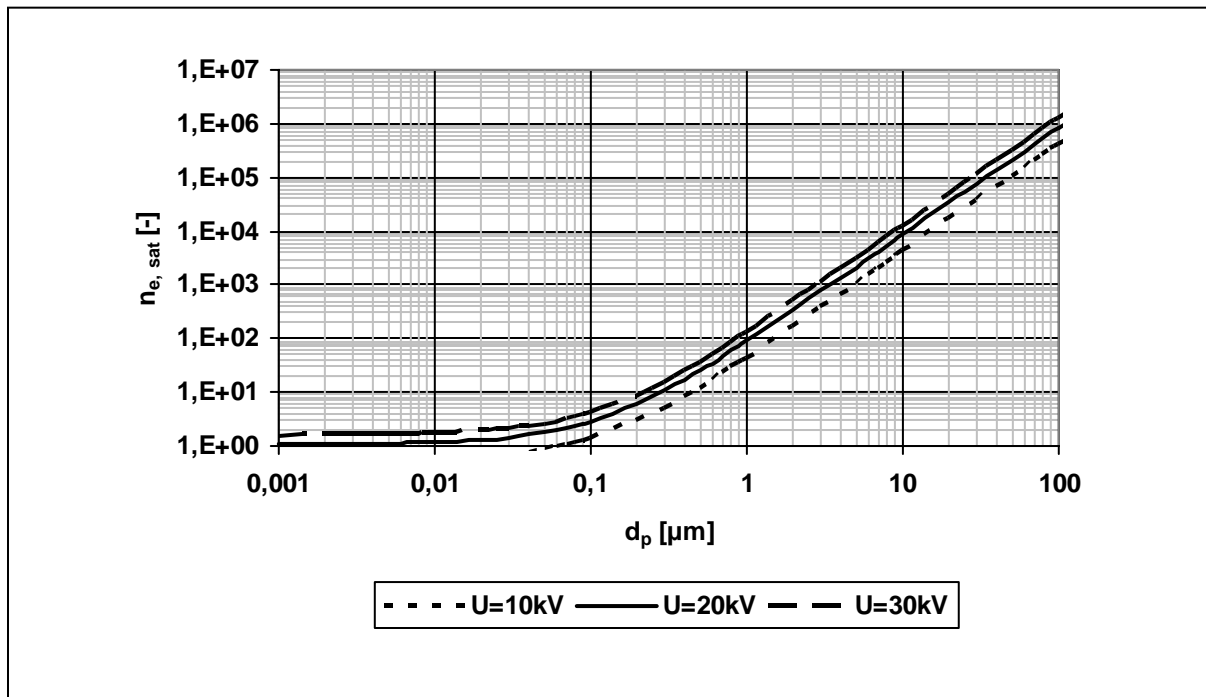


Abbildung 4: Abhängigkeit der elektrischen Ladung vom Partikeldurchmesser bei verschiedenen Spannungen

Die tatsächlich aufgebrauchte Ladung auf ein Partikel in Abhängigkeit der Zeit und Zeitkonstanten können folgendermaßen berechnet werden.

$$q_p(t) = q_{sat} \cdot \frac{t}{t + \tau_Q} \quad (4)$$

$$\tau_Q \approx \frac{4 \cdot \epsilon_0}{j_{NE} / E} \quad (5)$$

$q_p(t)$	=	Ladung als Funktion der Zeit	[C]
$t$	=	Zeit	[ms]
$\tau_Q$	=	Zeitkonstante	[ms]
$j_{NE}$	=	Stromdichte	[A/m <sup>2</sup> ]

Mit der berechneten Ladung der Partikel kann die Abwanderungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Auf ein geladenes Partikel wirkt eine elektrostatische Kraft  $F_{el}$  und entgegengesetzt die Widerstandskraft  $F_w$ . Eine Geschwindigkeitskomponente ist vorhanden, sobald die elektrische Kraft größer wie die Widerstandskraft ist. Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Abwanderungsgeschwindigkeit  $w_p$  berechnen.

$$F_{el} = q \cdot E \quad (6)$$

$$F_w = 3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \eta_F \cdot w_p \quad (7)$$

$$0 = q \cdot E - 3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \eta_F \cdot w_p \quad (8)$$

$$w_p = \frac{q \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \eta_F} \quad (9)$$

$F_{el}$	=	elektrostatische Kraft	[N]
$F_w$	=	Widerstandskraft	[N]
$\eta_F$	=	dynamisch Viskosität	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$w_p$	=	Driftgeschwindigkeit	[m/s]

Für Partikel die im Bereich der freien Weglänge der Gasmoleküle  $\lambda$  liegen nimmt die Widerstandskraft ab. Deshalb muss eine Korrektur eingeführt werden. Diese geschieht durch den Cunningham-Faktor  $Cu$ .

$$Cu = 1 + 2,429 \cdot \frac{\lambda}{d_p} + 0,84 \cdot \frac{\lambda}{d_p} \cdot e^{\left[-0,435 \cdot \frac{d_p}{\lambda}\right]} \quad (10)$$

$$w_p = \frac{q \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \eta_F} \cdot Cu \quad (11)$$

$Cu$	=	Cunningham-Faktor	[-]
------	---	-------------------	-----

Die Ablagerungseffektivität der Partikel lässt sich mit Hilfe der Driftgeschwindigkeit berechnen. Die geschieht nach der Formel von Deutsch.

$$T = 1 - e^{\left(-\frac{w_p \cdot A_T}{V}\right)} \quad (12)$$

$T$	=	Abscheideeffektivität	[-]
$A_T$	=	Abscheidefläche	[m <sup>2</sup> ]
$V$	=	Gasvolumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]

In Abbildung 5 ist die Abscheideeffektivität in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und der elektrischen Feldstärke in turbulenter Gasströmung dargestellt.

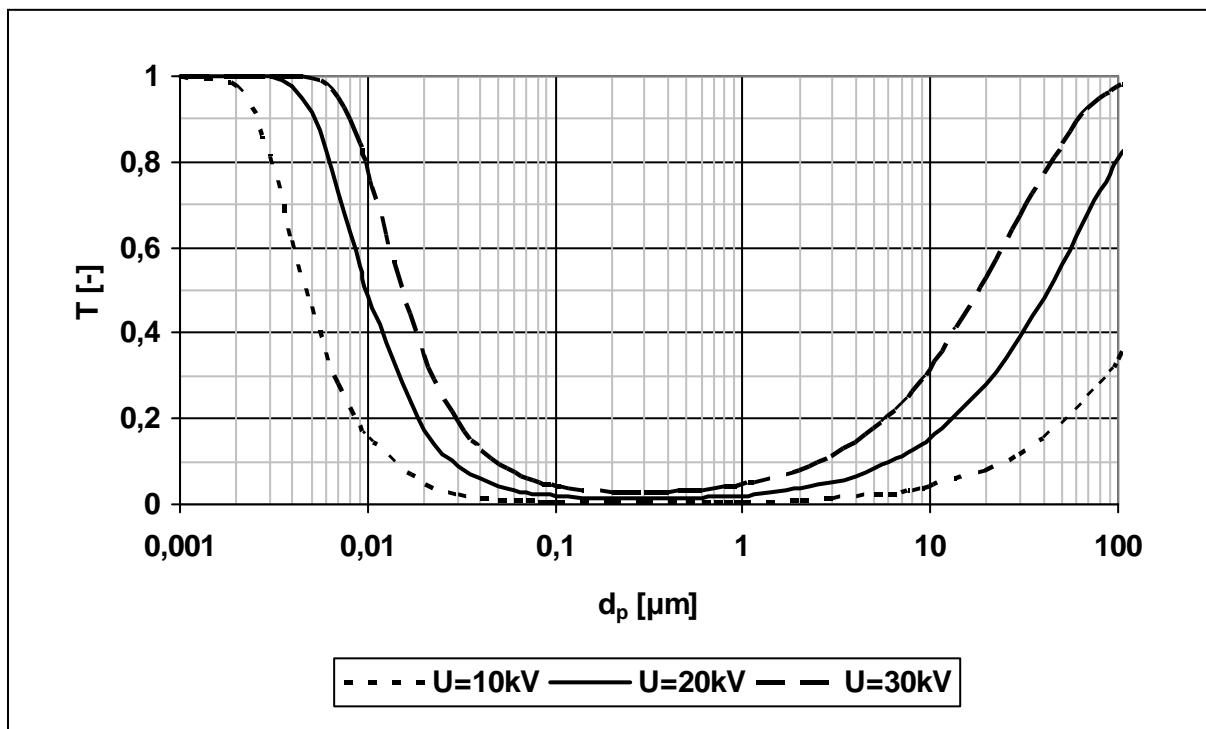


Abbildung 5: Abscheideeffektivität in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und der elektrischen Feldstärke in turbulenter Strömung

Bei der Sättigungsladung wie auch bei der Abscheidewahrscheinlichkeit kann man einen großen Einfluss der elektrischen Feldstärke sowie des Partikeldurchmessers erkennen. Weiter ist die Abscheidewahrscheinlichkeit, besonders der kleinen Partikel, abhängig von der freien Weglänge der Gasmoleküle und somit von der Temperatur.

Mit der berechneten, durch das elektrische Feld auf ein Partikel wirkenden Kraft, kann mit Hilfe von CFD-Programmen die Abscheidung simuliert werden. In Abbildung 6 ist hierfür ein Beispiel gezeigt. Für den gezeigten Anwendungsfall, Abscheidung in einem Kanal mit laminarer Strömung, mussten die Gleichungen angepasst werden. Die schlechtere Abscheidung der größeren Partikeln verdeutlicht die Notwendigkeit von Strömungseinbauten in den Kanälen.

#### 4. PM-Metalit Advanced

Die Entwicklung von Elektrofiltern, elektrostatischen Agglomeratoren und Russweichen mit Zyklonabscheider wurde in den vergangenen 25 Jahren wiederholt gestartet. Gescheitert sind die Versuche zum einen durch den relativ großen apparativen Aufwand für die Hochspannungserzeugung und vor allem an der Dauerhaltbarkeit der elektrischen Hochspannungsdurchführung im Abgassystem. Verschmutzungen führten teilweise nach kurzen Betriebszeiten zu Kurzschlüssen und elektrischen Überschlüssen. Aufgrund der im Vergleich zum NO<sub>2</sub> hohen Rußrohmissionen und den relativ kleinen Filterflächen konnte der Ruß in den bekannten Filterkonstruktionen nicht passiv regeneriert werden, sondern wurde gesammelt.

Heute sind moderne Hochspannungsnetzteile kaum größer als ein Handy und können zudem hochdynamisch geregelt werden.

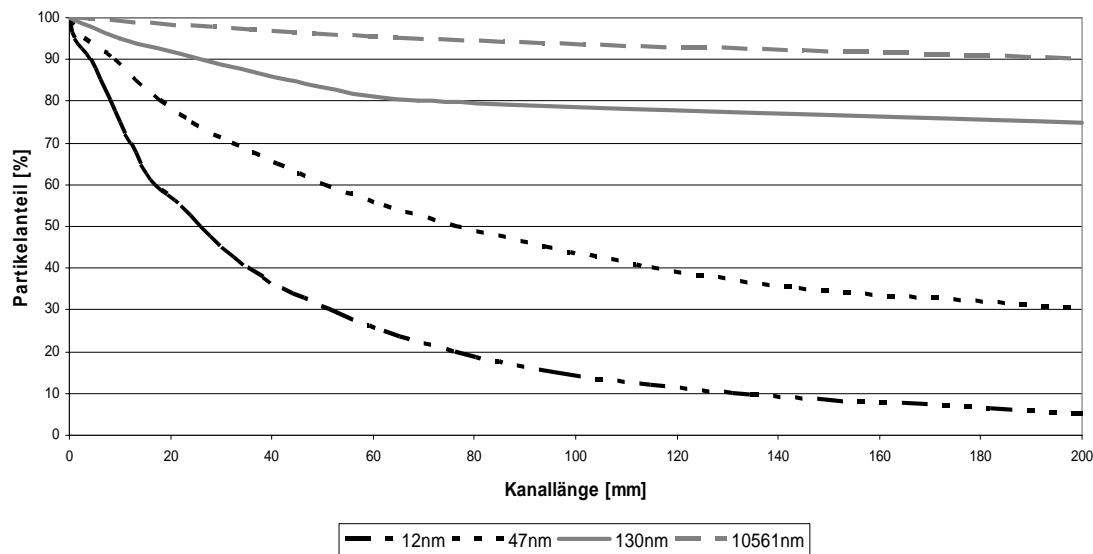


Abbildung 6: Berechnete Partikelabscheidung in einem Kanal

Eine elektrische Durchföhrung wird zwar immer noch benötigt, aber zum Einen sind die Russrohmissionen der Motoren deutlich niedriger als in der Vergangenheit, wodurch die Verschmutzungsneigung vermindert wird, und zum Anderen können die modernen Hochspannungsnetzteile so geregelt werden dass Kurzschlüsse vermieden werden.

Wie in 2.3 bereits beschrieben muß das Ziel eines elektrostatischen Filters im Automobil sein den gefilterten Ruß mit rein passiver Regeneration zu oxidieren. Dafür ist es notwendig den Ruß auf einer großen Oberfläche zu verteilen, um die Reaktion mit dem im Abgas enthaltenden  $\text{NO}_2$  zu ermöglichen. Plattenelektrofilter bieten zwar große Oberflächen sind mechanisch aber nicht für den Einsatz im Abgasstrang geeignet.

Metallische Wabenkörper werden seit langem für Katalysatoren im Automobil und Zweirädern eingesetzt und verbinden die Vorteile von mechanischer/thermischer Dauerhaltbarkeit, niedrigem Druckverlust, großen Oberflächen und elektrischer Leitfähigkeit.

Aus diesem Grund wurde ein metallischer Wabenkörper der gleichzeitig als Abscheideelektrode funktioniert entwickelt. Als Basis diente der Nebenstrom Tiefbettfilter PM-Metalit. Die Konstruktion eignete sich besonders um zu verhindern, dass abgelagerter Ruß im dynamischen Betrieb wieder ausgeblasen werden kann. Die in den Kanälen eingebauten Schaufeln stören die laminare Kanalströmung und verbessern die elektrostatische Abscheidung der größeren Partikel. Der PM-Metalit wird heute bereits in Großserie gebaut und hat sich bei Nutzfahrzeugen und NonRoad Anwendungen seit Jahren bewährt.

Um eine hohe Effektivität zu erreichen ist es notwendig das elektrische Feld möglichst gleichmäßig über dem gesamten Querschnitt vor dem Wabenkörper aufzubauen (Abbildung 7)

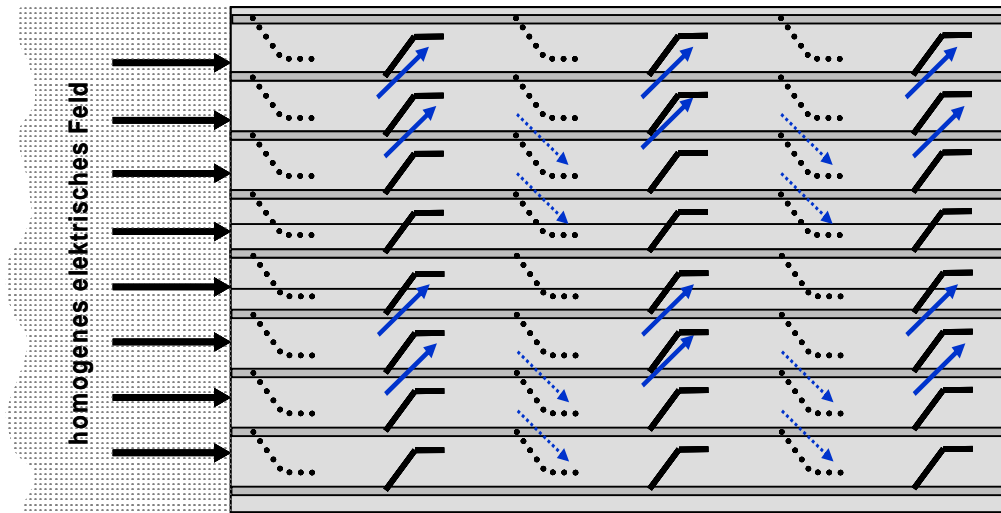


Abbildung 7: Metallischer Nebenstrom Tiefbettfilter PM-Metalit als Abscheideelektrode mit Leitschaukeln in den Kanälen

Insbesondere bei großen Katalysatorquerschnitten ist der Aufbau des elektrischen Felds mit Hilfe einer einzelnen Sprühelektrode schwierig. Mehrere Elektroden erhöhen jedoch den Aufwand und müssten elektrisch verschaltet werden. Aus diesem Grund wurde ein zweiter metallischer Wabenkörper als Stromverteiler konzipiert. Die Elektroden können in den Wabenkörper eingelötet werden. Die Anzahl und Form der Elektroden kann an die jeweiligen Randbedingungen angepasst werden (Abbildung 8)

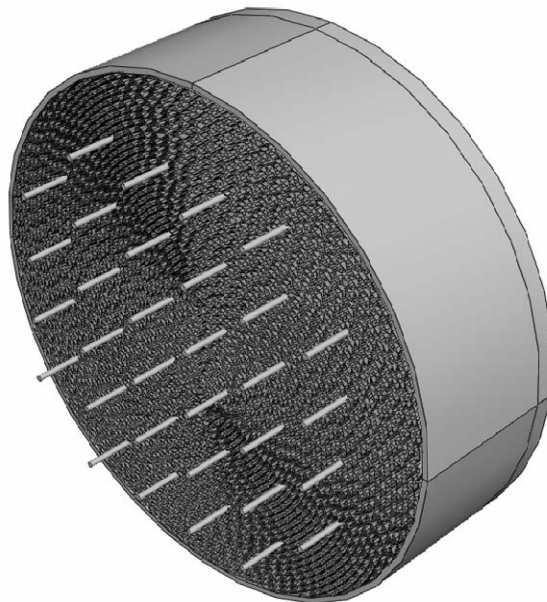
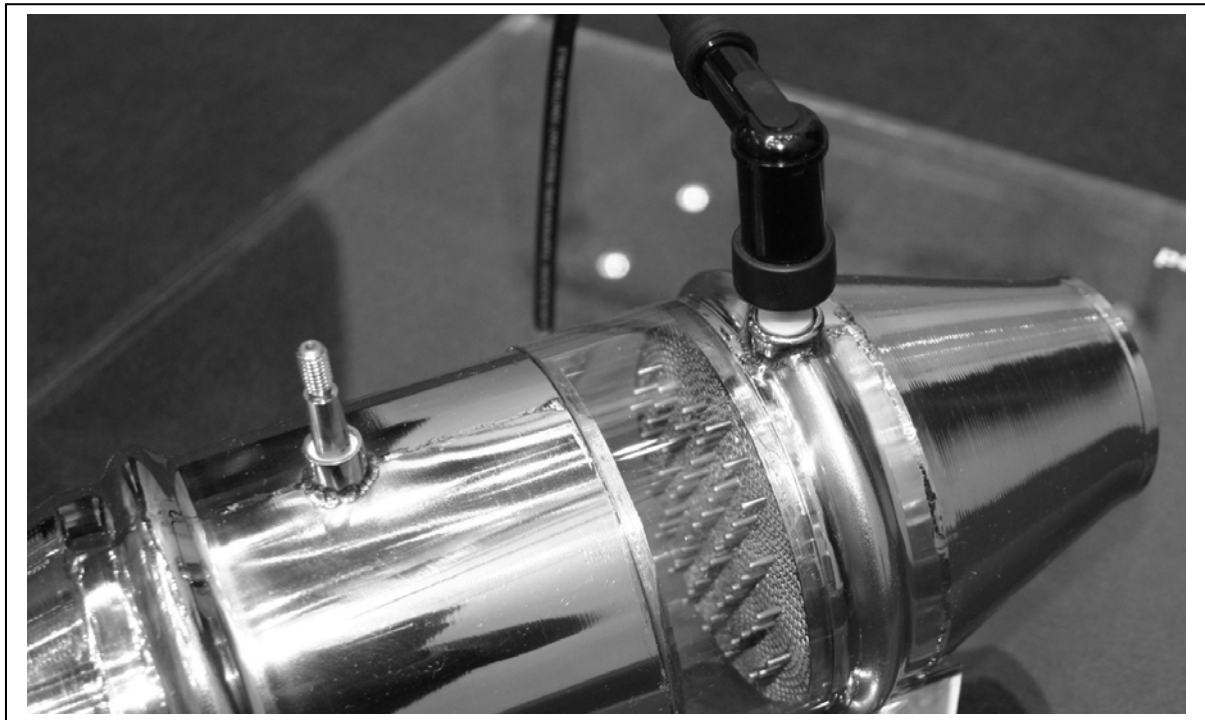


Abbildung 8: Metallischer Wabenkörper als Stromverteiler mit eingesetzten Elektroden

Die Hochspannungsisolation und Befestigung erfolgt über den Umfang des Wabenkörpers. Um Verunreinigungen zu vermeiden werden speziell entwickelte Ablenkstrukturen eingesetzt. Das elektrische Feld baut sich zwischen den Spitzen der Elektroden und dem „Abscheiderträger“ auf. Sowohl der „Stromverteilerträger“ als

auch der „Abscheiderträger“ können katalytisch beschichtet werden. Abbildung 9 zeigt den Zusammenbau und das elektrische Feld zwischen den beiden Metallträgern.



*Abbildung 9: PM-Metalit advanced bestehend aus Stromverteilerträger mit eingelöteten Elektroden und Abscheiderträger*

Mit dieser Konstruktion wird der Wirkungsgrad des bekannten PM-Metalit Filters durch die elektrostatische Aufladung der Partikel verstärkt. Die elektrostatischen Kräfte verstärken die Diffusionsabscheidung durch eine zusätzliche Kraftkomponente.

## **5. Versuchsergebnisse**

Der PM-Metalit advanced befindet sich in der Vorentwicklungsphase. Erste Versuche wurden am dynamischen Motorprüfstand an einem EU IV PKW Dieselmotor durchgeführt. Um unabhängig vom Motorbetrieb auch eine Massenstromvariation fahren zu können wurde hinter der Abgasturbine ein Verteiler eingebaut der es erlaubt einen Teil des Abgases bei Bedarf durch einen Bypass abzuleiten.

Ziel der ersten Versuche war es zunächst festzustellen ob der Ruß sich nur an der Stirnflächen des „Abscheiderträgers“ abgeschieden wird oder der ganze Träger genutzt wird. Aus diesem Grund wurde ein Metallträger in Scheiben erodiert und mit einem Luftspalt von 2 mm in der Abgasanlage montiert (Abbildung 10).

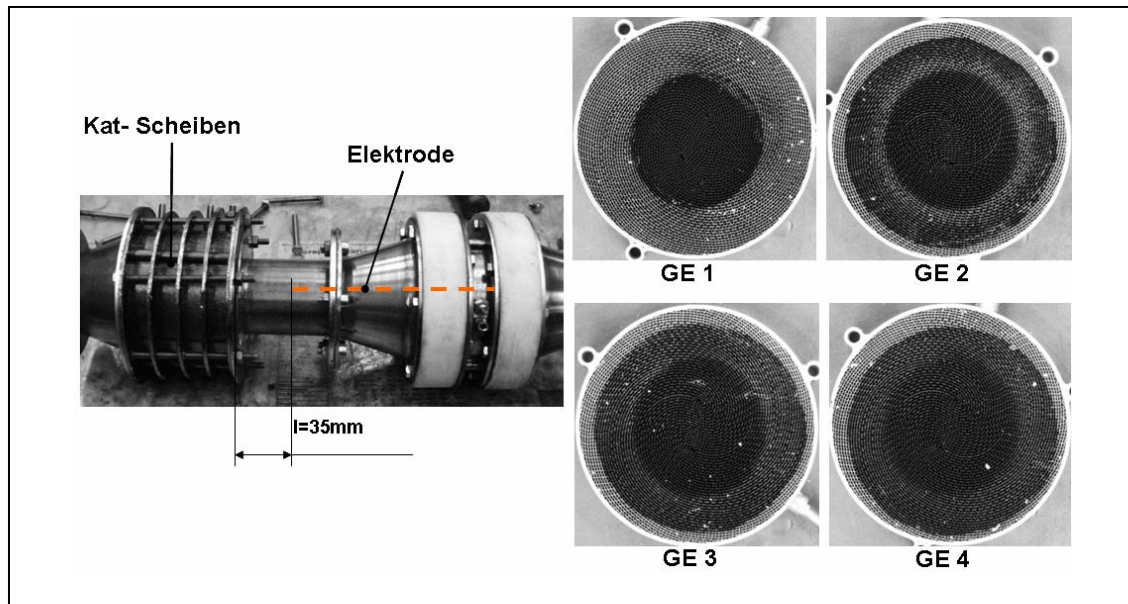


Abbildung 10: Versuchsaufbau: „Abscheiderträger“ in 4 Scheiben mit vorgeschalteter einzelner Stabelektrode

Die einzelne Elektrode war in einem Abstand von 35 mm vor dem Abscheider positioniert. Aufgrund der Elektrodenkonstruktion und des Abstands sollte sich das elektrische Feld nur über einen Teil des Trägerdurchmessers aufbauen um gezielt Bereiche die im elektrischen Feld liegen von benachbarten zu unterscheiden. Abbildung 11 zeigt die Rückseiten des Katalysatorscheiben.

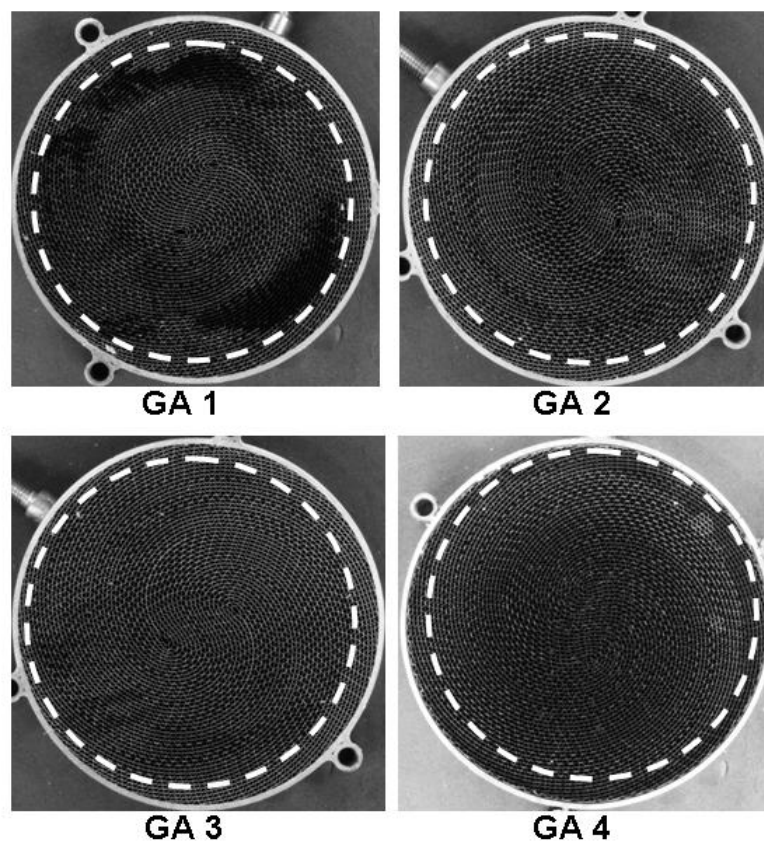


Abbildung 11: Rückseiten der Katalysatorscheiben 1 – 4 (in Strömungsrichtung)

Deutlich ist auf der ersten Scheibe der Ruß in den Kanälen zu erkennen. Die Ablagerung erstreckt sich jedoch nur in dem Bereich des aufgebauten elektrischen Feldes. Aufgrund des Spaltes zwischen den Scheiben gab es einen Queraustausch von Gas und geladenen Partikeln über den Querschnitt so dass die Ablagerungszone der 2. bis 4. Scheibe deutlich größer ist. Die Tatsache dass auch am Ende der letzten Scheibe noch Ruß zu erkennen ist belegt eine komplette Ausnutzung der Abscheiderfläche und damit eine ideale Voraussetzung für eine passive Regeneration.

Mit dem gleichen Versuchsaufbau wurde sowohl die Partikelmassenminderung als auch die Anzahlminderung bei variierendem Massenstrom und konstanter Spannung gemessen. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse.

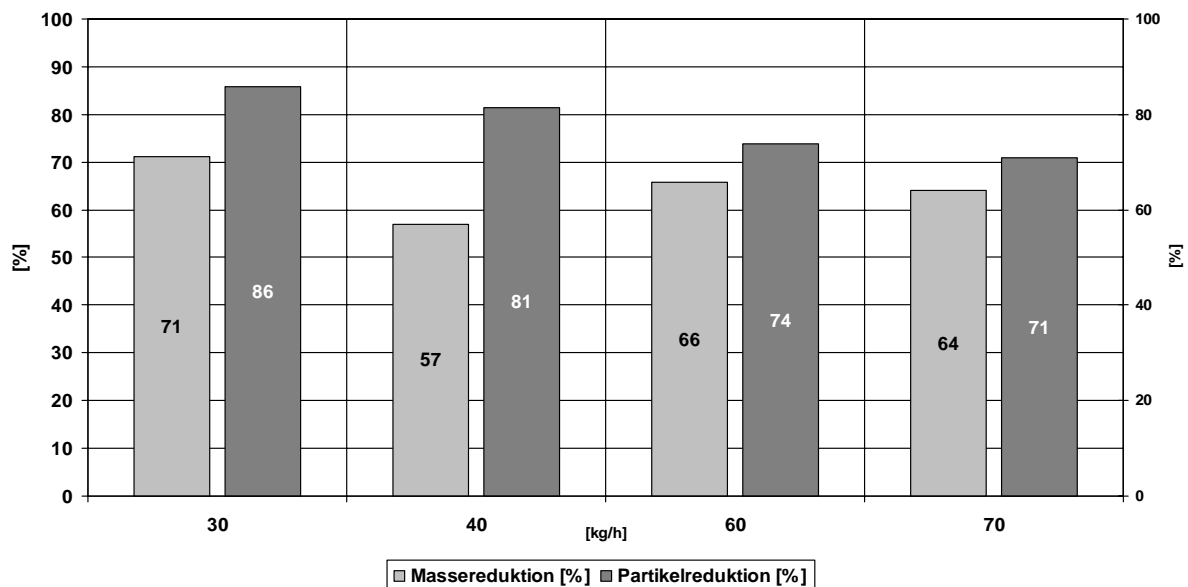


Abbildung 12: Partikelmassen- und Anzahlminderung in Abhängigkeit des Abgasmassenstroms bei konstanter Spannung

In Abhängigkeit des Abgasmassenstroms konnte bei konstanter Spannung von 16 kV eine Massenreduktion von 60 – 70 % und eine Anzahlreduktion von 70 – 85 % erreicht werden. Das Ergebnis ist umso erstaunlicher als das elektrische Feld wie aus den Ergebnissen in Abbildung 11 zu erkennen sich nur über einen Teilbereich des „Abscheiderträger“-querschnitts aufbaut.

In einem weiteren Versuch wurde ein System mit Multielektrode ähnlich dem in Abbildung 9 gezeigtem Aufbau vermessen. Es wurde sowohl die Partikelanzahl- als auch die Partikelmasseneffektivitäten vermessen. Die Partikelmasse und Anzahl wurde im NEDC um mehr als 95% reduziert. Zur Verdeutlichung wurde die Partikelanzahleffektivität in einem mittleren Lastpunkt über die Partikelgröße ermittelt. Abbildung 13 zeigt die Anzahleffektivität als Funktion des Partikeldurchmessers.

Die Anzahleffektivität ist entsprechend der Theorie abhängig vom Partikeldurchmesser und beträgt im Bereich größer 50 – 300 nm größer 95%. Das Ergebnis verdeutlicht dass die elektrostatische Abscheidung von Rußpartikeln in Kanälen von Wabenkörpern mit Leitstrukturen über den gesamten Partikelgrößenbereich funktioniert.

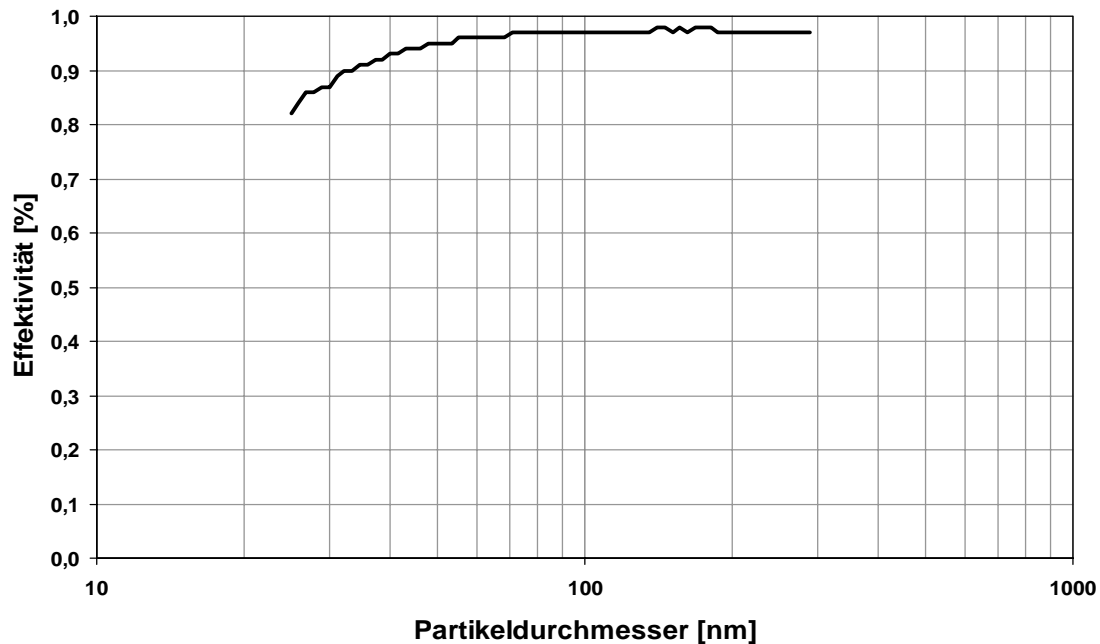


Abbildung 13: Anzahleffektivität in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser

## 6. Zusammenfassung / Ausblick

Der elektrostatische Partikelfilter PM-Metalit advanced für den mobilen Einsatz stellt eine völlige Neuentwicklung zur Erfüllung der Partikelanzahlgrenzwerte bei niedrigstem Druckverlust dar. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch die innovative Nutzung von Metallträgern als Stromverteiler und Abscheider neue Wege in der Partikelfiltration aufgezeigt wurden. Die Nutzung des PM-Metaliten mit kleinen Kanälen und Leitschaufeln als Abscheider bewirkt eine gute Abscheideleistung über alle Partikelgrößen.

Im nächsten Schritt werden sowohl die Spannungsversorgung als auch der PM-Metalit advanced weiterentwickelt um eine dauerhaltbare Lösung für PKW und Nutzfahrzeuganwendungen darzustellen.

Neben dieser Entwicklungsarbeit ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Politik nur Grenzwerte definiert und nicht indirekt oder direkt einzelne Technologien bevorzugt oder sogar vorschreibt. Eine Technikfestlegung des Gesetzgebers würden Innovationen verhindern und Europa im internationalen Wettbewerb benachteiligen.

**Quellen:**

- [1] Änderungsvorschlag der Verordnung (EG) Nr. 715/2007**
- [2] GRPE – PMP Particulates Meeting; 30 March 2009**
- [3] Zievers; Lexikon Verbrennungsmotoren Partikel**
- [4] William C. Hinds; Aerosol Technology; Second Edition**
- [5] C. Riehle; Applied Electrostatic Precipitation; Edited by K.R. Parker**
- [6] Peter Kukla; James Wright; A Novel Electrostatic Method of Ultrafine PM Control Suitable for Low Exhaust Temperature Applications**
  
- [7] Rolf Brück, Friedrich-Wilhelm Kaiser, Roman Konieczny, Emitec; ,Der metallische Nebenstromfilter PM-Metalit™; eine Lösung zur Partikelreduktion bei PKW- und NFZ-Anwendungen; HdT-Tagung 16.-17.5.2006, Ismaning**