

Filtration in der Mobilität auf Basis von Metalllegierungsschäumen

Robin Kolvenbach*, Alexandra Gerstle, Didier Beton, Andreas Tillmann, Lars Torkuhl, Gunnar Walther, Tilo Büttner, Thomas Weißgärber, Bernd Kieback

1. Einleitung

Abgasgrenzwerte für Kraftfahrzeuge wurden erstmals 1967 nach Unterzeichnung der Mulford-Carrell Act durch den damaligen Gouverneur Ronald Reagan in Kalifornien festgelegt, um der hohen Anfälligkeit von Großstädten wie Los Angeles für Sommersmog entgegenzuwirken [1]. Die ersten einheitlichen Abgasvorschriften der europäischen Gemeinschaft traten im Jahre 1970 in Kraft und beschränkten die Emissionen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen für Pkw [2]. Bereits vier Jahre später erfolgte eine deutliche Verschärfung dieser Grenzwerte und im Jahre 1977 wurden Stickoxide in die zu begrenzenden Abgaswerte aufgenommen [3, 4]. Innerhalb von Europa war die Schweiz der erste Staat, der mit Beginn des Jahres 1986 Katalysatoren für alle Neuwagen vorschrieb. Bald darauf folgten Österreich, Schweden und 1989 auch Deutschland. Aufgrund der erhöhten Rußemissionen von Fahrzeugen mit Kompressionszündung wurden 1988 erstmals Grenzwerte für Partikelemissionen von Dieselmotoren festgelegt [5]. Mit Einführung der Euro-5b Normen wurden Partikelmasseemissionen für Pkw mit Dieselmotoren auf $4,5 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$ festgelegt und erstmals Grenzwerte für Partikelanzahlemissionen von $6 \cdot 10^{11} \text{ km}^{-1}$ vorgeschrieben. Eine Übersicht der Emissionsgrenzwerte für Pkw mit Dieselmotoren ist in **Tabelle 1** aufgeführt [6]. Bei Fahrzeugen mit Ottomotoren unterscheidet die Verordnung zwischen Motoren mit Saugrohreinspritzung (PFI = *Port Fuel Injection*) und Direkteinspritzung (GDI = *Gasoline Direct Injection*), da PFI-Pkw üblicherweise nur einen niedrigen Feinstaubausstoß aufweisen. Mit Einführung der Euro-6b- und Euro-6c-Gesetzgebung wurde erstmals auch die Einhaltung von Grenzwerten für Partikelanzahlemissionen (PN) von Ottomotoren mit GDI gefordert. Eine Übersicht über Emissionsgrenzwerte im Rahmen von Euro-5 und -6 Normen für Pkw mit Ottomotor ist in **Tabelle 2** dargestellt [6]. Analog zu den Euro-Normen für den Landverkehr müssen ab 2016 gebaute Schiffe ihren Schadstoffausstoß in von der IMO (IMO = *Internationale Seeschiffahrts-Organisation*) festgelegten Kontrollzonen (ECAs = *Emission Control Areas*) in Landnähe senken [7].

Norm	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6c	Euro 6d-TEMP	Euro 6d
Typgenehmigung neue Fahrzeugtypen	2009	2011	2014	2017	2017	2020
Prüfverfahren	NEFZ	NEFZ	NEFZ	WLTC	WLTC / RDE	WLTC / RDE
CO [mg·km ⁻¹]	500	500	500	500	500 / -	500 / -
HC + NO _x [mg·km ⁻¹]	230	230	170	170	170 / -	170 / -
NO _x [mg·km ⁻¹]	180	180	80	80	80 / 168	80/120
PM [mg·km ⁻¹]	5	4,5	4,5	4,5	4,5 / -	4,5 / -
PN [km ⁻¹]	-	6·10 ¹¹	6·10 ¹¹	6·10 ¹¹	6·10 ¹¹ / 9·10 ¹¹	6·10 ¹¹ / 9·10 ¹¹

NEFZ = neuer europäischer Fahrzyklus
 WLTC = Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle
 RDE = Real Driving Emission

Tabelle 1: EU-Abgasgrenzwerte für Pkw mit Dieselmotoren [6]

Norm	Euro 5a	Euro 6b	Euro 6c	Euro 6d-TEMP	Euro 6d
Typgenehmigung neue Fahrzeugtypen	2009	2014	2017	2017	2020
Prüfverfahren	NEFZ	NEFZ	WLTC	WLTC / RDE	WLTC / RDE
CO [mg·km ⁻¹]	1000	1000	1000	1000 / -	1000 / -
HC (NMHC) [mg·km ⁻¹]	100 (68)	100 (68)	100 (68)	100 (68) / -	100 (68) / -
NO _x [mg·km ⁻¹]	60	60	60	60 / 126	60 / 90
PM* [mg·km ⁻¹]	5	4,5	4,5	4,5 / -	4,5 / -
PN* [km ⁻¹]	-	6·10 ¹²	6·10 ¹¹	6·10 ¹¹ / 9·10 ¹¹	6·10 ¹¹ / 9·10 ¹¹

* ausschließlich für GDI
 NEFZ = neuer europäischer Fahrzyklus
 WLTC = Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle
 RDE = Real Driving Emission

Tabelle 2: EU-Abgasgrenzwerte für Pkw mit Ottomotoren [6]

Im Sinne des Allgemeinwohls und durch die fortschreitende gesetzliche Reglementierung von Partikelgrenzwerten sind nicht nur Hersteller von Pkw, Lkw und Motorrädern, sondern über kurz oder lang auch weltweit Luftfahrt, Schifffahrt, Schienenverkehr sowie Hersteller von mobilen Arbeitsmaschinen gezwungen, innovative Verbesserungen vorzunehmen. Zur Einhaltung von Grenzwerten müssen Motoren optimiert und mit Ruß reduzierenden, reinigenden Techniken ausgestattet werden, was eine große Herausforderung für Motor- und Maschinenbau darstellt.

Die Sintertechnologie auf Basis metallischer und keramischer Pulver bietet hervorragende Möglichkeiten, Design und Eigenschaften von Filterelementen gezielt auf die jeweiligen Anforderungen maßzuschneidern. Hierfür stehen vielfältige Formgebungsmöglichkeiten, Pulverqualitäten und Sintertechnologien zur Verfügung. Dabei spielen Porosität, Porengröße, Design und Hochtemperaturbeständigkeit eine Schlüsselrolle, um gewünschte Eigenschaften wie niedriger Druckverlust, hohe Filtrationseffizienz, geringer Bauraumanspruch und hohe Lebensdauer zu erzielen. In Kraftfahrzeugen werden heute eine Reihe unterschiedlicher Filterkonzepte, welche sowohl auf pulvermetallurgischer als auch keramischer Prozessroute hergestellt werden, eingesetzt. Breite Anwendung bei Dieselpartikelfiltern und Katalysatoren haben keramische Extrudate gefunden. Daneben werden auch Sintermetallfilter sowie pulvermetallurgisch hergestellte Metallschäume auf Basis von Hochtemperaturlegierungen für Spezialanwendungen in der Abgasreinigung eingesetzt.

2. Partikelfilter

Partikelfilter lassen sich nach der Größe abzuschheidender Partikel generell in drei Filtergruppen, umfassend Grobstaubfilter (> 10 µm), Medium- und Feinstaubfilter (0,3 – 10 µm) sowie Schwebstofffilter (< 1 µm), einteilen [8, 9]. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Partikelfiltertechnologien entwickelt, die sich im Hinblick auf Geometrie, Filtermedium und Regenerationsmöglichkeiten unterscheiden. Für die Abgasfiltration existieren grundsätzlich Filter in zwei Konfigurationen. Dies sind Wandstromfilter, deren Filtrationswirkung auf das Durchdringen einer porösen Wand zurückzuführen ist und Nebenstromfilter, die vom Abgas entlang einer inneren Oberfläche durchströmt werden und Partikel durch Diffusion und Adhäsion entfernen. Wichtige Mechanismen für Partikeltransport und -ablagerung sind die Brownsche Diffusion, die direkte Abscheidung und Thermophorese in Gegenwart von Temperaturgradienten [10].

2.1 Wandstromfilter

Wandstromfilter, häufig als geschlossene Filtersysteme bezeichnet, können in Oberflächen- und Tiefenfilter eingeteilt werden. Für die Abgasreinigung kommen in erster Linie Oberflächenfilter zum Einsatz. Bei Oberflächenfiltern bleiben Partikel vorwiegend durch Adhäsion an der Oberfläche der Filterwand haften. Nur kleinere Partikel gelangen durch Diffusion in die Filterwand und werden auch im Falle der Oberflächenfilter durch Tiefenfiltration im Inneren der Filterwand abgetrennt. Infolge der Belegung innerer Filterflächen erfolgt die Ablagerung von Partikeln auf der äußeren Filteroberfläche unter Bildung eines Filterkuchens. Tiefenfilter hingegen lagern Partikel ausschließlich in der inneren Filterstruktur ab [11].

Üblicherweise weisen eingesetzte Filtersubstrate Porengrößen von ca. 10 µm auf. Durch Anlagerung von Partikeln an der Substratoberfläche entsteht ein Oberflächenfiltrat, in dem Partikel abgeschieden werden, wodurch sich Filterwirkungsgrade bei Partikelgrößen > 20 nm von 90 bis 99,9% erzielen lassen und alle relevanten Bereiche an Feinstaub wirkungsvoll reduziert werden können. Wandstromfilter weisen eine dauerhaft stabile, hohe Abscheidungsrate der Gesamtpartikelmasse auf [11, 12].

Bedingt durch Partikelablagerung und fortschreitendes Wachstum des Filterkuchens steigt der durch den Abgasvolumenstrom erzeugte Differenzdruck über dem Filter in Abhängigkeit von Drehzahl, Lastzustand und Ladungsmenge an. Bei Erreichen eines Schwellenwertes ist eine Regeneration des Filters durch Verbrennung eingelagerter Partikel erforderlich. Sowohl der erhöhte Abgasgedruck als auch die Regeneration können zu gesteigertem Kraftstoffverbrauch führen. Des Weiteren ist der Verbau diverser Sensoren und eine Anpassung von Motorsteuergeräten des Fahrzeugs zur Überwachung des Abgasgedrucks notwendig, was einen erheblichen Nachteil für den Einbau von Wandstromfiltern in Nachrüstungsmaßnahmen darstellt. Infolge werden Wandstromfilter in erster Linie in Neufahrzeugen ab Werk eingesetzt [11, 12].

Vorteile bieten sogenannte geregelte geschlossene Systeme, die nach dem CRT-Prinzip (CRT = *Continuous Regenerating Trap*) arbeiten. Diese sind katalytisch beschichtet und ermöglichen die passive, kontinuierliche Filterregeneration im Temperaturbereich von 350 bis 500 °C. Ein vorgeschalteter Oxidationskatalysator oder eine entsprechend wirkende Beschichtung des Partikelfilters oxidieren im Abgas vorhandenes Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid, welches dann zur Umsetzung des Rußes zu Kohlendioxid dient. Eine aktive Regeneration durch Kraftstoffnacheinspritzung wird nur bei zu niedrigen Abgastemperaturen erforderlich. Durch das beschriebene Verfahren können Kohlenmonoxid-Sekundäremissionen, ein Mehrverbrauch an Kraftstoff und Ascherückstände im Filtersystem erheblich reduziert werden [12].

2.2 Nebenstromfilter

Nebenstrom-Tiefbettfilter, auch als offene Filtersysteme bezeichnet, arbeiten nach dem Prinzip der Tiefbettfiltration. Die Filterung von Rußpartikeln erfolgt durch partielle Umlenkung des Abgasstromes in Nachbarkanäle, ohne dass der Abgasstrom gezwungen ist, vollständig durch poröse Wände zu dringen. Die Partikel werden folglich durch die Vorgänge der Diffusion und Adhäsion abgetrennt. Bei Partikelüberladung des porösen Filtermaterials wird der Abgas-Teilstrom durch Längskanäle ohne Druckerhöhung abgeleitet. Im Rahmen von Nachrüstungsmaßnahmen müssen neben dem Einbau des Filtersystems somit keine Änderungen am Fahrzeug erfolgen, da der Abgasgegendruck keine unzulässigen Werte erreichen kann [12, 13].

Da der Abgasstrom nicht vollständig durch ein feinporöses Substrat gezwungen wird, weisen Nebenstromfilter einen niedrigeren Wirkungsgrad als Wandstromfilter auf. In der Regel beträgt die Abtrennung besonders gesundheitsschädlicher kleiner Partikel mit Partikelgrößen < 400 nm, bis zu 80%. Der Wirkungsgrad des Nebenstromfilters zeigt eine starke Abhängigkeit von Fahrzeug, Betriebsbedingungen, Filterausführung und Betriebszuständen im zeitlichen Verlauf. Bei den meisten Nebenstromfiltern handelt es sich um Partikelkatalysatoren. Diese verfügen über eine katalytische Beschichtung und arbeiten, wie bereits im Falle der Wandstromfilter erläutert, nach dem CRT-Prinzip. Nebenstromfilter zeichnen sich meist durch eine kompaktere Bauweise als Wandstromfilter aus [12, 13].

Geometrie und Material des verwendeten Filtrationsmediums sind von zentraler Bedeutung für resultierende Eigenschaften im Hinblick auf Abgasgegendruck bzw. Druckverlust, Filterwirkungsgrad, Regeneration, Beständigkeit und Kosten. Filtermaterialien werden aus porösen Werkstoffen hergestellt, die meist von Fasern oder Pulvern gebildet werden. Diese bestehen klassisch aus Keramiken (Cordierit, Mullit, Siliciumcarbid, Aluminiumtitanat), Metallen (Sintermetall, Metalldrahtnetze, Metallschäume) oder Kombinationswerkstoffen. Meist sind metallbasierte Filter teurer als Keramikfilter. Dennoch gibt es auch bei Keramikfiltern preisliche Unterschiede: Siliciumcarbidfilter sind gewöhnlich teurer als Cordieritfilter [10, 14].

Die Materialien können in Form von Extrudaten, Fasern, Schäumen, Infiltraten und Filzen eingesetzt werden. Fasern bzw. Pulver werden zu flächigen Filterwänden geformt und in Rohren, Bälgen, Taschen oder Kanälen angeordnet. Gebräuchliche Geometrien umfassen konzentrisch angeordnete Wandstromfilter-Röhren, monolithische Schaumböcke und Platten, Zylinder aus Faserstrukturen, parallel angeordnete Wandstromfilterplatten oder wabenförmige Extrudate aus alternierend verschlossenen, parallelen Kanälen [10]. Die 1981 entwickelte monolithische Wabenkörper-Wandstromfilterstruktur zählt aufgrund ihres kompakten Aufbaus und der hohen Filtrationswirkung bei vergleichsweise niedrigem Druckverlust bis heute zu den beliebtesten Filtergeometrien [10, 15].

3. Partikelfiltersysteme in der Praxis

3.1 Dieselpartikelfilter (DPF)

Die Abgasnachbehandlung mit Rußpartikelfiltern ist von großer Bedeutung für die Reduzierung von Feinstaubemissionen und findet breiten Einsatz in automobilen Anwendungen. **Tabelle 3** gibt einen kurzen Überblick über die Vor- und Nachteile verschiedener Partikelfiltersysteme. Wesentliche Anforderungen an Rußpartikelfilter stellen eine möglichst hohe Filtrationswirkung, geringer Abgasgegendruck sowohl im beladenen als auch unbeladenen Zustand und eine hohe thermische Beständigkeit des Materials für die bei der Regeneration notwendigen hohen Temperaturen dar. Die Hitzebeständigkeit von Wabenstrukturmonolithen aus Cordierit und die verhältnismäßig niedrigen Kosten für das keramische Material im Vergleich zu Sintermetallfiltern machen diese zu den am häufigsten verbauten Dieselpartikelfiltern. Trotz Regeneration ist das Risiko für die Verblockung von Wandstromfiltern, vor allem nach Alterung und Einlagerung von Aschepartikeln, erheblich. Der Abgasgegendruck kann durch Vergrößerung der Porenweite gesenkt werden, was jedoch die Effizienz der Filtration reduziert. Deutlich geringer ist das Verblockungsrisiko beim Einsatz von Nebenstromfiltern, die einen geringeren Anteil der Gesamtpartikelmasse, dafür jedoch vorzugsweise besonders gesundheitsschädliche kleine Partikel aus dem Abgasstrom filtern [12, 16-20].

Material	Geometrie	Hersteller	Vorteile	Nachteile
Geschlossene bzw. Wandstromfilter				
Keramik				
Cordierit	Monolith mit Wabenstruktur		✓ preiswert	× Smp ca. 1200 °C (Schmelzen bei Regeneration unter zu hoher Rußbelastung)
			✓ PN > 99 %	× Vorzugsweise aktive Regeneration
			✓ PM ₁₀ > 85 %	× Verblockungsgefahr
				× hohe Empfindlichkeit bei Stößen/Vibrationen
				× Alterung/Zerbröseln
Siliziumcarbid	Monolith mit Wabenstruktur	NGS Iriden Pirelli	✓ rel. preiswert	× Verblockungsgefahr
			✓ Hitzebeständigkeit: Smp ca. 2700 °C	× Alterung/Zerbröseln
			✓ PN > 99 %	× geringere Langzeitstabilität bei therm. Belastung als Cordierit (Wärmeexpansion)
			✓ PM ₁₀ > 85 %	
Metall				
Sintermetall	Poröse Sintermetalltaschen	HJS	✓ wartungsfrei	× Smp rel. niedrig (Schmelzen bei Regeneration unter zu hoher Rußbelastung)
			✓ Taschenbauweise: hohe Rußspeicherfähigkeit/geringe Verblockungsgefahr	× teurer als Keramik
			✓ PN > 99 %, auch kleinste Partikel	
Offene bzw. Nebenstromfilter				
Metall				
Sintermetall	Sintermetallvlies zwischen Stahlfolie mit schaufelförmigen Substrukturen	Emitec Twintec MAN	✓ wartungsfrei	× Smp rel. niedrig (Schmelzen bei Regeneration unter zu hoher Rußbelastung)
			✓ geringe Verblockungsgefahr	× Senken der Gesamtpartikelmasse 30 - 40 %
			✓ geringer Abgasgedruck	× Filtration kleiner Partikel
			✓ kaum Kraftstoffmeherverbrauch	× 80 %
				× teurer als Keramik

Tabelle 3: Vor- und Nachteile gebräuchlicher Partikelfiltersysteme [12, 16-20]

3.2 Keramische Vollfilter

Klassische Wandstromfilter aus poröser Keramik mit Wabenstruktur besitzen parallele Strömungskanäle, die alternierend an den gegenüberliegenden Ein- und Austrittsseiten geöffnet bzw. verschlossen sind. Zum Passieren des Filters ist der Abgasstrom gezwungen, das poröse Substrat des Filtermaterials zu durchströmen, wodurch Rußpartikel zurückgehalten werden. Die Filter weisen ein zweistufiges Filtrationsverhalten auf. Nach anfänglicher Tiefenfiltration bei der in Abhängigkeit von der Porengröße zwischen 60-85% der Partikel abgeschieden werden bildet sich ein Filterkuchen, der den Abscheidegrad des Filters auf über 99,5% erhöht. Damit abgelagerter Ruß verbrannt wird, können Oxidationskatalysatoren vorgeschaltet und die Keramikkörper katalytisch beschichtet werden. Eigenschaften wie temperaturabhängige Dehnung und Hitzebeständigkeit hängen von der verwendeten Keramik ab. Siliciumcarbid besitzt einen hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Zur Erhöhung der Thermoschockbeständigkeit des Materials werden Dehnungsfugen in den Monolithen integriert. Ähnliche geschlossene Keramikfilter werden von vielen Autoherstellern wie Peugeot, Mercedes, Audi und Toyota in Kombination mit verschiedenen Regenerationstechnologien ab Werk verbaut. Die **Bilder 1** und **2** zeigen Keramikfilter aus Siliciumcarbid und Cordierit sowie eine schematische Darstellung des Abgasstrom-

flusses durch einen eingebauten Filter [21, 22]. Vor- und Nachteile der Filter sind in **Tabelle 4** aufgeführt [12, 16].

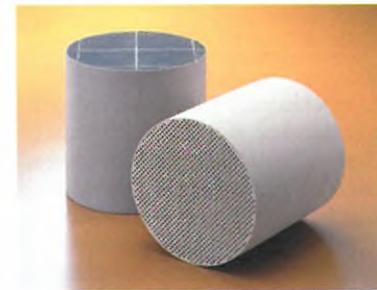


Bild 1: Fotografien von Filtermonolithen der Firma NGK aus grauem Siliciumcarbid und beigem Cordierit [21]

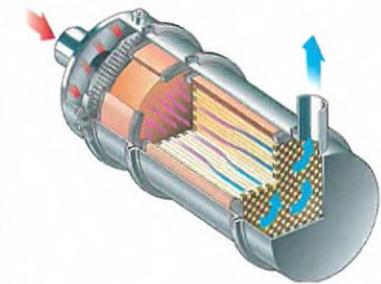


Bild 2: Schematische Darstellung des Abgasstromflusses durch einen Wandstromfilter mit Wabenstruktur [22]

- Vorteile**
- ✓ Über 99% der Gesamtpartikelmasse werden gefiltert
 - ✓ Hitzebeständigkeit

- Nachteile**
- × Verblockungsgefahr
 - × Sensoren und Steuerung für aktive Regeneration sinnvoll
 - × Alterung/Zerbröseln von Keramik & Beschichtung zu Feinstaub/Katalysatormetallaerosolen

Tabelle 4: Vor- und Nachteile keramischer Monolithen [12, 16]

Partikelfilter auf Basis von Siliciumcarbid-Keramik werden von den Automobilherstellern Peugeot und Citroen in Kombination mit dem Kraftstoffadditiv Eolys der Firma Rhodia eingesetzt. Das Additiv senkt die Spontanverbrennungstemperatur der Rußpartikel auf 450 °C. Des Weiteren stellt das Additiv stabile Betriebsbedingungen sicher, senkt die Dauer der aktiven Regeneration auf zwei bis vier Minuten und den Kraftstoffmeherverbrauch auf 5% während des Regenerationsvorgangs. Die aktive Regeneration verhindert eine Verblockung des Filters, die bei passiver Regeneration und häufigem Kurzstreckenbetrieb unter niedrigen Abgastemperaturen auftreten kann. Der Peugeot 607 erreichte damit eine niedrige Partikelmasseemission von 0,004 g·km⁻¹ und im ADAC-Langzeittest über 80.000 km im Mittel lediglich 0,001 g·km⁻¹. Der Additivtank muss nach einer Laufleistung von ca. 120.000 km aufgefüllt werden. Auch Toyota verwendet einen keramikbasierten DPNR-Filter (= Diesel Particulate NO_x-Reduction), der Behandlung von Ruß und Stickoxiden in einem Speicherkatalysator kombiniert. Das System erfordert keinerlei Additive und ist wartungsfrei. Die Oberfläche des

Filters enthält Platin als katalytisch aktive Komponente und Bariumoxid zur Zwischenspeicherung von Stickstoffdioxid in Form von Bariumnitrat. Das System arbeitet mit Nacheinspritzung zur Erhöhung der Abgastemperatur für die aktive Regeneration [16].

3.3 Sintermetallbasierte Vollfilter

Der HJS City-Filter ist für die Nachrüstung verschiedener Dieselmotoren geeignet und enthält ein geschlossenes Partikelfilterelement auf Sintermetallbasis in Taschenbauweise. Das Sintermetallelement besteht aus einem gefalteten, kalandrierten Streckmetallträger, dessen Öffnungen mit Sintermetallpulver gefüllt und gesintert wurden [23]. Die Abgase werden durch die so geformten, porösen Sintermetalltaschen geleitet, die auch feinste Rußpartikel zurückhalten. Die Ablagerung der Rußpartikel erfolgt an der Oberfläche der Sintermetalltaschen, die eine besonders hohe Rußaufnahmekapazität aufweisen und somit eine Verblockung des Filters verhindern. Eine passive Regeneration des Filters findet bereits bei Abgastemperaturen von 200 °C statt. Das erforderliche Stickstoffdioxid wird im vorangeschalteten Oxidationskatalysator bzw. einer als solcher wirkenden katalytischen Beschichtung gebildet [16, 17]. Der Aufbau des HJS-Sintermetallfilters mit und ohne katalytischer Beschichtung ist in den **Bildern 3** und **4** dargestellt [17]. Vor- und Nachteile des Filtersystems sind in **Tabelle 5** aufgeführt [16,17].

Vorteile

- ✓ Wartungsfrei für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs
- ✓ Über 99% der Gesamtpartikelmasse werden gefiltert (Erfüllt EEV-Standards)
- ✓ Taschenbauweise verhindert Verblockung: Hohe Rußspeicherfähigkeit & Sicherheit
- ✓ Keine zusätzlichen Sensoren oder Additive erforderlich

Nachteile

- × Rußansammlung bei häufigem Kurzstreckenbetrieb und infolge Überhitzung bei Regeneration

Tabelle 5: Vor- und Nachteile des HJS-Sintermetallfilters [16,17]



Bild 3: Schematische Darstellungen des Dieselpartikelfiltersystems mit Sintermetallfiltern der Firma HJS mit integriertem Oxidationskatalysator [17]

Bild 4: Sintermetallfilter der Firma HJS ohne Oxidationskatalysator [17]

3.4 Sintermetallbasierte Nebenstromfilter

Das Nebenstromfiltersystem von Emitec besitzt eine gewickelte, zweilagige Struktur. Die Filtereinheit besteht aus gewellten Lagen einer Stahlfolie mit schaufelförmigen Substrukturen, zwischen denen sich Lagen aus Sintermetallvlies zur Partikelspeicherung befinden. Die schaufelförmigen Strukturen werden von Durchbrechungen der gewellten Metallfolie gebildet. Die geformten Substrukturen dienen der teilweisen Ablenkung des Abgasstromes durch das Vlies hindurch in Nachbarkanäle, wobei Partikel im Vlies zurückgehalten werden. Das Sintermetallvlies besteht aus Fasern, die zu einem porösen Faserwerkstoff gesintert wurden. Folie und Vlies sind mit einer Aktivmetalldispersion katalytisch beschichtet [16, 18, 19, 24].

Die Struktur des Systems ist schematisch in **Bild 5** gezeigt [18].

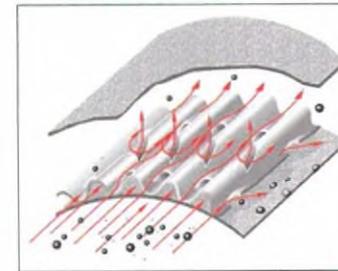


Bild 5: Ausschnitt aus der mehrlagigen Struktur des Emitec-Filtersystems mit Sintermetallvlies und Schaufelstrukturen. Rote Pfeile stellen den Verlauf des Abgasstromes dar, schwarze Kugeln entsprechen Rußpartikeln [18]

Der Hauptabgasstrom wird in Längsrichtung am Vlies vorbeigeführt, wodurch ultrafeine Partikel durch Diffusion und Adhäsion abgeschieden werden. Das im vorangeschalteten Oxidationskatalysator bzw. der katalytischen Beschichtung ab 200-280 °C anfallende Stickstoffdioxid unterstützt die kontinuierliche passive

Filterregeneration. Ebenso werden anfallendes Kohlenmonoxid sowie Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid und Wasser durch die katalytische Beschichtung oxidiert [18].

Vor- und Nachteile der Filtertechnologie sind in **Tabelle 6** zusammengefasst [16, 18, 19].

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hohe Sicherheit: Verblockung nicht möglich/Motorschäden ausgeschlossen ✓ Wartungsfrei für die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs ✓ Oxidationskatalysator und Partikelfilter in einer Einheit ✓ Geringer Kraftstoffverbrauch (kein erhöhter Abgasgegendruck/ i.d.R. keine Nacheinspritzung zur Regeneration) 	<ul style="list-style-type: none"> × Filtrationswirkung begrenzt: Senkung der Gesamtpartikelmasse 30-40 % × Partikel < 100 nm 80%

Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Emitec-Filtersystems [16, 18, 19]

Trotz gewisser Unterschiede der Partikelfiltration bei leichten Nutz- und Schwerlastfahrzeugen überwiegen die Gemeinsamkeiten. Die beschriebenen Filtrationseinheiten und Materialien sind auch für Lkw in Anwendung. Im Bereich der Schwerlastanwendungen kann das Erreichen ausreichender Temperaturen für die Regeneration des Partikelfilters bei geringer Beladung und tiefen Außentemperaturen eine Herausforderung darstellen [25, 26]. Hohe Filtrationsleistungen werden durch Kombination mehrerer Filtrationseinheiten erzielt. Filtertemperatur, Temperaturgradienten im Filter und Vollständigkeit der Regeneration hängen von der thermischen Masse des Filtermaterials, Rußbelastung sowie der Eingangstemperatur und Flussrate des Abgasstroms ab. Um die Regeneration des Filters unter allen Bedingungen zu gewährleisten, werden die Filtereinheiten mit Isolierungen versehen und motornah positioniert [26].

3.5 Metalllegierungsschäume für Partikelfilter

Offenporige Metallschäume haben aufgrund ihrer hohen Porosität und irregulären Struktur ein hohes Potenzial für Filtrationsanwendungen. Kommerziell sind z.B. Nickelschäume verfügbar, die jedoch unter den Hochtemperaturbedingungen im Abgasstrang nicht beständig sind. Deshalb wurde im Rahmen einer Kooperation zwischen Alantum und dem Fraunhofer IFAM Dresden ein pulvermetallurgisches Verfahren entwickelt, bei dem das Nickelsubstrat in eine hochtemperaturbeständige Legierung überführt wird. **Bild 6a)** zeigt den patentierten Herstellungsprozess [27]. Dabei wird der Ni-Schaum zunächst mit einem Binder über einen Sprühprozess und nachfolgend mit einem legierten Pulver beschichtet. Im Anschluss erfolgen Entbinderung und Sinterung. Als Produkt wird ein Schaum aus einer homogenen Legierung erhalten.

Bild 6b) zeigt die Schritte der Wärmebehandlung im Detail. Nach der thermischen Entfernung des Binders erfolgt durch weitere Temperaturerhöhung das

Sintern. Die Bestandteile des metallischen Pulvers diffundieren in die Schaumstege und es entsteht ein homogen legierter Schaum. Vergleichende rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des reinen Nickelschaums und des legierten Schaums sind in **Bild 7** zu sehen. Die hohe Rauigkeit der Oberfläche der Schaumstege erweist sich als vorteilhaft für die angestrebten Anwendungen, da sie eine hohe spezifische Oberfläche generiert und eine gute Haftfestigkeit katalytisch aktiver Schichten gewährleistet (**Bild 8**).

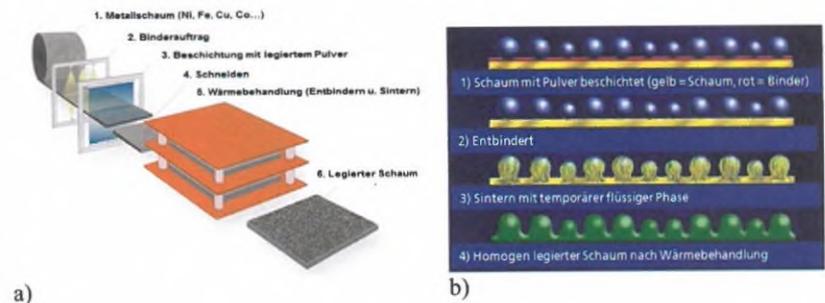


Bild 6: Patentierter PM-Prozess zur Herstellung legierter Schäume

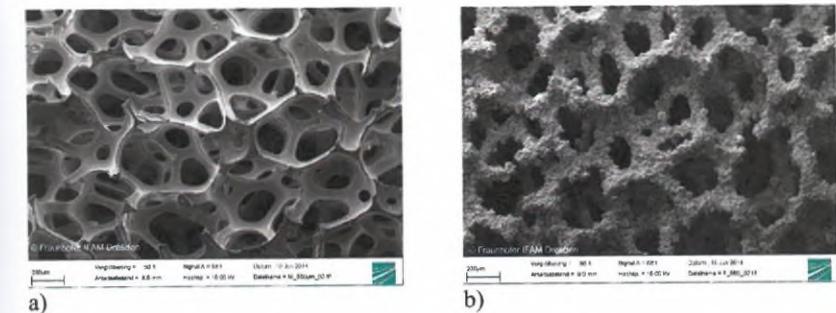


Bild 7: Schaum mit einer Zellgröße von 580 µm a) Ni-Schaum, b) NiFeCrAl-Schaum nach Beschichtungs- und Sinterprozess mit ausgeprägter rauer Oberfläche

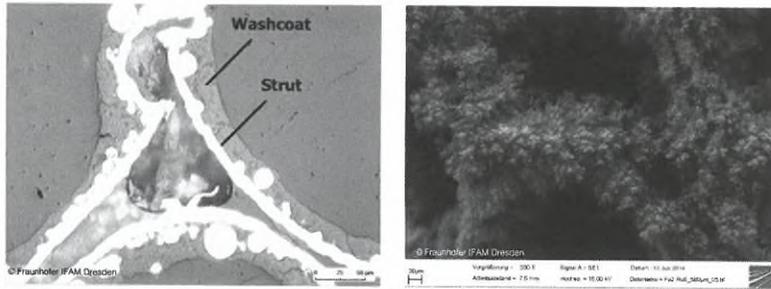


Bild 8: Querschliff an einem Schaumsteg (Strut) mit katalytischer Beschichtung (Washcoat)

Bild 9: Topographiebild eines Schaumes nach Rußbeladung in einem Partikelfilter

Die einzigartige Kombination der Eigenschaften von Metalllegierungsschäumen machen diese interessant für eine Vielzahl von Anwendungen. Metalllegierungsschäume haben großes Potential für den Einsatz in Nischenanwendungen als beschichtete SCR-Katalysatoren, Trägermaterialien für Oxidationskatalysatoren, als Partikelfiltermedien und nicht zuletzt für die Nachrüstung solcher Komponenten. Die Porengröße ist über einen weiten Bereich zwischen 450 μm bis 6 mm wählbar. Damit sind Filtrationseigenschaften wie Druckverlust und Filtrationseffizienz steuerbar, sodass sie gezielt auf den gewünschten Anwendungsfall angepasst werden können. Das Schaummaterial hat abhängig von der Porengröße eine Dicke im Bereich von 1-5 mm. Aufgrund der höheren Anschaffungskosten sind Partikelfilter basierend auf Metalllegierungsschäumen vor allem für spezielle Anwendungen von Vorteil. Im Gegensatz zu vielen auf dem Markt gebräuchlichen Substraten zeichnen sich Metalllegierungsschäume durch sehr vielseitige Möglichkeiten der Formgebung aus, was eine leichte und flexible Platzierung und Integration der Systeme ermöglicht. Sowohl einfache als auch komplexere Formen können durch Schneiden, Biegen, Rollen sowie Aneinanderfügen und Sintern von Platten realisiert werden. Aus einem solchen Schaumkörper können z.B. Axialfilter gefertigt werden. Für Partikelfilter werden in der Regel einzelne Schaumlagen zu Radialfiltern gewickelt, um den Druckverlust möglichst gering zu halten. Dabei ist auch die Gradierung der Porengröße durch Verwendung verschiedener Schaumqualitäten möglich, sodass sich z.B. bei Dieselpartikelfiltern der Ruß gleichmäßig im Schaumvolumen abscheidet. **Bild 9** zeigt einen mit Ruß beladenen Schaum aus einem Dieselpartikelfilter. Der Ruß wird dabei nur auf den Schaumstegen abgelagert, sodass die Poren nicht verblockt werden und der Gegendruck nur geringfügig ansteigt.

Eine hohe Temperaturbeständigkeit kann durch die Zusammensetzung und Vorbehandlung der Legierungen erreicht werden. Aluminiumhaltige Legierungsschäume wie NiFeCrAl, NiCrAl oder FeCrAl können Aluminiumoxidschichten auf der Oberfläche ausbilden, die zu einer hohen Oxidationsbeständigkeit der Le-

gierungsschäume bei über 950 $^{\circ}\text{C}$ führen [28, 29]. Damit sich eine geschlossene α -Aluminiumoxidschicht ausbilden kann (**Bild 10**), muss die Legierung mindestens 5% Aluminium enthalten. Vor- und Nachteile von Metalllegierungsschäumen werden im Folgenden anhand von verschiedenen Anwendungsbeispielen erläutert.

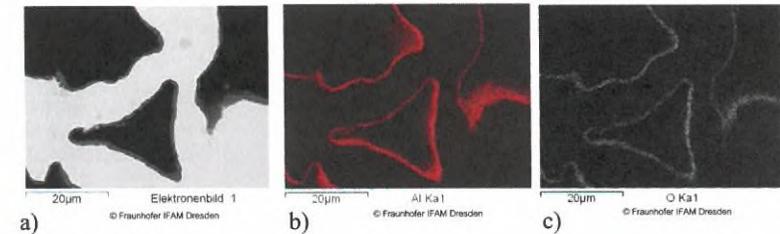


Bild 10: Elementmapping an einem Querschliff einer unter Sauerstoff vorpassivierten Schaumprobe der Legierung NiFeCrAl mit Aluminiumoxidschicht. (a) BSE-Bild, (b) Elementverteilung von Aluminium und (c) Sauerstoff

3.5.1 Dieseloxydationskatalysator (DOC)

Dieseloxydationskatalysatoren basierend auf Metalllegierungsschäumen wurden in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt und beim Test im europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit gebräuchlichen Keramikmonolithen mit ähnlichem Volumen und katalytischer Beladung verglichen. **Bilder 11a)** und **11b)** zeigen den Aufbau eines weiterentwickelten Dieseloxydationskatalysators basierend auf Metallschaum, der für die Partikelfiltration optimiert wurde. Die Kombination von Partikelfiltration, Partikeloxydationskatalyse und Dieseloxydationskatalyse in verschiedenen Schichten ermöglicht eine kontinuierliche Rußverbrennung bei niedrigen Temperaturen und ohne aktive Regeneration.

Ein schaumbasiertes Vorgängermodell des Dieseloxydationskatalysators, welches nicht für die Partikelfiltration angepasst wurde, erreichte bereits eine Reduzierung der Rußpartikel um gut 20%, was in **Bild 12** ersichtlich ist. Im Vergleich dazu reduzieren Dieseloxydationskatalysatoren basierend auf offenen Keramikmonolithen die Partikelmasse lediglich um 10%. Die Filtrationswirkung von Metallschäumen basiert auf den Prinzipien der Tiefenfiltration. Die mittleren Porengrößen des Filtermediums sind größer als die mittleren Durchmesser aufgefangener Partikel, die aufgrund von Konzentrations- und Geschwindigkeitsgradienten innerhalb des Gasstroms abgeschieden werden. Die Bewegung kleiner Partikel $< 0.3 \mu\text{m}$ beruht auf Diffusion und Brownscher Molekularbewegung. Sie bewegen sich nicht gleichförmig mit dem Gasstrom und diffundieren an die Oberflächen des Filtersubstrats, wo sie gesammelt werden. Mit steigender Partikelgröße und Masse folgen Partikel zunehmend dem Gasstrom. Aufgrund von Trägheit können sie Hindernissen nicht so leicht ausweichen wie der Gasstrom, treffen auf das Filtersubstrat und werden zurückgehalten. Ebenso werden Partikel, die bei

Umströmung nahe an ein Hindernis herankommen, adsorbiert und aus dem Gasstrom entfernt. Metallschäume besitzen aufgrund der Turbulenz des Gasstroms durch den Schaum großes Potential für den Einsatz als Partikelfilter.

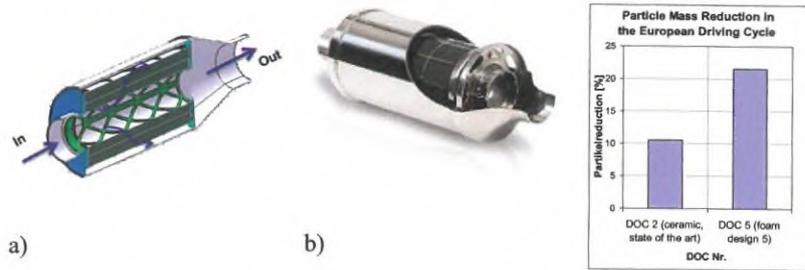


Bild 11: Alantum Dieseloxydationskatalysator (DOC) basierend auf Metallschaum, optimiert für die Partikelfiltration
(a) Schematische Darstellung des Radialfilters, (b) Fotografie des katalysierten Partikelfilters

Bild 12: Vergleich der Reduzierung der Rußpartikel durch einen herkömmlichen keramikbasierten und einen schaum-basierten DOC

Schaumbasierte Dieseloxydationskatalysatoren weisen im Vergleich zu herkömmlichen Keramikmonolithen eine über 30% geringere Emission von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen auf. Schaumbasierte Strukturen zeigen sehr gute Stofftransporteigenschaften und weisen geringere Transportlimitierungen als Keramikmonolithen auf. Hohe volumenbasierte, katalytische Aktivitäten sind auf die hohe Turbulenz des Gasstroms durch die Schaumstruktur, hohe geometrische Oberflächen der Schäume, einen besseren Kontakt des Stroms mit der katalytisch aktiven Oberfläche und folglich einer höheren Reaktivität zurückzuführen [30, 31]. Dies wird anhand ihres höheren Umsatzes bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen in **Bild 13** deutlich. Infolge der hohen katalytischen Aktivitäten schaumbasierter Systeme können bis zu 30% an Edelmetallen für die katalytische Beschichtung eingespart und die Kosten für den Katalysator deutlich gesenkt werden. Dennoch sind Substrate aus Metallschaum teurer als Konkurrenzprodukte aus Keramik.

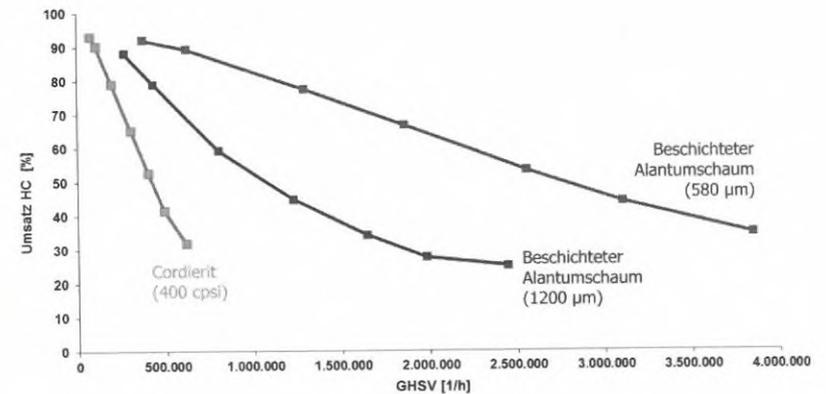


Bild 13: Umsätze für die katalytische Oxidation von Kohlenwasserstoffen (HC) in Abhängigkeit von der Raumgeschwindigkeit des Gasflusses (GHSV). Mit steigender Flussrate und somit abnehmender Kontaktdauer werden geringere Umsätze in der Oxidation erzielt. Bei einer Flussrate von 600.000 h^{-1} erzielt der Keramikmonolith (hellgrau) einen Umsatz von 32%, wohingegen ein schaumbasierter Katalysator mit größerem Porendurchmesser (dunkelgrau) einen Umsatz von 75% und mit kleinerem Porendurchmesser (rot) einen Umsatz von $> 90\%$ erzielt.

Neben der Einsparung von teuren Aktivmetallen ermöglicht die hohe Aktivität schaumbasierter Katalysatoren eine Reduzierung des Substratvolumens unter gleichzeitiger Beibehaltung hoher Umsätze. Dies reduziert den Bauraumanspruch und erhöht die Flexibilität der Positionierung der Komponente. Die geringe Masse sowie die hohe geometrische Oberfläche der Schaumstrukturen führen zu schneller Erwärmung und beschleunigen das Anspringen des Katalysators. Schaumbasierte Dieselpartikelfilter wurden sowohl für die Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen als auch im Lastkraftbereich umfassenden Untersuchungen und Praxistests unterzogen, deren Ergebnisse in den folgenden Beispielen dargestellt werden.

Beispiel 1: Dieselpartikelfilter in China

Fahrzeugabgase stellen die Hauptquellen der Luftverschmutzung in chinesischen Großstädten dar. Die chinesische Regierung hat daher die Einhaltung von Emissionsgrenzen entsprechend Euro IV Vorgaben ab Juli 2013 beschlossen. Eine große Herausforderung an Filtersysteme für den chinesischen Markt sind der hohe zulässige Schwefelgehalt des Dieseltreibstoffs von bis zu $350 \mu\text{g/g}$. Der hohe Schwefelgehalt führt bei den meisten Filtern zu zunehmender Verstopfung der Poren, ansteigendem Abgasgedruck und letztlich zur Verblockung des Filters.

Neben der Substratstruktur ist die Zusammensetzung der katalytischen Beschichtung von entscheidender Bedeutung für die Schwefeltoleranz eines katalysierten Partikelfilters. Die Leistungen eines herkömmlichen Keramikfilters und eines Alantumpartikelfilters wurden unter Verwendung von schwefelhaltigem Diesel verglichen. Dabei zeigt der metallschaumbasierte Filter bei verschiedenen Geschwindigkeiten einen um 50% niedrigeren Abgasgedruck als der Keramikfilter. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in den **Bildern 14** und **15** zusammengefasst.

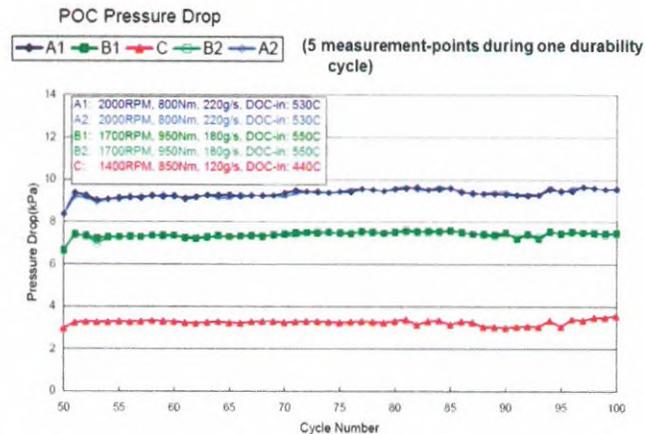


Bild 14: Druckverlust des Dieselpartikelfilters gemessen am SwARC Automotive Research Laboratory bei Verwendung von Dieseltreibstoff mit 350 µg/g Schwefel

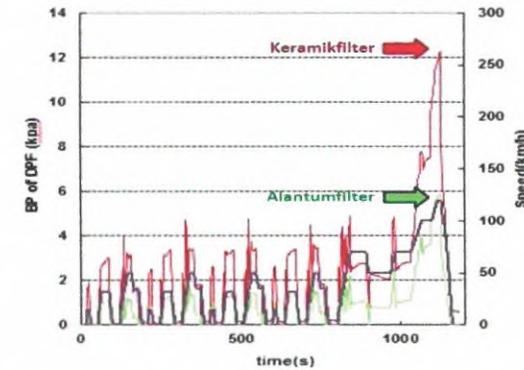


Bild 15: Vergleich des Druckverlustes eines Keramikfilters (rot) und des Alantumfilters (grün) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (violett). Der Alantumfilter zeigt einen um 50% niedrigeren Druckverlust nach Alterung (100 h, Diesel S-Gehalt 350 µg/g)

Beispiel 2: Dieselpartikelfilter für die Nachrüstung leichter Nutzfahrzeuge

Im Rahmen eines koreanischen Nachrüstungsprogramms für leichte Nutzfahrzeuge wurden über 5000 Dieselpartikelfilter der Fa. Alantum basierend auf Legegierungsschaum in Fahrzeugen mit 3 L Motoren eingebaut. Regulierungen der Abgasgrenzwerte sahen eine Senkung der Emission von Rußpartikeln von 50% vor. Mit den eingebauten Filtern wurde eine durchschnittliche Reduzierung der Partikelmasse von 70% sowie eine hohe Lebensdauer des Systems, auch unter schlechten Bedingungen, erzielt. Häufige Stadtfahrten bei entsprechend niedrigen Abgastemperaturen führten weder zu einem signifikanten Anstieg des Abgasgedrucks noch zur Verblockung des Partikelfilters. Die Testergebnisse der koreanischen Regierung sind in **Tabelle 11** zusammengefasst. Die Partikelfilter zeigen gleichbleibende Senkung von Schadstoffen und Partikelmasse bei konstantem Abgasgedruck auch nach 20.000 km Laufleistung.

Vehicle	Pregio (g/km)					
Item	fresh			after 20,000 km		
	Base	Sample	Reduction	Base	Sample	Reduction
CO	0.485	0.064	87%	0.479	0.067	86%
THC	0.071	0.003	96%	0.068	0.007	90%
NOx	1.633	1.677	-3%	1.655	1.676	-1%
PM	0.079	0.022	72%	0.073	0.025	66%
Vehicle	Bongo Frontier (g/km)					
Item	fresh			after 20,000 km		
	Base	Sample	Reduction	Base	Sample	Reduction
CO	1.103	0.087	91%	0.951	0.085	91%
THC	0.222	0.008	96%	0.184	0.009	95%
NOx	1.034	1.066	-3%	1.060	1.068	-1%
PM	0.099	0.032	68%	0.084	0.034	60%

Copyright © Copyright © 2011 Alcantara Corp. All Rights Reserved.

Tabelle 11: Leistung des Alantum Partikelfilters im Neuzustand und nach 20.000 km im realen Fahrbetrieb

Beispiel 3: Dieselpartikelfilter für Lkw

In Europa wurde ein metallschaumbasiertes Dieselpartikelfiltersystem für Lkw > 3,5 t bis Euro IV zugelassen und ermöglicht eine Senkung der Partikelmasse auf maximal $20 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$ im Prüfverfahren (ESC). Das Filtersystem ist in **Bild 16** dargestellt. Im Praxistest über 12 Monate bei Laufleistungen > 190.000 km kam es weder zu erhöhtem Treibstoffbedarf aufgrund eines Anstiegs des Abgasgedrucks noch zur Verblockung des Filtersystems. Der schaubasierte Filter zeichnet sich durch eine konstante Filtrationseffizienz von ca. 80% PM, ein geringes Gewicht von ca. 65 kg und einem niedrigen Druckverlust, verglichen mit anderen Filtern derselben Klasse, aus.



Bild 16: Partikelfilter für Lkw. Reduzierung der Rußpartikelemissionen auf Euro IV Standard

Dieselpartikelfilter basierend auf Metallschaum stellen eine langlebige und robuste Möglichkeit für die katalytische Schadstoffbehandlung und Reduzierung der Partikelmasse in Abgasen dar. Als Katalysatormedium begünstigen sie hohe katalytische Aktivitäten durch eine hohe Turbulenz des Gasstromes innerhalb der Schaumstruktur, eine große geometrische Oberfläche und sehr gute Stofftransporteigenschaften. Sie besitzen eine hohe Korrosionsbeständigkeit und sind robust beim Einsatz schwefelhaltiger Kraftstoffe. Schaumbasierte Katalysatoren besitzen geringere Massen und Volumina als Konkurrenzprodukte und ermöglichen die Einsparung teurer Platingruppenmetalle. Ihre geringe thermische Masse begünstigt ein schnelles Anspringen des Katalysators. Katalysatoren basierend auf Metallschäumen sind jedoch kostenintensiver als Keramikmonolithen. Metallschäume eignen sich als Substrate für die Partikelfiltration mit flexiblen Filtrationsleistungen. Da es sich jedoch um Hauptstromfilter handelt, deren Wirkung auf dem Prinzip der Tiefenfiltration beruht, erreichen sie insgesamt geringere Filtrationsleistungen als Wandstromfilter. Schaumbasierte Partikelfilter erweisen sich besonders bei geringen Abgastemperaturen durch ihr schnelles Ansprungsverhalten, gleichbleibend guter Filtrationsleistung und konstant niedrigem Abgasgedruck, auch bei Verwendung schwefelhaltiger Dieseldieselkraftstoffe, als vorteilhaft.

3.5.2 Benzinpartikelfilter (GPF) mit integriertem 3-Wege-Katalysator

Aufgrund des stetig wachsenden Anteils an Fahrzeugen mit Direkteinspritzung ist zu erwarten, dass gegen Ende dieses Jahrzehntes ein Großteil der verkauften Fahrzeuge mit Ottomotoren über GDI-Technologie verfügen wird [32]. Die Anforderungen an Benzinpartikelfilter weichen von den Anforderungen an Dieselpartikelfilter ab. Durch den insgesamt niedrigeren Partikelaustritt von Benzinmotoren sind geringere Filtrationsleistungen notwendig, um die gesetzlich geforderten Rußmassengrenzen einzuhalten und der Fokus kann auf die Minimierung des Abgasgedrucks gerichtet werden [32]. Benzinpartikelfilter sind für Neufahrzeuge mit Direkteinspritzung ab September 2017 vorgeschrieben [6]. Es ist davon auszugehen, dass Automobilhersteller katalysierten Partikelfilter den Vorzug geben. Die katalytische Funktionalität ermöglicht eine kontinuierliche, passive Filterregeneration. Der Einbau zusätzlicher Kontrollsysteme kann durch Anpassung vorhandener Sensoren und Bauteile vermieden werden und führt zu insgesamt geringeren Mehrkosten für Hersteller und Kunden. Höhere Abgastemperaturen von Benzinmotoren beschleunigen das Anspringen des Katalysators und erleichtern die Oxidation von Rußpartikeln [33, 34].

Die Integration der katalytischen Funktionalität in ein schaumbasiertes Partikelfiltersystem stellt eine vielversprechende Möglichkeit zur Minimierung von Schadstoff- und Partikelemissionen moderner Benzinmotoren mit Direkteinspritzung dar. Im Optimalfall können Gas- und Partikelemissionen bei geringem Bau-raumanspruch und niedrigem Abgasgedruck material- und kostensparend gesenkt werden. Metallschäume verfügen über eine große geometrische Oberfläche, die sich positiv auf die katalytische Aktivität und ein schnelles Anspringverhalten des Katalysators auswirkt. Partikelfiltereffizienz und Druckverlust hängen von der Porengröße des verwendeten Filtersubstrates ab. Sowohl Filtereffizienz als auch Abgasgedruck steigen mit sinkender Porengröße. Gewählte Porengrößen stellen somit stets einen Kompromiss zwischen ausreichender Filtrationsleistung und möglichst geringem Druckverlust dar. Zwei verschiedene Kombinationen aus Partikelfiltern mit 3-Wege-Katalysator basierend auf Legierungsschäumen mittlerer Porengröße (TWmC-M, 800 µm) und geringer Porengröße (TWmC-H, 450 µm) wurden mit einem herkömmlichen 3-Wege-Katalysator aus Keramik (TWC, 600/4) und einem katalytisch beschichteten Keramikpartikelfilter (GPF, NGK C 650, 300/12) verglichen. Merkmale der Testfilter sind in **Tabelle 12** zusammengefasst.

Name	Typ	Substratvolumen [L]	PGM Verhältnis (Pd/Rh)	PGM Beladung [g/L]	PGM Beladung [g/µ]
TWC	600/4	1.5	14/1	3.84	5.76
GPF (NGK C 650)	300/12	1.5	14/1	3.84	5.76
TWmC-M (Alantum)	800 µm	0.975	14/1	3.84	3.74
TWmC-H (Alantum)	450 µm	1.23	14/1	3.84	4.72

Tabelle 12: Merkmale untersuchter Testfilter

Beide metallschaumbasierten Testfilter weisen geringere Volumina sowie Gesamtbeladungen an Platingruppenmetallen (PGM) verglichen mit den herkömmlichen Katalysatoren auf. In Untersuchungen zeigen Testfilter mit Metallschaumschubstrat bei unterschiedlichen Flussraten niedrigere Druckverluste, schnelleres Aufheizverhalten aufgrund ihrer geringeren thermischen Massen und geringere Emissionen gasförmiger Schadstoffe als die Konkurrenzfilter. Der Filter mittlerer Porengröße (TWmC-M) zeigte hierbei eine Reduktion der Partikelanzahl um 30% (FTP-75, 2.0 L T-GDI), der Filter kleiner Porengröße (TWmC-H) um 63% (WLTC, 2.0 L T-GDI). Im Vergleich dazu ist ein herkömmlicher Keramikpartikelfilter in der Lage, die Partikelanzahl bei gleichen Testbedingungen (WLTC, 2.0 L T-GDI) um 78% zu senken.

Des Weiteren sind die Eigenschaften der Metallschäume vorteilhaft für die Anwendung als Katalysatorträger. Schaumbasierte Katalysatoren verfügen über eine geringe thermische Masse, die schnelles Aufheizen und Anspringen des Katalysators gewährleisten. Legierungsschäume verfügen über eine besonders raue Oberfläche, die zu einer starken Adhäsion des katalytischen Washcoats führt, was eine hohe Lebensdauer des Katalysators selbst bei extremen mechanischen Belastungen ermöglicht. Experimente mit Katalysatoren basierend auf Keramik und Metallschaum bestätigen, dass der Gewichtsverlust nach Ultraschallbehandlung für letztere geringer ist. Die Ergebnisse des Experimentes sind in **Bild 17** aufgeführt.

Die katalytische Aktivität ist abhängig von der Größe der aktiven Oberfläche. **Bild 18** zeigt die geometrische Oberfläche von Metallschäumen mit Porengrößen zwischen 450 bis 1200 µm im Vergleich zu Keramikkörpern mit Wabenstruktur. Die große geometrische Oberfläche der Schäume ermöglicht eine Reduzierung der katalytisch aktiven Beschichtung bei gleichbleibender Aktivität um bis zu 30%. Ein dünnerer Washcoat senkt Stofftransportlimitierungen innerhalb der aktiven Beschichtung und steigert die makroskopische katalytische Aktivität trotz der geringeren Menge an Aktivkomponente.

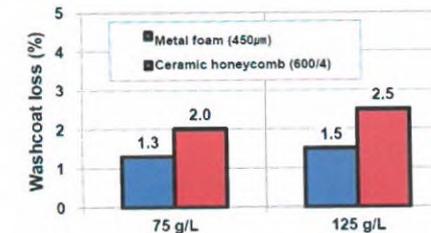


Bild 17: Vergleich des Gewichtsverlustes von beschichtetem keramischem Wabenkörper in 600/4 Konfiguration (rot) und Metallschaum mit einer Porengröße von 450 µm (blau) nach Ultraschallbehandlung

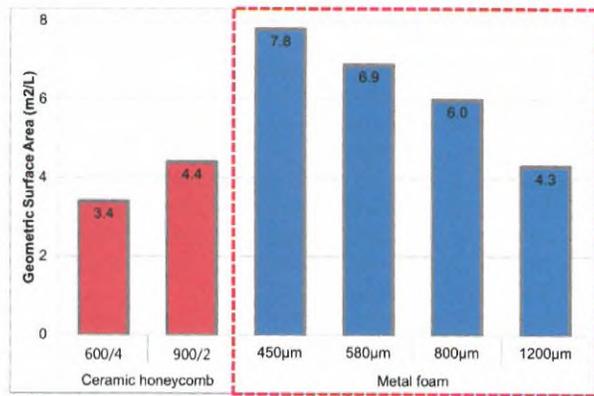


Bild 18: Vergleich der geometrischen Oberflächen von keramischen Wabenkörpern mit Zelldichten in [cps]/Wandstärken in [mil] (rot) und Metallschäumen mit Porengrößen zwischen 450 - 1200 µm (blau)

Des Weiteren ist die Porengrößenverteilung des Materials entscheidend für die katalytische Aktivität. Untersuchungen haben gezeigt, dass im Falle breiter Größenverteilungen eine erhebliche Menge katalytischen Materials nicht hinreichend genutzt wird, da der Abgasstrom aufgrund des niedrigeren Druckverlusts präferenziell durch größere Poren strömt. Ein hoher Katalysatorwirkungsgrad kann nur durch eine optimale Substratanströmung und Geometrie erreicht werden. Metallschäume können mit einheitlichen Porengrößen hergestellt werden, weisen ein turbulentes Strömungsprofil des Gasstroms durch die Schaumstruktur sowie hohe katalytische Aktivität bei geringen Edelmetallbeladungen auf. Drei der Testfilter, deren Charakteristika in **Tabelle 12** aufgeführt sind, wurden im Hinblick auf ihre Gasphasenaktivität im WLTC (2.0 L T-GDI) verglichen. Die Ergebnisse der Untersuchung für den gebräuchlichen Drei-Wege-Katalysator, einen katalysierten Benzinpartikelfilter und einen katalysierten Metallschaumfilter sind in **Bild 19** dargestellt. Sowohl im Neuzustand als auch nach Alterung erzielt der schaum-basierte Katalysator die niedrigsten Emissionswerte für Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide, was die hohe katalytische Aktivität und Robustheit des Systems verdeutlicht. **Tabelle 13** gibt einen Überblick über verschiedene Vor- und Nachteile von Legierungsschäumen als Substrat für Partikelfilter mit katalytischer Beschichtung.

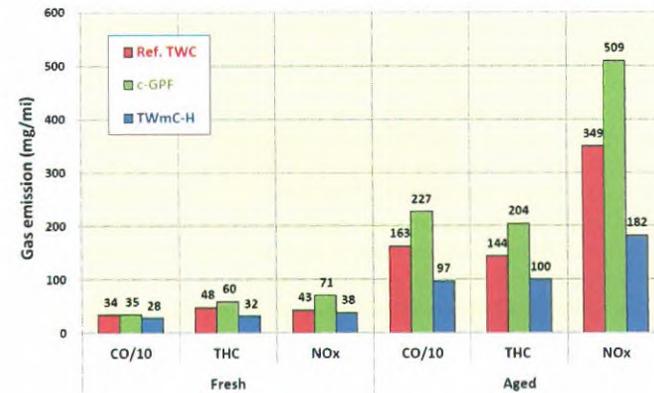


Bild 19: Vergleich der Gasemissionen nach Abgasbehandlung mit einem konventionellen Drei-Wege-Katalysator (Ref. TWC), einem katalysierten Partikelfilter (c-GPF) und einem katalysierten Metallschaumfilter (TWmC-H). Die Untersuchung wurde im Prüfverfahren WLTC mit einem 2.0 L T-GDI Motor durchgeführt. Die Alterung der Katalysatormaterialien erfolgte für 24 h bei 1050 °C unter hydrothermal Bedingungen (CO 2,5%, NO 7,5%, H₂O 10%, N₂ 80%)

	Vorteile	Nachteile
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> ✓ geringere Edelmetallbeladungen für hohe kat. Aktivität ✓ geringeres Volumen erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> × Substratkosten
Formgebung/Verarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Hohe Flexibilität: Jede Form kann realisiert werden ✓ Variable Porengrößen (450 – 1200 µm) ✓ einheitliche Porengrößen oder gezielte Gradienten realisierbar 	
Stabilität	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperaturbeständigkeit bis 1200 °C (NiCrAl) ✓ Hohe thermische Schockbeständigkeit bei schnellem Temperaturwechsel ✓ Hohe mechanische Stabilität gg. Stößen und Vibrationen ✓ Hohe Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit bis 1200 °C (NiCrAl) 	<ul style="list-style-type: none"> × Smp. niedriger als SIC
Filtereigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Geringer Abgasgedruck (unbeladen und beladen) für geringen Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> × Geringere Senkung von Partikelemissionen als Wandstromfilter aus Keramik mit Wabenstruktur
Integration katalytischer Funktionalität	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 3D turbulente Strömung/optimaler Stofftransport ✓ Stärkere Adhäsion und höhere Lebensdauer von Beschichtungen ✓ Große geometrische Oberfläche für schnelles Ansprungsverhalten und hohe Aktivität 	

Tabelle 13: Vor- und Nachteile von Metalllegierungsschäumen als Partikelfiltermedium

4. Zusammenfassung und Ausblick

Verbrennungsmotoren, insbesondere Ottomotoren mit Direkteinspritzung und Dieselmotoren sowohl in On-Road- als auch in Off-Road-Anwendungen, tragen erheblich zur Emission von Schadstoffen und Rußpartikeln bei. Um gesundheitliche Auswirkungen zu begrenzen, unterliegen die Emissionen von Schadstoffen und Rußpartikeln zunehmend strengen gesetzlichen Reglementierungen. Die Einhaltung von Grenzwerten kann durch den Einsatz von Katalysatoren und Partikelfiltern gewährleistet werden. Dabei werden unterschiedliche Materialkonzepte verfolgt. Im OEM-Markt haben sich derzeit keramische Extrudate, welche sich durch hohe Filtrationseffizienz und Kosteneffizienz auszeichnen, durchgesetzt. Trotz verschiedener Regenerationsmaßnahmen ist das Risiko für die Verblockung von Wandstromfiltern vor allem nach Alterung und Einlagerung von Aschepartikeln erheblich. Niedriger ist das Verblockungsrisiko beim Einsatz von Nebenstromfiltern, die Partikel basierend auf den Vorgängen von Diffusion und Adhäsion entfernen, jedoch teils unzureichende Filtrationsleistungen aufweisen. Preislich höher angesiedelte Sintermetallfilter werden insbesondere im Nachrüstmarkt verwendet. Eine Lösung für spezielle Anwendungen bieten teurere Metallschäume auf Basis von hochtemperaturbeständigen Legierungen.

Bild 20 gibt einen zusammenfassenden Vergleich der unterschiedlichen Partikelfiltertypen. Metallschäume eignen sich als Substrate für die Partikelfiltration mit flexiblen Filtrationsleistungen und können die Filtrationsraten von Nebenstromfiltern übertreffen. Allerdings sind Metallschäume Hauptstromfilter, deren Filtrationswirkung auf dem Prinzip der Tiefenfiltration beruht und erreichen nicht dieselben Filtrationsleistungen wie Wandstromfilter. Im Gegensatz zu Wandstromfiltern sind sie jedoch verblockungssicher, selbst unter herausfordernden Betriebsbedingungen. Niedrige Abgastemperaturen bei häufigen Kurzstreckenfahrten und schwefelhaltige Kraftstoffe, die schnell zum Anstieg des Abgasgegenstands oder Verblockung katalysierte Keramikmonolithen führen, stellen für schaumbasierte Systeme kein Problem dar.

Sinterbasierte, poröse Materialien haben eine breite Anwendung bei der Abgasnachbehandlung in Kraftfahrzeugen gefunden. Katalysierte Partikelfilter basierend auf Metallschaum stellen langlebige und robuste Systeme für die katalytische Schadstoffbehandlung und Reduzierung von Partikelmasse in Abgasen dar. Eine hohe Turbulenz des Gasstromes innerhalb der Schaumstruktur, eine große geometrische Oberfläche und sehr gute Stofftransporteigenschaften haben hohe katalytische Aktivitäten zur Folge. Schaumbasierte Katalysatoren besitzen geringere Massen und Volumina als Konkurrenzprodukte aus Keramik und ermöglichen die Einsparung teurer Platingruppenmetalle bei zugleich hoher katalytischer Aktivität. Ihre geringe thermische Masse begünstigt ein schnelles Anspringen des Katalysators. Die hohe offene Porosität und Korrosionsbeständigkeit bieten Lösungen in Märkten, auf denen der Kraftstoff sehr schwefelhaltig ist oder sich aufgrund spezieller Abgasvorschriften kombinierte Systeme aus Oxidationskatalysator und Partikelfilter realisieren lassen. Großes Potenzial bietet Metallschaum

für die Anwendung als Partikelfilter für Benzinmotoren, welches durch die neue Euro 6-Regelung von besonderer Aktualität ist.

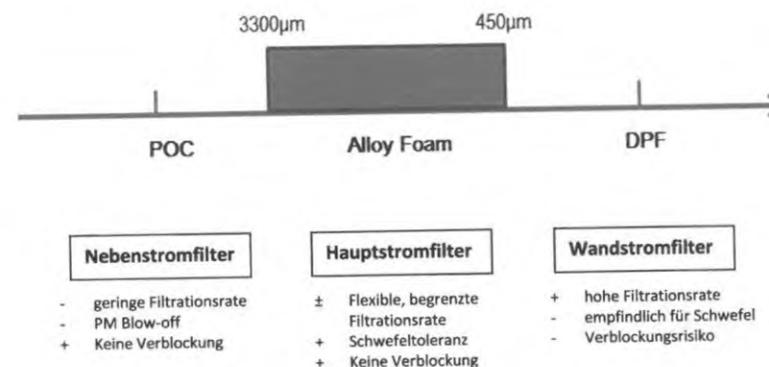


Bild 20: Vergleich von Nebenstrom-, Hauptstrom- und Wandstrompartikelfiltern.

Literatur

- [1] Grant, E. P.: California Redoubles Its Efforts – Mulford-Carrell Act Highlights. Environmental Science And Technology, 9, 1967, 682.
- [2] Richtlinie 70/220/EWG des Rates, 20. März 1970.
- [3] Richtlinie 74/290/EWG des Rates, 28. März 1974.
- [4] Richtlinie 77/102/EWG des Rates, 30. November 1976.
- [5] Richtlinie 88/436/EWG des Rates, 18. Juni 1988.
- [6] Verordnung (EG) Nr. 715/2007, 20. Juni 2007.
Gültig mit Ergänzungen a) - f).
(a) Verordnung (EG) Nr. 692/2008, 18. Juli 2008.
(b) Verordnung (EG) Nr. 595/2009, 18. Juni 2009.
(c) Verordnung (EU) Nr. 566/2011, 8. Juni 2011.
(d) Verordnung (EG) Nr. 459/2012, 29. Mai 2012.
(e) Verordnung (EG) Nr. 2016/427, 10. März 2016.
(f) Verordnung (EG) Nr. 2016/646, 20. April 2016.
- [7] International Maritime Organization (IMO): Emission Control Areas (ECAs) Designated Under MARPOL Annex VI, unter: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx) (aufgerufen am 23.08.2017)
- [8] DIN EN 779:2012-10 Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik - Bestimmung der Filterleistung, Berlin, Beuth Verlag, 2012.

- [9] DIN EN 1822 Teil 1:2011-01 Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA) - Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung, Berlin, Beuth Verlag, 2011.
- [10] *Konstandopoulos, A. G., Kostoglou, M., Skaperdas, E., Papaioannou, E., et al.*: Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration and Aging. SAE Technical Paper 2000-01-1016, 2000.
- [11] Wandstromfilter, unter: <http://www.partikelfilter-fakten.de/startseite/wandstromfilter.html> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [12] Dieselrußpartikelfilter, unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Dieselu%C3%9Fpartikelfilter> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [13] Nebenstromfilter, unter: <http://www.partikelfilter-fakten.de/startseite/nebenstromfilter.html> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [14] DPF – Diesel Particulate-Filter, unter: http://www.axces.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=317&Itemid=589 (aufgerufen am 23.08.2017)
- [15] *Howitt, J., Montierth, M.*: Cellular Ceramic Diesel Particulate Filter. SAE Paper No. 81104, 1981.
- [16] *Wiesinger, J.*: Dieselabgastechnik Teil 3 – Diesel Partikelfilterung, unter: <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/dieselabgas3.htm> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [17] Sintermetallfilter-Technik & Funktionsweise, unter: <http://www.hjs.com/aftermarket/produkte/dieselpartikelfilter/sintermetallfilter/technik-funktionsweise.html> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [18] *Wiesinger, J.*: Rußfilter Nachrüstlösungen, unter: <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/russfilter-twintec.htm> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [19] PM-Kat, unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/PM-Kat> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [20] Sintermetallfilter-Wartung, unter: <http://www.hjs.com/aftermarket/produkte/dieselpartikelfilter/sintermetallfilter/serserv-wartung.html> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [21] NGK Invests in Diesel Particulate Filter Production, unter: <http://www.ngk.co.jp/english/news/2001/0514.html> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [22] Allgemeine Produktinformationen, unter: <http://www.jmdpf.com/german/Dieselpartikelfilter-abgasbehandlungssysteme-DPF-johnson-matthey> (aufgerufen am 23.08.2017)
- [23] *Koll, J., Frisse, H. P., Neumann, P., Jutka, C., Claus, J. C.*: Exhaust Gas Particulate Filter Made of Sintered Metal, EP 2002740649, Anmeldetag: 25. Mai 2002.
- [24] *Brück, R.*: Partikelfalle mit beschichteter Faserlage, DE 10257113, Anmeldetag: 05. Dezember 2002.
- [25] *Kodama, K., Hiranuma, S., Doumeki, R., Takeda, Y.*: Development of DPF System for Commercial Vehicles (Second Report) – Active Regenerating Function in Various Driving Conditions. SAE Paper 2005-01-3694, 2005.
- [26] *Johnson, T. V.*: Diesel Emission Control in Review. SAE Paper 2006-01-0030, 2006.
- [27] *Walther, G., Klöden, B., Büttner, T., Kieback, B., Weißgärber, T., Böhm, J., Boden, A., Böhm, H.-D., Dölling, W., Fröhlich, S.*: Offenporiger Metallschaumkörper und Verfahren zu seiner Herstellung, DE 102009015176, Anmeldetag: 20. März 2009
- [28] *Bürgel, R.*: Handbook High Temperature Materials. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn 1998.
- [29] *Huang, J., Fang, H., Fu, X., Huang, F., Wan, H., Zhang, Q., Deng, S., Zu, J.*: High-Temperature Oxidation Behavior and Mechanism of a New Type of Wrought Ni-Fe-Cr-Al Superalloy up to 1300 °C. Oxidation of Metals, 53, 2000, 273 - 287.
- [30] *Koltsakis, G. C., Katsaounis, D. K., Samaras, Z. C., Naumann, D., Saberi, S., Böhm, A.*: Filtration and Regeneration Performance of a Catalyzed Metal Foam Particulate Filter. SAE paper 2006-01-1524, 2006.
- [31] *Koltsakis, G. C., Katsaounis, D., Markomanolakis, I., Samaras, Z. C., Naumann, D., Saberi, S., Böhm, A.*: Metal Foam Substrate for DOC and DPF Applications. SAE Transactions: Journal of Fuels and Lubricants 2007-01-0659, 2007.
- [32] *Boger, T., Gunasekaran, N., Bhargava, R., Bischof, C.*: Partikelfiltertechniken für Di-Ottomotoren. Motortechnische Zeitschrift, 74, 2013, 452 – 458.
- [33] *Többen, H., Oesterle, J. J.*: Partikel-Abgasnachbehandlung bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Motortechnische Zeitschrift, 74, 2013, 136 – 144.
- [34] *Kern, B. et al.*: Comprehensive Exhaust Emission Control for the Next Generation Gasoline DI Engines. IQPC-Konferenz, Stuttgart, 2012.