

4.2 Partikelfiltration für Dieselmotoren

- Helmut Benkert
St. Gobain Advanced Ceramics Lauf GmbH
Lauf a.d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 334.

4.2.1. Einleitung

Moderne PKW Dieselmotoren erreichen mittlerweile Fahreigenschaften, welche man sich vor 15 Jahren in seinen kühnsten Gedanken nicht vorgestellt hätte. Aus diesem Grund steigen die Marktanteile der Dieselfahrzeuge in Europa stark an. Der bekannt niedrige Kraftstoffverbrauch, der relativ niedrige Preis für Dieselkraftstoff und der nun nahe an den Ottomotor heranreichende Fahrkomfort tragen ebenfalls dazu bei.

In einigen Ländern wurde der Marktanteil >50% bereits überschritten, und man erwartet in 2005 generell, dass die 50% Marke in Europa erreicht wird.

Somit leistet der verbrauchsarme Dieselmotor einen nicht unerheblichen Beitrag zur Verminderung der CO₂ – Emission. Nachteilig sind aber immer die prinzipbedingten hohen Stickoxidemission (DeNox-Systeme), wie auch die seit langem diskutierte Dieselrußemissionen, die selbst bei den modernsten Diesellaggregaten wie z.B. bei der „Common Rail“ Einspritztechnologie zur Zeit nicht vermeidbar ist.

4.2.2. Dieselruß

Dieselpartikel bestehen aus Kohlenstoffzusammenballungen (Ruß) auf denen unverbrannte Kohlenwasserstoffe (meist polycyclische aromatische, PAK) und Schwefelverbindungen angelagert sind. Man kann allgemein sagen, dass Dieselruß aus organischen wie auch anorganischen Bestandteilen zusammengesetzt ist. Der organische Bestandteil überwiegt bei weitem. Die anorganischen (ca. 3%) können

mit verbessertem Kraftstoff z.B. geringer Schwefelanteil, weiter reduziert werden.

Besonders die ultrafeinen Rußpartikel, werden seit langem von Wissenschaftlern als gesundheitsgefährdend diskutiert. Es wird befürchtet, dass die lungengängigen Kleinstpartikel zu der Auslösung von Lungenkrebs beitragen. Obwohl dieser Verdacht bis jetzt noch nicht schlüssig nachgewiesen werden konnte, sollte nach Einschätzung bestimmter Institutionen, wie z.B. Umweltbundesamt, das Risiko durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselmotoren reduziert werden. Außerdem ist die Verbindung Ruß und Staub erst vor kurzem in den USA als kanzerogen eingestuft worden. Weiterhin liegen Erkenntnisse von dem Forscher Jacobson (US Klimaforschung, Stanford Universität) vor, dass Rußpartikel in der Atmosphäre die Erderwärmung beschleunigt.

Verständlicherweise bemüht sich die Automobilindustrie mit motor-energetischen Maßnahmen den Ruß im Ansatz nicht entstehen zu lassen. Man kann den Motor entweder mehr Richtung NO_x – oder Partikelreduzierung einstellen. Das bedeutet eine Maßnahme geht immer zur Last der anderen. Eine Lösung erscheint in den nächsten Jahren nicht realisierbar besonders bei den Dieselaggregaten für Mittelklasse- oder Oberklasseautos.

Im Gegensatz zur PSA – Gruppe (Start Einsatz der Partikelfilter im Jahr 2000) tendiert die deutsche Automobilindustrie dazu, durch Maßnahmen am Motor die Partikelemission zu vermindern, da Partikelfilter nicht nur den Kraftstoffverbrauch erhöhen und die Motorleistung negativ beeinflussen, sondern auch die Herstellkosten deutlich erhöhen.

Es zeichnet sich jedoch immer mehr ab, dass demnächst weitere namhafte Automobilhersteller eine Russfilter-Kombination einsetzen werden.

4.2.3. Emissionsgesetze Euronorm

Die wahrscheinlich nächste größere Herausforderung sollte das Erreichen der zukünftigen Grenzwertvorgaben für PKW Euronorm Stufe 4 sein. Die angestrebten Abgasgrenzwerte max. 0,025 g/km für Partikelemissionen können nun heute bereits mit einem Partikelfilter weit übertroffen werden.

	1992 Euro 1	1996 Euro 2	2000 Euro 3	2005 Euro 4	2008/9 Euro 5 ?
NOx + HC	0,97	0,7	0,56	0,3	0,2
Partikel max g/km	0,14	0,08	0,05	0,025	0,0125

Tabelle 1: Euronormstufen

Es gibt den Koalitionsvertrag, dass die Schadstoffbelastungen durch den Autoverkehr weiter verringert werden sollen, vor allem beim Dieselruß und Stickoxiden. Dafür ist neben steuerlichen Anreizen besonders eine Fortentwicklung der europäischen Abgasnormen mit dem Ziel der Einführung eines Partikelfilters oder vergleichbarer technischer Lösung erforderlich.

Weiterhin ist im Rahmen des Partikelmeasurement- Programmes (PMP) geplant, nicht mehr die Partikelmenge, sondern die Partikelanzahl festzuschreiben. Verschiedene Partikelmessverfahren werden zur Zeit überprüft, da die heutige gravimetrische Methode nach 2005 nicht mehr empfindlich genug ist.

4.2.4. Keramischer Partikelfilter

Die technischen Anforderungen an den Partikelfilter sind sehr hoch. Er muss extremen Temperaturen und raschen Temperaturwechseln widerstehen sowie hohe Abscheidegrade aufweisen. Außerdem wird ein möglichst geringer Druckverlust, lange Standzeit und Wirtschaftlichkeit erwartet.

Als Filtermedien werden oberflächenreiche Strukturen aus hochwärmfesten Materialien, wie keramische Substrate benötigt.

Aus einer Anzahl verschiedener Systeme wie Schaumfilter, Faserwickelfilter, Faserflechtfilter oder Metall-Sinterfilter haben sich die keramischen – „monolithischen“ Zellenfilter (Bild 1) am besten bewährt.

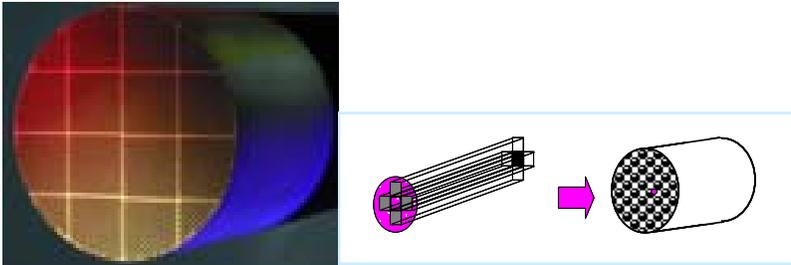


Bild 1: Keramischer monolithischer Zellenfilter

Filtersysteme die diesen Aufgaben gerecht werden, müssen im gesamten Bereich lungengängiger Partikelgrößen einen möglichst hohen Abscheidegrad aufweisen. Werte über 99% werden nach neuestem Stand der Technik erreicht.

Keramische – monolithische (assembled) Zellenfilter mit wechselweise verschlossenen Zellen sind Filter mit großer geometrischer Oberfläche ($1 - 3\text{m}^2/\text{ltr.}$). Sie haben einen geringen Gegendruck und hohe Abscheidungsgrade bei kleinen Gasgeschwindigkeiten. Um von der Eintritts- zur Austrittsseite des Filters zu gelangen, ist das Abgas gezwungen die Wände, die die einzelnen Kanäle voneinander trennen zu durchströmen, wobei die Partikel zurückgehalten werden (Bild 2).

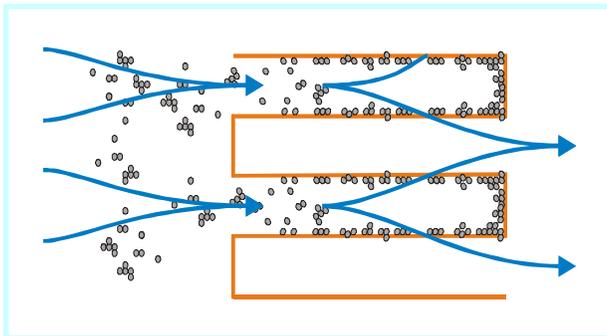


Bild 2: Prinzip des Zellenfilters „Wall-Flow“

Diese Filter werden aus **Cordierit** und seit fünf Jahren mit großem Erfolg aus einer Variante des **rekristallisierten Siliciumcarbids** mit definierter offener Porosität und Porengröße hergestellt (Bilder 3,4).

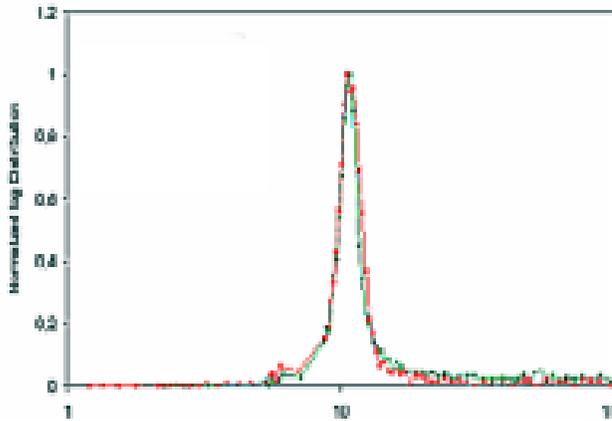


Bild 3: Porengrößen in μm

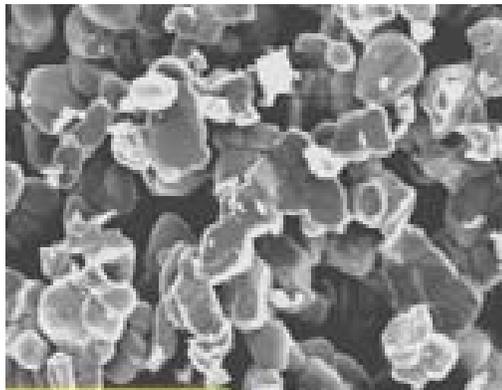


Bild 4: Porosität - Gefügeaufnahme

Mit der Auswahl definierter SiC – Rohstoffe und systematischen Verfahrensabläufen kann man Porengröße und Porenanteil einstellen. Man strebt z.B. eine durchschnittliche Porengröße im d_{50} - Wert von 8 – 12 μm an.

Dazu nachstehend ein tabellarischer Vergleich von typischen Cordieritmaterial und dem jetzt eingesetzten RSiC.

	RSiC (für Wabenkörper)	Cordierite (Wabenkörper)
Biegefestigkeit MPa	40	ca.5
Wärmeleitfähigkeit cal/(cm*s*°C)	0,075	0,0025
Ausdehnungskoeff. 20 – 1.000°C; $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	4	0,7 – 1,0
Temperatur- beständigkeit °C	2.220 (reduzierte Atmosphäre gesintert)	1.400

Tabelle 2: Werkstoffvergleich

Sowohl in einer Reihe von Tests, als auch im täglichen Einsatz hat sich gezeigt, dass eine effiziente Filterung gewährleistet werden kann. Ein zusätzlicher Vorteil von rekristallisiertem Siliciumcarbid ist eine verbesserte inerte chemische Beständigkeit gegenüber katalytische Additiven wie CeO oder Fe₂O₃ oder CuO. Diese oder ähnliche Zusätze werden für die regelmäßige Regeneration des Filters (Abbrennen des angesammelten Rußes nach 500 km) benötigt.

Wie man aus der obigen Tabelle entnehmen kann, hat das SiC-Material eine relativ hohe Dilatation. Somit ist es notwendig die Thermoschockbeständigkeit geometrisch zu lösen. Mit einer Anzahl kleinerer Wabenelemente, die dann zu einem Monolithen verklebt werden, konnte man die Temperaturwechselbeständigkeit den Einsatzbedingungen anpassen.

4.2.5. Vereinfachte Systemdarstellung der Dieselfiltration

Die im Partikelfilter gesammelten Rußpartikel müssen regelmäßig in Intervallen von ca. 500 km abgebrannt werden. Damit wird die Durchlässigkeit des Filters gewährleistet. Durch die aktive Messung des Abgasgedruckes wird der Beladungszustand überwacht. Der Druckverlust dient dabei als Indikator zur Einleitung oder Beendigung des Regenerationsvorganges.

Für die Regeneration ist es notwendig die Abgastemperatur auf 450°C zu erhöhen. Dies erfolgt automatisch durch eine Kraftstoff-Nachein-

spritzung und Zugabe einer Katalysatorflüssigkeit (Ceriumbasis). Die spontan entstehenden unverbrannten Kohlenwasserstoffe werden in einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator verbrannt (Abgastemperaturerhöhung). Dies und motoregelungstechnische Maßnahmen unterstützen die optimale Regenerierung der Partikelfilters während der Fahrt. Zusätzlich muss der Partikelfilter alle 80.000 km, die zweite Generation vermutlich alle 120.000 km, in einer Werkstatt gereinigt werden (Bild 5).

Prinzip des Filters und Regeneration „idealisierte Darstellung“

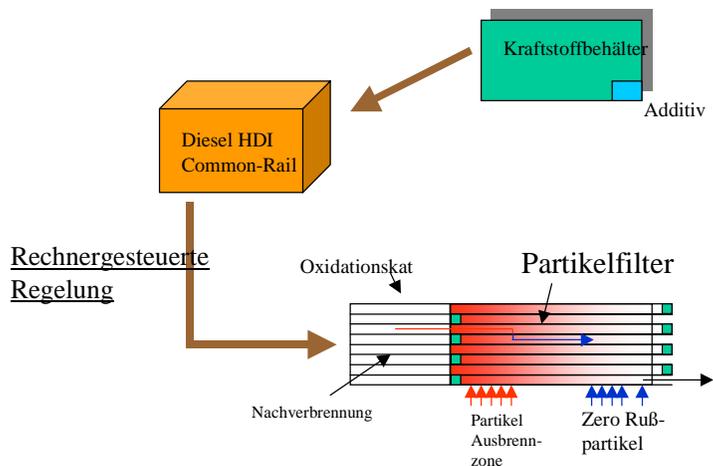
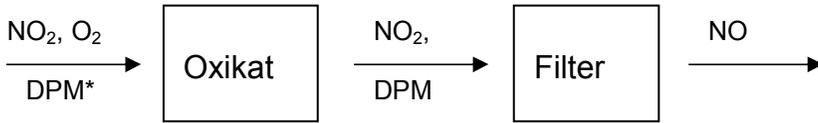


Bild 5: Prinzip des Filters

Mittlerweile sind kombinierte Diesel-Kat-Systeme (D-CAT) oder „Zweistufen - Filter weiterentwickelt (kontinuierliche Reinigung mit NO_2). Es wird angekündigt, dass in dieser Einheit sowohl die Stickoxide wie auch Russpartikel mit einem speziellen Katalysator (z.B. Platinbeschichtung) erfolgreich reduziert werden. Damit ist der Euro 4 Standard erreicht.



*Dieselpartikel

4.2.6. Fazit

Mit dem Werkstoff Siliciumcarbid ist ein guter Durchbruch für den Einsatz der Partikelfiltration bei Diesel-PKW gelungen. In vielen Entwicklungs- und Forschungsbereichen wird mit großer Energie an einer weiteren Optimierung der keramischen Werkstoffe und der Wirtschaftlichkeit insgesamt gearbeitet.

Wir sollten aber nicht übersehen, dass bereits heute eine Möglichkeit besteht, den Anteil der Partikel, welche pro gefahrenen km in die Luft geblasen werden, deutlich zu reduzieren. Sehr anschaulich ist dafür das nebenstehende Diagramm (Bild 6).

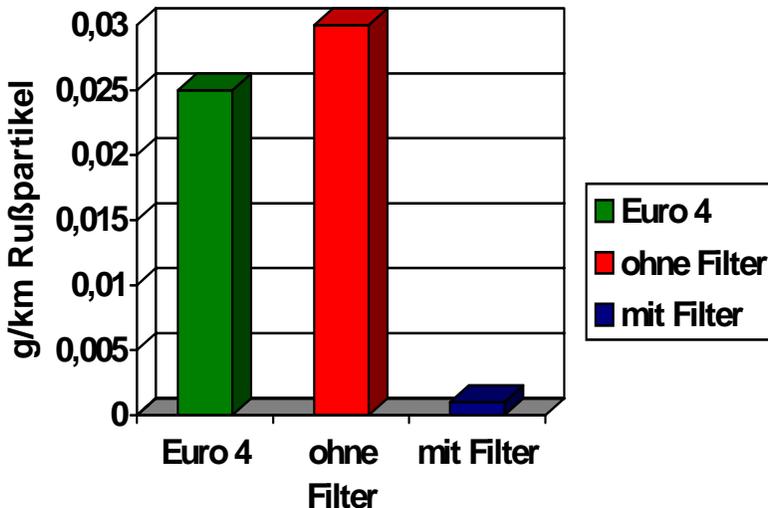


Bild 6: Rußausstoß

Der Ausstoß der Partikel kann durch den Einsatz der keramischen Partikelfilter nahezu auf das Niveau der Ottomotoren reduziert werden.

4.2.7. Literaturhinweise

- IBI – Techno press release
- Referenz PSA – Group
- Centre recherche (CREE) Saint-Gobain
- Eolys Rodia MTZ 3/2002
- SuvaPro geprüfte Partikelsysteme für Dieselmotoren, VERT
- (Version vom 1.8.1999)
- Gesundheitsamt – Umweltlexikon Bayern, Internet
- ADAC motorwelt 11/2001
- Umweltbundesamt
- Tenneco Gilletgruppe

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 32) finden sich auf den folgenden Seiten.

Chemie- und Prozesstechnik

Partikelfiltration für Dieselmotoren

Helmut Benkert
St. Gobain Advanced Ceramics Lauf GmbH
Lauf a.d. Pegnitz

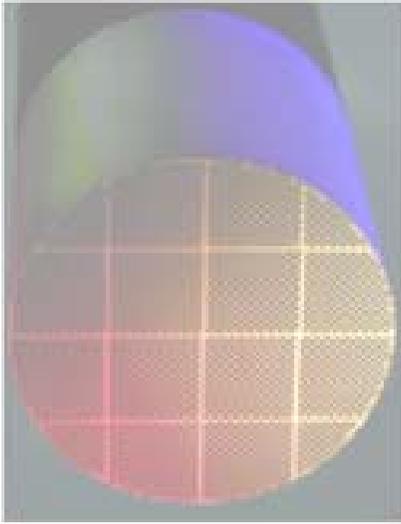


Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren



Quelle: Web.de

Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren



Diesel - Trend

Umwelt

Werkstoff

Konzept

Ausblick

Diesel - Trend



**Siegeszug bei Dieselmotoren
Anteil bei Personenkraftwagen in Deutschland
steigt auf > 38%**

Frankreich: > 50%
Österreich: > 65%

Technologische Entwicklungen der letzten Jahre
waren wegweisend für den Diesekomfort
Abgasurboaufladung und Direkteinspritzung

„Common - Rail - Prinzip“ oder „Multi-Injectors (Pumpe - Dose)“

**Preis, Leistung und Verbrauch sind wichtige
Argumente, aber auch Sauberkeit für die
Umwelt**



Diesel - Trend

Trend zu Dieselmotor hält weiter an!

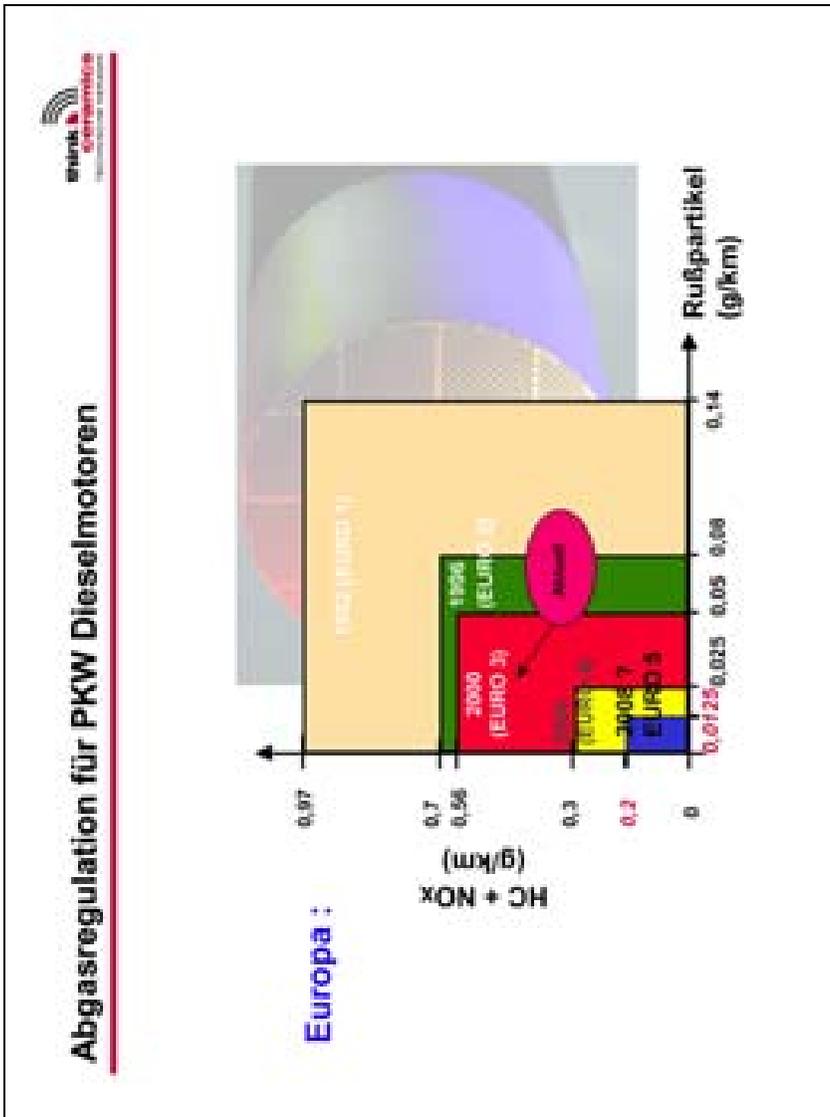
- Niedriger Dieselvebrauch : 20 bis 40% besser als Ottomotoren
- Neue Diesel bieten hohen Fahrkomfort
- Verbrauch und Abgasemissionen sind sehr stabil
- Hohe Fahrleistung
- HC, CO-Emission : besser im Vergleich zu « Benzinern »

Dieselmotoremissionen

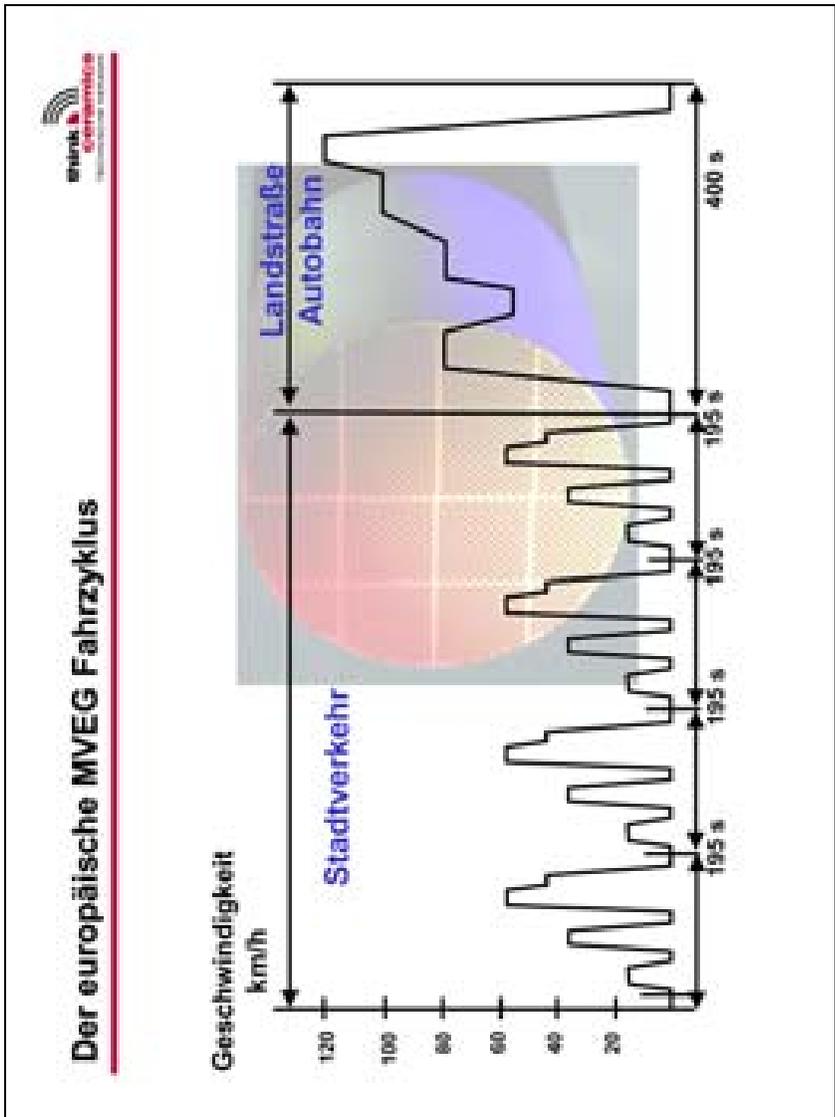


Abgasgrenzwerte werden gesetzlich weiter reduziert

- **EURO 4 (2005) Gesetz wird u.a. den Einsatz eines Partikeelfilters notwendig machen; besonders für Mittelklasse- oder Oberklassewagen**
- **In Nordamerika sehr hoher Druck nicht nur bei LKW - Fahrzeugen den Schadstoffausstoß zu verringern, die Gesetze in Kalifornien allgemein erzwingen bereits einen Partikeelfilter.**



4.2 Folie 7



Schadstoffausstoß durch Dieselmotoren



Dieselfußpartikel enthält elementaren Kohlenstoff ~ 97%
Unverbrannte Kohlenwasserstoffe und
anorganische Verbindungen; Sulfate, Metalloxide ~ 3%

Dieselfuß: mit vielen Kohlenstoffpartikeln
die deutlich $< 1\mu\text{m}$ (ultrafein) sind :

bedeutet extrem lungengängige Partikel
und -----

Viele Experten diskutieren über Art der Schädigung

Strategie

der Automobilhersteller, um EURO IV zu erfüllen

Entwicklung einer neuen Dieselmotorgeneration, welche gänzlich ohne schädliche Emissionen arbeitet und somit unabhängig von „Nachbehandlungen“ ist

Eigentlich die beste Idee –
aber ernstere Emissionsprobleme bestehen bis jetzt weiterhin

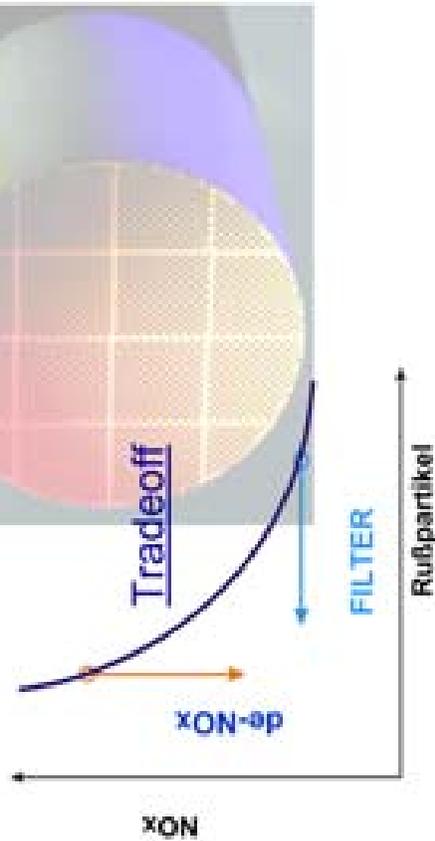
Bewertet man den Kompromiß zwischen NOx, Partikel und Verbrauch, dann erscheint folgender Weg als beste Möglichkeit entweder

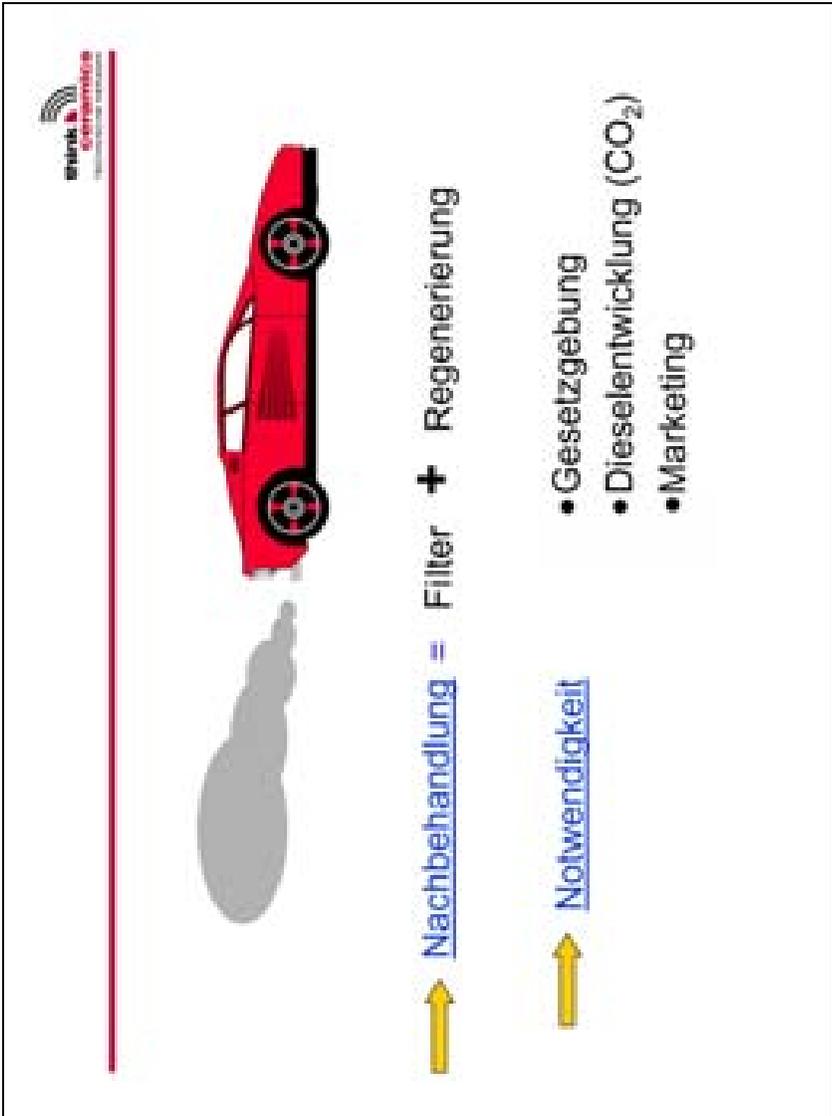
- Hochleistungsfähiges DeNOx System (>70%) - type SCR
- Mittelleistungsfähiges DeNOx system (20 à 30%) + EGR + DPF

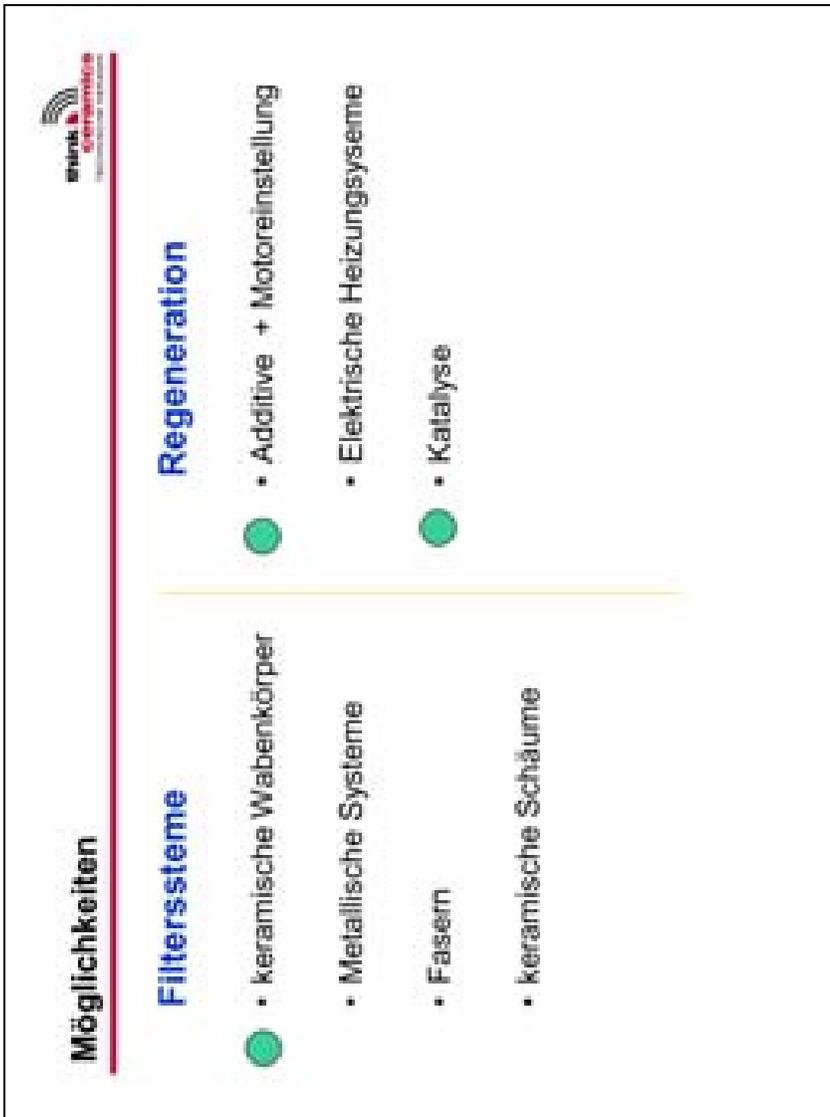


Abhängigkeit von NOx und PM Emissionen

Die spontan entstehende Emission ist je nach Motorenmanagement-
 einstellung NOx- oder Partikel optimiert
 Maßnahmen zur Reduzierung des einen Bestandteiles geht zu Lasten
 des anderen







Anforderungen an den Partikelfilter



mechanische Festigkeit (Schock, Vibrationen)

Thermoschockwiderstand (während der Regeneration)

Temperaturfestigkeit (max Temp erreicht während der Regeneration)

chemische Beständigkeit (Rückstände, H_2SO_4 , Na,....)

Gute Wärmeleitfähigkeit (Regeneration)



Anforderungen an den Partikelfilter



Material : offene Porosität, Porengröße und Morphologie
Korn(Kristall)größen und Homogenität

Struktur : Zellengröße
Filtergeometrie
Wandstärke und Zelldichte (cpsl)

Verbindung : Verkleben der einzelnen Elemente

Auspuffanlage : Montage --- Toleranz und Abdichtung

Kompromis zwischen Druckaufbau / Rückhalt der Partikel

Keramische Materialien



Cordierit Als Anwendung mehr als 20 Jahre bekannt – Temperaturstabilität zu gering

Mullit - SiC

Sialon - SiC

SiSiC



R-SiC bis jetzt **der** erfolgversprechende Werkstoff

Es ist davon auszugehen,
daß die Werkstoffe noch weiter optimiert wird



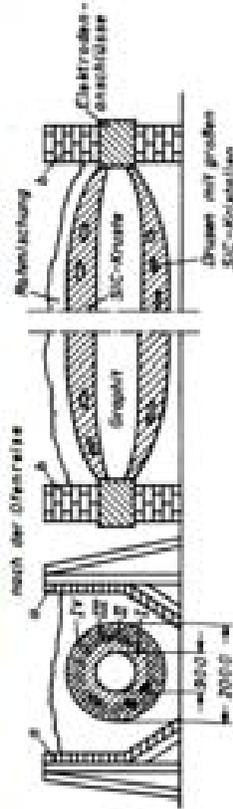
Rohstoff SiC



Herstellung synthetisch z. B. nach dem Acheson Verfahren
(Gemisch aus Sand und Koks)

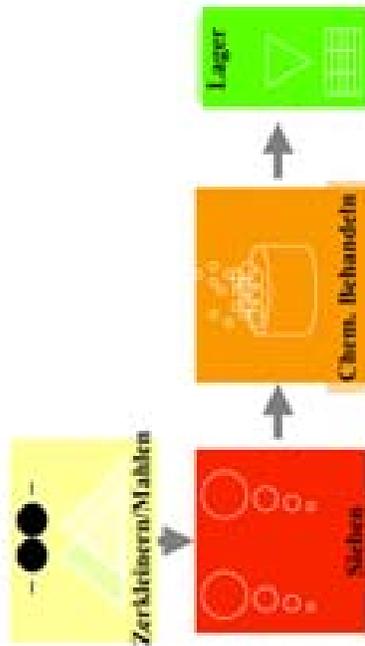


Widerstandsofen
2.400°C



Rohstoff SiC

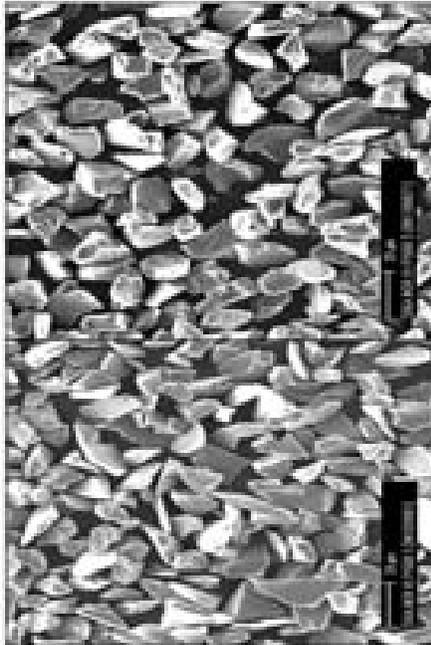
Das synthetische SiC fällt als „Monolith“ an und muß danach weiter verarbeitet werden



Rohstoff SiC

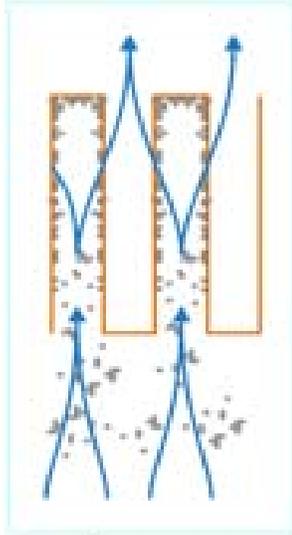


Das synthetische SiC fällt als „Monolith“ an und muß danach weiter verarbeitet werden



Prinzip Partikelfiltration

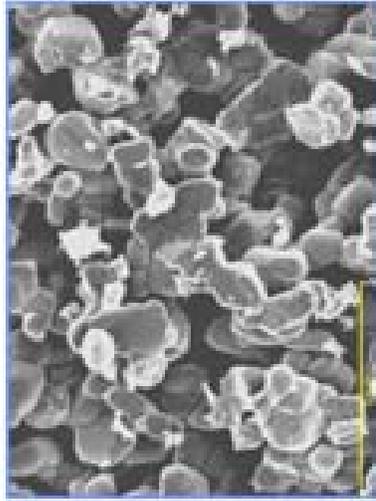
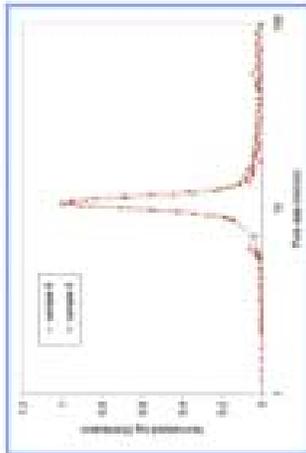
Parallel angeordnete Kanäle, wechselweise vorne und hinten verschlossen



Abgas strömt durch die porösen Wände, die Rußpartikel sammeln sich an den Filterwänden.

Diskontinuierliche Reinigung alle 500km
(nach Überschreiten des def. max Abgasgedruckes)

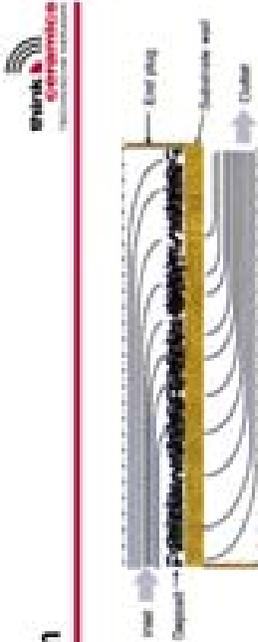
Prinzip Partikelfiltration



- offene Porosität ca 42 %
- mittlerer Porendurchmesser ca 9 -11 μm
- sehr enge Porenverteilung angestrebt
- Biegefestigkeit ca. 50MPa

Blatt 04/05 (2012)

Prinzip Partikeelfiltration



Regeneration

Ein zugemischtes brennbares Additiv (z.B. Ce oder Fe – Basis) wird die Zündtemperatur der angelagerten Rußpartikel auf ca. 450°C senken. Außerdem erhöht man kurzfristig die Abgastemperaturen durch gezielte Nacheinspritzung geringer Mengen Treibstoff. Auf diese Weise wird der Kohlenstoff nachverbrannt

Mögliche Geometrien der Dieselfilter

R-SiC Material
 Dilatation $_{20-1000^{\circ}\text{C}}: 4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
 gute Thermoschockbeständigkeit

Aber durch kleinere Einzelwaberkörper wurde die Thermoschockbeständigkeit wesentlich verbessert

Diese Teile werden zu einem Monolith verklebt

Thermoschockbeständigkeit



Wichtigste Einflußgrößen:

- Biegefestigkeit
- Ausdehnungskoeffizient
- E - Modul
- Wärmeleitfähigkeit
- (Querkontraktionszahl)
- Konstante (u.a. Wärmeübergangszahl)

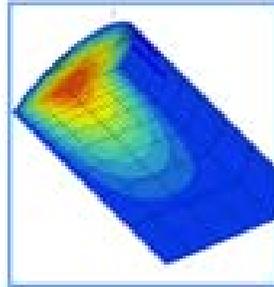
$$TWB = \frac{\sigma_b (1-\mu) \times \lambda}{E \times \alpha} \times K$$

* Diese Beziehung ist eine Näherung unter der Voraussetzung, dass der Keramik-Stein gefahren ist

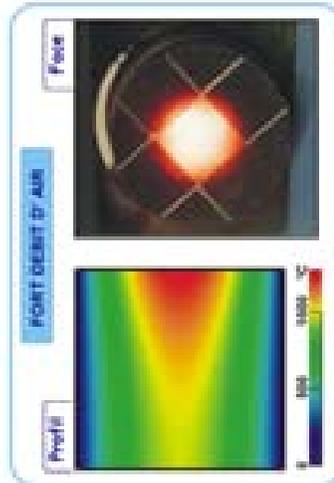
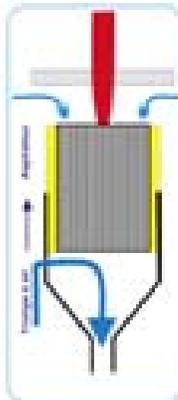
Thermomechanische Betrachtung



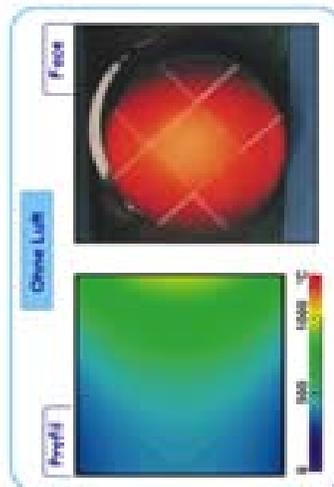
- ↳ Réglage fin du gradient radial :
 $100 < \Delta T < 1000^\circ\text{C}$, für $T_{\text{centre}} > 1250^\circ\text{C}$.
- ↳ Kontrolle der Heizgeschwindigkeit.
- ↳ Kontrolle der Abkühlphase.
- ↳ Unterschiedliche Zyklen.



Thermomechanische Betrachtung



Quelle: [10]



Typische Geometrien der Dieselfilter



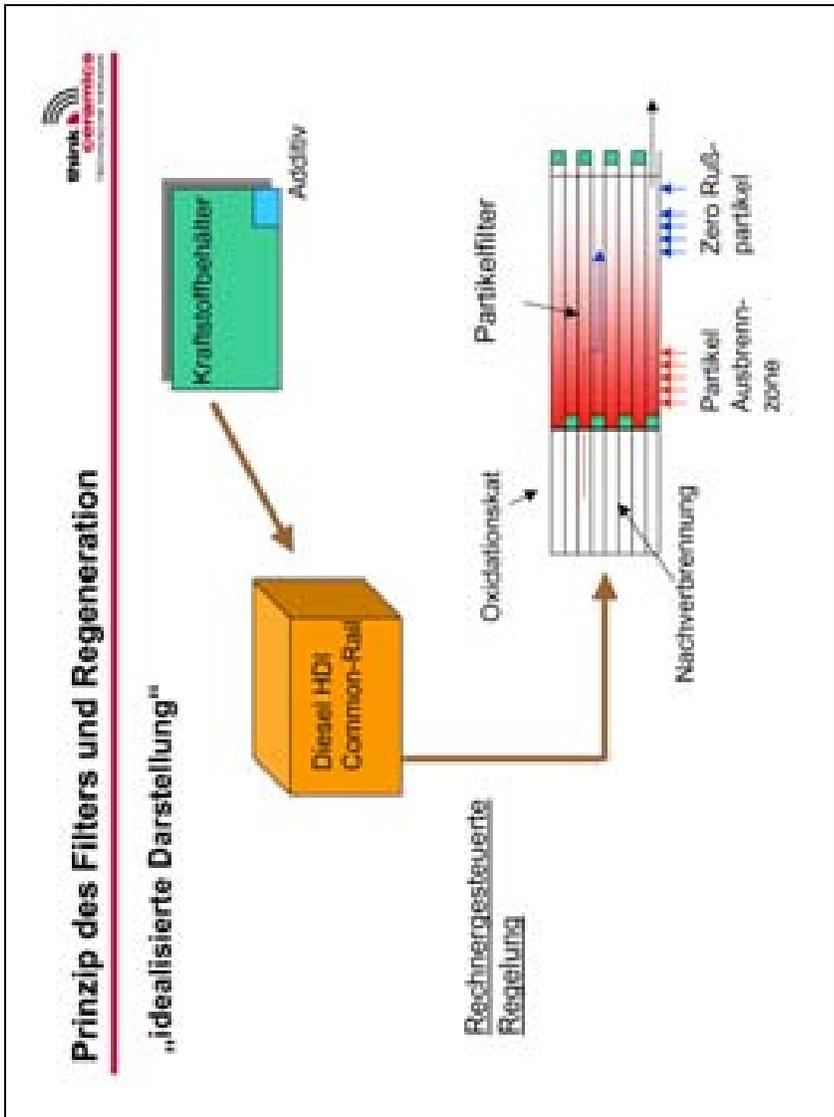
Monolith zusammengesetzt aus
einzelnen Elementen

Zelldichte: 200 - 300 per inc^2

Wandstärke: 0,3 - 0,4 mm

Ø 200 mm, aber flexibel

Länge: 153 - 382 mm





Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren

Mit dem Partikelfilter aus R-SiC hat man eine wirtschaftliche und effiziente Lösung gefunden, die schädlichen Rußpartikel vollständig aus dem Abgas zu filtern und nach einem Zyklus diese rückstandsfrei nachzuverbrennen.

Diese keramischen Rußfilter haben in einer Reihe von Langzeittests ihre Eignung für Personenkraftwagen bewiesen.

Sie sind somit derzeit die beste technische Lösung, um Dieseleruß zu vermeiden. Der Wirkungsgrad ist >99,5% (Partikelanzahl).

Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren



Ausstoßmenge Rußpartikel
nach 80 000 km

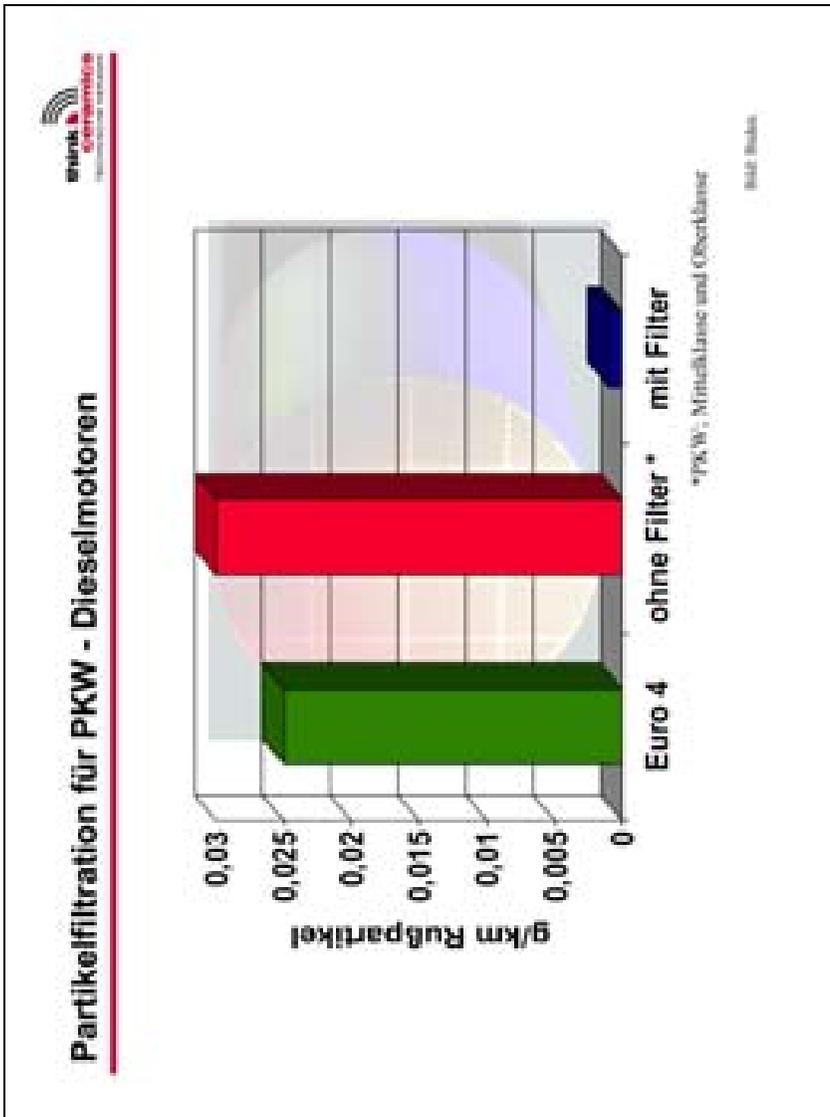


Modernster Diesel ohne Filter:

ca 3000g Rußpartikel
(0,03g/km)

**Dieselmotor mit Partikelfilter: < 100g
(0,001g/km)**

think-ceramics



Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren



Mit der Filterung und Regeneration ist die Chance das Image der Diesel-Pkw in den USA oder Asien wesentlich zu verbessern

Die angekündigte „zweite Generation“ berücksichtigt Rußpartikel und NOx

Somit:

„Rauchen gefährdet die Gesundheit“, wir können dagegen etwas tun!

