

## 4.2 Partikelfiltration für Dieselmotoren

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

*Die Folien finden Sie ab Seite 309.*

### **Einleitung:**

Moderne PKW Dieselmotoren erreichen mittlerweile Fahreigenschaften, welche man sich vor 15 Jahren selbst bei sehr kühnen Gedanken kaum vorstellen konnte. Aus diesem Grund steigen die Marktanteile der Dieselfahrzeuge in Europa stark an. Der bekannt niedrige Kraftstoffverbrauch und der nun nahe an den Ottomotor heranreichende Fahrkomfort tragen ebenfalls dazu bei.

Somit leistet der Dieselmotor einen nicht unerheblichen Beitrag zur Verminderung der CO<sub>2</sub> – Emission. Es verbleibt aber immer noch die seit langem diskutierte Dieselrußemission, die selbst bei den modernsten Dieselaggregaten wie z.B. bei der „Common Rail“ Einspritztechnologie zur Zeit nicht vermeidbar ist.

### **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 weiter reduziert werden.

Besonders sehr feine Rußpartikel werden seit langem von Wissenschaftlern als gesundheitsgefährdend diskutiert. Außerdem ist die Verbindung Ruß und Staub erst vor kurzem in den USA als kanzerogen eingestuft worden.

Verständlicherweise bemüht sich die Automobilindustrie mit motorenergetischen Maßnahmen den Ruß im Ansatz nicht entstehen zu lassen. Eine Lösung erscheint in den nächsten Jahren nicht realisierbar besonders bei den Mittelklasse- oder Oberklasseautos.

Außerdem kann man den Motor entweder mehr NO<sub>x</sub> –reduziert oder partikeloptimiert einstellen. Das bedeutet eine Maßnahme geht immer zur Last der anderen.

### Emissionsgesetze Euronorm

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

	1992 Euro 1	1996 Euro 2	2000 Euro 3	2005 Euro 4
NO <sub>x</sub> + HC	0,97	0,7	0,56	0,3
Partikel max g/km	0,14	0,08	0,05	0,025

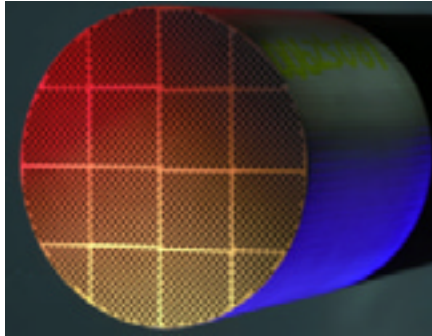
**Tabelle 1:** Euronormstufen

### 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 hochwarmfesten Materialien, wie keramische Substrate benötigt.

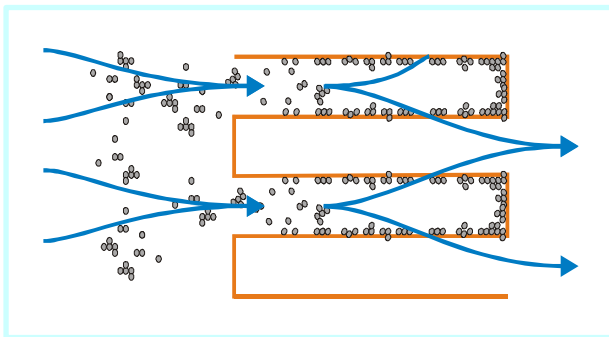
Aus einer Anzahl verschiedener Systeme wie Faser-Wickelfilter, Faserflechtfilter oder Metall-Sinterfilter haben sich die keramischen – „monolithischen“ Zellenfilter (Bild 1) am besten bewährt.



**Bild 1:** Keramischer monolithischer Zellenfilter

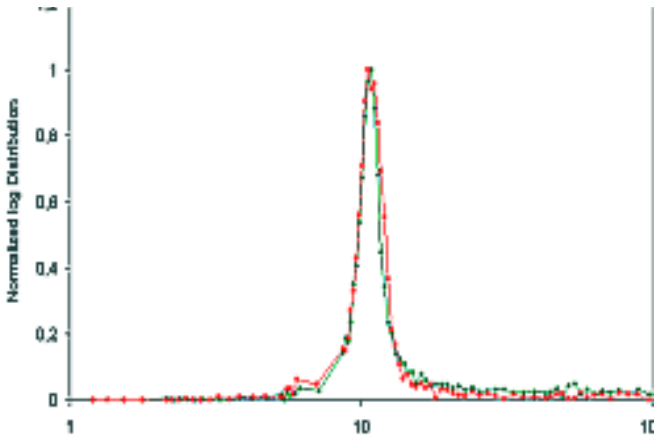
Filtersysteme die diesen Aufgaben gerecht werden, müssen im gesamten Bereich lungengängiger Partikelgrößen einen möglichst hohen Abscheidegrad aufweisen. Werte über 99% werden nach neuestem Stand der Technik erreicht.

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).

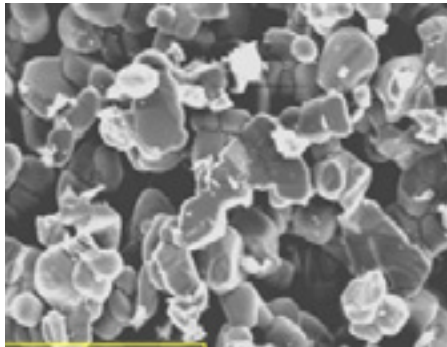


**Bild 2:** Prinzip des Zellenfilters

Diese Filter werden aus **Cordierit** und seit neuesten mit großem Erfolg aus einer Variante **rekristallisiertem Siliciumcarbid** mit definierter offener Porosität und Porengröße hergestellt (Bilder 3,4).



**Bild 3:** Porengrößen in  $\mu\text{m}$



**Bild 4:** Porosität - Gefügebildung

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 $\mu\text{m}$  an.

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

	<b>R-SiC (für Wabenkörper)</b>	<b>Cordierite (Wabenkörper)</b>
Biegefestigkeit MPa	40	ca.5
Wärmeleitfähigkeit cal/(cm*s*°C)	0,075	0,0025
Ausdehnungskoeff. 20 – 1000; x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	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 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oder CuO. Diese oder ähnliche Zusätze werden für die regelmäßige Regeneration des Filters (Abbrennen des angesammelten Rußes nach 500km) benötigt.

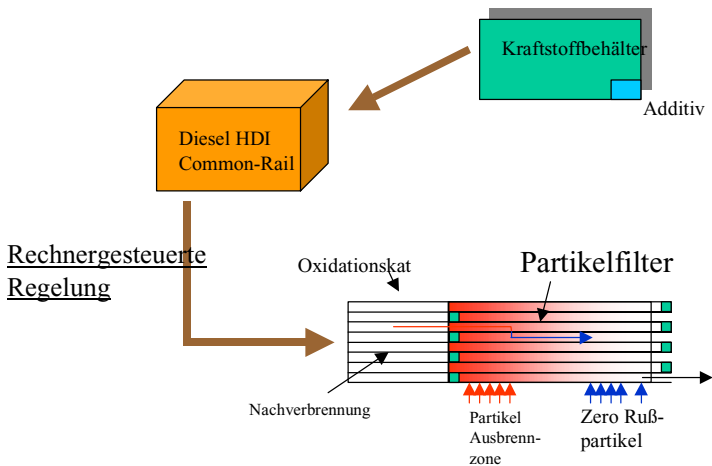
Wie man aus der obigen Tabelle entnehmen kann, hat das SiC-Material eine relativ hohe Dilatation. Somit ist es notwendig die Thermoschockbeständigkeit geometrisch zu lösen. Mit einer Anzahl kleinerer Wabenelemente, die dann zu einem Monolithen verklebt werden, konnte man die Temperaturwechselbeständigkeit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

### **Vereinfachte Systemdarstellung der Dieselfiltration**

Die im Partikelfilter gesammelten Rußpartikel müssen regelmäßig in Intervallen von ca. 500km 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-Nacheinspritzung und Zugabe einer Katalysatorflüssigkeit (Cerium-basis). 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 000km in einer Werkstatt gereinigt werden (Bild5).

### Prinzip des Filters und Regeneration „idealisierte Darstellung“

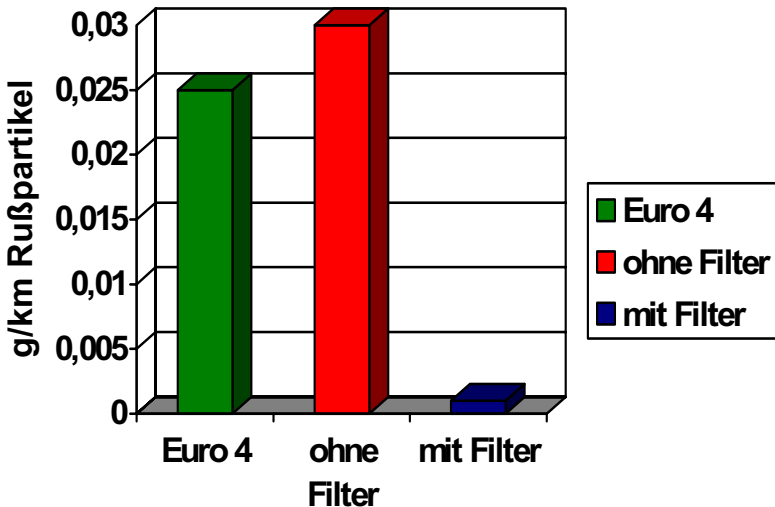


**Bild 5:** Prinzip des Filters

## Fazit

Mit dem Werkstoff Siliciumcarbid ist ein erster 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 Wirtschaftlichkeit 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 mit dem Einsatz der keramischen Partikelfilter auf das Niveau der Ottomotoren reduziert werden.

### 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

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 29) finden sich auf den folgenden Seiten.



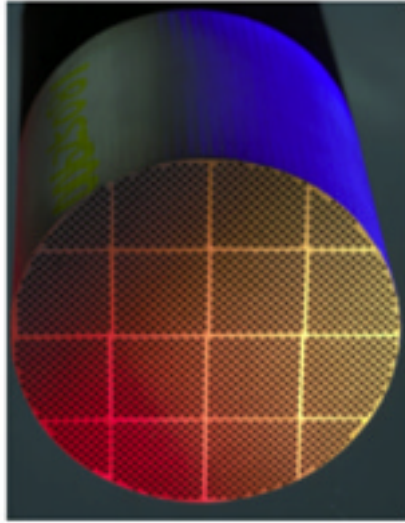
# Chemie- und Prozesstechnik

## Partikelfiltration für Dieselmotoren

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

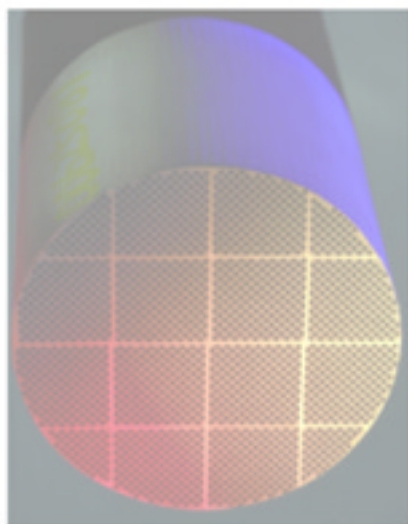


## Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren



Quelle: Ebdem

## Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren



Diesel - Trend

Umwelt

Werkstoff

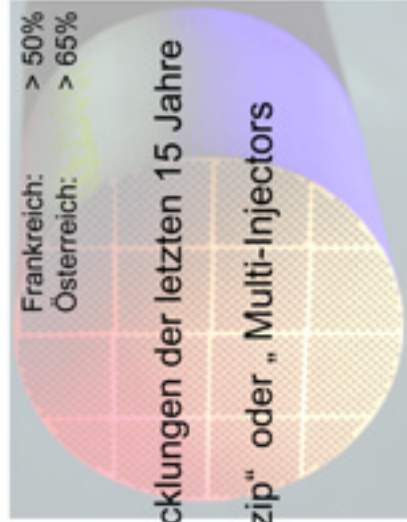
Konzept

Ausblick

## Diesel - Trend



Anteil der Diesel bei Personenkraftwagen in Deutschland steigt auf > 38%



Technologische Entwicklungen der letzten 15 Jahre waren herausragend  
„Common - Rail - Prinzip“ oder „Multi-Injectors (Pumpe - Düse)“

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

## Diesel - Trend

Trend zu Dieselmotor hält weiter an!

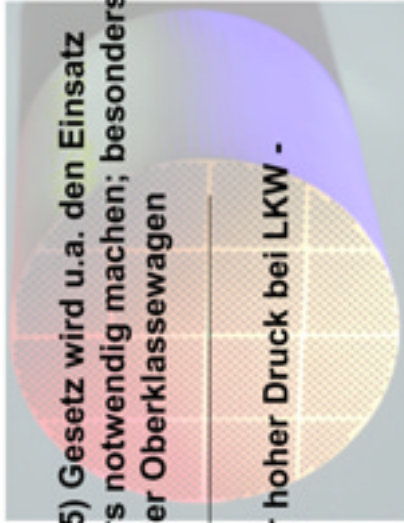
- Niedriger Dieselverbrauch : 20 bis 40% besser als Ottomotoren
- Neue Diesel bieten hohen Fahrkomfort
- Verbrauch und Abgasemissionen sind sehr stabil
- Hohe Fahrleistung
- HC, CO-Emission : besser im Vergleich zu « Benzinern »

## Dieselmotoremissionen

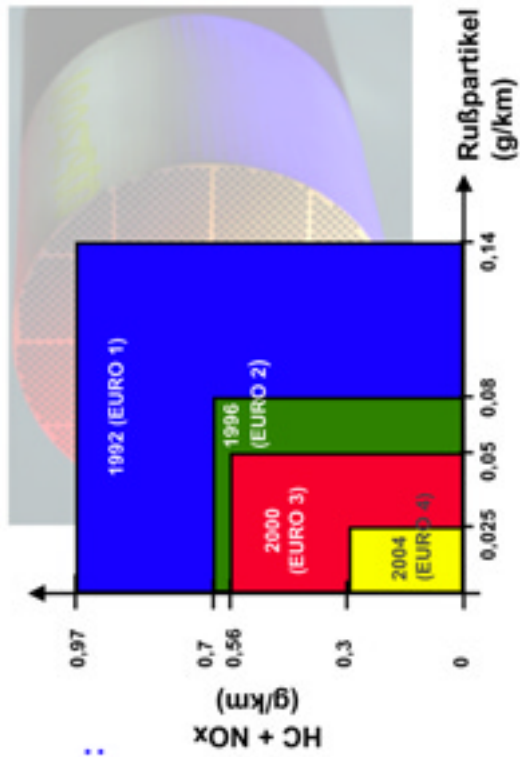


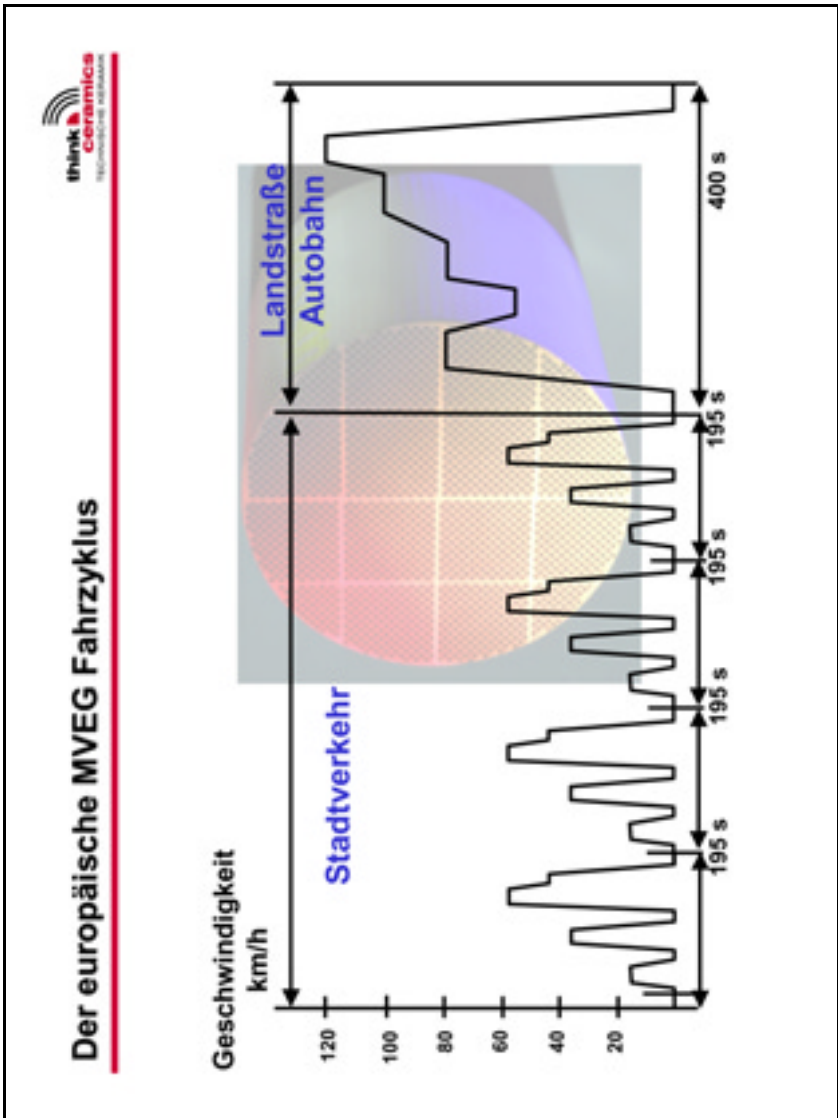
### Abgasgrenzwerte werden gesetzlich weiter reduziert

- EURO IV (2004-2005) Gesetz wird u.a. den Einsatz eines Partikelfilters notwendig machen; besonders für Mittelklasse- oder Oberklassewagen
- In den Staaten sehr hoher Druck bei LKW - Fahrzeugen



## Abgasregulation für PKW Dieselmotoren





Folie 8



## Schadstoffausstoß durch Dieselmotoren



Dieselabgas enthält organische (Ruß) und anorganische Partikel (MeO) ~ 97%  
~ 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

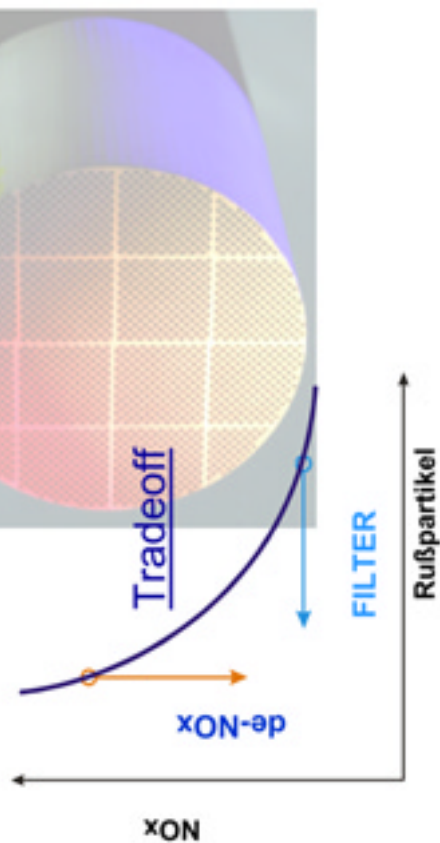
Eigentlich die beste Idee --  
aber ernste Emissionsprobleme bestehen bis jetzt weiterhin

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
- oder

## 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.



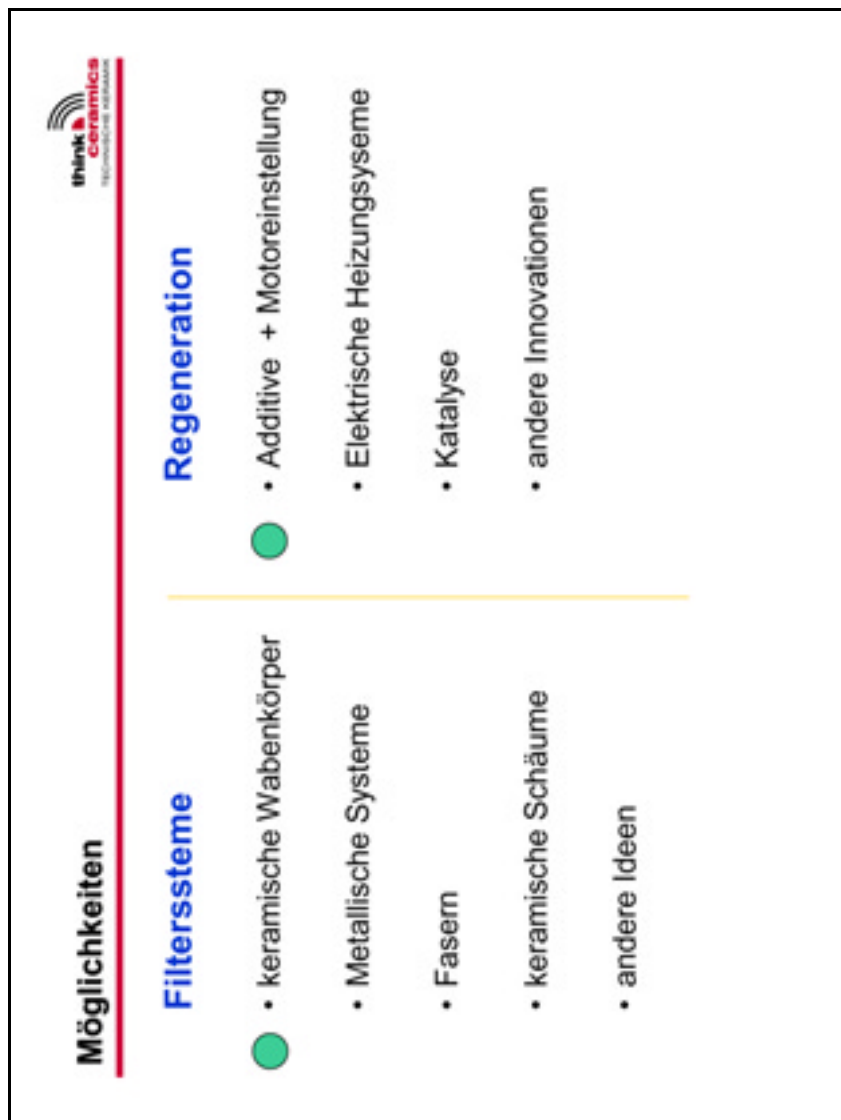
**think ceramics**  
TECHNOLOGISCHE ANWENDUNGEN

Nachbehandlung = Filter + Regenerierung

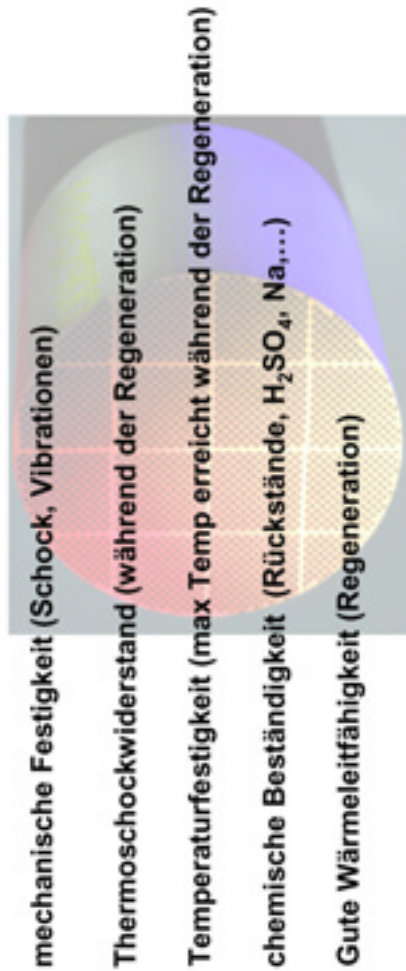
Notwendigkeit

- ☞ Gesetzgebung
- ☞ Dieseleentwicklung (CO<sub>2</sub>)
- ☞ Marketing

Folie 12



## Anforderungen an den Partikelfilter



## Anforderungen an den Partikelfilter

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

**Struktur :** Zellengröße  
Filtergeometrie  
Wandstärke und Zelldichte (cpsj)

**Verbindung :** Verkleben der einzelnen Elemente

**Auspuffanlage :** Montage --- Toleranz und Abdichtung



**Kompromis zwischen Druckaufbau / Rückhalt der Partikel**

## Keramische Materialien



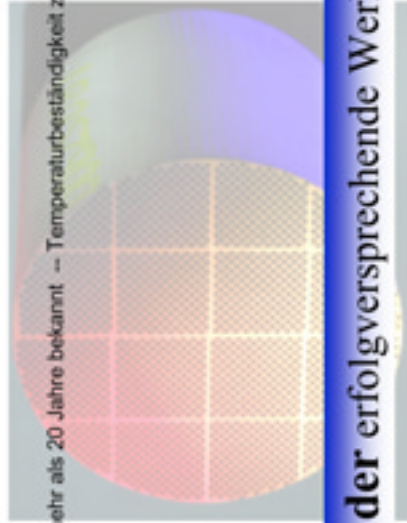
**Cordierit** Als Anwendung mehr als 20 Jahre bekannt -- Temperaturbeständigkeit zu gering

Mullit - SiC

Sialon - SiC

Si - SiC

$\text{Si}_3\text{N}_4$  - SiC



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

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



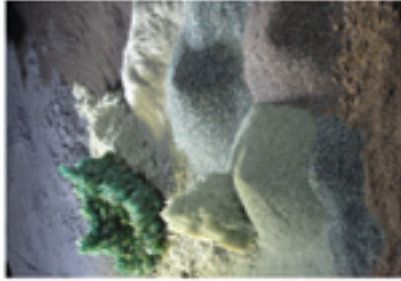
## Rohstoff SiC

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

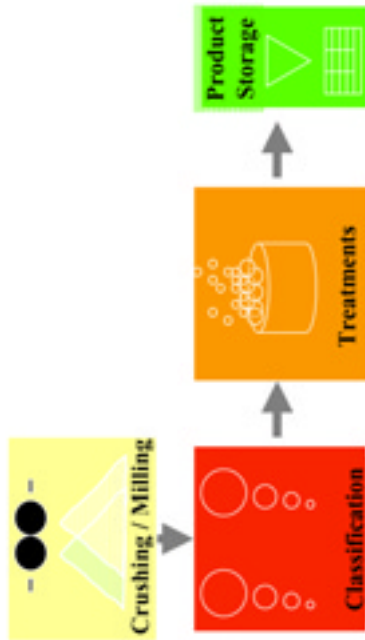
Widerstandsofen  
2.400°C



## Rohstoff SiC

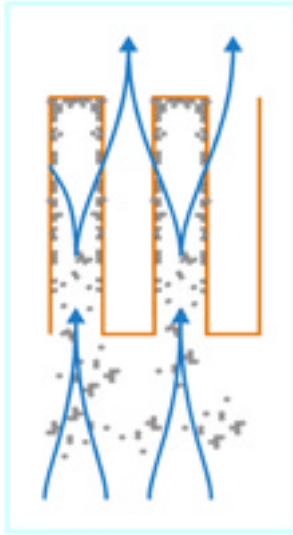


Das synthetische SiC fällt als „Monolith“ an und muß danach weiter verarbeitet werden



## Prinzip Partikelfiltration

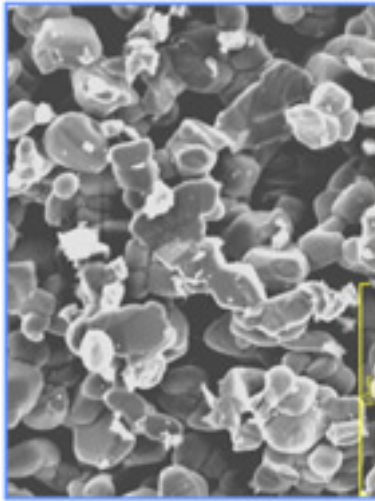
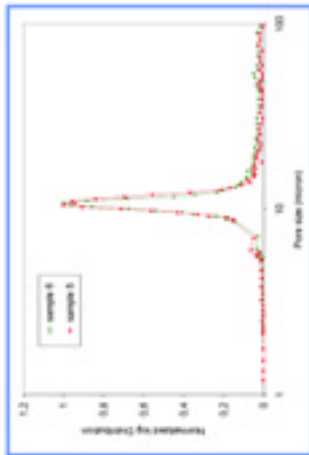
Parallel angeordnete Kanäle,  
wechselweise vorne und  
hinten verschlossen



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

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

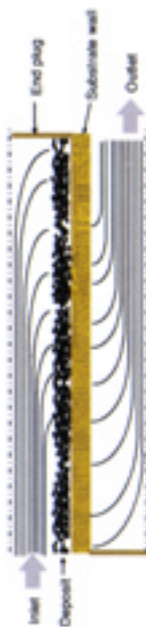
## Prinzip Partikelfiltration



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

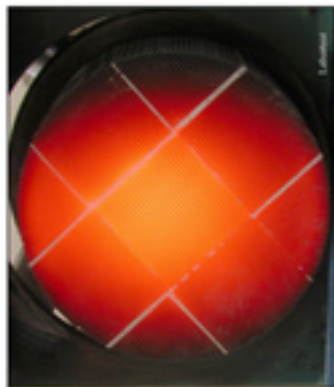
Bilder Quelle: CREE

## Prinzip Partikelfiltration



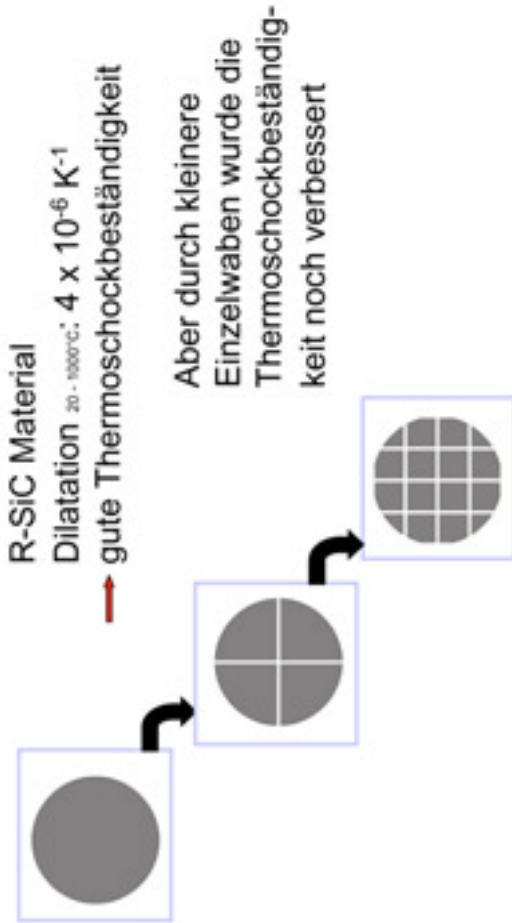
## Regeneration

Ein zugemischtes brennbares Additiv wird die Zündtemperatur der angelagerten Rußpartikel auf ca. 450°C senken. Außerdem erhöht man kurzfristig die Abgastemperaturen durch gezielte Nacheinspritzung geringer Mengen Treibstoff.



Quelle: PSA  
Mit CREE-St. Gobain

## Mögliche Geometrien der Dieselfilter



## Thermoschockbeständigkeit

### Wichtigste Einflußgrößen:

- Biegefestigkeit  $\uparrow$
- Ausdehnungskoeffizient  $\downarrow$
- E - Modul  $\downarrow$
- Wärmeleitfähigkeit  $\uparrow$

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

- (Querkontraktionszahl)  $\downarrow$  • Konstante (u.a. Wärmeübergangszahl)

\* Diese Berechnung ist eine Näherung unter der Voraussetzung, dass die Keramik dicht gebrannt ist

## Typische Geometrien der Dieselfilter



Monolith zusammengesetzt aus  
einzelnen Elementen  
Zelldichte: 200 - 300 per inc<sup>2</sup>  
Wandstärke: 0,3 - 0,4 mm



Ø 200 mm, aber flexibel  
Länge: 153 - 382 mm



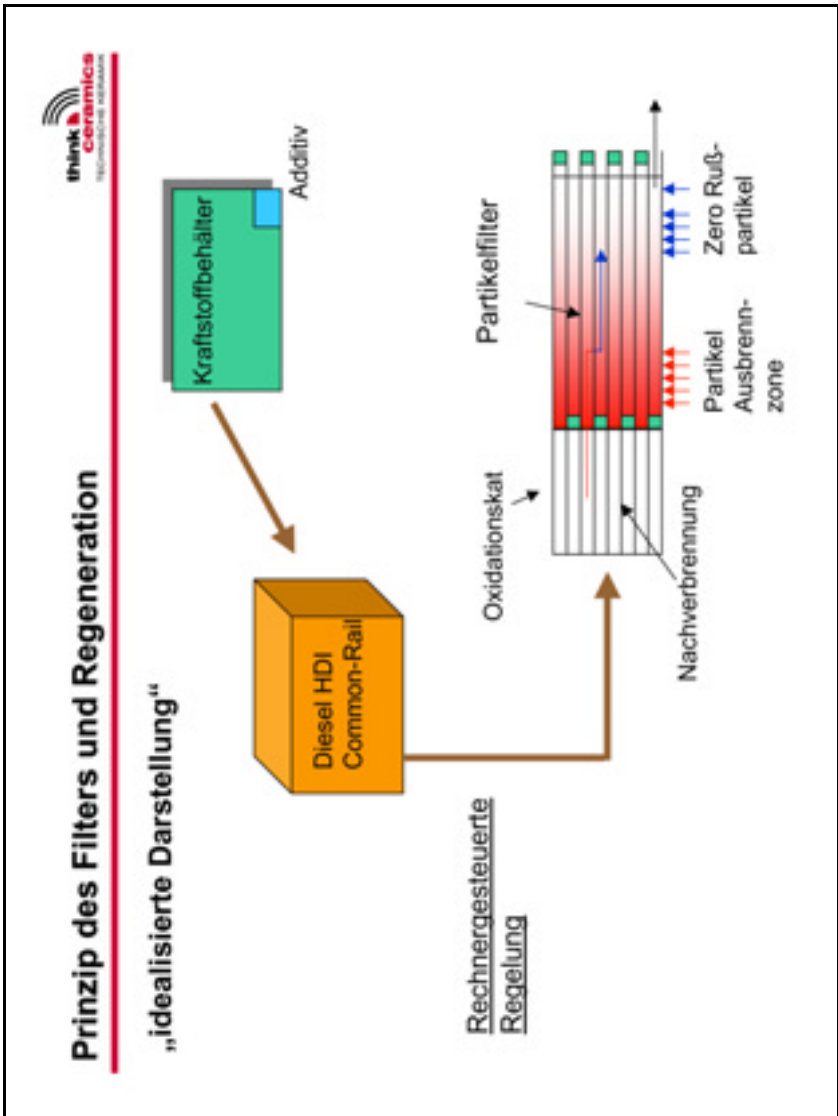
## Thermomechanische Betrachtung

$$R1 := \frac{\sigma_{HC} \times \lambda_{SiC}}{E_{HC} \cdot \alpha_{HC}}$$

$$R2_{90}(c, w) := \frac{\phi_{90}(c, w) \cdot k_{90}(c, w)}{E_w \cdot \alpha_w} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{eq}(c)}{w}$$

$$R2 := R1 \cdot k_T$$

Quelle: CREE



Folie 26

## 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)**

Quelle: ADAC

## Partikelfiltration für PKW - Dieselmotoren

