

19



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



11 Veröffentlichungsnummer: **0 635 625 A1**

12

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: **94105211.0**

51 Int. Cl.<sup>6</sup>: **F01N 3/02**

22 Anmeldetag: **02.04.94**

30 Priorität: **26.06.93 DE 4321363**

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**25.01.95 Patentblatt 95/04**

84 Benannte Vertragsstaaten:  
**DE FR GB**

71 Anmelder: **DORNIER GmbH**

**D-88039 Friedrichshafen (DE)**

72 Erfinder: **Steinwandel, Jürgen, Dr. rer. nat.**  
**Bodanstrasse 19a**  
**D-88690 Oberuhldingen (DE)**

Erfinder: **Willneff, Rainer**  
**Richard-Wagner-Strasse 3**  
**D-88677 Markdorf (DE)**  
Erfinder: **Ströer, Martin, Dr. rer. nat.**  
**Auf dem Ruhbühl 153**  
**D-88090 Immenstaad (DE)**  
Erfinder: **Staneff, Theodor, Dipl.-Ing**  
**Weierstrasse 12**  
**D-88697 Bermatingen (DE)**

74 Vertreter: **Landsmann, Ralf, Dipl.-Ing.**  
**Dornier GmbH**  
**FNS 003**  
**D-88039 Friedrichshafen (DE)**

54 **Verfahren und Vorrichtung zum Abbrand von Russ auf keramischen Diesel-Partikelfiltern.**

57 Verfahren zur Regeneration rußbeladener keramischer Diesel-Partikelfilter, dadurch gekennzeichnet, daß durch selektive Absorption von elektromagnetischer Hochfrequenzstrahlung (z.B. Mikrowellenfrequenz 2.46 GHz) durch die filterabgelagerte Rußschicht deren Zündgrenze erreicht wird und der Rußabbrand im Sauerstoffüberschuß des Dieselabgases erfolgt. Hohe lokale elektrische Feldstärken der magnetischen ( $H_{10}$ ) oder elektrischen ( $E_{010}$ ) Grundmoden werden eingesetzt. Die Feldverstärkung des magnetischen  $H_{10}$ -Modus wird durch kapazitive Kopplung in einem Rechteckhohlleiter (Resonator) vorgenommen. Die Ruß-Zündtemperatur wird durch katalytisch aktive Substanzen abgesenkt.

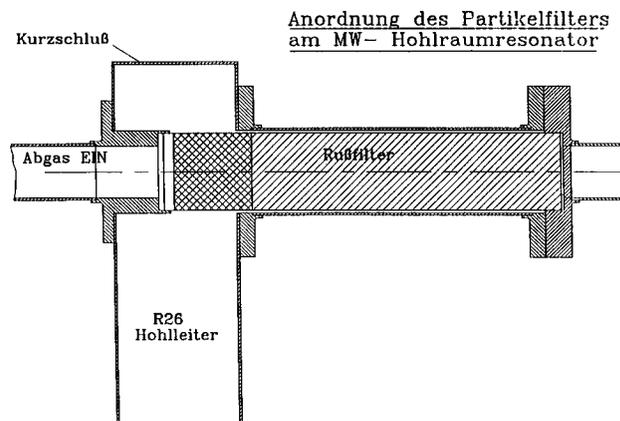


Fig. 3: Vorrichtung zum Rußabbrand für motorische Anwendungen  
(Rechteckhohlleiter)

EP 0 635 625 A1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regeneration rußbeladener keramischer Diesel-Partikelfilter

Rußpartikel (anorganisch Komponenten, graphitische C-Komponenten sowie höhere aliphatische, alizyklische und aromatische Kohlenwasserstoffe) können bei allen technischen Verbrennungen mit kohlenstofftragenden Verbindungen auftreten.

Besonders schädlich ist bei der Partikelemission von Dieselmotoren das Auftreten rußadsorbierter polykondensierter aromatischer Kohlenwasserstoffe (gesundheitsgefährdend bis cancerogen, z.B. 3 bis 4 Benzpyren und Nitroaromaten).

Im Hinblick auf derzeitige und zukünftig zu erwartende Emissionsgrenzwerte (Partikel) reichen motorische Maßnahmen alleine nicht aus. Dazu sind nachmotorische Abgasbehandlungsmethoden erforderlich.

Dabei stützt sich die überwiegende Mehrzahl von Rußminderungsverfahren auf den Einbau von Partikelfiltern (Oberflächenfilter, Tiefenfilter) in den Abgaskanal.

Durch den Rußablagerungsprozess verstopft das Filter im Lauf der Zeit immer mehr, was zu einer beträchtlichen Erhöhung des Abgasgedruckes (Filterstaudruck) und damit zu einer teilweise erheblichen Reduzierung der Maschinenleistung führt.

Daher ist in bestimmten Zeitintervallen eine Filterregeneration durch Abbrand des angesammelten Dieselrußes erforderlich.

Aus chemisch-thermodynamischer Sicht ist dazu der bei Dieselmotoren grundsätzlich vorhandene Gehalt an freiem Sauerstoff ausreichend. Die absoluten thermodynamischen Gleichgewichte liegen bei allen in Frage kommenden Abgasbedingungen (Rußkonzentration, Sauerstoff-Partikeldruck, Gesamtdruck und Temperatur) in Richtung quantitativer Oxidation zu Kohlendioxid und Wasser.

Infolge reaktionskinetischer Kriterien (Aktivierungsenergie zur Rußzündung) werden bei rußbeladenen Partikelfiltern die thermodynamisch favorisierten Zustände rein thermisch erst ab ca. 600° C hinreichend schnell realisiert.

Diese Temperaturen stehen im Regelfall in Abgasen von Dieselmotoren nicht zur Verfügung. Daher wurde in der Vergangenheit versucht, durch Katalysatoren (Filterbeschichtung oder direkter Bestandteil des Filterkörpers-Vollmaterials) die Zündtemperatur des Rußes soweit abzusenken, daß die normalerweise nutzbaren Abgastemperaturen bei Dieselmotoren (ab ca. 200° C) zum Rußabbrand herangezogen werden können. Beschrieben werden dabei Verfahren, wo als katalytisch aktive Materialien Mischoxide (z.B. **DE-OS 29 51 316, DE-OS 31 41 713, EP-A-0 160 482**) oder Edelmetalle in Zeolithmaterialien (z.B. **DE 37 16 446 C2**) zum Einsatz kommen.

Hinsichtlich der großen Schwankungsbreiten der Abgastemperaturen bei dieselangetriebenen Fahrzeugen erwiesen sich die mittel Mischoxidkatalysatoren erreichbaren Absenkungen der Rußzündtemperaturen als nicht ausreichend für einen zuverlässigen Rußabbrand.

Durch die Verwendung zeolithgestützter Edelmetallkatalysatoren konnte das Abbrandverhalten zwar deutlich verbessert werden, jedoch erwies sich auch dieses Verfahren als noch nicht optimal geeignet. Allen derzeit beschriebenen rein katalytischen Verfahren ist gemeinsam, daß diese ohne zusätzliche Maßnahme nicht zu einem zuverlässigen Rußabbrand bei allen fahrzeugspezifischen Betriebsbedingungen führen.

Dazu können entweder chemische Promotoren (Additive im Brennstoff oder separate Eindüsung in den Abgaskanal vor dem Partikelfilter) angewandt, oder Maßnahmen zu einer Zusatzheizung der Filter (bzw. des Rußes) getroffen werden.

Da der Umgang mit chemischen Promotoren nicht in allen Fällen unproblematisch ist, kommt den additivfreien Verfahren eine wichtige Bedeutung zu.

Anzustreben sind dabei Filter (Bzw. Ruß-Aufheizverfahren, die nach Möglichkeit ohne zusätzlich katalytisch aktive Substanzen wirksam sind).

Aufgrund gegebener technischer Randbedingungen ist es dabei vorteilhaft, schnelle Temperaturerhöhungen zur Rußzündung zu realisieren. Da dies mit konventionellen Widerstand-Heizelementen nur bedingt möglich ist, bieten sich in diesem Zusammenhang elektromagnetische Hochfrequenzverfahren an.

Bei den normalerweise üblichen HF-Heizverfahren (Frequenzbereich ca. 0,5 GHz bis 6 GHz, in Ausnahmefällen auch darüber) wird eine Volumenheizung angestrebt (beispielsweise Mikrowellen-HF-Verfahren zur raschen Sinterung bei keramischen Werkstoffen).

Entsprechende volumenspezifische Aufheizungen von rußbeladenen keramischen Partikelfiltern zum Rußabbrand mittels Mikrowellen (elektrische und magnetische Verlustleistungen) werden in der Literatur beschrieben (z.B. **SAE-Paper 890174, SAE-Paper 90037**). Im Gegensatz dazu besteht die Aufgabe der vorliegenden Erfindung darin, die mikrowellenspezifischen Absorptionseigenschaften von filterabgelagertem Dieseltuß (ausschließlich dielektrische Verluste) bei gleichzeitig minimal möglichem Wärmeübergang in das keramische Filtermaterial (bestimmende Größe: Wärmeleitfähigkeit der Filterkeramik) dahingehend zu nutzen, daß der überwiegende Anteil der HF (MW)-Leistung zur Rußheizung bis zur Zündgrenze genutzt

wird.

Der Erfindung liegt weiter die Aufgabe zugrunde, eine großvolumige Filteraufheizung so gut wie möglich zu verhindern.

Zum einen ist eine derartige Vorgehensweise infolge des notwendigen Kriteriums einer möglichst raschen (und effizienten) Partikelauflösung erforderlich.

Zum anderen ist zu berücksichtigen, daß alle keramischen Materialien bei steigender Temperatur ansteigende Werte der elektrischen Leitfähigkeit aufweisen und damit verstärkt Mikrowellenleistung absorbieren.

Die in den Patentansprüchen angegebene Lösung der Aufgabe wird nachfolgend erläutert: Bei der Absorption von HF-Energie durch (dielektrische) Materialien führt der allgemeine physikalische Temperaturgang der elektrischen Leitfähigkeit zu dem bekannten Effekt des "Thermal Runaway", weil es durch die positive Rückkopplung von Temperaturerhöhung und anwachsender HF-Absorption zu einer katastrophalen Keramik-Überhitzung kommen kann.

Falls einmal ein solcher, sich selbst verstärkender Effekt in Gang gekommen ist, ist dieser durch keinerlei Maßnahmen (zeitliches Regelproblem!) mehr zu kontrollieren und es kommt zu einer irreversiblen Schädigung des Filtermaterials bis hin zum Totalausfall.

In der Praxis kann der Effekt des "Thermal Runaway" dadurch vermieden werden, daß die HF-Energie entweder gepulst eingestrahlt wird oder bei längerer HF-Einwirkung die eingestrahlte HF-Energie (resp. Ruß-Verbrennungsenthalpie) bezüglich möglicher Wärmeabfuhr (Strahlung und Konvektion) sorgfältig ausbalanciert wird. Im Regelfall wird letzteres Kriterium durch Anpassung der HF-Energie an den jeweiligen Gasdurchsatz (Konvektionskühlung) erreicht.

Bei nichtmagnetischen Materialien hängt eine Einkopplung von HF-Leistung von der komplexen Dielektrizitätskonstanten (DK) ab:

$$\epsilon = \epsilon' + i \epsilon'' \quad (1)$$

bzw. vom dielektrischen Verlustwinkel  $\delta$ :

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (2)$$

$\epsilon$  ist i.a. eine Funktion der Temperatur und der Frequenz.

Die volumenspezifische Absorption von HF-Energie innerhalb eines absorptionsaktiven Materials ist gegeben durch:

$$P_{\text{abs}} = \pi \nu \epsilon'' \tan \delta / E^2 \quad (3)$$

mit  $\nu$  der Frequenz und E der mittleren elektrischen Feldstärke im absorbierenden Volumen.

Für Materie, deren Verluste durch dielektrische Leitfähigkeit definiert werden, gilt:

$$\epsilon'' = \sigma / 2\pi \nu \quad (4)$$

mit der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  in  $(\Omega\text{m})^{-1}$ . Damit ergibt sich für die umsetzbare Verlustleistungsdichte (Watt/m<sup>3</sup>):

$$P_{\text{abs}} = 1/2 \sigma \tan \delta / E^2 \quad (5)$$

Das in ein absorbierendes Volumen eindringende elektromagnetische Feld wird durch Absorption geschwächt. Damit ergibt sich je nach Materie und Frequenz des elektromagnetischen Feldes eine begrenzte Eindringtiefe  $d_c$ :

$$d_c = c / 2\pi \nu \left( \frac{2 \epsilon_{\text{O}}}{\epsilon' \left( (1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1 \right)} \right)^{1/2} \quad (6)$$

mit  $c = 3 \cdot 10^8$  m/sec (Lichtgeschwindigkeit)

und  $\epsilon_{\text{O}} = 8,859 \cdot 10^{-12}$  Asec/Vm (die geläufige Formel für die Eindringtiefe in gute elektrische Leiter

- "Skin-Effekt"- erhält man durch die Grenzwertbetrachtung  $\tan^2 \delta \gg 1$  !).

Die Zeitabhängigkeit der Aufheizung von filterabgelagertem Dieselruß wird in einer ersten Näherung durch ein Randwertproblem für die instationäre Wärmeleitungsgleichung beschrieben. Unter den vorliegenden Bedingungen ist die Eindringtiefe der elektrischen Felder groß gegen die Schichtdicke der Rußbelegung, so daß die durch die Absorption der Mikrowellenstrahlung pro Zeit- und Volumeneinheit entstehende Wärmemenge über die Schichtdicke konstant ist. Die anfängliche Temperaturerhöhung, bei der noch kein wesentlicher Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet, ist dann durch

$$T(t) - T_0 = \frac{Q}{c_R \rho_R} t \quad (7)$$

gegeben, mit der elektrischen Verlustleistungsdichte im Ruß  $Q$  und der spezifischen Wärme  $c_R$  (Dichte  $\rho_R$ ) von Ruß. Neben dieser anfänglich gleichförmigen Erwärmung muß die Wärmeabgabe an das Filter berücksichtigt werden. Diese wird wesentlich durch die Zeitkonstante

$$\tau = \frac{c_R \rho_R}{4\lambda_R} D^2 \quad (8)$$

und den Quotienten

$$\eta = \left( \frac{c_R q_R \lambda_R}{c_K q_K \lambda_K} \right)^{1/2} \quad (9)$$

bestimmt, mit der Wärmeleitfähigkeit vom Ruß  $\lambda_R$  (Keramik  $\lambda_K$ ) und der Dicke  $D$  der Rußschicht. Mit diesen Konstanten gilt für die Erwärmung der Rußschicht an der Gasseite bei Vernachlässigung der Wärmeleitung des Gases:

$$T(t) - T_0 = \frac{Pd t}{c_R \rho_R} \left\{ 1 - \frac{8}{1 + \eta} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{\eta - 1}{\eta + 1} \right)^n \operatorname{erfc} \frac{2n + 1}{(t/\tau)^{1/2}} \right\} \quad (10)$$

Da die Materialdaten der Rußschicht und des Keramikfilters im wesentlichen festlegen, kann die Erwärmung der Rußschicht nur durch die eingekoppelte Leistung  $Pd$  und die Schichtdicke  $D$  beeinflusst werden. Die Betriebsparameter für die Filterregeneration sollten so gewählt werden, daß ohne starke Erwärmung des Filters die Zündtemperatur in der Rußschicht erreicht wird. Den Gleichungen (8) bis (10) zufolge sollte hierfür die Schichtstärke der Rußbelegung an der Filtereintrittsfläche mehrere 100  $\mu\text{m}$  betragen. Ferner muß die elektrische Feldstärke der eingestrahlte Mikrowelle bei einigen  $\text{kV/cm}$  liegen, um die erforderliche Verlustleistungsdichte zu erzielen. Diese Feldstärken lassen sich mit vertretbarem Aufwand nur durch den Einsatz von Mikrowellenresonatoren oder Hohlleitern mit kapazitiver Feldverdichtung realisieren. Unter den genannten Bedingungen erfolgt die Erwärmung der Rußschicht bis über die Zündtemperatur in Zeiträumen deutlich unter einer Sekunde.

Zur Erzeugung hoher Feldstärken bei Hohlleitersystemen sind folgende Konfigurationen möglich:

- Feldverdichtung (E-Vektor) in Reckteck-Hohlleitersystemen, z.B. R 26 für Standard 2,46 GHz-Technologie ( $H_{10}$ -Geometrie).  
Zusätzliche Feldkonzentrationen im Hohlleiter durch kapazitive Ankopplung (Stubs).
- Anregung elektrischer oder magnetischer Grundmodus (z.B.  $E_{010}$ ,  $H_{111}$ ) oder höherer Moden in Hohlraumresonatoren (zylindrisch).

In beiden Fällen ist es grundsätzlich möglich, die zu einer raschen Rußaufheizung erforderlichen lokalen hohen Feldstärken zu erreichen.

Die im folgenden beschriebenen Ausführungsbeispiele zum hochfrequenzinduzierten Abbrand von keramischen Filterelementen abgelagertem Dieselruß basieren auf der 2,46 GHz-Technologie.

Die Wahl dieser Frequenz stellt kein Ausschlußkriterium für andere typische Mikrowellenfrequenzen dar. Auswahlkriterium der 2,46 GHz-Technologie zum Zwecke der Verfahrensdemonstration war ausschließlich die problemlose Verfügbarkeit wesentlicher Komponenten (Haushalts-Mikrowellengeräte).

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen und Versuchsergebnissen näher erläutert.

Es zeigen:

- Fig. 1 eine Darstellung des grundlegenden physikalischen Randwertproblems (Wirkungsprinzip).
- Fig. 2 den Mikrowelleninduzierten Abbrand von Dieselruß auf Codierit-Keramik (Foto, grundsätzliche Verfahrensdemonstration).
- Fig. 3 eine Vorrichtung zum Rußabbrand für motorische Anwendungen (Rechteckhohlleiter).
- Fig. 4 eine Vorrichtung zum Rußabbrand für motorische Anwendungen (Rechteckhohlleiter/Zylinderresonator).
- Fig. 5 ein Verfahrensfleißbild zur Rußminderung (Laboraufbau).
- Fig. 6 ein Diagramm darstellend die Abhängigkeit der Rußbelastung (Corning Codierit Partikelfilter) von der Zeit bei Vollastbetrieb des Dieselmotors und
- Fig. 7 ein Diagramm von Versuchsergebnissen zum Rußabbrand.

Die Abmessungen eines Hohlleitersystems sind entscheidend bezüglich der prinzipiellen Wellenausbreitungsmöglichkeit bei vorgegebener Frequenz.

Man unterscheidet zwischen transversal-elektrischen ( $E_{mn}$ ) und transversalmagnetischen ( $H_{mn}$ )-Wellen. Die Indizes  $m$ ,  $n$  bezeichnen die Anzahl der Wellenmaxima (Amplituden) in X- bzw. Y-Richtung. Die stabilste Wellenform in einem Rechteckhohlleiter ist die sogenannte  $H_{10}$ -Welle. Diese hat die größte kritische Wellenlänge (Grenzwellenlänge  $\lambda_k$ ). Der Hohlleiter läßt sich daher so dimensionieren, daß bei der gewünschten Frequenz keine Ausbreitung eines anderen Wellentyps möglich ist.

Die Grenzwellenlänge berechnet sich wie folgt:

$$\lambda_k = 2/[(m/a)^2 + (n/b)^2]^{1/2} \quad (11)$$

für die  $H_{10}$ -Welle gilt ( $m = 1$ ,  $n = 0$ )

$$\lambda_k = 2 \cdot a \quad (12)$$

Dämpfungsarme Rechteck-Hohlleitersysteme weisen im Normalfall ein Breiten- zu Höhenverhältnis  $a/b = 2$  auf.

Es ist zusätzlich zu beachten, daß die Hohlleiterwellenlänge  $\lambda_H$  größer ist als die Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$ . Verlustfrei gilt:

$$\lambda_H = \lambda_0/[1 - (\lambda_0/\lambda_k)^2]^{1/2} \quad (13)$$

Für 2,46 GHz ergibt sich somit eine Hohlleiter-Wellenlänge ( $R26$ ) des  $H_{10}$ -Grundmodes von 171,97 mm.

Noch höhere Feldstärken lassen sich bei anderen Geometrien von Hohlraumresonatoren erzielen. Obwohl prinzipiell beliebige Formen und Moden möglich sind, erscheint der  $E_{010}$ -Mode des Zylinderresonators aufgrund der Feldverteilung besonders geeignet.

Die Eigenfrequenz eines Zylinderresonators mit Radius  $R$  im  $E_{010}$ -Mode ist unabhängig von dessen Länge gegeben durch

$$\nu = 2.405c/2\pi R \quad (14)$$

Bei einer Resonanzfrequenz von 2.46 GHz ergibt dies einen Radius von 47 mm. Die Güte bei Leistungsanpassung (halbe Leerlaufgüte) berechnet sich zu

$$Q = (\sigma/\epsilon_0 \nu)^{1/2} 2.405/(4 * (1 + R/L)) \quad (15)$$

Um den Grundmode stabil zu betreiben, darf die Länge  $L$  maximal  $2R$  betragen. In diesem Fall ergibt sich für einen Messingresonator die Güte  $Q = 7750$ .

Aus der Güte und der Verlustleistung  $P_d$  im Resonator kann die maximale Feldstärke gemäß

$$E^2 = 2Z_0 / (2.405\pi J_1^2(2.405)) QP_d / LR \quad (16)$$

berechnet werden. Es wird also eine ca. fünfzigfache Feldüberhöhung gegenüber dem R26 Hohlleiter erzielt (bei 800 W Verlustleistung ca. 9 kV/cm). Die Anregung des Resonators kann grundsätzlich über Antennen (induktiv oder kapazitiv) oder durch Koppelöcher erfolgen. Eine bevorzugte Anordnung zeigt Fig. 4. Hier dient eine jeweils in beiden Stirnflächen angebrachte zentrale Kreislochblende sowohl der Anregung des Resonators als auch der Abgasführung. Die Lage und die Dimensionierung des Koppelochs sind entscheidend für die Leistungsanpassung.

## 10 Nachweis Wirkungsprinzip

Zum Nachweis des grundsätzlichen Wirkungsprinzips (Fig. 1) wurde ein Probenkörper (Corning Glass Cordierit-Keramik, Honeycomb-Struktur mit offenen Kanälen) mit Dieselruß beschichtet.

Gemäß der Versuchsvorrichtung aus Fig. 2 wurde der Probenkörper in einem zur Demonstration des Wirkungsprinzips offen betriebenen R26-Rechteckhohlleiter positioniert und dem Mikrowellenfeld eines, 2,46 GHz-Magnetrons ausgesetzt.

Während des Versuchsbetriebs wurde der Honeycom-Probenkörper mit einer Gasmischung bestehend aus ca. 8 % Sauerstoff und ca. 92 % Stickstoff durchströmt.

Die Ankopplung des Mikrowellenfeldes erfolgte spontan nach Leistungsabgabe des Magnetstroms. Gleichzeitig wird spontan eine Rußzündung beobachtet (siehe Fig. 2).

Kontrollversuche mit reinem Cordierit-Träger ohne Rußbeschichtung bei sonst identischen Versuchsbedingungen ergaben keine Mw-Leistungsaufnahme durch den Probenkörper.

Damit konnte die Gültigkeit der grundsätzlichen physikalisch-chemischen Überlegungen (siehe Fig. 1) experimentell verifiziert werden.

Die Fig. 3 und 4 zeigen Vorrichtungen, die zur Verfahrensdemonstration unter Verwendung eines Dieselmotors herangezogen werden können.

Verwendet wurde ein 300 cm<sup>3</sup> Einzylinder-Direkteinspritzmotor mit maximaler Welenleistung von 4,2 kWatt bei 3000 mm<sup>-1</sup> Umdrehungszahl. Lastvariationen der Maschine sind realisierbar über einen wellengekoppelten Einphasen-Wechselstromgenerator mit elektronisch variabler Last.

In den Demonstrationsversuchen wurde ein Corning Glass Cordierit-Dieselpartikelfilter ohne katalytische Unterstützung des Rußabbrandes unter Verwendung der 2,46 GHz-Technologie eingesetzt (Positionierungen der Partikelfilter; siehe Fig. 3,4).

Fig. 5 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensfleißbild der Experimentalanalyse, die mit einer kompletten Abgasanalytik (on-line) ausgerüstet ist (Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie, Infrarot-Absorptionsspektroskopie, Chemiluminiszenz).

Fig. 6 zeigt exemplarisch die Abhängigkeit der Filterbeladung von der Beladungszeit für Vollastbedingungen des Dieselmotors.

Die Filterbeladung (Masse) ist in definierter Weise korrelierbar zum jeweiligen Abgasgegendruck (Filterstanddruck) bei bestimmten Betriebszuständen der Maschine. Insofern stellt die Messung des Filter-Differenzdruckes eine ganz wesentliche Größe zur Prozeßsteuerung des Mw-induzierten Partikelabbrandes dar.

In den Versuchen zur Verfahrensdemonstration wurde weiterhin der Temperaturverlauf im Partikelfilter sowie die Filtereinlauf- und Auslauftemperaturen bestimmt (PT 100 Thermolemente).

Weiterhin bestimmt wurde die Zusammensetzung des Abgases (on-line) vor und nach dem Partikelfilter.

Fig. 7 zeigt ein Versuchsdigramm eines im Vollastbetrieb beladenen Partikelfilters nach Reduktion der Maschinenleistung auf Leerlaufbetrieb und Anfahren der Mw-Leistung.

Der rasche Temperaturanstieg im Filter verdeutlicht das sofortige Anspringen der Rußoxidation (Messung der Strahlungstemperatur der Rußschicht).

Der sukzessive Abbrand der Rußschicht kann anhand des Differenzdruckverlaufes (o) festgestellt werden.

Damit konnte das grundsätzliche Wirkungsprinzip (Fig. 1) auf eine technische Einheit übertragen werden. In den Versuchen wurden mit einem Filter bis ca. 100 Beladungs/Abbrandzyklen gefahren, ohne daß das Filter geschädigt wurde.

Bei bestimmten Betriebsbedingungen wurde eine (bezogen auf den Normalabgasgehalt) erhöhte Produktion von Kohlenmonoxid festgestellt.

Im Hinblick auf entsprechende Emissionsgrenzwerte kann die Nachschaltung eines CO-Oxidationskatalysators angezeigt sein.

Dazu stehen handelsübliche Kontakte auf Edelmetallbasis zur Verfügung.

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Regeneration rußbeladener keramischer Diesel-Partikelfilter, **dadurch gekennzeichnet**, daß durch selektive Absorption von elektromagnetischer Hochfrequenzstrahlung durch die filterabgelagerte Rußschicht deren Zündgrenze erreicht wird und der Rußabbrand im Sauerstoffüberschuß des Dieselabgases erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Rußaufheizung typische Mikrowellenfrequenzen eingesetzt werden.
3. Verfahren nach Ansprüchen 1 und 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß Mikrowellen-Magnetrons der Standardtechnologie 2,46 GHz zur Anwendung kommen.
4. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Rußheizung hohe lokale elektrische Feldstärken der magnetischen ( $H_{10}$ ) oder elektrischen ( $E_{010}$ )-Grundmoden eingesetzt werden.
5. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Feldverstärkung des magnetischen  $H_{10}$ -Modes durch kapazitive Kopplung in einem Rechteckhohlleiter (Resonator) vorgenommen wird.
6. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Feldverstärkung in einem Hohlraumresonator des  $E_{010}$ -Modes ausgenutzt und dieser aus einem Rechteckhohlleiter im  $H_{10}$ -Mode durch Iriskopplung angeregt wird.
7. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Einkopplung der Mw-Energie quasi-stationär erfolgt.
8. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Einkopplung der Mw-Energie durch typische Kurzzeit-HF-Pulse erfolgt.
9. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß das keramische Filtermaterial im verwendeten Frequenz- und Temperaturbereich verschwindende Mw-Absorptionseigenschaften aufweist.
10. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß das keramische Filtermaterial eine geringstmögliche Wärmeleitfähigkeit aufweist.
11. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß das keramische Filtermaterial als Oberflächenfilter oder Tiefenfilter ausgebildet ist.
12. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Unterstützung des HF-Abbrandes die Ruß-Zündtemperatur durch katalytisch aktive Substanzen abgesenkt wird.
13. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß entsprechend katalytisch aktive Materialien als Filter-Oberflächenbeschichtung aufgebracht sind.
14. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß entsprechend katalytisch aktive Materialien homogene Bestandteile des Filtermaterials darstellen.
15. Verfahren nach Ansprüchen 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Rußfiltereinheit ein Kohlenmonoxid-Oxidationskatalysator nachgeschaltet wird.

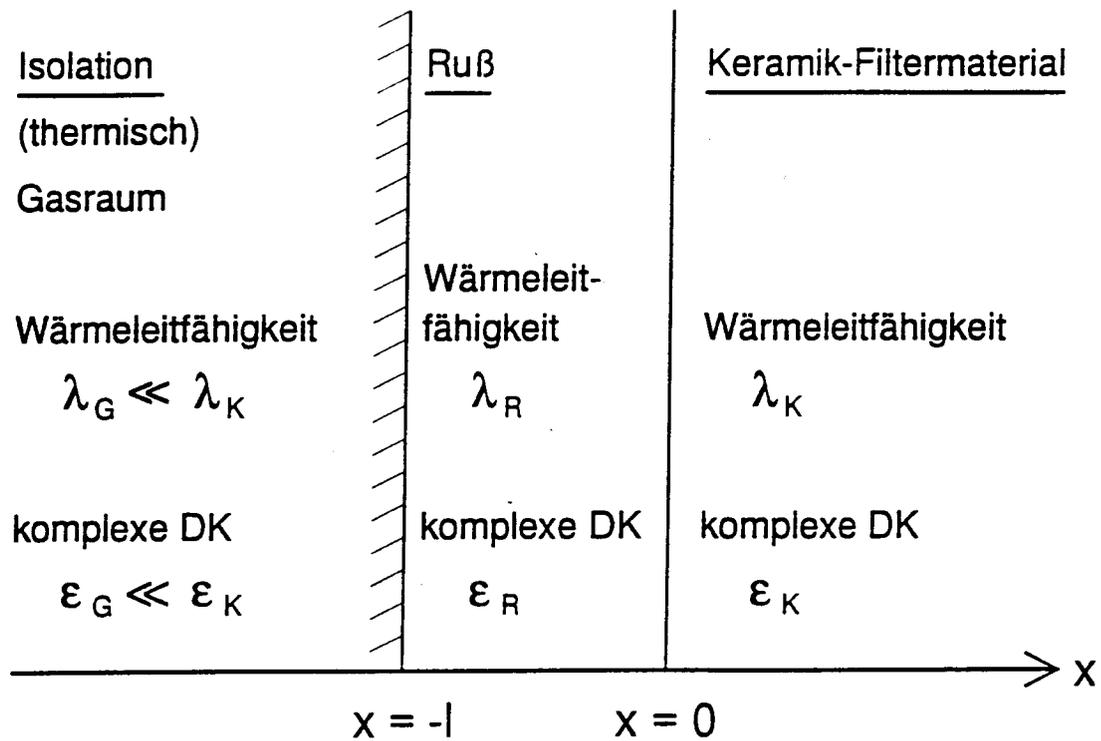


Fig. 1: Vereinfachte Geometrie zur Darstellung des physikalischen Randwertproblems zur Aufheizung von Dieselruß (abgelagert auf keramischen Diesel-Partikelfiltern).

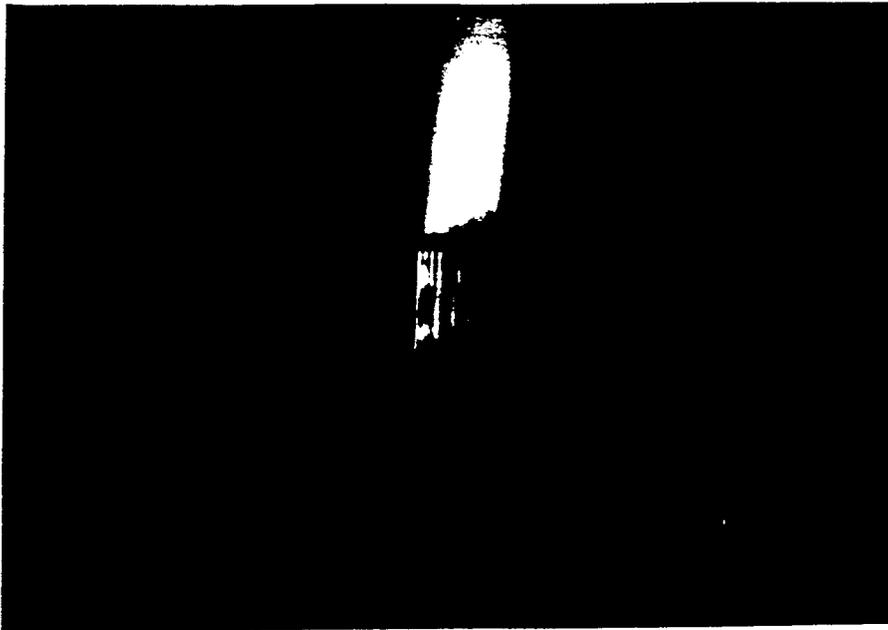


Fig. 2: Mikrowelleninduzierter Abbrand von Dieselruß auf Cordierit-Keramik  
(grundsätzliche Verfahrensdemonstration)

Anordnung des Partikelfilters  
am MW – Hohlraumresonator

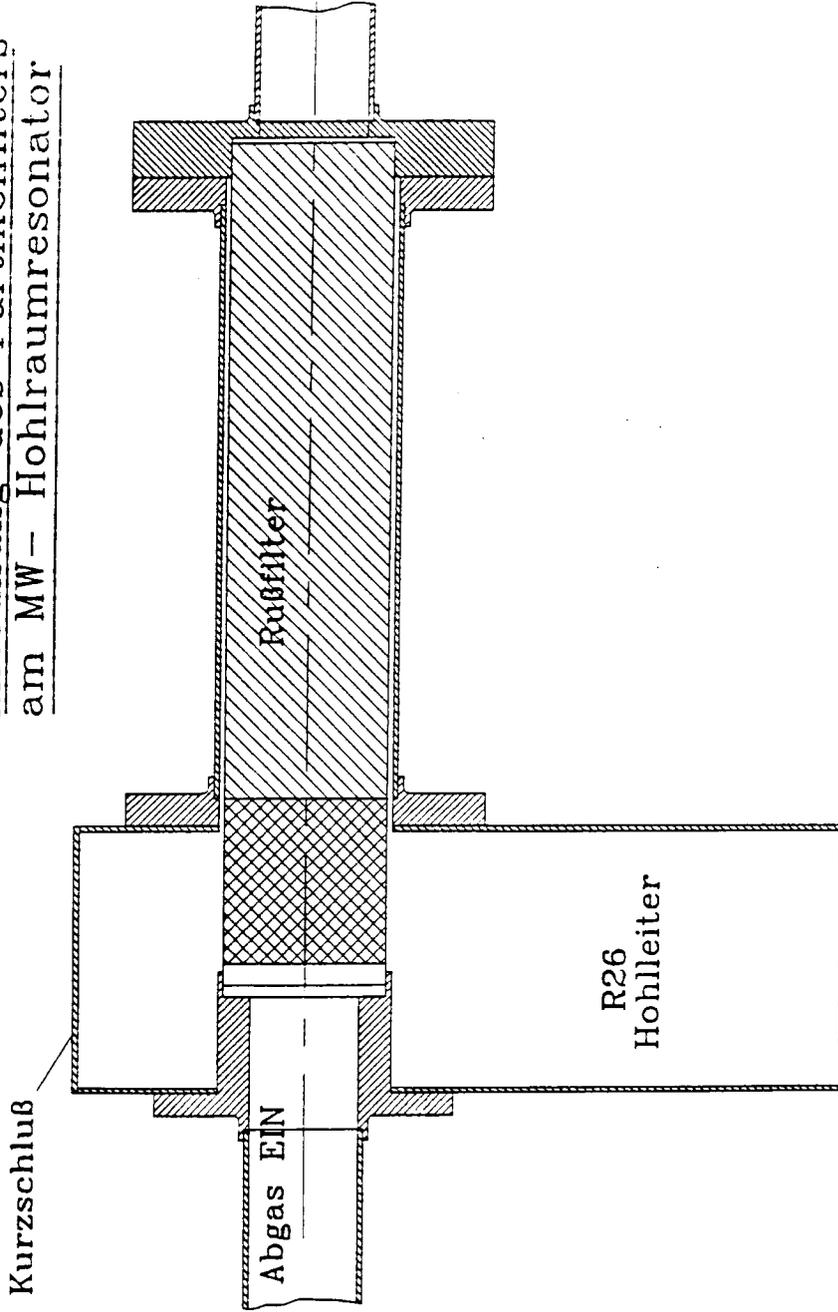


Fig. 3: Vorrichtung zum Rußabbbrand für motorische Anwendungen  
(Rechteckhohlleiter)

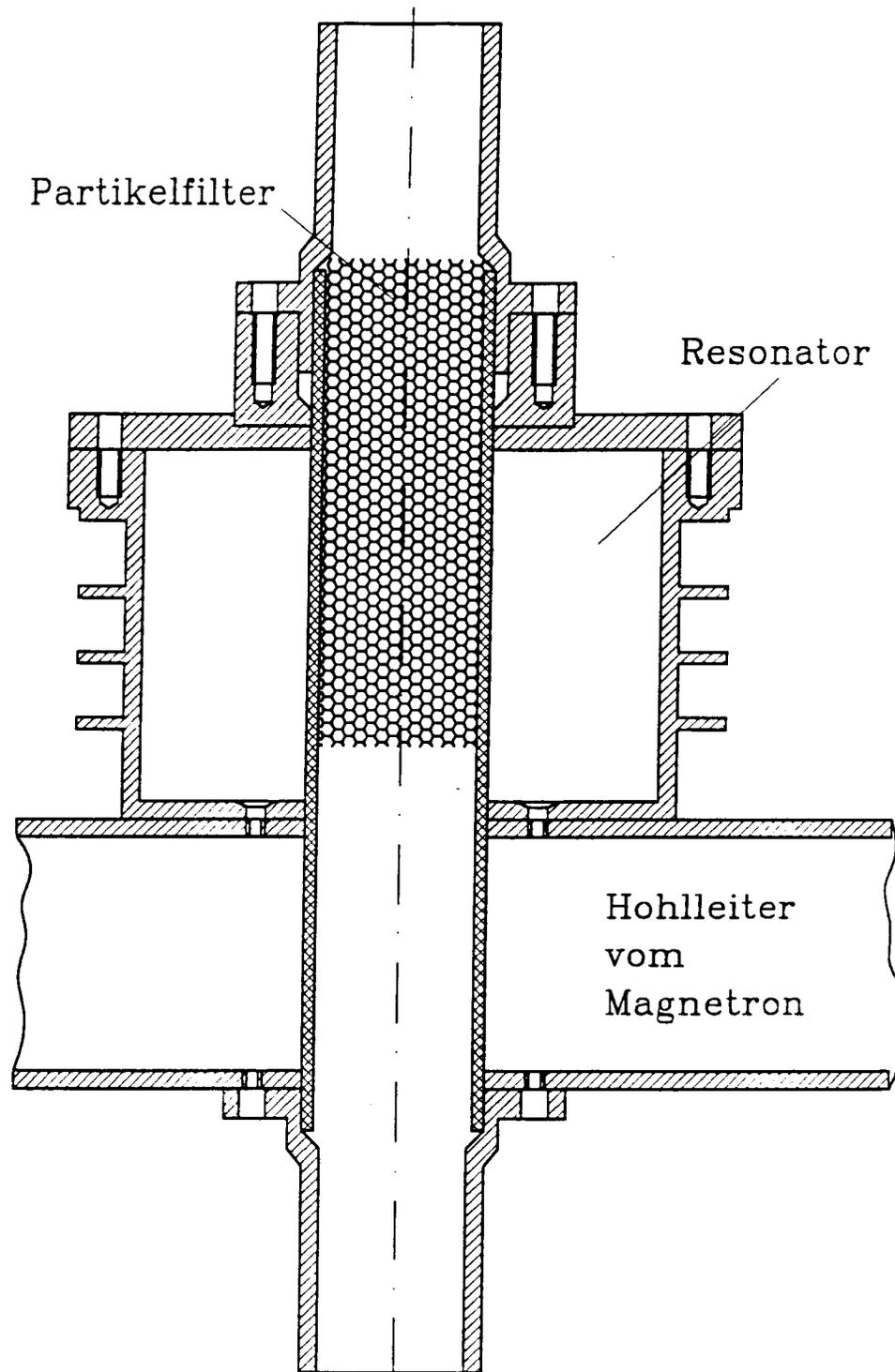


Fig. 4: Vorrichtung zum Rußabbrand für motorische Anwendungen (Rechteckhohlleiter/Zylinderresonator)

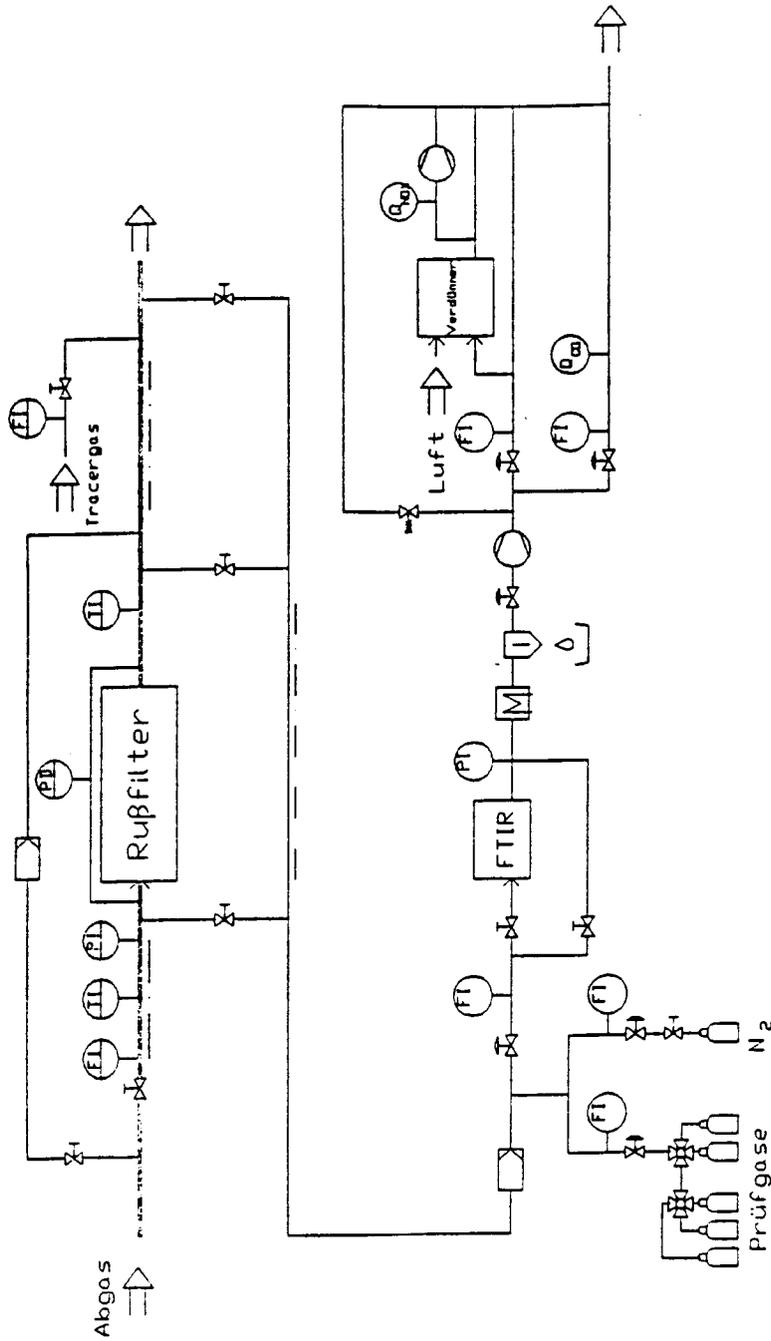


Fig. 5: Verfahrensbild zur Rußminderung (Laboraufbau)

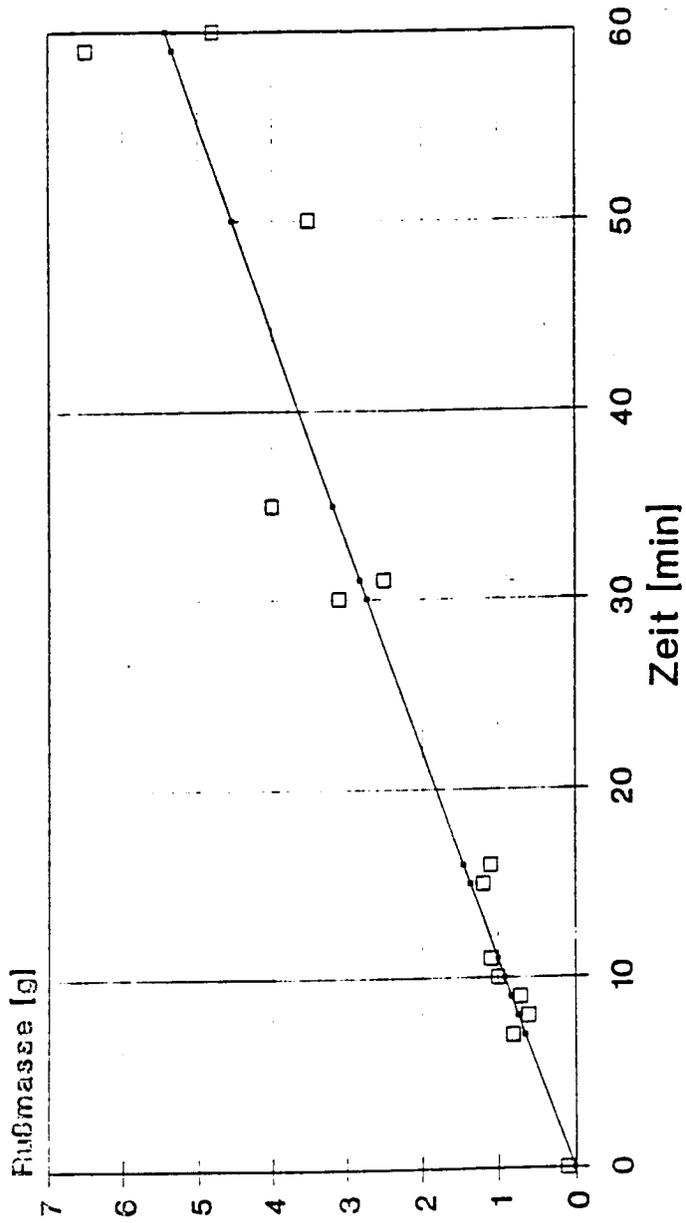


Fig. 6: Abhängigkeit der Rußbelastung (Corning Cordierit Partikelfilter) von der Zeit bei Vollastbetrieb des Dieselmotors

**Kurzzeitverhalten MW-Absorption auf rußbeladenem Cordierit-DPF**

– Abbrand bei Motorleerlauf ( $V=8,4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) –

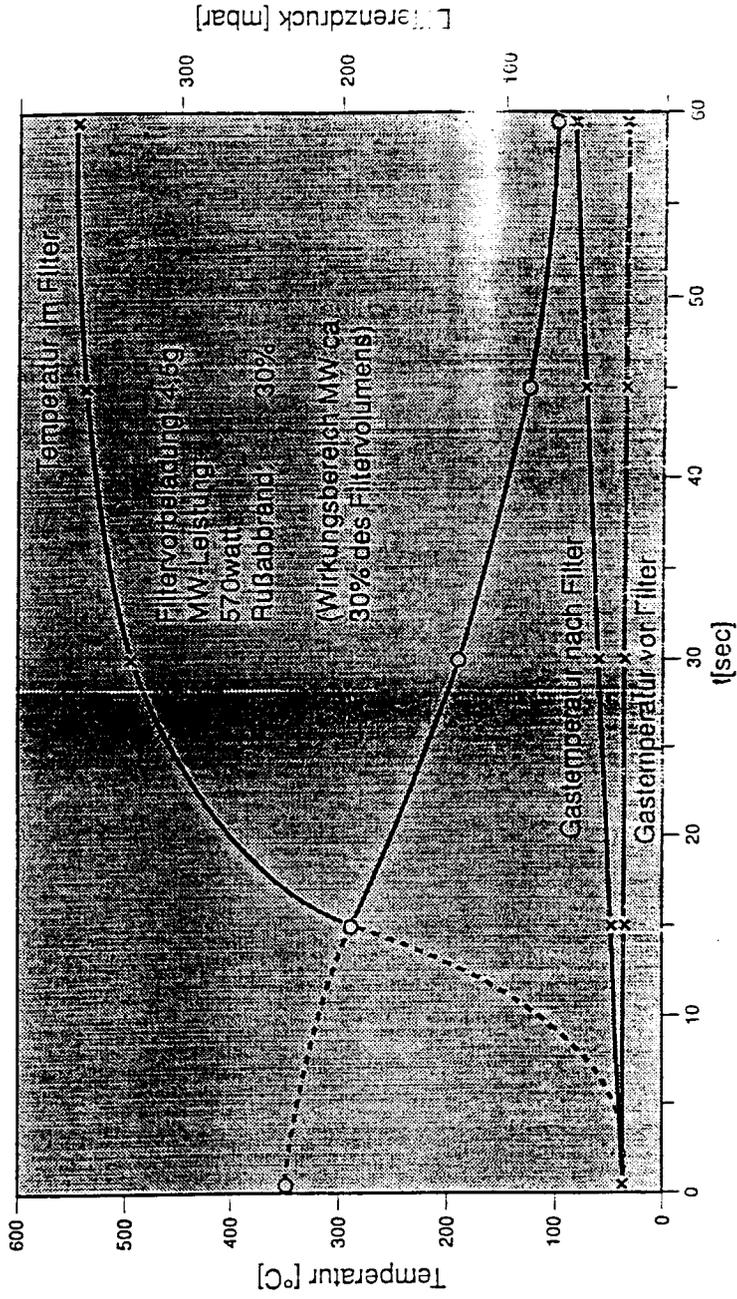


Fig. 7: Diagramm von Versuchsergebnissen zum Rußabbrand



EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.CL5)
Y	US-A-5 074 112 (WALTON)  * Spalte 4, Zeile 3 - Zeile 40; Abbildung 1 *	1-6, 11-14	F01N3/02
Y	EP-A-0 221 805 (RENAULT)  * Seite 2, Zeile 15 - Seite 6, Zeile 25; Abbildungen 1,2 *	1-6, 11-14	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 17, no. 117 (M-1378) 11. März 1993 & JP-A-04 301 124 (MATSUSHITA) 23. Oktober 1992 * Zusammenfassung *	1,2	
A	EP-A-0 443 625 (MATSUSHITA) * Zusammenfassung *	9	
A	EP-A-0 212 396 (BMW)		
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.CL5)
			F01N
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 27. September 1994	Prüfer Sideris, M
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument ..... & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer andern Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			