

(19)



(11)

EP 1 990 098 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
12.11.2008 Patentblatt 2008/46

(51) Int Cl.:
B03C 3/68 (2006.01) **B03C 3/62** (2006.01)
B03C 3/36 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **08450075.0**

(22) Anmeldetag: **09.05.2008**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT
RO SE SI SK TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL BA MK RS

(30) Priorität: **10.05.2007 AT 7292007**

(71) Anmelder: **Fleck, Carl M.**
2391 Kaltenleutgeben (AT)

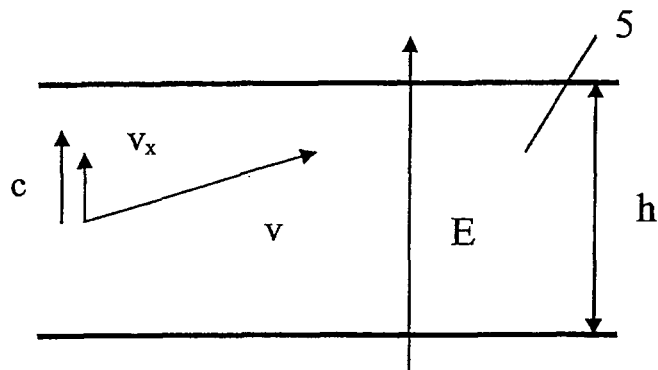
(72) Erfinder: **Fleck, Carl M.**
2391 Kaltenleutgeben (AT)

(74) Vertreter: **KLIMENT & HENHAPEL**
Patentanwälte OG
Singerstrasse 8
1010 Wien (AT)

(54) **Wall-flow-Filter mit geringem Druckaufbau**

(57) Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus einem Abgasstrom, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines porösen Keramikkörpers (7) verlaufende, wechselseitig verschlossene Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) hindurchgeleitet wird, und an parallel zu den Kanälen (5) verlaufenden Elektroden (1,2) eine Spannung an den Keramikkörper (7) zur Erzeugung eines elektrischen Feldes (E) in den Kanälen (5) angelegt wird. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass vor dem Einleiten des Abgasstroms

in die Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) eine Aufladung der Russpartikel mithilfe einer weiteren Elektrodenanordnung erfolgt, und es sich bei jener Spannung, die an den parallel zu den Kanälen (5) verlaufenden Elektroden (1,2) angelegt wird, um bipolare Spannungsimpulse handelt, die so gewählt werden, dass die durch eine Halbwelle der Spannungsimpulse erzeugte Driftgeschwindigkeit (c) der aufgeladenen Russpartikel im Mittel größer oder gleich der maximalen Geschwindigkeitskomponente (v_x) der Gasströmung in Feldrichtung des in den Kanälen (5) erzeugten, elektrischen Feldes ist.

Fig. 3**EP 1 990 098 A2**

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus einem Abgasstrom, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines porösen Keramikkörpers verlaufende Kanäle des Keramikkörpers hindurchgeleitet wird, gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1, sowie eine Filteranordnung zur Durchführung dieses Verfahrens nach Anspruch 7.

[0002] Bei dieser Art von Filtersystemen tritt der Abgasstrom durch Poren der Wände der lediglich einseitig offenen Kanäle des Keramikkörpers durch, wobei die Russpartikel zurück gehalten werden. In diesen so genannten "Wall-flow-Filter" erfolgt die Abscheidung der Russpartikel somit mechanisch. Für den Abbau der abgelagerten Russpartikel in den Kanälen des Keramikkörpers sind unterschiedliche Systeme bekannt, etwa mithilfe eines in den Kanälen des Keramikkörpers erzeugten Plasmas ("plasmaregenerierte Filtersysteme"). Hierzu wird an parallel zu den Kanälen verlaufenden Elektroden eine Spannung an den Keramikkörper zur Erzeugung eines elektrischen Feldes in den Kanälen des Keramikkörpers, das jeweils quer zur Achse der Kanäle orientiert ist, angelegt. Elektrische Feldstärken von etwa 1 kV/cm in den Kanälen des Wabenkörpers sind dabei in der Regel ausreichend, um in den Kanälen ein Plasma zu erzeugen, das abgelagerte Russpartikel in gasförmige Substanzen umwandelt.

[0003] Bei den heute in Verwendung befindlichen Wall-flow-Filtern, mit denen das Abgas von dieselgetriebenen Verbrennungskraftmaschinen von Russpartikel gereinigt wird, ist der größte Nachteil ihre beschränkte Zeitstandsfestigkeit. Durch Ölasche werden die porösen Wände des Keramikkörpers kontinuierlich zugesetzt, und es entsteht ein irreversibler Druckaufbau, der einen sehr aufwendigen Wechsel der Filtereinheit nach etwa 150.000 km bis 200.000 km notwendig macht. Überdies steigt durch den Druckaufbau auch der Treibstoffverbrauch deutlich an, der bei der heutigen Sensibilität gegenüber dem zunehmenden Ausstoß an CO₂ nicht mehr unberücksichtigt bleiben kann.

[0004] Untersucht man das Problem im Detail, so stellt sich folgender Mechanismus dar, der zu einem irreversiblen Verstopfen der Poren führt: durch das Einströmen in die Öffnungen der Poren wird das Abgas derart beschleunigt, dass es zu einer massiven Impaktierung der Russpartikel rund um die Porenöffnung kommt. Im Regenerationsprozess wird der Russ mit hoher lokaler Temperatur verbrannt, die Ölasche bleibt zurück, wird in den Porenrand eingebrannt, und setzt so die Einströmöffnung der Pore langsam zu. Dieser Mechanismus wird durch den steigenden Anteil von Biodiesel in den Dieseltreibstoffen beschleunigt, da der dadurch steigende Phosphatanteil zu einer sinkenden Kilometerleistung der Wall-flow-Filter führt. Durch die hohen Temperaturen bei der Regeneration des Filters wird nämlich Phosphor freigesetzt, der sich ebenso am Porenrand festsetzt, und so zu einer raschen und irreversiblen Verlegung der Poren führt. In der Zeit einer steigenden Beimengung von Biodiesel zu den Dieseltreibstoffen verringert sich daher die Lebensdauer der klassischen rein mechanisch arbeitenden Wall-flow-Filter.

[0005] Es ist daher das Ziel der Erfindung, durch ein geeignetes Verfahren den Druckaufbau in Filteranordnungen, die auf der Verwendung eines Keramikkörpers mit einseitig geschlossenen Kanälen basieren, zu reduzieren, und somit die Lebensdauer solcher Filteranordnungen zu erhöhen.

[0006] Diese Ziele werden durch die Merkmale von Anspruch 1 erreicht. Anspruch 1 bezieht sich auf ein Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus einem Abgasstrom, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines porösen Keramikkörpers verlaufende Kanäle des Keramikkörpers hindurchgeleitet wird, wobei der Abgasstrom durch Poren der Wände der lediglich einseitig offenen Kanäle des Keramikkörpers durchtritt, und an parallel zu den Kanälen verlaufenden Elektroden eine Spannung an den Keramikkörper zur Erzeugung eines elektrischen Feldes in den Kanälen des Keramikkörpers, das im Wesentlichen normal zur Achse der Kanäle orientiert ist, angelegt wird. Erfindungsgemäß ist hierbei vorgesehen, dass vor dem Einleiten des Abgasstroms in die Kanäle des Keramikkörpers eine Aufladung der Russpartikel mithilfe einer weiteren Elektrodenanordnung erfolgt, und es sich bei jener Spannung, die an den parallel zu den Kanälen verlaufenden Elektroden angelegt wird, um bipolare Spannungsimpulse handelt, wobei die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass die durch eine Halbwelle der Spannungsimpulse erzeugte Driftgeschwindigkeit der aufgeladenen Russpartikel in Feldrichtung des in den Kanälen erzeugten, elektrischen Feldes im Mittel größer oder gleich der maximalen Geschwindigkeitskomponente der Gasströmung in Feldrichtung des in den Kanälen erzeugten, elektrischen Feldes ist.

[0007] Die erfindungsgemäßen Maßnahmen sehen daher vor, die Abscheidung der Russpartikel in den Kanälen des Keramikkörpers nicht ausschließlich mechanisch erfolgen zu lassen, sondern das in den Kanälen für den Russabbrand errichtete, elektrische Feld auch für die Abscheidung der Russpartikel zu verwenden, wobei hierzu eine weitere Elektrodenanordnung zur vorherigen Aufladung der Russpartikel vorgesehen ist. Diese Maßnahme alleine ist jedoch noch nicht ausreichend, um das oben beschriebene Problem der porennahen Abscheidung der Russpartikel zu beheben. Hierzu ist erfindungsgemäß ferner vorgesehen, dass bipolare Spannungsimpulse anzuwenden sind, die so zu wählen sind, dass die durch eine Halbwelle der Spannungsimpulse erzeugte Driftgeschwindigkeit der aufgeladenen Russpartikel im Mittel größer oder gleich der maximalen Geschwindigkeitskomponente der Gasströmung in Feldrichtung des in den Kanälen erzeugten, elektrischen Feldes ist. Überwiegt nämlich die Driftgeschwindigkeit der elektrisch geladenen Russpartikel während der elektrischen Spannungsimpulse die Geschwindigkeitskomponente in Feldrichtung auf die Kanalwand zu, oder ist sie dieser zumindest gleich, so stellt sich eine überwiegend durch das elektrische Feld und nicht durch

die lokale Strömungsgeschwindigkeit um die Porenöffnung gesteuerte Abscheidung ein. Eine solche Abscheidung findet allerdings über die gesamte Kanalwand verteilt statt, und nicht mehr nur in Porennähe.

[0008] Die maximale Geschwindigkeitskomponente in Feldrichtung sowie die Driftgeschwindigkeit können dabei leicht bestimmt werden. Da die gesamte in den Kanal eingeströmte Abgasmenge durch beide Seiten des Kanals entweichen muss, kann etwa als obere Abschätzung der Geschwindigkeitskomponente v_x parallel oder antiparallel zur Feldrichtung einer Gasströmung mit der Einströmgeschwindigkeit v angesetzt werden:

$$v_x = h/2t = h \cdot v/2L,$$

wobei h die Kanalhöhe und t die Durchlaufzeit des Abgasstromes durch einen Kanal der Länge L ist:

$$v = L/t$$

[0009] Ist somit die Einströmgeschwindigkeit bekannt, die im Zuge der Regelung des Filters ohnehin gemessen werden wird, um die angelegte Spannung zu regeln, kann gemeinsam mit den ohnehin bekannten Geometrieparametern der Kanalhöhe h und der Kanallänge L die maximale Geschwindigkeitskomponente v_x in Feldrichtung ermittelt werden. Die Driftgeschwindigkeit der Russpartikel mit Durchmesser d ergibt sich wiederum aus der Beweglichkeit $\kappa(d)$, der Ladungszahl $z(d)$ und der zeitabhängigen Feldstärke $E(t)$ des Wechselfeldes senkrecht auf die Kanalachse, wobei letztere durch die bipolaren Spannungsimpulse gegeben ist, sodass sich für die Driftgeschwindigkeit für Russteilchen mit dem Durchmesser d ergibt:

$$c(d, t) = \kappa(d) \cdot z(d) \cdot E(t)$$

[0010] Die Beweglichkeit $\kappa(d)$ und die Ladungszahl $z(d)$ können für unterschiedliche Durchmesser d aus hinlänglich bekannten Tabellen abgelesen werden. Die durch die Ladungszahl $z(D)$ quantifizierte Aufladung der Russpartikel ist durch die vorherige Aufladung mittels der Entladungselektrode bedingt. Die durch eine Halbwelle der Spannungsimpulse erzeugte, mittlere Driftgeschwindigkeit der aufgeladenen Russpartikel ergibt sich durch Integration der oben angegebenen, zeitabhängigen Driftgeschwindigkeit über die Dauer der Halbwelle des Spannungsimpulses. Die Feldstärke $E(t)$ ist in bekannter Weise direkt durch die angelegten Spannungsimpulse gegeben. Anhand der erfindungsgemäßen Merkmale kann somit die im jeweiligen Anwendungsfall notwendige Feldstärke, und somit die an die Elektroden anzulegende Spannung, abgeleitet werden.

[0011] Aus der so ermittelten Driftgeschwindigkeit kann auch leicht der während dieser Halbwelle zurückgelegte Driftweg s errechnet werden, nämlich als zeitliches Integral über die Zeitdauer der Halbwelle:

$$s(d) = \int c(d, t) dt$$

[0012] Anspruch 2 sieht nun vor, dass die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass der während einer Halbwelle der Spannungsimpulse zurückgelegte Driftweg s der aufgeladenen Russpartikel kleiner als die Kanalhöhe h in Feldrichtung des in den Kanälen erzeugten, elektrischen Feldes ist. Diese Maßnahme setzt daher eine obere Schranke für die zu wählende elektrische Feldstärke, und somit für die anzulegenden Spannungsimpulse. Bei zu starken Feldstärken kann es nämlich in Abhängigkeit von der Kanalhöhe bereits zu einer Abscheidung des Rußes im Einlaufteil des Kanals kommen, und damit zu einer starken Ungleichverteilung des abgeschiedenen Rußes im Kanal. Um die Russpartikel auf den größeren Teil des Kanals bei ihrer Abscheidung zu verteilen, ist daher vorgesehen, dass der Driftweg $s(d)$ der Russpartikel während einer Halbwelle deutlich kleiner als die Kanalhöhe h in Feldrichtung ist.

[0013] Gemäß Anspruch 3 wird ein weiteres Kriterium für die Wahl der notwendigen Feldstärke, und somit der Größe der anzulegenden Spannungsimpulse vorgeschlagen, das eine Abscheidung der Russpartikel am Porenrand zusätzlich unterbindet. Ausgehend vom mittleren Durchmesser p der Poren des Keramikkörpers ergibt sich eine offene Fläche f der Einströmöffnung der Poren. Eine einfache Näherung eines Porendurchmessers p erhält man insbesondere für Keramiken, deren oberflächliche Porenöffnungen sehr stark von der Kreisform abweichen. Mit

$$p^2 \pi / 4 = f \quad \text{ergibt sich} \quad p = 2 (f / \pi)^{1/2}$$

5

[0014] Daraus ergibt sich das Kriterium gemäß Anspruch 3 für den notwendigen Driftweg innerhalb einer Halbwelle eines Spannungsimpulses dadurch, dass der Driftweg $s(d)$ der aufgeladenen Russpartikel innerhalb einer Halbwelle mindestens dem Zweifachen, und gemäß Anspruch 4 dem Dreifachen, mittleren Durchmesser p der Porenöffnungen betragen soll.

10 **[0015]** Um das Bordnetz nicht zu überlasten, werden ferner die hochfrequenten, elektrischen Spannungsimpulse nicht fortlaufend betrieben, sondern in kurzen Perioden von Schwingungen, so genannte hochfrequente, bipolare Pulsfolgen, die aus mindestens einer oder einigen wenigen bipolaren Schwingungen bestehen. Wählt man nun den Zeitabstand τ zwischen zwei bipolaren Impulsen oder Impulsfolgen zu groß, um den elektrischen Leistungsbedarf deutlich zu reduzieren, so können in den zwischen liegenden Pausen Russpartikel doch wieder in Porennähe gelangen, und am Poreneingang impaktiert werden, bevor der nächste bipolare Impuls sie abscheidet.

15 **[0016]** Daher wird gemäß Anspruch 5 vorgeschlagen, dass die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass der während einer Halbwelle der Spannungsimpulse zurückgelegte Driftweg der aufgeladenen Russpartikel mindestens so groß ist wie das Produkt aus der maximalen Geschwindigkeitskomponente v_x der Gasströmung in Feldrichtung des in den Kanälen erzeugten, elektrischen Feldes, und dem Zeitabstand zwischen zwei bipolaren Spannungsimpulsen oder zwischen zwei Folgen von bipolaren Spannungsimpulsen. Der Driftweg $s(d)$ ergibt sich dabei, wie bereits erwähnt, als zeitliches Integral der Driftgeschwindigkeit $c(d,t)$ über eine Halperiode des Wechselfeldes.

20 **[0017]** Gemäß Anspruch 6 wird schließlich eine Regelung der Spannungsimpulse im Zuge des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgeschlagen. Hierbei ist vorgesehen, dass der Differenzdruck des Abgasstromes am Keramikkörper gemessen wird, und oberhalb eines vorgegebenen Wertes des Differenzdrucks die Regelung der bipolaren Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Abgasstroms in den Kanälen des Keramikkörpers erfolgt, und unterhalb dieses vorgegebenen Wertes die Regelung nur dann in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Abgasstroms in den Kanälen des Keramikkörpers erfolgt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit eine abfallende Tendenz aufweist, und andernfalls die Regelung unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt. Mithilfe dieser Maßnahme kann, wie noch näher ausgeführt werden wird, die Russverteilung im Kanal gelenkt werden, und insbesondere auch bei verschiedenen Gasgeschwindigkeiten konstant gehalten werden, indem die Feldamplitude zumindest zeitweise verringert wird, vorzugsweise bei kurzem aber sehr hohen Russanfall, während man die Feldamplitude in der verbleibenden Zeit direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit im Kanal regelt.

25 **[0018]** Insbesondere können bei länger dauernden hohem Russanfall, der dann mit hohen Temperaturen des Abgasstroms verbunden ist, entsprechend hohe Feldamplituden gesetzt werden, bei geringem Russanfall aber je nach Regenerationszustand des Filters zwischen hohen Feldamplituden und geringen Feldamplituden gewechselt werden. Gemäß Anspruch 6 wird hierbei so vorgegangen, dass man die mittlere Geschwindigkeit in den Kanälen in mindestens zwei Intervalle teilt, wo für die größere Strömungsgeschwindigkeit die normale, strömungsgeschwindigkeitsabhängige Regelung mit den durch den Plasmastrom und der Temperatur des Abgases gegebenen Randbedingungen gilt, während für die geringere Strömungsgeschwindigkeit nur dann diese normale Regelung gilt, wenn die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit negativ ist, also die Geschwindigkeit mit der Zeit abnimmt. Ist dagegen die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit positiv, nimmt also die Strömungsgeschwindigkeit mit der Zeit zu, so wird das elektrische Feld mit niedrigeren Feldamplituden $E_{\min}$ gefahren, um die feldunterstützte Ablagerung von Russ weiter in das Innere der Kanäle zu verlagern.

35 **[0019]** Ist die Feldstärke, die zur Erfüllung des erfindungsgemäßen Verfahrens notwendig ist, aus Gründen der Durchschlagsfestigkeit des Keramikkörpers oder zu hoher lokaler Gasgeschwindigkeit nicht zu erreichen, so besteht die Möglichkeit, bei der Wahl oder gegebenenfalls bei der Entwicklung des keramischen Werkstoffes für den Keramikkörper den Durchmesser der Porenöffnungen, vorzugsweise der Porendurchmesser p selbst, entsprechend zu verringern. Eine entsprechende Maßnahme ist Gegenstand von Anspruch 7. Anspruch 7 bezieht sich auf eine Filteranordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 6 mit einem Keramikkörper, der axial verlaufende Kanäle aufweist, die vom Abgas durchströmt werden, wobei der Abgasstrom durch Poren der Wände der lediglich einseitig offenen Kanäle des Keramikkörpers durchtritt, und am Keramikkörper parallel zu den Kanälen verlaufende Elektroden zur Erzeugung eines normal zu den Kanälen verlaufenden, elektrischen Feldes in den Kanälen angeordnet sind. Erfindungsgemäß ist dabei vorgesehen, dass der Keramikkörper eine Gesamtporosität von über 50% aufweist, und der Anteil der Makroporen unter 15% beträgt. Makroporen treten in keramischen Strukturen auf, deren Porosität sehr hoch ist. Da ihre Anwesenheit die erfindungsgemäßen Maßnahmen zur porenfernen Abscheidung des Rußes stören würden, wird durch Anspruch 7 ihr Anteil entsprechend begrenzt.

50 **[0020]** Kann der Porendurchmesser p nach Anspruch 7 nicht entsprechend verringert werden, um das erfindungsgemäße Verfahren durch entsprechende Erhöhung der Feldstärke sicherzustellen, so besteht die weitere Möglichkeit, bei

der Auslegung des keramischen Wabenkörpers durch die Vergrößerung des freien Gesamtquerschnittes q die Strömungsgeschwindigkeit v soweit herabzusetzen, dass das erfindungsgemäße Verfahren der Feldstärkeregelung ermöglicht wird.

[0021] Bei bekanntem Gasvolumenstrom V und der Länge L des Wabenkörpers ergibt sich mit

$$v_x = h \cdot v / 2L$$

ergibt sich aus der Regelgleichung

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > (t_2 - t_1) \cdot H \cdot v / 2L$$

die Auslegungsgleichung bei maximal möglicher Feldstärke $E_{\max}$ für die größte erlaubte Gasgeschwindigkeit v in den Kanälen des Wabenkörpers:

$$v < 2L \cdot \kappa(d) \cdot z(d) \int E_{\max}(t) dt / (t_2 - t_1) \cdot H$$

und mit

$$v \cdot q = V$$

die Auslegungsgleichung für den mindestens notwendigen freien Querschnitt q des Wabenkörpers bei der maximal möglichen Feldstärke $E_{\max}$:

$$q > (t_2 - t_1) \cdot H \cdot V / 2L \cdot \kappa(d) \cdot z(d) \int E_{\max}(t) dt$$

[0022] Ebenso erhält man aus der Regelgleichung für den maximal erlaubten Zeitabstand τ zwischen zwei bipolaren Impulsen oder Impulsfolgen

$$v_x \cdot \tau \leq \kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt$$

mit

$$v_x = h \cdot v / 2L$$

die Auslegungsgleichung bei der maximal möglichen Feldstärke $E_{\max}$ für die größte erlaubte Gasgeschwindigkeit v in den Kanälen des Wabenkörpers:

$$v \leq 2L \cdot \kappa(d) \cdot z(d) \int E_{\max}(t) dt / \tau \cdot h$$

und mit

$$v \cdot q = V$$

5 die Auslegungsgleichung für den mindestens notwendigen freien Querschnitt q des Wabenkörpers bei der maximal möglichen Feldstärke $E_{\max}$:

$$q \geq \tau \cdot h \cdot V / 2L \cdot \kappa(d) \cdot z(d) \int E_{\max}(t) dt$$

10

[0023] Die Erfindung wird im Folgenden anhand der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen hierbei die

15

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Querschnitts eines Keramikkörpers zur Entfernung von Russpartikel aus einem Abgasstrom,

Fig. 2 eine Detailansicht von Fig. 1, wobei insbesondere die Anordnung der Kanäle ersichtlich ist,

20

Fig. 3 eine Darstellung zur Erläuterung der Geschwindigkeitskomponenten des Abgasstromes in einem Kanal des Keramikkörpers, und

Fig. 4 eine Darstellung zur Erläuterung der Regelung der Spannungsimpulse im Zuge des erfindungsgemäßen Verfahrens.

25

[0024] Die Fig. 1 und 2 zeigen jeweils eine schematische Darstellung eines Querschnitts eines Keramikkörpers 7, bei dem es sich um einen Wabenkörper handelt. Dabei ist jeweils ein Keramikkörper 7 mit konvexer, nämlich elliptischer Umfangslinie dargestellt, er könnte aber auch andere Querschnittsformen aufweisen, etwa eine Trapezform. Der Keramikkörper 7 weist Kanäle 5 auf, die in Längsrichtung des Keramikkörpers 7 verlaufen, und an einer Stirnseite des Keramikkörpers 7 offen sind, und an der jeweils gegenüberliegenden Seite geschlossen. Somit tritt der Abgasstrom durch einen an der Eintrittsseite offenen, aber an dessen Austrittsseite verschlossenen Kanal 5 ein, und muss zum Verlassen des Keramikkörpers 7 durch die Innenwand des betreffenden Kanals 5 zum benachbarten Kanal 5, der an der Eintrittsseite verschlossen, aber an der Austrittsseite offen ist, hindurch treten.

30

[0025] Gemäß der Ausführungsform der Fig. 1 und 2 werden die Elektroden 1,2 jeweils durch eine Gruppe von Elektrodenkanälen 4, in denen jeweils zumindest teilweise entlang ihrer axialen Erstreckung eine elektrische Beschichtung 6 eingebracht ist, gebildet. Wie insbesondere aus der Fig. 2 ersichtlich ist, werden die Gruppen von Elektrodenkanälen 4 jeweils durch nebeneinander liegende Elektrodenkanäle 4 gebildet, sodass durch jede Gruppe von Elektrodenkanälen 4 eine ebene Elektrodenfläche 1,2 definiert wird. Es sind aber auch andere Ausführungen der Elektroden möglich.

35

[0026] Wie aus der Fig. 1 ersichtlich ist, verlaufen die ebenen Elektrodenflächen 1,2 jeweils horizontal und parallel zueinander. Der Abstand zweier benachbarter Elektrodenflächen 1 und 2 beträgt vorzugsweise weniger als 40 mm, etwa 15-25 mm. Dadurch kann zwischen den Elektrodenflächen 1 und 2 ein homogenes elektrisches Feld sichergestellt werden, und zwar insbesondere in jenen Raumbereichen, die sich innerhalb des von jeweils zwei benachbarten Elektrodenflächen 1,2 begrenzten Raumbereiches des Keramikkörpers 7 befinden, der im folgenden auch als homogener Feldbereich bezeichnet wird. Der außerhalb des homogenen Feldbereiches liegende Bereich 3 des Keramikkörpers 7 verfügt in der Ausführungsform gemäß der Fig. 1 und 2 über eine dichtere Struktur, um deren strukturelle Belastbarkeit zusätzlich zu erhöhen.

40

[0027] Zwei benachbarte Elektrodenflächen 1 und 2 sind jeweils gegenpolig kontaktiert, wobei in der Fig. 1 etwa die Elektrodenfläche 1 geerdet ist, und die Elektrodenfläche 2 mit bipolaren Spannungsimpulsen versorgt wird.

[0028] Im Folgenden wird nun das erfindungsgemäße Verfahren näher erläutert. Da die gesamte in den Kanal 5 eingeströmte Abgasmenge durch beide Seiten des Kanals 5 entweichen muss, erhält man zunächst als obere Abschätzung der Geschwindigkeitskomponente v_x der Gasströmung v normal auf die Kanalachse, also parallel oder antiparallel zur Feldrichtung

50

55

$$v_x = h/2t = h \cdot v/2L,$$

wobei h die Höhe der Kanäle 5 in Feldrichtung, und t die Durchlaufzeit des Abgasstromes durch einen Kanal 5 der Länge L ist:

$$v = L/t$$

[0029] Sind nun erfindungsgemäß die Driftgeschwindigkeiten $c(d)$ der aufgeladenen Russteilchen mit den Durchmessern d in oder gegen die Feldrichtung größer, als die Geschwindigkeitskomponente v_x gegen oder in die Feldrichtung, so werden erfindungsgemäß die Russteilchen nicht rund um einen offenen Porenkanal durch die Geschwindigkeit des einströmenden Gases impaktiert, sondern praktisch an der ganzen Kanalwand elektrisch abgeschieden, wenn sie in die Nähe der Kanalwand gelangen.

[0030] Natürlich sind die Einströmgeschwindigkeiten des Abgases in die Porenöffnungen deutlich über der Geschwindigkeitskomponente v_x in Richtung Kanalwand, aber

$$c(d) > v_x$$

ist gerade deshalb ein gutes Maß für das Abscheiden der Partikel vor dem Erreichen der lokalen Beschleunigung des Gases in die Pore, die erst in unmittelbarer Umgebung der Porenöffnung stattfindet.

[0031] Mit der Beweglichkeit $\kappa(d)$, der Ladungszahl $z(d)$ und der zeitabhängigen Feldstärke $E(t)$ des Wechselfeldes senkrecht auf die Kanalachse kann die Driftgeschwindigkeit für Russteilchen mit dem Durchmesser d ermittelt werden:

$$c(d, t) = \kappa(d) \cdot z(d) \cdot E(t)$$

[0032] Damit ergibt sich die Bedingung für das Abscheiden der Russteilchen mit Abstand zu der Porenöffnung mit

$$v_x = h \cdot v / 2L$$

zu

$$c(d, t) > h \cdot v / 2L$$

[0033] Genauer für diese Ungleichung ist der Driftweg $s(d)$ als Integral der Driftgeschwindigkeit $c(d, t)$ über die Zeit t_1 bis t_2 einer Halbperiode des Wechselfeldes:

$$s(d) = \int c(d, t) dt \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

oder

$$s(d) = \kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

[0034] Ist nun die Komponente in oder gegen die Feldrichtung des Weges $v_x \cdot (t_2 - t_1)$ des auf die Kanalwand zuströmenden Gases während einer Halbwelle des Feldes kleiner als der Driftweg $s(d)$ in dieser Halbwelle, also

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > v_x \cdot (t_2 - t_1) \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

so wird das Russteilchen nicht in der Nähe einer offenen Pore, sondern irgendwo auf der Kanalwand abgeschieden.

[0035] Für das Gleichheitszeichen gilt, dass sich das Russteilchen in der Nähe, aber nicht unmittelbar an der Porenöffnung abscheidet, da dann die Driftgeschwindigkeit $c(d)$ und die Geschwindigkeitskomponente v_x ungefähr gleich groß sind.

[0036] Ein weiteres Kriterium für die notwendige Feldstärke E , um eine Abscheidung der Russpartikel am Porenrand zu verhindern, kann über eine genauere Betrachtung der Porendurchmesser gewonnen werden. Zu diesem Zweck dient der mittlere Durchmesser p der Einstromöffnung mit der offenen Fläche f als Ausgangspunkt. Eine einfache Näherung eines Porendurchmessers p erhält man insbesondere für Keramiken, deren oberflächliche, Porenöffnungen sehr stark von der Kreisform abweichen. Mit

$$p^2 \pi / 4 = f \quad \text{erhalten wir} \quad p = \sqrt{4(f/\pi)}^{1/2}$$

[0037] Mit dieser Vorbemerkung ergibt sich eine vorteilhafte Wahl für den notwendigen Driftweg innerhalb einer Halbwelle (von t_1 bis t_2), und somit für die Größe der Spannungsimpulse dadurch, dass der Driftweg $s(d)$ innerhalb einer Halbwelle mindestens dem Zweifachen, vorzugsweise dem Dreifachen mittleren Durchmesser p der Porenöffnungen betragen soll, um eine Abscheidung am unmittelbaren Porenrand zu verhindern, also

$$s(d) > 2p$$

oder

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > 2p = \sqrt{4(f/\pi)}^{1/2} \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2,$$

und vorzugsweise

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > 3p = \sqrt{6(f/\pi)}^{1/2} \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

[0038] Wird das hochfrequente Wechselfeld nicht laufend, sondern nur in Paketen gesendet, also etwa Paketdauer T_1 mit der anschließenden Pause T_2 , so kann diese Abschätzung mit dem Reziprokwert des so genannten "Duty-cycle" $T_1/(T_1 + T_2)$ zu verschärft werden, also

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > 2p(T_1 + T_2)/T_1 = \sqrt{4(f/\pi)}^{1/2} (T_1 + T_2)/T_1$$

Integral von t_1 bis t_2

und vorzugsweise

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > 3p(T_1 + T_2)/T_1 = \sqrt{6(f/\pi)}^{1/2} (T_1 + T_2)/T_1$$

Integral von t_1 bis t_2

[0039] Ist die Feldstärke E , die zur Erfüllung dieser Ungleichungen notwendig ist, aus Gründen der Durchschlagsfestigkeit des Keramikkörpers 7 oder zu hoher lokaler Gasgeschwindigkeit v nicht zu erreichen, so können die Unglei-

chungen erfindungsgemäß doch noch erfüllt werden, indem bei der Wahl oder gegebenenfalls bei der Entwicklung des keramischen Werkstoffes für den Keramikkörper 7 der Durchmesser der Porenöffnungen, vorzugsweise der Porendurchmesser p selbst, entsprechend verringert wird. Mit entsprechend kleinen Poren muss erfindungsgemäß die Gesamtporosität der Keramik sehr hoch, vorzugsweise über 50% gehalten werden.

[0040] Insbesondere gelten jetzt folgende Ungleichungen erfindungsgemäß für den Porendurchmesser p , wenn für $E(t)$ die unter den gegebenen Umständen größtmögliche Feldstärke $E_{\max}(t)$ eingesetzt wird:

$$p < \kappa(d) \cdot z(d) \int E_{\max}(t) dt \cdot T_1/2(T_1 + T_2) \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

vorzugsweise

$$p < \kappa(d) \cdot z(d) \int E_{\max}(t) dt \cdot T_1/3(T_1 + T_2) \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

[0041] In keramischen Strukturen, deren Porosität sehr hoch ist, treten auch so genannte Makroporen auf, deren Anwesenheit die erfindungsgemäßen Maßnahmen zur porenfernen Abscheidung des Rußes stören.

[0042] Daher ist vorzugsweise die Wahl einer Keramik mit einem geringen Gehalt an Makroporen, vorzugsweise unter 15%, wichtig. Ebenso ist es vorteilhaft, wenn die mittleren Porendurchmesser p der Makroporen unter 20 μm , vorzugsweise unter 15 μm , bleiben.

[0043] Wie bereits erwähnt wurde, wird das hochfrequente elektrische Wechselfeld nicht fortlaufend betrieben, sondern in kurze Perioden von Schwingungen, so genannte hochfrequente bipolare Pulsfolgen, die aus mindestens einer oder einigen wenigen bipolaren Schwingungen bestehen, zerlegt, um das Bordnetz nicht zu überlasten.

[0044] Wählt man nun den Zeitabstand τ zwischen zwei bipolaren Impulsen oder Impulsfolgen zu groß, um den elektrischen Leistungsbedarf deutlich zu reduzieren, so können in der Pause dazwischen Russpartikel doch wieder in Porennähe gelangen und am Poreneingang impaktiert werden, bevor der nächste bipolare Impuls sie abscheidet. Daher muss der Weg v_x , den die vom Abgas getragenen Russpartikel zwischen zwei bipolaren Impulsen oder Impulsgruppen mit dem zeitlichen Abstand τ in Wandrichtung zurücklegen kleiner oder gleich sein als der Driftweg $s(d)$ als zeitliches Integral der Driftgeschwindigkeit $c(d,t)$ über eine Halbperiode des Wechselfeldes, also

$$v_x \cdot \tau \leq s(d)$$

oder

$$v_x \cdot \tau \leq \kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

[0045] Da Russteilchen je nach ihrem Durchmesser unterschiedliche Beweglichkeiten $\kappa(d)$ haben und unterschiedliche Sättigungsauf Ladungen $z(d)$ erlauben, ergeben sich im elektrischen Feld E auch unterschiedliche Driftgeschwindigkeiten $c(d)$. Tabelle 1 zeigt die bei zwei maximalen elektrischen Feldstärken (6 kV/cm und 8 kV/cm) erreichbaren Driftgeschwindigkeiten im Maximum der elektrischen Halbwelle:

Tabelle 1:

Partikel-durchmesser	$\kappa(d)/\text{cm}^2/\text{V.s/}$ (Beweglichkeit)	$z(d)$ (Ladezahl)	$\kappa(d) \cdot z(d)$	$\kappa(d) \cdot z(d) \cdot E$ ($E = 6 \text{ kV/cm}$)	$\kappa(d) \cdot z(d) \cdot E$ ($E = 8 \text{ kV/cm}$)
10 nm	$6,3 \cdot 10^{-3}$	0,3	$1,9 \cdot 10^{-3}$	11,4 cm/s	15,2 cm/s
20 nm	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1	$1,3 \cdot 10^{-3}$	7,8 cm/s	10,4 cm/s
100 nm	$1,0 \cdot 10^{-4}$	10	$1,0 \cdot 10^{-3}$	6,0 cm/s	8,0 cm/s
1 μm	$5,4 \cdot 10^{-6}$	300	$1,6 \cdot 10^{-3}$	9,6 cm/s	12,8 cm/s
10 μm	$5,4 \cdot 10^{-7}$	11 000	$6,0 \cdot 10^{-3}$	36,0 cm/s	48,0 cm/s

[0046] Tabelle 2 zeigt mindestens notwendige Durchlaufzeiten des Abgasstromes in den Kanälen 5 eines Keramikkörpers 7 für zwei unterschiedliche Feldstärken im Maximum der elektrischen Spannungsimpulse, um die Ungleichung realisieren zu können. Die Daten wurden für einen Massendurchsatz von 500 kg/h bei 500°C und einem Gesamtquerschnitt des Wabenkörpers von 360 cm² bestimmt.

Tabelle 2:

Partikel- durchmesser	$\kappa(d) \cdot z(d) \cdot E$ (6 kV/cm)	$h = 0,8 \text{ mm } t \geq$	$h = 0,6 \text{ mm } t \geq$	$\kappa(d) \cdot z(d) \cdot E$ (8 kV/cm)	$h = 0,8 \text{ mm } t \geq$	$h = 0,6 \text{ mm } t \geq$
10 nm	11,4 cm/s	14 ms	11 ms	15,2 cm/s	11 ms	8 ms
20 nm	7,8 cm/s	21 ms	16 ms	10,4 cm/s	16 ms	12 ms
100 nm	6,0 cm/s	27 ms	20 ms	8,0 cm/s	20 ms	15 ms
1 μm	9,6 cm/s	17 ms	13 ms	12,8 cm/s	13 ms	10 ms
10 μm	36,0 cm/s	5 ms	4 ms	48,0 cm/s	4 ms	3 ms

[0047] Mit einer Durchlaufzeit von $t = 10 \text{ ms}$ können bereits Abgasmengen von 500 kg/h bei 500°C bei vertretbaren Filterquerschnitten diese Bedingungen erfüllen. Dieser Abgasmassenstrom von 500 kg/h entspricht einem Vollastbetrieb eines aufgeladenen Dieselmotors der unteren Mittelklasse. Ein Abscheidefeld von 8 kV/cm kann also bei einer Kanalhöhe h von 0,6 mm auch bei Vollast alle Partikel entlang einer Abscheidewand ohne Beeinflussung durch Porenkanäle auffangen. Da Partikel mit Durchmessern um 100 nm nichts mehr zur Partikelzahl und noch nichts zur Partikelmasse beitragen, ist ein Filterbetrieb mit diesen Parametern durchaus akzeptabel, da bei diesen Temperaturen die Regeneration unter Plasma kontinuierlich und schnell abläuft. Die notwendigen Abscheidefelder von bis zu 8 kV/cm liegen zwar deutlich über den derzeit üblichen Feldstärken von etwa 1 kV/cm, wie sie zum Zweck des Russabbrandes eingesetzt werden, diese Feldstärken sind aber insbesondere bei planaren Geometrien für den Keramikkörper 7 aufgrund verbesserter Keramiken durchaus zu verwirklichen.

[0048] Somit ist ersichtlich, dass kleinere Kanalhöhen h kürzere Durchlaufzeiten t , d.h. höhere Volumenströme erlauben. Der Versuch, zu immer kleineren Kanalhöhen h in Feldrichtung zu gehen, findet aber dort seine Grenze, wo der Driftweg s während einer Halbwelle in die Nähe der halben Kanalhöhe h kommt, da es dann bereits zu einer Abscheidung des Rußes im Einlaufteil des Kanals 5 und damit zu einer starken Ungleichverteilung des abgeschiedenen Rußes im Kanal 5 kommt.

[0049] Um den Russ auf den größeren Teil des Kanals 5 bei seiner Abscheidung zu verteilen, wird daher vorgeschlagen, dass der Driftweg $s(d)$ der Russpartikel während einer Halbwelle deutlich kleiner als die Kanalhöhe h in Feldrichtung ist, also

$$s(d) \ll h$$

oder

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt \ll h \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

[0050] Die Grenzen des Integrals erstrecken sich jeweils über eine unipolare Halbwelle des Feldes E . Damit ergibt sich das Kriterium, dass der Driftweg $s(d)$ während einer Halbwelle größer oder gleich ist, als die Komponente in oder gegen die Feldrichtung des Weges $v_x \cdot (t_2 - t_1)$ des auf die Kanalwand zuströmenden Gases während einer Halbwelle des Feldes, und deutlich kleiner als die Kanalhöhe h :

$$v_x \cdot (t_2 - t_1) < s(d) \ll h$$

oder

$$v_x \cdot (t_2 - t_1) < \kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt \ll h \quad \text{Integral von } t_1 \text{ bis } t_2$$

5 **[0051]** Da V_x eine Funktion der Gasgeschwindigkeit v ist, kann dieser Zusammenhang auch dazu benutzt werden, die Russverteilung im Kanal 5 zu lenken, oder sie auch bei verschiedenen Gasgeschwindigkeiten konstant zu halten, indem die Feldamplitude zumindest zeitweise verringert wird, vorzugsweise bei kurzem aber sehr hohen Russanfall, während die Feldamplitude in der verbleibenden Zeit direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit im Kanal 5 geregelt wird.

10 **[0052]** Dieses Problem kann dadurch gelöst werden, dass bei länger dauerndem, hohen Russanfall, der dann mit hohen Temperaturen verbunden ist, entsprechend hohe Feldamplituden gesetzt werden, bei geringem Russanfall aber je nach Regenerationszustand des Filters zwischen hohen Feldamplituden und geringen Feldamplituden gewechselt wird, wobei vorzugsweise zu diesem Wechsel die Daten "hoher Russanfall" und "geringer Russanfall" sowie Gasmas-
senstrom aus dem Motorrechner über einen CANBUS an den Prozessor des Filters übertragen werden, oder der Wechsel
15 wird direkt aus dem Motorrechner gesteuert, der dann Russmenge und Russverteilung im Filter selbst berechnet.

[0053] Ist v die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Abgases in den Kanälen 5 des Keramikkörpers 7, so kann dieses Regelprinzip vom Filterprozessor autonom dadurch umgesetzt werden, dass die mittlere Geschwindigkeit in den Kanälen 5 in mindestens zwei Intervalle geteilt wird, wo für die größere Strömungsgeschwindigkeit v die normale Re-
gelung mit den oben diskutierten Randbedingungen gilt, während für die geringere Strömungsgeschwindigkeit v gilt,
20 wenn die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit kleiner null ist, also die Geschwindigkeit mit der Zeit abnimmt, wird mit der größten erlaubten Feldamplitude gefahren. Ist dagegen die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit größer oder gleich Null, nimmt also die Strömungsgeschwindigkeit v mit der Zeit zu oder bleibt konstant, so wird das Feld E mit niedrigeren Feldamplituden $E_{\min}$ gefahren, um die feldunterstützte Ablagerung von Russ weiter in das Innere der Kanäle 5 zu verlagern:

25

Intervall I:

$v > v_1$ Regelung nach mindestens einer der bisher diskutierten Regelgleichungen, d.h.

30

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > v_x \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > 2p$$

35

$$v_x \cdot \tau \leq \kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt$$

Intervall II:

40

$v < v_1$ lauten die Regelgleichungen mit $dv/dt < 0$

$$E(T) = E_{\max}$$

45

mit den erlaubten Nebenbedingungen

$v < v_1$ lautet die Regelgleichung mit $dv/dt \geq 0$ dagegen

50

$$E(T) = E_{\min}$$

55 **[0054]** Hierbei hat $E_{\min}$ zumindest noch zwei der obigen vier Ungleichungen zu erfüllen:

$$v_x \cdot \tau \leq s(d)$$

und/oder

$$2p < s(d)$$

und/oder

$$v_x \cdot (t_2 - t_1) < s(d)$$

und/oder

$$s(d) \ll h$$

[0055] Diese Vorgangsweise wird in der Fig. 4 skizziert, in der die in den Kanälen 5 errichtete, maximale Feldstärke E in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v des Abgasstroms im Kanal 5 aufgetragen sind. Zur Vereinfachung ist ein linearer Zusammenhang dargestellt. Zusätzlich ist auch zum Vergleich der Wert E_A eingezeichnet, der derzeit übliche Werte für jene Feldstärke angibt, die notwendig wäre, wenn die Feldstärke E lediglich die Aufgabe des Russabbrandes in den Kanälen 5 zu erfüllen hätte.

[0056] Natürlich kann der Prozessor des Russfilters diese Steuerung auch selbst durchführen. Die einfachste Umsetzung erhält man durch eine Messung des vorzugsweise am Filter selbst auftretenden Differenzdrucks ($p_1 - p_2$), der in guter Näherung direkt proportional zu der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v in den Kanälen 5 des Keramikkörpers 7 ist, und dessen Zunahme oder Abnahme einen guten Rückschluss auf die Russemission des Motors erlaubt. Um von dem durch unabgebrannten Russ erhöhten Filterdruck unabhängig zu sein, ist es weiters vorteilhaft, die Druckdifferenz nicht am Keramikkörper 7 selbst, sondern an einem durch den Russ unveränderten Strömungswiderstand, vorzugsweise dem Entladungsgefäß, in dem die Entladungselektroden untergebracht sind, zu messen (in den Fig. 1 bis 4 nicht dargestellt).

[0057] Dadurch ergibt sich eine Umsetzung des erfindungsgemäßen Regelprinzips dadurch, dass man den am Keramikkörper 7 oder einem anderen entsprechenden Strömungswiderstand auftretenden Differenzdruck ($p_1 - p_2$) in mindestens zwei Intervalle teilt, wo für den größeren Differenzdruck die normale Regelung gilt, während für den geringeren Differenzdruck ($p_1 - p_2$) gilt, wenn die Ableitung des Differenzdrucks nach der Zeit negativ ist, also der Differenzdruck mit der Zeit abnimmt, wird mit der größten erlaubten Feldamplitude gefahren. Ist dagegen die Ableitung des Differenzdrucks nach der Zeit positiv oder Null, nimmt also der Differenzdruck mit der Zeit zu oder bleibt konstant, so wird das Feld E mit dem geringsten, unter zumindest einer der Nebenbedingungen

$$v_x \cdot \tau \leq s(d) \text{ und/oder } v_x \cdot (t_2 - t_1) < s(d)$$

möglichen Feld $E_{\min}$ gefahren.

Intervall I:

$$(p_1 - p_2) > \Delta p_1$$

Regelung nach mindestens einer der bisher diskutierten Regelgleichungen, d.h.

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > v_x \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt > 2p$$

$$v_x \cdot \tau \leq \kappa(d) \cdot z(d) \int E(t) dt$$

Intervall II:

$$(p_1 - p_2) < \Delta p_1 \quad \text{mit} \quad d(p_1 - p_2) / dt < 0$$

lauten die Regelgleichungen

$$E(T) = E_{\max}$$

mit den erlaubten Nebenbedingungen

[0058] Die Regelgleichung bei $d(p_1 - p_2) / dt \geq 0$ lautet dagegen

$$E(T) = E_{\min}$$

[0059] Natürlich kann auch der Filterprozessor selbst die zur optimalen Abscheidung des Rußes notwendige Spannungssteuerung berechnen und durchführen, wenn der Motorprozessor die dazu notwendigen Signale, vorzugsweise Temperatur T, Gasvolumenstrom oder Massenstrom, vorzugsweise auch AGR-Rate und Einspritzmenge über ein Signalsystem, vorzugsweise über CANBUS, zur Verfügung stellt. Dabei besteht auch ein weiterer Vorteil darin, dass der kleinere Filterprozessor schneller die notwendigen Spannungsänderungen ermittelt, und dadurch das durch Kapazitäten auf der Hochspannungsseite nur langsam regelbare Abscheidefeld rechtzeitig auf den neuen Russanfall eingestellt werden kann.

[0060] Sind die Feldamplituden zu groß, kommt es im Einlaufteil des Keramikkörpers 7 zu einer weiteren Schwierigkeit, da beim Eintritt in die Kanäle 5 Einlaufturbulenzen entstehen, die erst innerhalb der so genannten Einlauflänge in eine laminare Strömung übergehen. Durch die turbulente Umwälzung des Abgases im Kanal 5 kommen die meisten Russteilchen auch in Wandnähe, und können mit einer großen Feldamplitude abgeschieden werden. In diesem Fall wird der größte Teil des Rußes innerhalb der Einlauflänge abgeschieden, und kann zu einer lokalen Überforderung des Regenerationsvermögens des Filters führen.

[0061] Diese Schwierigkeit kann dadurch beseitigt werden, indem die Außenelektroden des Keramikkörpers 7 auf der Einlaufseite deutlich zurückgesetzt sind, vorzugsweise um ein bis zwei Einlaufängen l_e , die mit der maximal möglichen Gasgeschwindigkeit v in den Kanälen 5 berechnet wird. Etwas vereinfacht hängt die Einlauflänge von der Kanalhöhe h und von der mittleren Gasgeschwindigkeit v im Kanal 5 ab:

$$l_e = 0,029h \cdot Re,$$

und wird mit der von der Gasgeschwindigkeit v abhängenden Reynoldszahl Re berechnet, wobei die Konstante k noch implizite Korrekturen für Viskosität und Temperatur des Gases enthält:

$$Re = k \cdot v \cdot h$$

[0062] Somit ergibt sich der näherungsweise gültige Zusammenhang

$$l_e = 0,029 \cdot k \cdot v \cdot h^2$$

der zeigt, dass die Kanalhöhe h quadratisch in die Einlauflänge eingeht. Dies kann bei verringerter Kanalhöhe h kritisch werden, da die Einlauflänge für 0,7 mm Kanalhöhe h und 200°C zwar noch eine Einlauflänge ergibt, die je nach Gasgeschwindigkeit v noch etwa 20 mm bis 60 mm beträgt, bei einer Reduktion der Kanalhöhe h auf 0,35 mm aber nur mehr etwa 5 mm bis 15 mm beträgt. Eine Abscheidung eines entscheidenden Anteils des Rußes auf einer so kurzen

Strecke wird zu eindeutigen Schwierigkeiten führen, die dadurch gelöst werden können, dass die Außenelektroden des Wabenkörpers bei 0,7 mm Kanalhöhe h um 60 mm, vorzugsweise um 120 mm, bei 0,35 mm Kanalhöhe h um 15 mm, vorzugsweise 30 mm, zurückversetzt werden.

[0063] Für die notwendige Rückversetzung l_x (in mm) der Elektroden für einen Keramikkörper 7 mit der Kanalhöhe h_x (in mm) in Feldrichtung ergeben sich somit folgende Schranken

$$60 \cdot h_x^2 / 0,49 \leq l_x \leq 120 \cdot h_x^2 / 0,49$$

[0064] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ergeben sich somit vielfältige Möglichkeiten, bei geeigneter Wahl der Spannungsimpulse und darauf abgestimmter Kanalhöhen h das Abscheideverhalten der Filteranordnung zu optimieren. Insbesondere kann der Druckaufbau in Filteranordnungen, die auf der Verwendung eines Keramikkörpers mit einseitig geschlossenen Kanälen basieren, deutlich reduziert werden, und somit die Lebensdauer solcher Filteranordnungen entscheidend erhöht.

Patentansprüche

1. Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus einem Abgasstrom, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines porösen Keramikkörpers (7) verlaufende Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) hindurchgeleitet wird, wobei der Abgasstrom durch Poren der Wände der lediglich einseitig offenen Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) durchtritt, und an parallel zu den Kanälen (5) verlaufenden Elektroden (1,2) eine Spannung an den Keramikkörper (7) zur Erzeugung eines elektrischen Feldes (E) in den Kanälen (5) des Keramikkörpers (7), das im Wesentlichen normal zur Achse der Kanäle (5) orientiert ist, angelegt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** vor dem Einleiten des Abgasstroms in die Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) eine Aufladung der Russpartikel mithilfe einer weiteren Elektrodenanordnung erfolgt, und es sich bei jener Spannung, die an den parallel zu den Kanälen (5) verlaufenden Elektroden (1,2) angelegt wird, um bipolare Spannungsimpulse handelt, wobei die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass die durch eine Halbwelle der Spannungsimpulse erzeugte Driftgeschwindigkeit (c) der aufgeladenen Russpartikel in Feldrichtung des in den Kanälen (5) erzeugten, elektrischen Feldes im Mittel größer oder gleich der maximalen Geschwindigkeitskomponente (v_x) der Gasströmung in Feldrichtung des in den Kanälen (5) erzeugten, elektrischen Feldes ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass der während einer Halbwelle der Spannungsimpulse zurückgelegte Driftweg (s) der aufgeladenen Russpartikel kleiner als die Höhe (h) der Kanäle (5) in Feldrichtung des in den Kanälen (5) erzeugten, elektrischen Feldes (E) ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass der während einer Halbwelle der Spannungsimpulse zurückgelegte Driftweg (s) der aufgeladenen Russpartikel mindestens dem Zweifachen, mittleren Durchmesser (p) der Poren des Keramikkörpers (7) entspricht.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass der während einer Halbwelle der Spannungsimpulse zurückgelegte Driftweg (s) der aufgeladenen Russpartikel mindestens dem Dreifachen, mittleren Durchmesser (p) der Poren des Keramikkörpers (7) entspricht.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die bipolaren Spannungsimpulse so gewählt werden, dass der während einer Halbwelle der Spannungsimpulse zurückgelegte Driftweg (s) der aufgeladenen Russpartikel mindestens so groß ist wie das Produkt aus der maximalen Geschwindigkeitskomponente (v_x) der Gasströmung in Feldrichtung des in den Kanälen (5) erzeugten, elektrischen Feldes (E), und dem Zeitabstand (τ) zwischen zwei bipolaren Spannungsimpulsen oder zwischen zwei Folgen von bipolaren Spannungsimpulsen.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Differenzdruck des Abgasstromes am Keramikkörper (7) gemessen wird, und oberhalb eines vorgegebenen Wertes (Δp_1) des Differenzdrucks

die Regelung der bipolaren Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (v) des Abgasstroms in den Kanälen (5) des Keramikkörpers (7) erfolgt, und unterhalb dieses vorgegebenen Wertes (Δp_1) die Regelung nur dann in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Abgasstroms in den Kanälen (5) des Keramikkörpers (7) erfolgt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit (v) eine mit der Zeit abfallende Tendenz aufweist, und andernfalls die Regelung unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit (v) erfolgt.

7. Filteranordnung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 bis 6 mit einem Keramikkörper (7), der axial verlaufende Kanäle (5) aufweist, die vom Abgas durchströmt werden, wobei der Abgasstrom durch Poren der Wände der lediglich einseitig offenen Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) durchtritt, und am Keramikkörper (7) parallel zu den Kanälen (5) verlaufende Elektroden (1,2) zur Erzeugung eines normal zu den Kanälen (5) verlaufenden, elektrischen Feldes in den Kanälen (5) angeordnet sind, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Keramikkörper (7) eine Gesamtporosität von über 50% aufweist, und der Anteil der Makroporen unter 15% beträgt.

Fig. 1

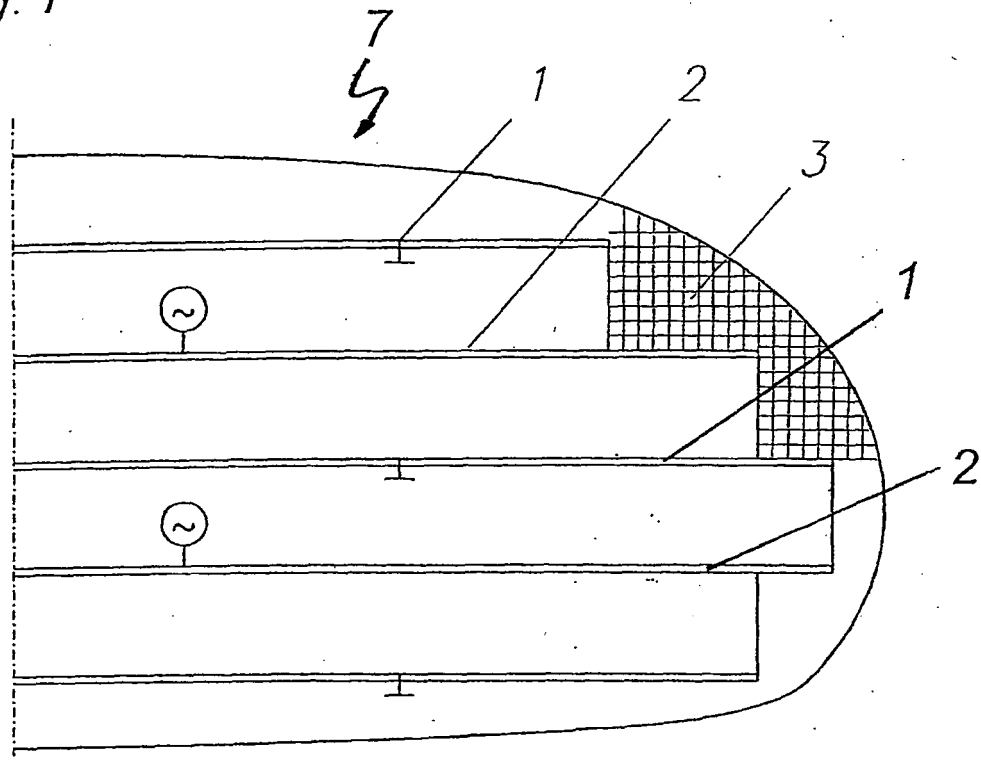


Fig. 2

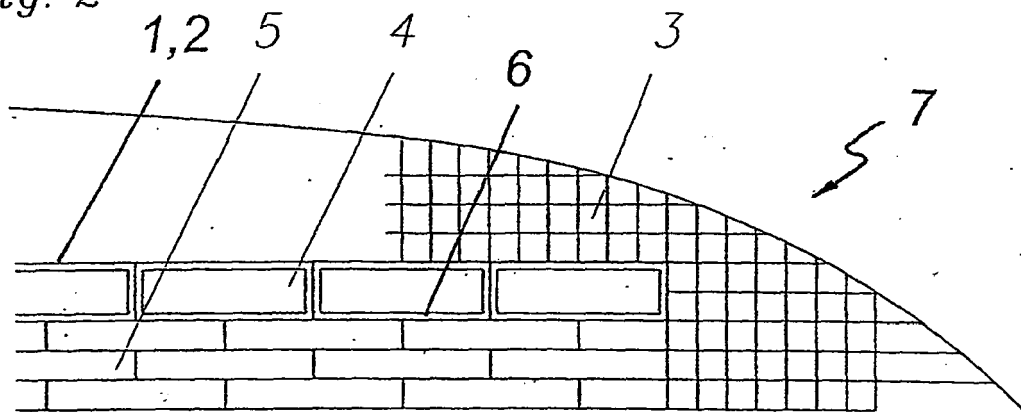


Fig. 3

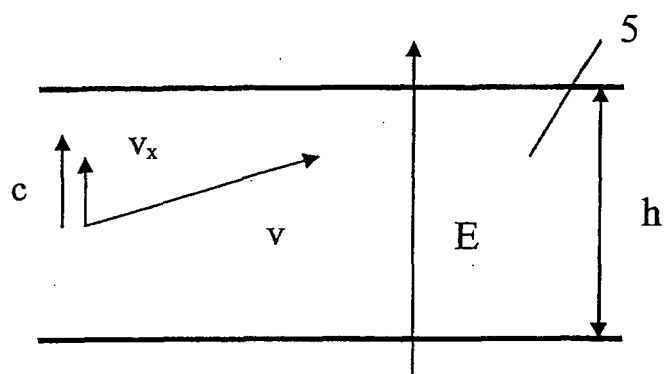


Fig. 4

