(19) österreichisches patentamt

(10) **AT 509 854 B1 2011-12-15**

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 1233/2010
(22) Anmeldetag: 22.07.2010
(45) Veröffentlicht am: 15.12.2011

(51) Int. Cl. : ***B01D 46/50*** (2006.01)
B03C 3/017 (2006.01)
F01N 3/01 (2006.01)

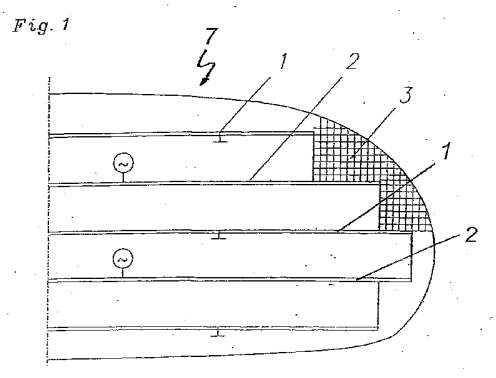
(56) Entgegenhaltungen:
WO 2001/034281A1
WO 2006/050546A1
WO 2006/131406A1
WO 2008/138023A1

(73) Patentinhaber:
FLECK CARL M. DR.
A-2391 KALTENLEUTGEBEN (AT)

(54) **REGELUNG EINES PLASMAREGENERIERTEN RUSSFILTERS**

(57) Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus dem Abgasstrom eines Dieselmotors, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines Keramikkörpers (7) verlaufende Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) mit der Strömungsgeschwindigkeit (v) hindurchgeleitet wird, und an parallel zu den Kanälen (5) verlaufenden Elektroden (1,2) Spannungsimpulse an den Keramikkörper (7) zur Erzeugung eines elektrischen Abscheidefeldes (E) in den Kanälen (5) des Keramikkörpers (7), das jeweils quer zur Achse der Kanäle (5) orientiert ist, angelegt wird, wobei in einem ersten Betriebsmodus konstanter oder zunehmender Strömungsgeschwindigkeit (v) zur vorwiegenden Abscheidung der Russpartikel in den Kanälen (5) eine Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (v) vorgenommen wird.
Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, dass in einem zweiten Betriebsmodus abnehmender Strömungsgeschwindigkeit (v) zum vorwiegenden Abbrand des abgeschiedenen Rußes eine Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Entladungsspannung an den Elektroden (1,2), die zumindest einmal zwischen zwei Spannungsimpulsen gemessen wird, vorgenommen wird.

Fig. 1



AT 509 854 B1 2011-12-15

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus dem Abgasstrom eines Dieselmotors, gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

[0002] Bei Vorrichtungen dieser Art werden die im Abgasstrom enthaltenen Russpartikel entfernt, indem das Abgas durch axial verlaufende Kanäle eines aus einem keramischen Werkstoff hergestellten Wabenfilter hindurchgeleitet wird, und an parallel zu den Kanälen verlaufenden Elektroden eine Spannung an den Wabenfilter zur Erzeugung eines normal zu den Kanälen verlaufenden, elektrischen Abscheidefeldes in den Kanälen angelegt wird. Die Kanäle weisen dabei einen rechteckförmigen Querschnitt, der in Spezialfällen auch quadratisch sein kann, auf, wobei als Kanalhöhe „h" jene Seite definiert wird, die in Feldrichtung orientiert ist, und die Kanalbreite „b" folglich im Wesentlichen normal zur Feldrichtung liegt. Die Kanäle sind in Feldrichtung durch eine Wandstärke ,,d" des keramischen Werkstoffes voneinander getrennt.

[0003] Zur prinzipiellen Ausführung des Wabenkörpers sind mehrere Varianten bekannt. So kennt der Stand der Technik etwa Filtersysteme, bei denen die axial verlaufenden Kanäle beidseitig offen sind („offene Filter"), oder nur an einer Seite offen, und an der gegenüber liegenden Seite geschlossen („Wall-flow-Filter" oder „geschlossene Filter"). Bei offenen Filtersystemen werden die Russpartikel mithilfe einer vor dem Wabenkörper angeordneten Entladungselektrode elektrisch aufgeladen, und durch das am Wabenkörper anliegende elektrische Feld abgeschieden. Das elektrische Feld am Wabenkörper kann dabei so betrieben werden, dass innerhalb der Kanäle ein Plasma erzeugt wird, mit dem abgeschiedene Russpartikel in gasförmige Substanzen umgewandelt werden (so genannte „plasmaregenerierte Filtersysteme"). Elektrische Feldstärken von etwa 1.5-2 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. Bei geschlossenen Filtern kann eine vorherige Aufladung der Russpartikel unterbleiben, da die Russpartikel im Zuge des Durchtritts des Abgases durch die Kanalwand in einen daneben liegenden Kanal mit offener Austrittsöffnung zurück gehalten werden. Diese Art der Abscheidung wird auch als „mechanische Abscheidung" bezeichnet. Der keramische Werkstoff ist hierzu porös ausgeführt, um einen Durchtritt des Abgases zu ermöglichen. Bei offenen Systemen wird der keramische Werkstoff im Zuge der Herstellung hingegen „dicht gebrannt", d.h., dass der Porenanteil gering ist, und es sich bei den verbleibenden Poren um geschlossene Poren handelt, also keinen Durchtritt von Abgas von einem Kanal in einen daneben liegenden Kanal ermöglichen. Als Werkstoff für den keramischen Wabenkörper finden in der Regel oxidische Keramiken Anwendung, insbesondere Kordierit.

[0004] Der Wabenkörper wird in der Regel entweder als kreisringzylindrischer Körper ausgeführt, in dessen innerem Hohlraum eine erste Elektrode angeordnet ist, zumeist jene mit der Hochspannungszuführung, und an dessen äußerem Umfang eine zweite Elektrode angebracht ist, zumeist jene, die auf Masse liegt, oder mit einer planaren Geometrie, also mit rechteckförmigem Querschnitt, an dessen gegenüber liegenden Seiten die beiden Elektroden angeordnet sind. Wahlweise kann auch eine „Sandwichstruktur" gewählt werden, bei der mehrere Elektrodenflächen den Wabenkörper durchziehen, wobei jeweils benachbarte Elektroden unterschiedliche Polarität aufweisen. Die Länge des Wabenkörpers, also die Erstreckung zwischen Eintrittsseite des Abgases in den Wabenkörper und der Austrittsseite, hängt im Wesentlichen von der notwendigen Verweildauer des Abgases im Wabenkörper ab, um einen vorgegebene Abscheidegrad für die Russpartikel sicher zu stellen. Diese Größe ist wiederum durch den Abgasvolumenstrom im Volllastbetrieb des Fahrzeugs bestimmt, also letztendlich auch vom Fahrzeugtyp abhängig. Die notwendige Verweildauer des Abgases in den Kanälen des Wabenkörpers ist selbstverständlich auch vom Abscheideverhalten der Russpartikel abhängig, die etwa durch die angelegte Feldstärke steuerbar ist, aber auch von der strukturellen Ausführung der Kanäle, also von der Wahl von Kanalhöhe und Kanalbreite.

[0005] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine besondere Filteranordnung, bei der vor

dem keramischen Wabenkörper, der im Folgenden einfach als Keramikkörper bezeichnet wird, eine Entladungselektrode angeordnet ist, in der eine Aufladung der Russpartikel erfolgt. Das im nachfolgenden Keramikkörper angelegte elektrische Feld erfüllt daher nicht nur die Funktion des Russabbrandes, sondern auch die Funktion der Abscheidung der Russpartikel, wobei es im Falle der Wall-flow-Filter die mechanische Abscheidung unterstützt. Das im nachfolgenden Keramikkörper angelegte elektrische Feld wird im Folgenden daher auch als „Abscheidefeld" bezeichnet. Wie der Anmelder zeigen konnte, können mit einer solchen Filteranordnung Abscheidegrade bis zu 100% erreicht werden.

[0006] Daneben besitzen diese durch eine unipolare Plasmaentladung regenerierbaren Filter je nach ihrer funktionellen Auslegung weitere Vorteile, etwa eine extrem hohe, fast unbegrenzte Lebensdauer für einen durch unipolare Impulse regenerierten Wall-flow-Filter, oder neben einer unbegrenzten Lebensdauer eines offenen Systems, bei dem der Russ durch seine vorher stattfindende Aufladung abgeschieden wird, sein praktisch nicht vorhandener Gegendruck und seine Notlaufeigenschaften im Schadensfall. Zu diesen Vorteilen kommt noch die kontinuierlich stattfindende Regeneration hinzu, die eine wesentlich leichtere Handhabung und Flexibilität plasmaregenerierter Systeme bei ihrer Anpassung an vorgegebene Pflichtenhefte, sowie eine Verwendung zur Nachrüstung ermöglicht.

[0007] Eine entscheidende Verbesserung in der Entwicklung dieser plasmaregenerierten Filtersysteme brachte der Übergang von einem Gleichstrombetrieb zu einem Betrieb des Filters mit einer kapazitiven Aufladung durch unipolare Hochspannungsimpulse, die die innere Wabenstruktur des Filters auflädet und so Kurzschlüsse vermeidet, die zu unkontrollierten Stromflüssen und damit zu einer Zerstörung des keramischen Wabenkörpers führen können. Wesentlich dabei ist die kurze Dauer der Hochspannungsimpulse, die unter jener Zeit liegen soll, in der sich die einer Funkenentladung vorausgehenden Vorfunken, die sogenannten „streamer", bilden.

[0008] Für den Betrieb einer solchen Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus dem Abgasstrom eines Dieselmotors wurde vom Anmelder in der PCT-Patentanmeldung PCT/AT2008/000163 ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem in einem ersten Betriebsmodus konstanter oder zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des Abgases innerhalb der Kanäle des Keramikkörpers die Spannungsimpulse für das Abscheidefeld in den Kanälen in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit geregelt werden.

[0009] Die Strömungsgeschwindigkeit in den Kanälen des Keramikkörpers ist dabei bei genauer Betrachtung eine komplexe Größe, da etwa im Einlaufteil der Kanäle turbulente Strömung herrscht, in der eine Strömungsgeschwindigkeit nicht so zu definieren ist wie in jenem Abschnitt der Kanäle, in denen sich letztendlich eine laminare Strömung einstellt. Des Weiteren wird sich innerhalb der Kanäle jeweils ein Strömungsprofil entlang des Querschnitts der Kanäle, sowie ein, wenn auch kleiner, Beschleunigungsweg des Abgasstroms einstellen. Für eine effiziente Regelung ist jedoch von einer Messgröße auszugehen, die die für die Regelung relevante Strömungsgeschwindigkeit des Abgasstroms in den Kanälen des Keramikkörpers wiedergibt. Diese Messgröße ist etwa über Messung des Differenzdrucks an der Einlaufseite und an der Auslaufseite der Kanäle leicht zu gewinnen. Alternativ zur Strömungsgeschwindigkeit des Abgasstroms in den Kanälen des Keramikkörpers könnte auch die Strömungsgeschwindigkeit des Abgasstroms durch die Entladungselektrode herangezogen werden. Diese beiden Strömungsgeschwindigkeiten kennzeichnen letztendlich dieselbe physikalische Größe, und variieren lediglich aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Gegebenheiten innerhalb der Entladungselektrode und der Kanäle des Keramikkörpers.

[0010] Da ferner die Strömungsgeschwindigkeit auch von der Menge des abgelagerten Rußes sowie vom Abbrand des Rußes abhängt, die wiederum jeweils von der Größe der Spannungsimpulse abhängen, handelt es sich hierbei um eine echte Regelung. Die Messung, etwa über Drucksensoren auf der Eintritts- und Austrittsseite des Keramikkörpers, und die Verarbeitung der Messsignale kann über einen eigenen, dem Keramikkörper zugeordneten Prozessor vorgenommen werden, und erfolgt in der Regel autark von den übrigen, prozessorgesteuerten Bordsystemen. Das ermöglicht einerseits eine Echtzeit-Regelung, die rasch auf unterschiedliche

Fahrtsituationen angepasst werden kann, und andererseits auch eine einfache und somit stabile Regelung, da keine Abhängigkeit von den zumeist komplexen Motorsteuerungsprozessen besteht. Eine rasche Regelung ist vor allem auch deshalb wichtig, da aufgrund der auf der Hochspannungsseite auftretenden Kapazitäten das Abscheidefeld ohnehin nur relativ langsam regelbar ist, und durch rasche Regelung rechtzeitig auf den neuen Russanfall abgestellt werden kann. Die Größe der Spannungsimpulse bestimmt sich im ersten Betriebsmodus in erster Linie über die für eine zuverlässige Abscheidung der Russpartikel notwendige, mittlere Feldstärke des Abscheidefeldes innerhalb der Kanäle, und hängt daher auch vom verwendeten Filtertyp ab, also ob etwa ein offener oder ein Wall-flow-Filter verwendet wird. Die Spannungsimpulse werden aber auch hinsichtlich einer gleichmäßigen Abscheidung des Rußes im Wabenkörper gewählt werden, um etwa zu vermeiden, dass der Grossteil des abgeschiedenen Rußes bereits in unmittelbarer Nähe der Eingangsöffnungen der Kanäle abgeschieden wird. Dadurch wird auch der Abbrand des Rußes begünstigt, da er über ein größeres Volumen stattfinden kann.

[0011] Des Weiteren wurde in der bereits genannten PCT-Patentanmeldung PCT/AT2008/000163 vorgeschlagen, dass in einem zweiten Betriebsmodus bei abnehmender Strömungsgeschwindigkeit eine auf den Abbrand des Rußes optimierte Regelung der Spannungsimpulse vorgenommen wird. Allerdings wurde bislang davon ausgegangen, dass im zweiten Betriebsmodus eine Maximierung des Abscheidefeldes für einen bestmöglichen Abbrand des Rußes vorteilhaft wäre.

[0012] Ein effizienter Abbrand des abgeschiedenen Rußes ist von entscheidender Bedeutung, da bei konventionellen Russfiltern ohne Plasmaregeneration insbesondere im Kurzstrecken- und Großstadtverkehr stets ein Liegenbleiben von Fahrzeugen aufgrund verstopfter Russfilter droht. Auch bei plasmaregenerierten Filtersystemen bereitet der zuverlässige Abbrand des abgeschiedenen Rußes mitunter Schwierigkeiten.

[0013] Um die Plasmaentladung im Wabenkörper trotz sehr unterschiedlicher Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen sowie Kondenswasser beim Kaltstart optimal zu betreiben, ist deren Regelung von entscheidender Bedeutung. Vorzugsweise ist hierfür ein eigener Prozessor vorgesehen. Ist die Strom-Spannungs-Kennlinie der Plasmaentladung des Impulsfeldplasmas im keramischen Wabenkörper als Funktion der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration bekannt, kann die Regelung der entsprechenden Elektronik programmiert werden.

[0014] Zusammenfassend lässt sich somit der bekannte Stand der Technik hinsichtlich der Regelung plasmaregenerierter Dieselfilter bei offenen und geschlossenen keramischen Wabenkörpern, die mit unipolaren Hochspannungsimpulsen betrieben werden, im Rahmen zweier unterschiedlicher Regelprinzipien wie folgt darstellen:

[0015] a) Die Regelung der Spannungsimpulse wird für all jene Betriebszustände, die sich durch starke Russproduktion auszeichnen („erster Betriebsmodus"), hinsichtlich einer optimalen Abscheidung der Russpartikel vorgenommen, indem die Spannungsimpulse proportional zur Gasgeschwindigkeit im keramischen Wabenkörper geregelt werden.

[0016] b) Die Regelung der Spannungsimpulse wird für all jene Betriebszustände, die sich durch geringe bis keine Russproduktion auszeichnen („zweiter Betriebsmodus"), hinsichtlich einer optimalen Regeneration des Filters vorgenommen. Hierfür wurde bislang lediglich eine Maximierung des Abscheidefeldes angestrebt.

[0017] Da es sich bei der Plasmaspannung (Entladungsspannung) in der Zeit der Russproduktion gleichzeitig auch um die Abscheidespannung im keramischen Wabenkörper handelt, gilt nach diesen Regelprinzipien für plasmaregenerierte Dieselfilter ein Überlagerungsprinzip für beide Betriebsmodi: für zunehmende oder gleichbleibende Gasgeschwindigkeiten im Filter (in diesen Betriebszuständen wird der überwiegende Russanteil emittiert) wird nach dem Regelprinzip a) geregelt, für abnehmende Gasgeschwindigkeiten im Filter (in diesen Betriebszuständen herrscht Schubbetrieb oder sehr geringe Russemission) nach dem Regelprinzip b). Dazu kommt die Nebenbedingung, dass bei der Regelung nach a) die bei der Regelung nach b) maximal erlaubte Plasmaspannung keinesfalls überschritten werden darf.

[0018] Allerdings hat sich herausgestellt, dass das Regelprinzip b) mitunter keinen zuverlässigen Abbrand des abgeschiedenen Rußes gewährleisten kann. Hierfür bedarf es einer verbesserten Regelung, um eine optimale Regeneration des Filters sicher zu stellen.

[0019] Es ist daher das Ziel der Erfindung, bei einem plasmaregenerierten Dieselfilter mit offenen oder geschlossenen keramischen Wabenkörpern, die mit unipolaren Hochspannungsimpulsen betrieben werden, eine verbesserte Regelung hinsichtlich eines zuverlässigen Abbrandes des abgeschiedenen Rußes bereit zu stellen, und so eine optimale Regeneration des Filters sicher zu stellen. Diese Ziele werden durch die Merkmale von Anspruch 1 erreicht.

[0020] Anspruch 1 bezieht sich hierbei auf ein Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus dem Abgasstrom eines Dieselmotors, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines Keramikkörpers verlaufende Kanäle des Keramikkörpers mit der Strömungsgeschwindigkeit v hindurchgeleitet wird, und an parallel zu den Kanälen verlaufenden Elektroden Spannungsimpulse an den Keramikkörper zur Erzeugung eines elektrischen Abscheidefeldes in den Kanälen des Keramikkörpers, das jeweils quer zur Achse der Kanäle orientiert ist, angelegt wird, wobei in einem ersten Betriebsmodus konstanter oder zunehmender Strömungsgeschwindigkeit v zur vorwiegenden Abscheidung der Russpartikel in den Kanälen eine Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit v vorgenommen wird. Erfindungsgemäß ist hierbei vorgesehen, dass in einem zweiten Betriebsmodus abnehmender Strömungsgeschwindigkeit v zum vorwiegenden Abbrand des abgeschiedenen Rußes eine Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Entladungsspannung an den Elektroden, die zumindest einmal zwischen zwei Spannungsimpulsen gemessen wird, vorgenommen wird.

[0021] Vorzugsweise ist dabei vorgesehen, dass auch der Ladestrom zwischen den Elektroden während eines Spannungsimpulses gemessen wird, und im zweiten Betriebsmodus die Regelung anhand der Strom-Spannungskennlinie der Gasentladungen innerhalb der Kanäle vorgenommen wird, wobei die Regelung eine Townsend-Entladung in den Kanälen sicherstellt.

[0022] Es hat sich nämlich herausgestellt, dass die für die Regeneration des Russpartikelfilters optimale Gasentladung nicht jene mit großen Entladungsströmen ist, also im Bereich einer selbständigen Entladung, sondern jene mit großen Entladungsspannungen im Bereich der unselbständigen Entladung, insbesondere im Bereich der Townsend-Entladung. Dieser Zusammenhang wird durch die Strom-Spannungskennlinie der Plasmaentladung genauer beschrieben, wie im Folgenden noch eingehend erläutert werden wird.

[0023] Eine einfache Regelung wird etwa dadurch ermöglicht, indem im zweiten Betriebsmodus der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht wird, falls die zuletzt gemessene Entladungsspannung um weniger als 40%, vorzugsweise um weniger als 30%, unterhalb des Maximalwerts des vorangegangenen Spannungsimpulses liegt, und der Maximalwert eines Spannungsimpulses verringert wird, falls die zuletzt gemessene Entladungsspannung um mehr als 60%, vorzugsweise um mehr als 80%, unterhalb des Maximalwerts des vorangegangenen Spannungsimpulses liegt.

[0024] Diese einfache Art der Regelung ergibt sich aus der Tatsache, dass eine Townsend-Entladung die Plasmaspannung zwischen zwei Ladeimpulsen nur geringfügig entlädt, während eine Funkenentladung zu einer, zumindest in einer Vielzahl von Kanälen vollkommenen Entladung der Kapazität des keramischen Wabenkörpers und daher zu einem starken Spannungsabfall führt.

[0025] Eine umfassendere Regelung kann dadurch vorgenommen werden, indem im zweiten Betriebsmodus der Maximalwert der Spannungsimpulse geringfügig variiert wird, und die Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Veränderung der Entladungsspannung zwischen den Spannungsimpulsen vorgenommen wird.

[0026] So kann etwa der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht werden, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit ansteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen zugenommen haben, und der Maximalwert eines Spannungsim-

pulses verringert werden, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit ansteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen abgenommen haben.

[0027] In entsprechender Weise kann der Maximalwert eines Spannungsimpulses verringert werden, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit absteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen zugenommen haben, und der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht werden, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit absteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen abgenommen haben.

[0028] Aus Gründen des Energiebedarfs aus dem Bordnetz ist die Nachladung des Wabenkörpers durch Hochspannungsimpulse nur notwendig, wenn die Spannung an den Elektroden zwischen zwei Hochspannungsimpulsen deutlich abfällt. Daher wird vorgeschlagen, dass die Entladungsspannung zwischen zwei Spannungsimpulsen zweimal gemessen wird, und die Frequenz der Spannungsimpulse proportional zur Differenz der beiden gemessenen Entladungsspannungen erhöht wird. Hierfür hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn die Zeitpunkte der Messungen für die erste Messung zwischen 5 µs und 25 µs nach dem vorangegangenen Spannungsimpuls liegen, und die Zeitpunkte der Messungen für die zweite Messung zwischen 25 µs und 50 µs nach dem vorangegangenen Spannungsimpuls liegen.

[0029] Insbesondere kann bei einer solchen Regelung vorgesehen sein, dass die Frequenz F der Spannungsimpulse proportional der Differenz (U_1 - U_2) der beiden gemessenen Entladungsspannungen U_1, U_2 multipliziert mit einer ersten vorgegebenen Konstanten K_1 und vermehrt um eine zweite vorgegebene Konstante K_2 eingestellt wird, wobei der Wert der ersten vorgegebenen Konstanten K_1 zwischen 5 und 25 liegt, und der Wert der zweiten vorgegebenen Konstanten K_2 zwischen 5.000 und 50.000 liegt.

[0030] Schließlich wird vorgeschlagen, dass der maximal erlaubte, obere Grenzwert für die Maximalwerte der Spannungsimpulse anhand jenes Punktes der Strom-Spannungskennlinie festgelegt wird, an dem die Steigungsänderung der Strom-Spannungskennlinie oberhalb eines vorgegebenen Wertes liegt.

[0031] Die Erfindung wird in weiterer Folge anhand der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen hierbei die

[0032] Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Querschnitts eines Keramikkörpers zur Entfernung von Russpartikel aus einem Abgasstrom,

[0033] Fig. 2 eine Detailansicht von Fig. 1, wobei insbesondere die Anordnung der Kanäle ersichtlich ist,

[0034] Fig. 3 eine Strom-Spannungskennlinie in einem Entladungsraum mit planaren Elektroden über den gesamten Entladungsbereich, in dem insbesondere der erfindungswesentliche Bereich der Townsend-Entladung ersichtlich ist,

[0035] Fig. 4 ein Flussdiagramm zur Erläuterung der prinzipiellen Regelung der Plasmaspannung durch die Höhe der Ladeimpulse,

[0036] Fig. 4a ein zu Fig. 4 analoges Flussdiagramm für jenen Fall, bei dem sich die Strom-Spannungskennlinie zwischen den Punkten D und E gemäß der Fig. 3 bereits wieder zu kleineren Spannungen bewegt,

[0037] Fig. 5 ein Flussdiagramm zur Erläuterung der prinzipiellen Regelung des Plasmastroms oder des Ladestroms durch die Höhe der Ladeimpulse,

[0038] Fig. 6 ein Flussdiagramm zur Erläuterung einer verfeinerten Regelung durch ein zweites Regelinkrement, und die

[0039] Fig. 7 ein Flussdiagramm, das die Regelelektronik verwendet, um zu entscheiden, ob nach dem Regelprinzip a) oder b) geregelt werden soll.

[0040] 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 Kera-

mikkörper 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. Bei einem „offenen Filter" sind die Kanäle 5 beidseitig offen, während bei einem „Wall-flow-Filter" die Kanäle 5 an einer Stirnseite des Keramikkörpers 7 offen sind, und an der jeweils gegenüberliegenden Seite geschlossen. Somit tritt der Abgasstrom bei diesem Filtertyp 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.

[0041] 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.

[0042] 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.

[0043] 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.

[0044] Die erfindungsgemäßen Regelungen der Spannungsimpulse am Keramikkörper 7 werden im Folgenden näher erläutert, indem zunächst auf die Fig. 3 Bezug genommen wird. In dieser Abbildung ist die so genannte Strom-Spannungskennlinie in einem Entladungsraum mit planaren Elektroden über den gesamten Entladungsbereich dargestellt. Im Bereich von den Punkten A bis B trägt die radioaktive Hintergrundstrahlung, sowie die Richardson-Elektronen zum Entladungsstrom bei. Mit bis zum Punkt B steigender Spannung wird verhindert, dass die Richardson-Elektronen, die von jedem Festkörper emittiert werden, in den Festkörper zurück diffundieren. Mit weiter bis zum Punkt C steigender Spannung ändert sich der Strom nicht, da bereits alle Richardson-Elektronen, auch jene, die sich bei geringerer Spannung an Gasmoleküle anlagern („Sättigungsbereich") von der Oberfläche des Festkörpers abgesaugt wurden. Im Bereich zwischen C und D oder E dieser Entladungsform tritt zwar keine Ionisation des Gases im Entladungsraum auf, allerdings ist eine Verstärkung der Elektronenemission aus den negativ geladenen Keramikwänden durch Photoelektronen festzustellen. Die dazu notwendige Quantenstrahlung wird sowohl durch Stoßanregung und Lichtemission der Gasmoleküle im Entladungsraum, in einem Russfilter auch durch Lichtemission der abbrennenden Russatome, hervorgerufen. In diesem Bereich findet im Gasraum nur die durch Richardson-Elektronen und ihre Verstärkung durch Photoelektronen hervorgerufene Dunkelfeld- bzw. Townsend-Entladung, also eine unselbständige Entladung, statt. Da die Elektronen selbst nur von Vorgängen außerhalb des Entladungsbereichs kommen, bleibt der Gesamtstrom trotzdem sehr gering. Dadurch gibt es auch mit freiem Auge keine sichtbare Lichtemission, wodurch sich die Bezeichnung Dunkelentladung erklärt.

[0045] Wird die Spannung weiter vorsichtig erhöht, kann dieser Zustand bis zum Punkt E aufrechterhalten werden, an dem der Zusammenbruch des Isolationsvermögens des Gases stattfindet. Es erreichen in diesem Bereich manche Elektronen durch das Feld im Entladungsraum

bereits das unterste Ionisationspotenzial der Abgase, die Entladung beginnt ihren Strom durch Ionisation des Gases selbst zu erzeugen. Die bis dahin unselbständige Entladung geht somit in eine so genannte selbständige Entladung über, die im Bereich geringen Gasdrucks als Glimmentladung Licht emittiert, und im Bereich hohen Gasdrucks, insbesondere Atmosphärendrucks, ansatzlos in eine Funkenentladung übergehen kann. Ist die Regenerationsrate des Rußes in der keramischen Filterstruktur sehr stark, also bei höherer Temperatur und starker Russbildung, so kann sich die Strom-Spannungskennlinie zwischen den Punkten D und E durch den hohen Widerstand der Keramikstruktur und beginnender Raumladungseffekte bereits vor dem Erreichen einer selbständigen Entladungsform zu senken beginnen.

[0046] Da die Elektroden im Fall der Impulsaufladung der keramischen Struktur aus einer isolierenden, mit Russ beschichteten und kapazitiv aufgeladenen Substanz bestehen, wird der Entladungsstrom durch keinen Vorwiderstand gebremst, und die Entladung geht unmittelbar nach dem Einsetzen der Gasmultiplikation durch die Bildung von Plasmalawinen, so genannte „streamer", in eine Funkenentladung über. Dies hat den großen Nachteil, dass in diesem Fall neben den Elektronen auch positive Ionen auftreten, sodass die Russpartikel bipolar aufgeladen werden und sehr rasch zu großen Teilchen agglomerieren, die kaum geladen sind und durch die entladene keramische Struktur auch nicht mehr abgeschieden werden können.

[0047] Es ist daher für die Zündung der Oxidationsreaktion im Russ außerordentlich wichtig, dass die Elektronen während ihrer Beschleunigung durch das elektrische Feld auf den abgelagerten Russ möglichst hohe Energien gewinnen. Gleichzeitig soll aber auch in den Bereichen höherer Ströme, also möglichst nahe dem Punkt E geregelt werden. Diese Aufgabenstellung ist für die Regelung diffizil: die Hochspannung muss im Regelprinzip b) den Punkt D im Diagramm überschreiten, aber gleichzeitig sicherstellen, nicht über den Punkt E hinauszukommen, also mit steigender Höhe der Ladungsimpulse keine zu stark sinkende Plasmaspannung an den Elektroden zu messen.

[0048] Dieser Nachteil wird erfindungsgemäß dadurch beseitigt, dass in jenem Betriebsmodus, in dem der Filter im Regelbereich der optimalen Townsendentladung arbeiten soll, zwischen den Ladungsimpulsen das elektrische Feld der Plasmaentladung, das hierin in funktionaler Hinsicht mit der Entladungsspannung gleichgesetzt wird, und vorzugsweise auch der Entladungsstrom durch den Wabenkörper gemessen und zur Einstellung der Townsendentladung verwendet wird. Das elektrische Feld der Plasmaentladung und die Entladungsspannung können deshalb in funktionaler Hinsicht gleichgesetzt werden, da sich das elektrische Feld der Plasmaentladung bei vorgegebenem Elektrodenabstand streng proportional zur Entladungsspannung verhält.

[0049] Insbesondere ist es vorteilhaft, wenn die Höhe der Hochspannungsimpulse fortwährend und rasch in einem kleinen Spannungsbereich dann verändert wird, wenn der Filter im Regelbereich der optimalen Townsendentladung arbeiten soll, und bei dieser raschen Veränderung der Hochspannungsimpulse zwischen den Hochspannungsimpulsen die Entladungsspannung, vorzugsweise die Spannung an den Elektroden des Wabenkörpers, und/oder der Entladungsstrom durch den Wabenkörper gemessen und zur Einstellung der optimalen Townsendentladung verwendet wird. Vorzugsweise wird diese optimale Entladungsspannung auch zur Einstellung des oberen Endpunktes der Regelung im Bereich des Regelprinzips a), wo die Abscheidespannung proportional zur Geschwindigkeit des Gases in den Kanälen des Wabenkörpers geregelt wird, verwendet.

[0050] Des weiteren kann eine Regelung der Gasentladung dadurch vorgenommen werden, indem der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht wird, falls die zuletzt gemessene Entladungsspannung um weniger als 40%, vorzugsweise um weniger als 30%, unterhalb des Maximalwerts des vorangegangenen Spannungsimpulses liegt, und der Maximalwert eines Spannungsimpulses verringert wird, falls die zuletzt gemessene Entladungsspannung um mehr als 60%, vorzugsweise um mehr als 80%, unterhalb des Maximalwerts des vorangegangenen Spannungsimpulses liegt.

[0051] Aus Gründen des Energiebedarfs aus dem Bordnetz ist die Nachladung des Wabenkör-

pers durch Hochspannungsimpulse nur notwendig, wenn die Spannung an den Elektroden zwischen zwei Hochspannungsimpulsen deutlich abfällt. Daher kann eine Regelung der Impulsfrequenz so durchgeführt werden, dass die Entladungsspannung zwischen zwei Spannungsimpulsen zweimal gemessen wird, und die Frequenz der Spannungsimpulse proportional zur Differenz der beiden gemessenen Entladungsspannungen erhöht wird. Damit erhält man für einen starken Spannungsabfall eine hohe Wiederholfrequenz, die eben für eine rasche Nachladung sorgt, für einen geringen Spannungsabfall eine niedrige Wiederholfrequenz, die erst nach geraumer Zeit für eine Nachladung des Wabenkörpers sorgt.

[0052] Hierbei hat sich als besonders günstig herausgestellt, wenn die Zeitpunkte der Messungen für die erste Messung zwischen 5 µs und 25 µs nach dem vorangegangenen Spannungsimpuls liegen, und die Zeitpunkte der Messungen für die zweite Messung zwischen 25 µs und 50 µs nach dem vorangegangenen Spannungsimpuls liegen.

[0053] Des Weiteren kann das Verfahren der Regelung so durchgeführt werden, dass die Frequenz F der Spannungsimpulse proportional der Differenz $(U_1 - U_2)$ der beiden gemessenen Entladungsspannungen U_1, U_2 multipliziert mit einer ersten vorgegebenen Konstanten K_1 und vermehrt um eine zweite vorgegebene Konstante K_2 eingestellt wird, also

$$F = (U_1 - U_2) .K_1 + K_2$$

[0054] Vorzugsweise können die Werte der Konstanten für diesen algebraischen Ausdruck für K_1 zwischen 5 und 25 gefunden werden, und der Wert der zweiten vorgegebenen Konstanten K_2 zwischen 5.000 und 50.000.

[0055] Die Unterscheidung zwischen den beiden Regelprinzipien a) und b), also die Regelung der Spannung der Plasmaentladung proportional zur Gasgeschwindigkeit im keramischen Wabenkörper, oder im Bereich der optimalen Townsendentladung kann durch eine regelmäßige Abfrage der Gasgeschwindigkeit V_i in den Kanälen 5 des Keramikkörpers 7, oder eine zu dieser relevanten Größe, etwa Gaspedalstellung oder Einspritzmenge, vorzugsweise alle 200 ms bis zu 2 Sekunden erfolgen. Gilt die Ungleichung

$$V_{i+1} \geq V_i$$

[0056] so ist der Verbrennungsmotor im Arbeitsregime, die Russproduktion ist hoch und die Regelung der Spannungsimpulse, die in diesem Betriebsmodus als Abscheidespannung U_{Ai} bezeichnet wird, erfolgt proportional zu der Gasgeschwindigkeit, also

$$U_{Ai} \approx V_i.$$

[0057] Gilt hingegen die Ungleichung

$$V_{i+1} < V_i$$

[0058] so arbeitet der Motor im Schubbetrieb oder in seiner Nähe, die Russproduktion ist klein oder nicht vorhanden, und die für die Regeneration des Filters optimale Townsendregelung wird eingeschaltet.

[0059] Im Folgenden wird auf die Fig. 4 Bezug genommen. Die Fig. 4 beschreibt das Auffinden der höchsten Entladungsspannung U_i durch die Veränderung des Maximalwerts V_i der Spannungsimpulse, die im Folgenden auch als Ladungsimpulses bezeichnet werden, in kleinen Schritten in jene Richtung, in der die Entladungsspannung zunimmt. Dieses Verfahren wird so ausgeführt, dass der Wert des Ladeimpulses mit der Höhe V_i ebenso gespeichert wird, wie die danach gemessene Höhe U_i der Entladungsspannung. Danach erhöht man den Ladeimpuls um einen kleinen Schritt $V_{i+1} = V_i + \Delta V$, fragt die dem neuen Ladeimpuls folgende Entladungsspannung U_{i+1} ab und vergleicht sie mit der alten, gespeicherten Entladungsspannung U_i. Ist die neue Entladungsspannung größer als die alte, wird der Prozess fortgesetzt, indem die Indizes n+1 wieder gleich n gesetzt werden (obere Regelschleife in Fig.4). Ist dagegen die neue Entladungsspannung kleiner als die alte, wird die alte Höhe V_{i+1} der Ladespannung um einen kleinen Schritt verkleinert: $V_{i+1} = V_i - \Delta V$. Danach wird mit der neu gemessenen Entladungsspannung U_{i+1} erneut verglichen: ist sie noch immer kleiner, als die alte Entladungsspannung wird der

Prozess (untere Regelschleife in Fig.4) fortgesetzt, bis sie wieder größer ist, als die vorhergehende: danach wird die Ladespannung wieder erhöht (obere Regelschleife in Fig.4).

[0060] Die Fig.4a beschreibt die entsprechende Regelung bei hoher Regenerationsrate im Filter. In diesem Fall kann sich der Teil der Strom-Spannungskennlinie zwischen den Punkten D und E in Fig. 3 durch den stark erhöhten Quantenfluss und einer entsprechend hohen Bildungsrate von Photoelektronen bereits geringfügig absenken, ohne in den Bereich der selbständigen Entladung zu kommen. In diesem Fall kann es im Rahmen der Erfindung dennoch von Vorteil sein, die Regelung der Entladungsspannung in jene Richtung vorzunehmen, wo die Spannung zwar geringfügig, aber nicht drastisch abnimmt. Dies wird durch das Regelschema in Fig. 4a beschrieben: Ist im Regelkreis die neue Entladungsspannung nur geringfügig kleiner als die alte, wird die alte Höhe V_{i+1} der Ladespannung noch nicht verkleinert: $V_{i+1} = V_i + \Delta V$ (obere Regelschleife in Fig. 4a). Danach wird mit der neu gemessenen Entladungsspannung U_{i+1} erneut verglichen: ist sie nur geringfügig kleiner, als die alte Entladungsspannung wird der Prozess fortgesetzt. Ist sie dagegen deutlich kleiner, also etwa

$$U_{i+1} + \Delta U < U_i$$

[0061] so wird wieder der Maximalwert der Spannungsimpulse verkleinert: $V_{i+1} = V_i - \Delta V$ (untere Regelschleife in Fig. 4a), bis der der alte geringfügig kleinere Wert der Entladungsspannung wieder erreicht ist. Bei einer Kanalhöhe h von 1 mm ist ΔU ein Wert im Bereich zwischen 10 Volt pro Kanal 5 und 100 Volt pro Kanal 5, vorzugsweise zwischen 20 Volt pro Kanal 5 und 50 Volt pro Kanal 5; bei einer Kanalhöhe h von 0,6 mm ist ΔU ein Wert im Bereich zwischen 6 Volt pro Kanal 5 und 60 Volt pro Kanal 5, vorzugsweise zwischen 12 Volt pro Kanal 5 und 30 Volt pro Kanal 5.

[0062] Die Fig. 5 beschreibt das Anfahren bei kaltem Motor durch Beobachtung des Plasmastroms bei schrittweiser Vergrößerung der Höhe des Maximalwerts des Ladeimpulses $V_{i+1} = V_i + \Delta V$. Falls die Messung des Plasmastroms, der zwischen der Keramik und Masse gemessen werden muss, aus fertigungstechnischen und kommerziellen Gründen nicht möglich ist, bietet sich in sehr vorteilhafter Weise der Ladestrom an, da er an der ohnehin isolierten Hochspannungsseite - etwa mit einem Optokoppler -gemessen wird. Der Ladestrom ist in erster Näherung dem Plasmastrom proportional, genauer: das Integral des Ladestroms über einen Ladeimpuls ist dem Integral des Plasmastroms vermehrt um den Eintrag des negativ aufgeladenen und abgeschiedenen Aerosols proportional. In weiterer Folge wird somit der Plasmastrom mit dem Ladestrom I_i gleichgesetzt.

[0063] Im Prozessor sind jene Werte gespeichert, die der Ladestrom I_i bei vorgegebenen Werten der Ladeimpulse V_i maximal erreichen darf. Bleibt der nach dem Ladeimpuls V_{i+1} gemessene Ladestrom I_{i+1} unterhalb eines, im Prozessor gespeicherten und zu V_{i+1} gehörenden Wertes $I_i + \Delta I$, so wird der Regelprozess fortgesetzt (obere Regelschleife der Fig. 5). Übersteigt der gemessene Ladestrom I_{i+1} den vorgegebenen Wert $I_i + \Delta I$, so wird die Höhe des Ladeimpulses wieder schrittweise verringert: $V_{i+1} = V_i - \Delta V$. Bleibt der nach dem Ladeimpuls V_{i+1} gemessene Ladestrom I_{i+1} über dem im Prozessor gespeicherten und zu V_{i+1} gehörenden Wert $I_i + \Delta I$, so wird dieser zweite Regelprozess fortgesetzt (untere Regelschleife der Fig. 5).

[0064] Durch die näherungsweise Gleichsetzung des Plasmastroms mit dem Ladestrom wird noch ein weiterer Vorteil erzielt: Bei Kurzschlüssen oder Funken innerhalb des Ladevorganges steigt der Ladestrom unmittelbar und so deutlich an, dass die Spannung des Ladeimpulses mit einem zweiten und wesentlich größeren Spannungsinkrement zurückgefahren werden kann.

[0065] Diese Regelung wird in der Fig. 6 wiedergegeben. Es wird hierbei im Entscheidungsintervall unterschieden zwischen der Ungleichung

$$I_{i+1} > I_i + \Delta I$$

[0066] und der doppelten Ungleichung:

$$I_{i+1} > I_{i2} + \Delta I_2 > I_{i1} + \Delta I_1,$$

[0067] die im Diagramm mit den Abfragen

$$I_{i+1} > I_{i1} + \Delta I_1$$

[0068] und

$$I_{i+1} > I_{i2} + \Delta I_2$$

[0069] aufgelöst wird, wobei bei der Bejahung der zweiten Ungleichung gleich der n-fache Wert $n.\Delta V$ von V_i subtrahiert wird. Dabei kann n vorzugsweise durch Zahlen von 5 bis 10 dargestellt werden. In absoluten Spannungswerten wird diese Regelung so vorgenommen, dass bei einer beispielhaften Ladespannung von 6 kV das Inkrement ΔI etwa 10 V betragen kann. In diesem Fall kann die Spannung bei einer Ladefrequenz von 10 kHz in 10 ms um 1 kV abgefahren werden. Für n = 10 wird die Spannung in 1 ms bereits um 1 kV abgeregelt, und somit schnell genug, um jede Funkenstrecke zu unterbrechen.

[0070] Die Fig. 7 zeigt schließlich das Regeldiagramm zur Unterscheidung zwischen

[0071] -) der Regelung der Spannung der Plasmaentladung proportional zur Gasgeschwindigkeit im keramischen Wabenkörper, und

[0072] -) der Regelung der Spannung der Plasmaentladung im Bereich der optimalen Townsendentladung.

[0073] Ist die Ungleichung zweier Gasgeschwindigkeiten, die im Abstand Δt gemessen werden

$$v_{i+1} \geq v_i$$

[0074] erfüllt, so befindet sich der Motor im Arbeitsregime, und die Impulsspannung muss proportional zur Strömungsgeschwindigkeit v des Abgasstromes geregelt werden. Falls die Ungleichung nicht erfüllt ist, arbeitet der Motor im Schubbetrieb, und es wird wenig oder kein Russ produziert und die Townsend-Regelung kann eingeschaltet werden, die eine optimale Regeneration des Filters garantiert. Diese Regelung zur Unterscheidung der beiden Regelregime wird mit dem Abstandsintervall Δt zwischen 100 ms und 5 s, vorzugsweise mit dem Abstandsintervall Δt zwischen 200 ms und 2 s, durchgeführt.

[0075] In der Praxis tritt folgender, diese Überlegungen störender Umstand ein: Bei steigender Temperatur tritt neben dem durch die elektrische Entladung verursachten Plasmastrom ein ohmscher Querstrom durch den gesamten Wabenkörper auf, der bei höheren Temperaturen den Plasmastrom leicht übertreffen kann. Deshalb kann es sinnvoll sein, in die gespeicherten Wertepaare (V_i, I_i), oder vorzugsweise auch in die erlaubten Steigerungswerte des Plasmastroms ΔI, die Temperaturabhängigkeit hinzuzunehmen.

[0076] Die durch einen Prozessor kontrollierte Messung erlaubt aber auch, den störenden Ohmschen Strom direkt zu kompensieren. Werden die bei zwei verschieden hohen Impulsspannungen gemessenen effektiven Gesamtwiderstände des Wabenkörpers bei Temperaturen über 200°C verglichen, so liefern unterschiedliche Spannungen durch die unselbständige Entladung auch unterschiedliche Widerstandswerte, und nicht immer den gleichen effektiven elektrischen Widerstand, wie dies das Ohmsche Gesetz ohne Plasmaentladung fordern würde. Der Grund liegt in dem sich ab etwa 150°C bis 200°C entwickelnden Elektronenplasma, das zum Ohmschen Strom in der Keramik einen parallel verlaufenden Plasmastrom in den Kanälen erzeugt.

[0077] In Abhängigkeit von zwei verschiedenen Plasmaspannungen U_1 und U_2, die der Prozessor durch unterschiedlich hohe Ladungsimpulse an einem Wabenkörper der Stärke d wählt, wobei U_1 so niedrig eingestellt wird, wie für die Messung möglich ist, also etwa 0,5 kV/cm bis 1 kV/cm, und U_2 etwa bei 2 kV/cm bis 4 kV/cm, erhält man durch die Messung der zugehörenden Ströme unterschiedliche Widerstandswerte $U_1/i_1 = R_1$ und $U_2/i_2 = R_2$.

[0078] Der Grund dafür ist ein bei höherer Spannung zunehmender Plasmastrom i_p, der mit folgender Überlegung ermittelt werden kann: $i_2 = U_2/R_2$ ist ein komplexer Strom, der sich aus dem Ohmschen Strom bei der höheren Spannung U_2 mit dem Ohmschen Widerstand R_1 und dem bei der höheren Spannung auftretenden Plasmastrom i_p zusammensetzt, also

$$i_2 = U_2/R_2 = U_2/R_1 + i_P$$

[0079] Damit kann aus der letzten Gleichung für den Plasmastrom i_p bei der Spannung U_2 ermittelt werden:

$$i_P\,(U_2) = U_2/R_2 - U_2/R_1$$

[0080] Werden diese Messungen für mehrere Spannungen durchgeführt, so kann die Entwicklung des Plasmastroms als Funktion der Spannung ermittelt werden, d.h. die Kennlinie der Entladung. Etwas allgemeiner kann die am Substrat anliegende Feldstärke U/d ermittelt werden als:

$$i_P = f(U) = g(U/d)$$

[0081] Für die Messung des Plasmastroms als auch des Ladestroms (Impulsstroms) kann es besonders zweckmäßig sein, die Messung des Stromes an der Hochspannungsseite mit Hilfe eines Optokopplers durchzuführen, dessen isolierender optischer Lichtleiter mindestens 15 mm lang, vorzugsweise mindestens 7 mm lang ist. Wurde ein Plasmastrom gemessen, so kann ermittelt werden, bei welchem Plasmastrom sich die höchste Plasmaspannung ausbildet. Dazu kann die Spannung in einem Bereich gewählt werden, der bereits einen Plasmastrom anzeigt, um auf diese Weise im Messwert i_M neben dem ohmschen Strom U/R_0 bereits den Plasmastrom i_P aufzufinden:

$$i_M = U_M/R_0 + i_p$$

[0082] In weiterer Folge kann die Spannung in der Summe aller Gasräume U_G abgeschätzt werden, die sich von der Mess-Spannung U_M um den Spannungsabfall in der Keramik unterscheidet. Der Plasmastrom muss ebenfalls die Keramik durchdringen, aber nicht über die Mäander der Ziegelmauerstruktur, in der der Keramikkörper 7 in der Regel gefertigt ist, wie der ohmsche Strom, sondern nur durch die Zwischenwände der Kanäle 5. Daher hat der Plasmastrom z.B. bei n übereinander liegenden Kanälen 5 einen um etwa den Faktor n geringeren Widerstand zu überwinden, also $i_P.R_1/n$. Die reine Plasmaspannung U_G über alle Gasräume kann somit berechnet werden über

$$U_G = U_M - i_p.R_p/n$$

[0083] Schließlich kann noch der Raumladungseffekt abgeschätzt werden, der das Feld in der Nähe des mit Russ bedeckten Substrates reduziert. Da die Raumladung proportional mit der Konzentration an Russpartikel wächst, kann näherungsweise eine maximal mögliche Reduktion der Plasmaspannung wie in der Keramik angesetzt werden:

$$U_G \approx U_M - i_p.R_P/n - \quad i_P.R_p/n$$

[0084] also

$$U_G \approx U_M - 2i_p.R_P/n$$

[0085] In weiterer Folge müssen die Parameter für eine maximale Spannung und nicht für den maximalen Plasmastrom ermittelt werden, da nur eine maximale Spannung entsprechend heiße Elektronen für das Zünden des Rußes garantiert. Diese Größen lassen sich näherungsweise mit einem einfachen Rechenprogramm im Prozessor ermitteln und erlauben dadurch bei jeder Betriebstemperatur und jeder Sauerstoffkonzentration das Auffinden des optimalen Arbeitspunktes für die Plasmaentladung.

[0086] Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahren kann somit bei einem plasmaregenerierten Dieselfilter mit offenen oder geschlossenen keramischen Wabenkörpern, die mit unipolaren Hochspannungsimpulsen betrieben werden, eine verbesserte Regelung hinsichtlich eines zuverlässigen Abbrandes des abgeschiedenen Rußes erzielt, und eine optimale Regeneration des Filters sichergestellt werden. Durch die Regeneration des Filters mit einer unselbständigen elektrischen Entladung, wie sie im Bereich der Townsend-Entladung stattfindet, kann des Weiteren die Regenerationstemperatur des Filters um rund 200°C gesenkt werden, ohne einen teuren Katalysator oder eine kostspielige Siliziumkarbid-Keramik verwenden zu müssen.

Patentansprüche

1. Verfahren für den Betrieb einer Filteranordnung zum Abscheiden von Russpartikel aus dem Abgasstrom eines Dieselmotors, bei dem der Abgasstrom durch in Längsrichtung eines Keramikkörpers (7) verlaufende Kanäle (5) des Keramikkörpers (7) mit der Strömungsgeschwindigkeit (v) hindurchgeleitet wird, und an parallel zu den Kanälen (5) verlaufenden Elektroden (1,2) Spannungsimpulse an den Keramikkörper (7) zur Erzeugung eines elektrischen Abscheidefeldes (E) in den Kanälen (5) des Keramikkörpers (7), das jeweils quer zur Achse der Kanäle (5) orientiert ist, angelegt wird, wobei in einem ersten Betriebsmodus konstanter oder zunehmender Strömungsgeschwindigkeit (v) zur vorwiegenden Abscheidung der Russpartikel in den Kanälen (5) eine Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit (v) vorgenommen wird, **dadurch gekennzeichnet,** dass in einem zweiten Betriebsmodus abnehmender Strömungsgeschwindigkeit (v) zum vorwiegenden Abbrand des abgeschiedenen Rußes eine Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Entladungsspannung an den Elektroden (1,2), die zumindest einmal zwischen zwei Spannungsimpulsen gemessen wird, vorgenommen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet,** dass der Ladestrom zwischen den Elektroden (1,2) während eines Spannungsimpulses gemessen wird, und im zweiten Betriebsmodus die Regelung anhand der Strom-Spannungskennlinie der Gasentladungen innerhalb der Kanäle (5) vorgenommen wird, wobei die Regelung eine Townsend-Entladung in den Kanälen (5) sicherstellt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet,** dass im zweiten Betriebsmodus der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht wird, falls die zuletzt gemessene Entladungsspannung um weniger als 40%, vorzugsweise um weniger als 30%, unterhalb des Maximalwerts des vorangegangenen Spannungsimpulses liegt, und der Maximalwert eines Spannungsimpulses verringert wird, falls die zuletzt gemessene Entladungsspannung um mehr als 60%, vorzugsweise um mehr als 80%, unterhalb des Maximalwerts des vorangegangenen Spannungsimpulses liegt.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet,** dass im zweiten Betriebsmodus der Maximalwert der Spannungsimpulse geringfügig variiert wird, und die Regelung der Spannungsimpulse in Abhängigkeit von der Veränderung der Entladungsspannung zwischen den Spannungsimpulsen vorgenommen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet,** dass der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht wird, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit ansteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen zugenommen haben, und der Maximalwert eines Spannungsimpulses verringert wird, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit ansteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen abgenommen haben.

6. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet,** dass der Maximalwert eines Spannungsimpulses verringert wird, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit absteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen zugenommen haben, und der Maximalwert eines Spannungsimpulses erhöht wird, falls die, jeweils zwei vorangegangenen Spannungsimpulsen mit absteigenden Maximalwerten folgenden Entladungsspannungen abgenommen haben.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Entladungsspannung zwischen zwei Spannungsimpulsen zweimal gemessen wird, und die Frequenz der Spannungsimpulse proportional zur Differenz der beiden gemessenen Entladungsspannungen erhöht wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Zeitpunkte der Messungen für die erste Messung zwischen 5 µs und 25 µs nach dem vorangegangenen Span-

nungsimpuls liegen, und die Zeitpunkte der Messungen für die zweite Messung zwischen 25 µs und 50 µs nach dem vorangegangenen Spannungsimpuls liegen.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet,** dass die Frequenz F der Spannungsimpulse proportional der Differenz (U_1 - U_2) der beiden gemessenen Entladungsspannungen (U_1, U_2) multipliziert mit einer ersten vorgegebenen Konstanten K_1 und vermehrt um eine zweite vorgegebene Konstante K_2 eingestellt wird, wobei der Wert der ersten vorgegebenen Konstanten K_1 zwischen 5 und 25 liegt, und der Wert der zweiten vorgegebenen Konstanten K_2 zwischen 5.000 und 50.000 liegt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 9, **dadurch gekennzeichnet,** dass der maximal erlaubte, obere Grenzwert für die Maximalwerte der Spannungsimpulse anhand jenes Punktes der Strom-Spannungskennlinie festgelegt wird, an dem die Steigungsänderung der Strom-Spannungskennlinie oberhalb eines vorgegebenen Wertes liegt.

Hierzu 7 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

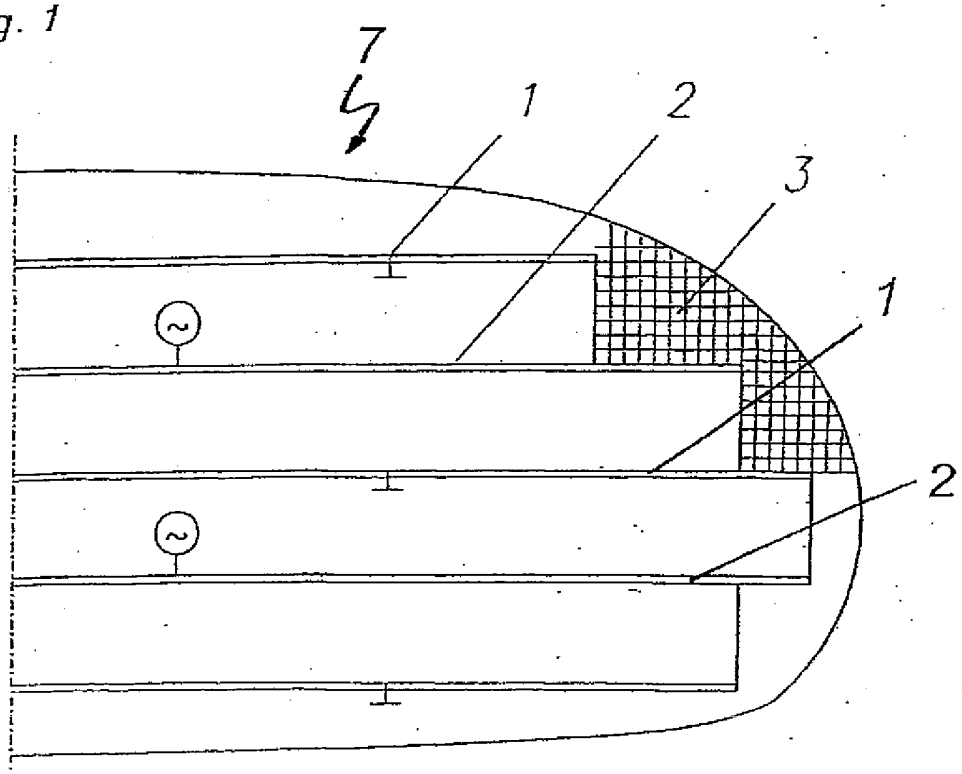


Fig. 2

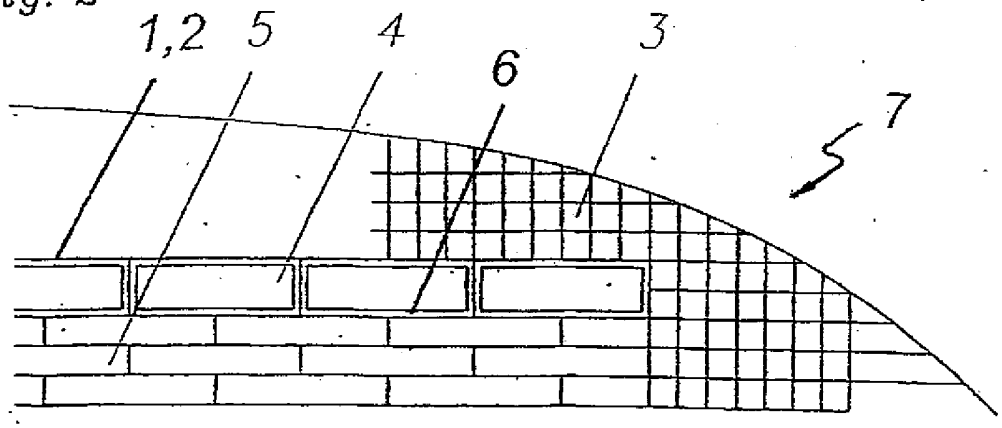


Fig. 3

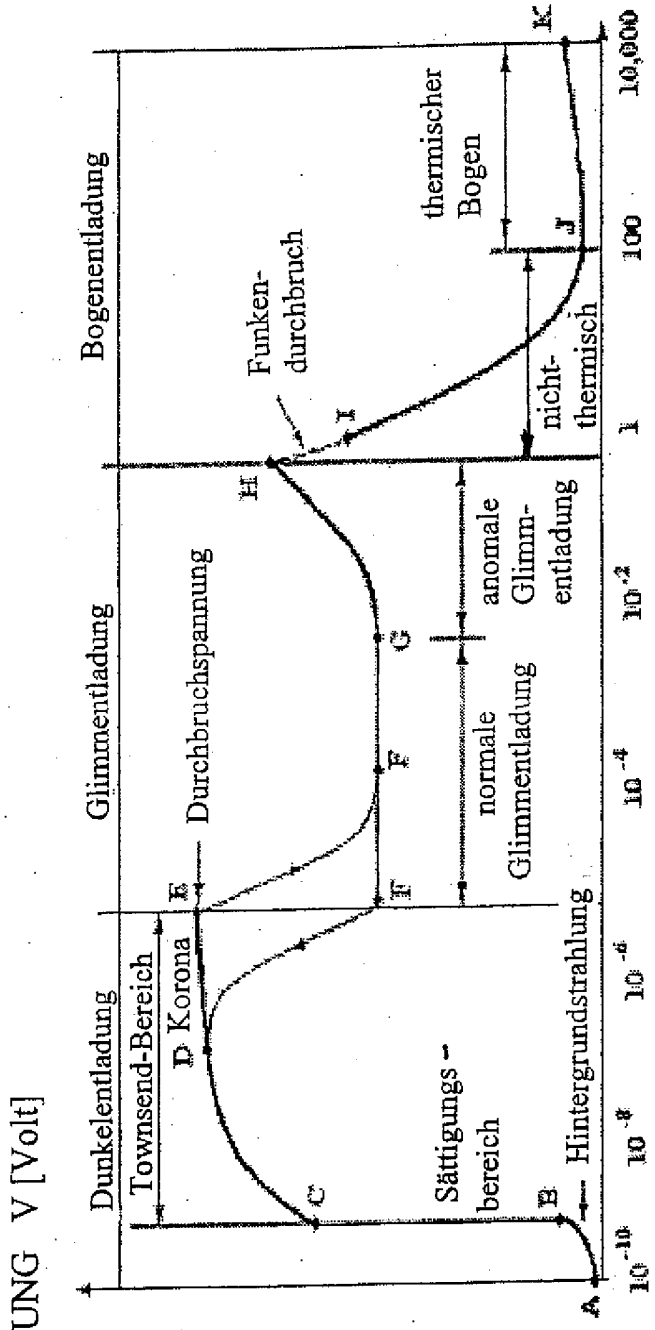

SPANNUNG V [Volt]
Dunkelentladung
Townsend-Bereich
Korona
Sättigungs-bereich
Hintergrundstrahlung
Glimmentladung
Durchbruchspannung
normale Glimmentladung
anomale Glimm-entladung
Bogenentladung
Funken-durchbruch
thermischer Bogen
nicht-thermisch
A
B
C
D
E
F
G
H
I
J
K
10^{-10}
10^{-8}
10^{-6}
10^{-4}
10^{-2}
1
100
10,000
STROM I [Ampere]

Fig. 4

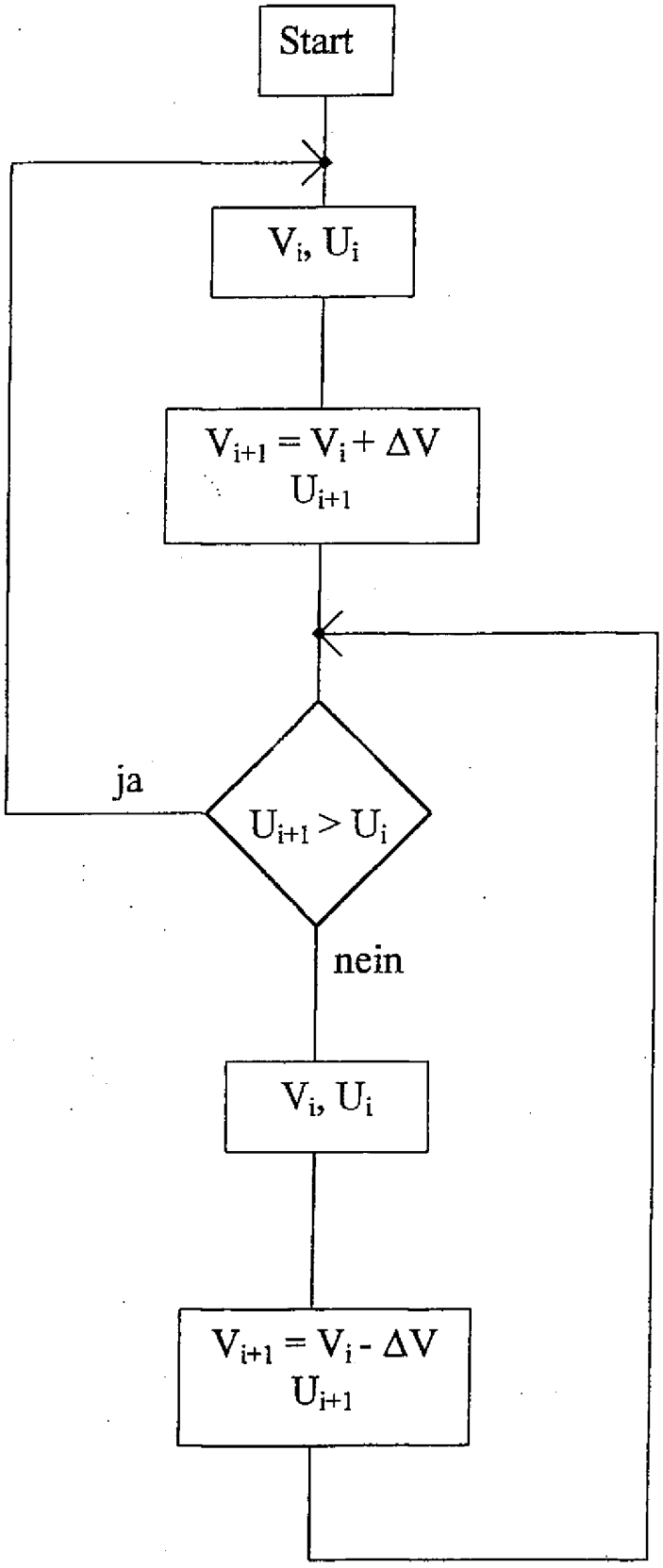

Start
V_i, U_i
$V_{i+1} = V_i + \Delta V$
U_{i+1}
ja
$U_{i+1} > U_i$
nein
V_i, U_i
$V_{i+1} = V_i - \Delta V$
U_{i+1}

Fig. 4a

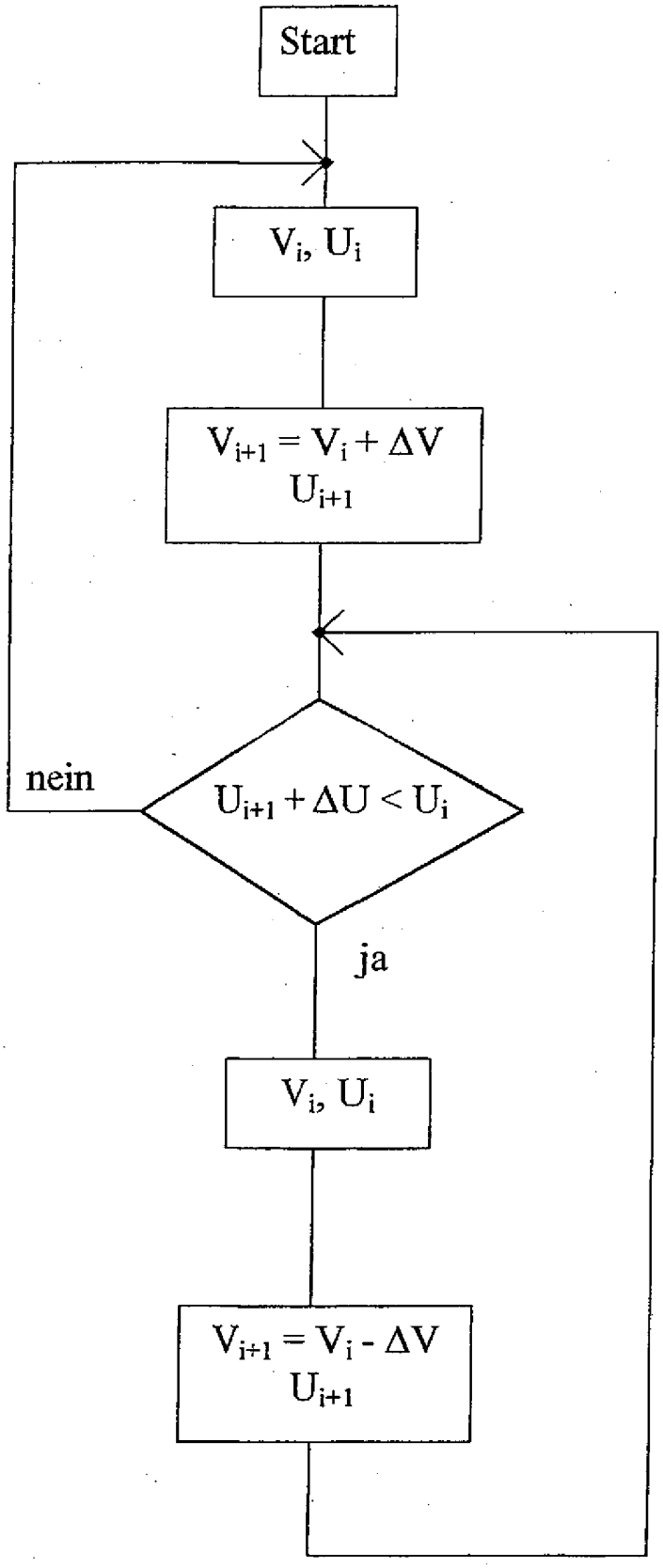

Start
V_i, U_i
$V_{i+1} = V_i + \Delta V$
U_{i+1}
nein
$U_{i+1} + \Delta U < U_i$
ja
V_i, U_i
$V_{i+1} = V_i - \Delta V$
U_{i+1}

Fig. 5

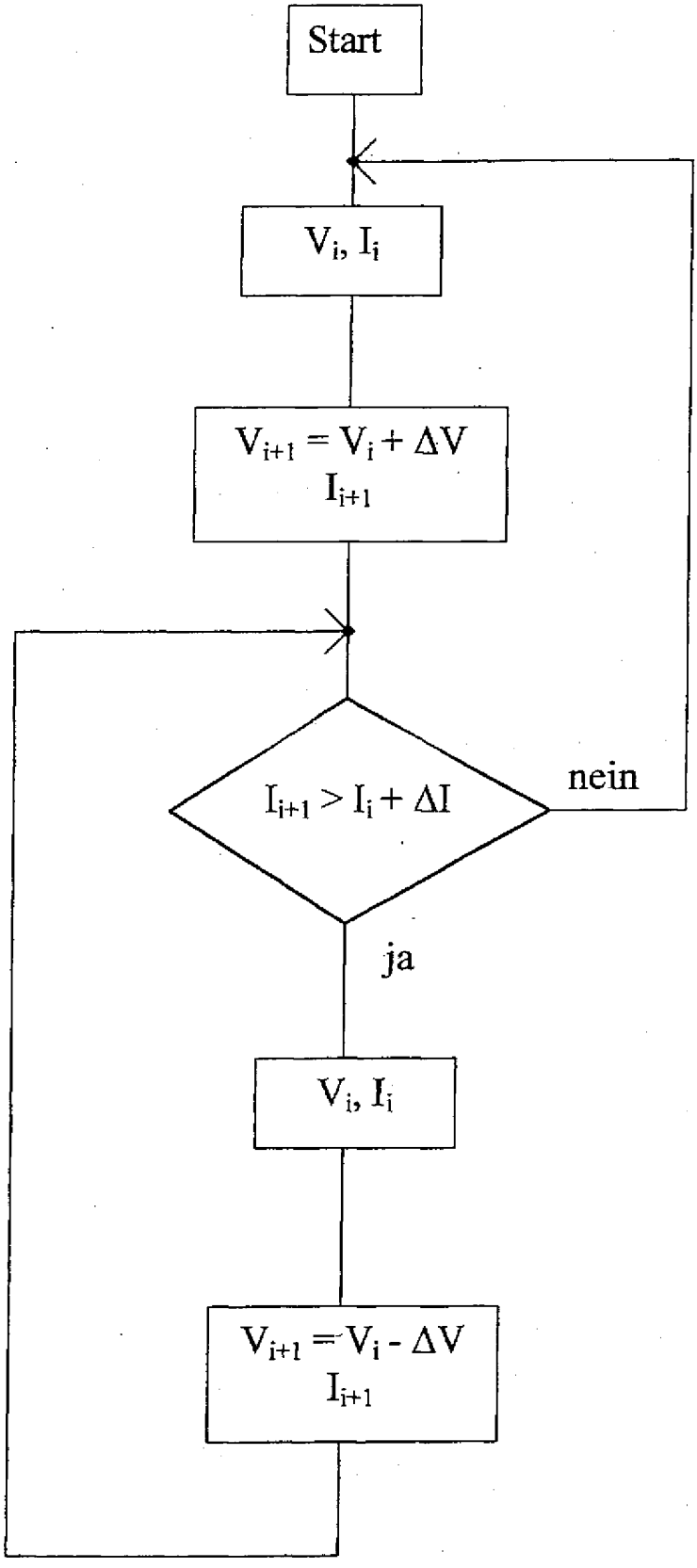

Start
V_i, I_i
$V_{i+1} = V_i + \Delta V$
I_{i+1}
$I_{i+1} > I_i + \Delta I$
nein
ja
V_i, I_i
$V_{i+1} = V_i - \Delta V$
I_{i+1}

Fig. 6

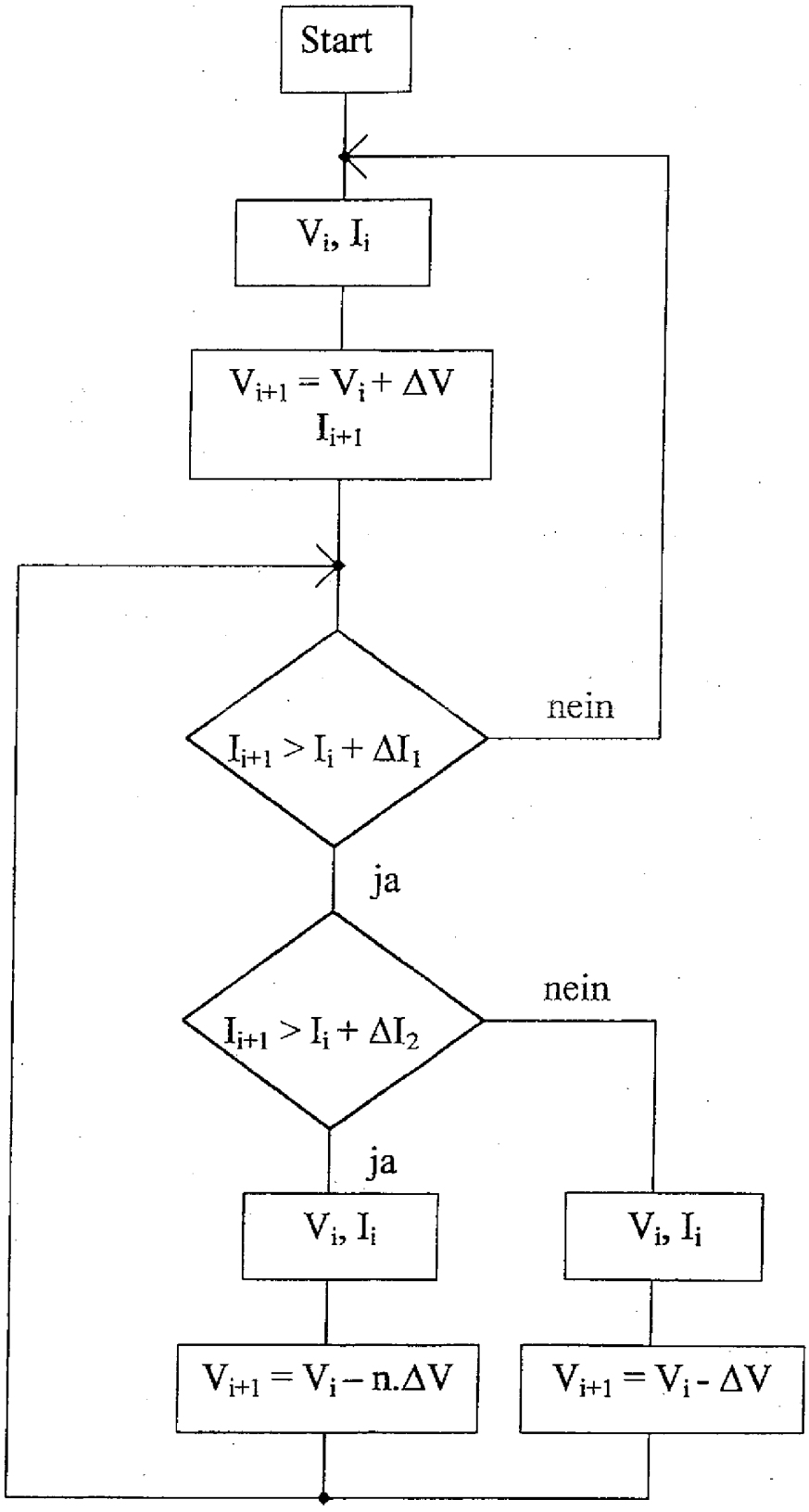
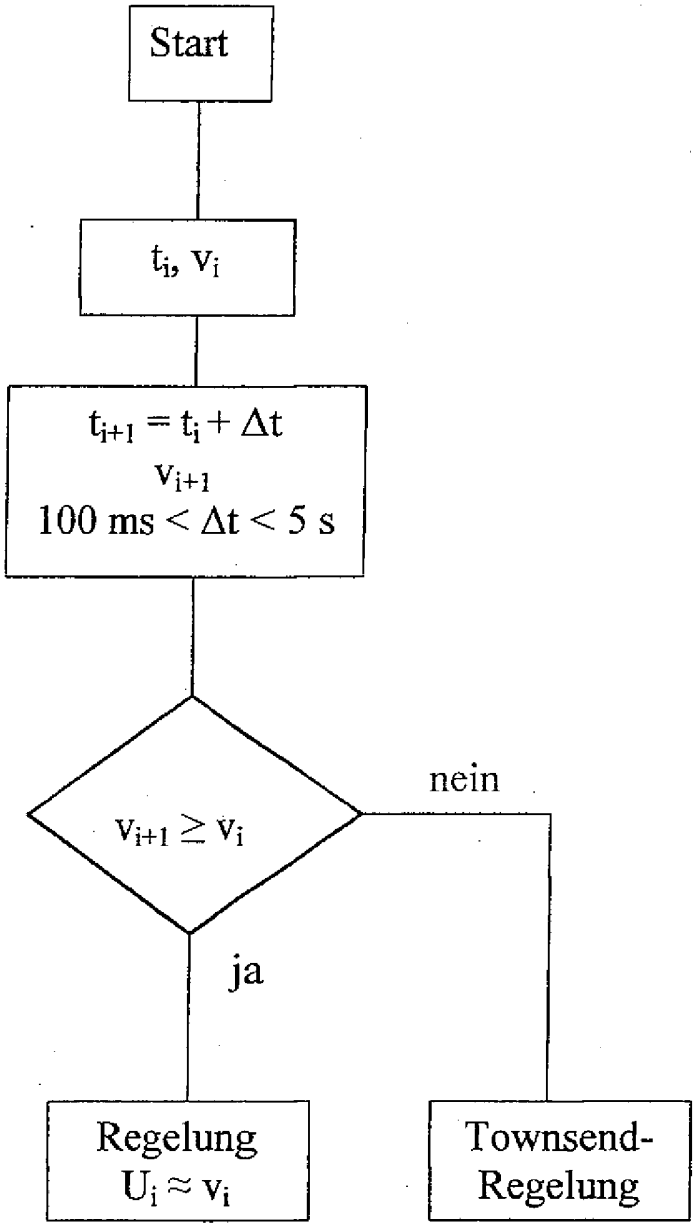

Start
V_i, I_i
$V_{i+1} = V_i + \Delta V$
I_{i+1}
$I_{i+1} > I_i + \Delta I_1$
nein
ja
$I_{i+1} > I_i + \Delta I_2$
nein
ja
V_i, I_i
V_i, I_i
$V_{i+1} = V_i - n.\Delta V$
$V_{i+1} = V_i - \Delta V$

Fig. 7


Start
t_i, v_i
$t_{i+1} = t_i + \Delta t$
v_{i+1}
100 ms < Δt < 5 s
$v_{i+1} \geq v_i$
nein
ja
Regelung
$U_i \approx v_i$
Townsend-
Regelung