



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
07.11.2001 Patentblatt 2001/45

(51) Int Cl.7: **H05B 6/64**

(21) Anmeldenummer: **01105940.9**

(22) Anmeldetag: **09.03.2001**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder:

- **Raether, Friedrich, Dr. Phys.
97204 Höchberg (DE)**
- **Baber, Jens, Dipl.-Ing.
97082 Würzburg (DE)**
- **Püschner, Peter-A., Dipl.-Ing.
28790 Schwanewede (DE)**

(30) Priorität: **03.05.2000 DE 10021528**

(71) Anmelder:

- **Püschner GmbH & Co. KG
28790 Schwanewede (DE)**
- **Fraunhofer-Gesellschaft zur
Förderung der angewandten Forschung e.V.
80636 München (DE)**

(74) Vertreter: **Eisenführ, Speiser & Partner
Martinistrasse 24
28195 Bremen (DE)**

(54) **Mikrowellenofen zum Aufheizen von Brenngut**

(57) Es wird ein Mikrowellenofen zum Aufheizen von Brenngut angegeben, der mindestens eine Mikrowellenquelle, einen Hohlraumresonator, eine Koppelvorrichtung zum Ein- und Auskoppeln eines Mikrowellenfeldes enthält. In vorgegebenem Abstand und Ausrichtung zu dem Brenngut ist mindestens ein Mikrowellen-Suszeptorelement angeordnet, welches sich unter

der Wirkung des Mikrowellenfeldes volumenmäßig aufheizt und Wärmeenergie an das Brenngut abstrahlt. Vorgesehen sind Stellmittel, welche auf die Mikrowellenquelle und/oder den Hohlraumresonator einwirken und an der Position des Brenngutes und an der Position des/der Suszeptorelemente ein starkes Mikrowellenfeld erzeugen.

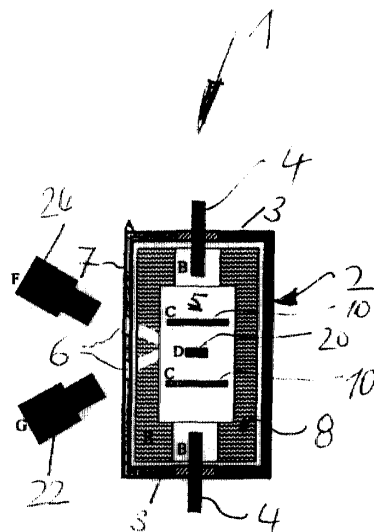


Fig. 7

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Mikrowellenofen zum Aufheizen von Brenngut, mit mindestens einer Mikrowellenquelle, einem Hohlraumresonator, einer Koppelvorrichtung zum Ein- und Auskoppeln eines Mikrowellenfeldes in den Hohlraumresonator.

[0002] Bei der Mikrowellenerwärmung wird im Unterschied zur konventionellen Ofenheizung die Wärmeenergie nicht an der Oberfläche eines Bauteils, sondern im Inneren eingeführt. Beim schnellen Aufheizen mit Aufheizraten von mehr als 200 k/min - wie es für viele technische Prozesse erforderlich ist - entstehen beim konventionellen Ofen große Temperaturgradienten zwischen der heißeren Bauteiloberfläche und dem kälteren Innenbereich. Bei der schnellen Mikrowellenerwärmung entstehen ebenfalls Temperaturgradienten -jedoch in umgekehrter Richtung.

[0003] Die Temperaturunterschiede betragen mehrere hundert Kelvin und führen zur Zerstörung der Bauteile aufgrund von Wärmespannungen. Durch verschiedene Maßnahmen wurde versucht, diese Temperaturgradienten zu beseitigen: So wurden zusätzliche Absorber für die Mikrowellenenergie - sogenannte Suszeptoren - in den Mikrowellenresonator eingebracht. Diese erwärmen sich zunächst selbst und geben dann Wärmeenergie an das Bauteil ab. Es werden auch für die Mikrowellen transparente Isolationen - sogenannte Caskets - eingesetzt, die das Brenngut einhüllen. Die Temperaturgradienten lassen sich mit den erwähnten Methoden verringern, jedoch ist eine präzise und schnelle Steuerung des Energieeintrags über die Bauteiloberfläche bzw. das Bauteilvolumen nicht möglich.

[0004] Zur Verringerung eines unerwünscht großen Temperaturgradienten bei der Erhitzung des Brennguts wurden bereits verschiedene Typen von Hybridöfen entwickelt. Bei ihnen erfolgt die Aufheizung mit Mikrowellenenergie und gleichzeitig mit anderen Heizverfahren: Z.B. durch Widerstandsheizung, Gasbefeuerung und Infrarotstrahlung. Die zusätzlichen Heizverfahren dienen zur kontrollierten Oberflächenheizung des Brennguts. Hierzu liegen zahlreiche Patentanmeldungen vor (vgl. z.B. DE 196 33 247 C2). Hybridöfen sind jedoch wegen der Kombination zweier Heiztechniken per se aufwendiger in der Herstellung, komplizierter in der Regelung und fehleranfälliger im Betrieb als reine Mikrowellenöfen.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, einen Mikrowellenofen der eingangs genannten Art derart weiterzubilden, dass auch bei einem sehr schnellen Aufheizen des Brenngutes unerwünscht große Temperaturgradienten zwischen dem Innenbereich des Brennguts und dessen Oberfläche vermieden werden.

[0006] Diese Aufgabe wird bei dem Mikrowellenofen der eingangs genannten Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass in vorgegebenem Abstand und Ausrichtung zu dem Brenngut mindestens ein Mikrowellen-Suszeptorelement angeordnet ist, welches sich unter der Wir-

kung des Mikrowellenfeldes volumenmäßig aufheizt und Wärmeenergie an das Brenngut abstrahlt, und dass auf die Mikrowellenquelle und/oder den Hohlraumresonator einwirkende Stellmittel vorgesehen sind, welche an der Position des Brenngutes und an der Position des/der Suszeptorelemente ein starkes Mikrowellenfeld erzeugen.

[0007] Die Vorteile der Erfindung liegen insbesondere darin, dass ein oder mehrere Mikrowellen-Suszeptorelemente in dem Hohlraumresonator vorgesehen sind, und dass der Hohlraumresonator während eines Betriebsintervalles mit einer ersten Mikrowellenmode angeregt wird, bei der an den Positionen der Suszeptorelemente ein starkes Mikrowellenfeld erzeugt wird, welches die Suszeptorelemente volumenmäßig aufheizt, die daraufhin ihre Wärmeenergie als Strahlungsenergie gegen das Brenngut abgeben und auf diese Weise das Brenngut an der Oberfläche erhitzt. In einem zweiten Betriebsintervall wird der Hohlraumresonator dann mit einer zweiten Mikrowellenmode erregt, die ihr Maximum im Bereich des Brenngutes hat, so dass dann das Brenngut volumenmäßig von dem Mikrowellenfeld erhitzt wird, während die von den Suszeptorelementen abgegebene Wärmestrahlung noch anhält und die Oberfläche des Brenngutes auf einer hohen Temperatur hält. Auf diese Weise wird der Temperaturgradient vom Innenbereich des Brennguts zu seiner Oberfläche hin reduziert. Durch schnelle aktive Stellelemente für das Mikrowellenfeld werden die Resonanzbedingungen so verändert, dass entweder an der Position des Brenngutes oder an der Position der Suszeptorelemente ein Feldstärkemaximum vorliegt. Durch die Steuerung der zeitlichen Dauer der beiden Betriebsintervalle sowie durch die Steuerung der während der beiden Betriebsintervalle vorliegenden Amplituden des Mikrowellenfeldes lässt sich der Energieeintrag über die Brenngut-Oberfläche bzw. in das Brenngut-Volumen so steuern, dass der Temperaturgradient zwischen dem heißeren Innenbereich und der kühleren Brenngut-Oberfläche in gewünschter Weise einstellt, so dass unerwünschte Wärmespannungen in dem Brenngut weitgehend vermieden werden können.

[0008] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung lassen sich die beiden Betriebsintervalle, die Suszeptorelemente bzw. das Brenngut durch ein Mikrowellenfeld, d.h. durch zwei verschiedene Mikrowellenmoden aufgeheizt werden, auch zeitlich überlagern, so dass gleichzeitig die beiden Mikrowellenmoden im Hohlraumresonator erregt werden.

[0009] Ähnlich wie im Fall eines zeitlichen Wechsels bei einer einzigen Frequenz muss dann für den einen Mikrowellentyp ein Feldstärkemaximum an der Position des Brennguts und für den anderen ein Maximum an der Position der Suszeptorelemente vorhanden sein. Die Intensität der beiden Mikrowellentypen wird variiert.

[0010] Werden die Suszeptoren stärker erwärmt als das Brenngut, so dominiert im wesentlichen der Energieeintrag durch Oberflächenerwärmung. (Die Suszept-

toren sind in der Regel geometrisch so angeordnet, dass sie die Bauteiloberfläche/n gleichmäßig erwärmen.) Umgekehrt kann das Brenngut volumenmäßig stärker erwärmt werden als die Suszeptoren, so dass in erster Linie eine Volumenerwärmung stattfindet.

[0011] Die Temperaturen von Suszeptoren und Brenngut können z.B. mit Pyrometern überwacht werden. Überraschend wurde festgestellt, dass auf diese Weise eine sehr schnelle und präzise Kontrolle von Oberflächen- und Volumenheizung möglich ist. Da ausschließlich Mikrowellenenergie verwendet wird, lässt sich ein entsprechender Ofen im Vergleich zu komplizierten Hybridheiztechniken günstig realisieren. Im Unterschied zu Mikrowellenöfen, bei denen geschlossene Caskets eingesetzt werden, lässt sich der vorgeschlagene Ofen mit In-Situ-Messtechniken kombinieren. Auf diese Weise kann der Mikrowellenerwärmungsprozess ständig überwacht und präzise gesteuert werden.

[0012] Ein weiterer Vorteil der Erfindung besteht darin, dass auch eine Kombination mit einer externen Strahlungsheizung möglich ist - durch zusätzliche Fenster kann die Bauteiloberfläche mit Wärmeenergie beaufschlagt werden. Diese Fenster können auch dazu genutzt werden, einen schnellen Wechsel der Bauteile in einer Serienfertigung zu gewährleisten.

[0013] Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind durch die Merkmale der Unteransprüche gekennzeichnet.

[0014] Im folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Mikrowellenofens; und

Fig. 2 ein Blockschaltbild zum Betreiben des Mikrowellenofens gemäß Fig. 1.

[0015] Fig. 1 zeigt eine Prinzipdarstellung eines Mikrowellenofens 1, der zur schnellen Oberflächenerwärmung und Volumenerwärmung von Brenngut dient. Ein Hohlraumresonator 2 besitzt eine zylindrische Form und weist an seinen beiden Stirnseiten 3 je eine Koppereinrichtung 4 auf, welche zum Einkoppeln und Auskoppeln von Mikrowellenenergie dient. Der Hohlraumresonator 2 ist in seinem Innenraum an seiner inneren Oberfläche mit Isoliermaterial 8 ausgekleidet, um Wärmeverluste nach außen zu reduzieren. In dem freien Innenraum 5 des Hohlraumresonators ist - in der dargestellten Ausführungsform in einer zentralen Position - das Brenngut 20 angeordnet, in vorgegebenem Abstand vom Brenngut 20 sind Suszeptorelemente 10 positioniert, die in der dargestellten Ausführungsform als Scheiben ausgebildet sind. Die Umfangswand 7 des Hohlraumresonators 2 besitzt zwei Fenster 6, außerhalb der Fenster befindet sich ein Pyrometer 22 zur Messung der Temperatur eines Suszeptorelements 10, und ein zweites Pyrometer 24, welches auf das Brenngut 20 gerichtet ist und die

Temperatur des Brenngutes misst. Das Isoliermaterial 8 besitzt entsprechende Kanäle, um den Strahlengang der Pyrometer 22, 24 auf das Brenngut und die Suszeptorelemente 10 freizugeben.

[0016] Fig. 2 zeigt ein Blockschaltbild des Mikrowellenschaltkreises. Dieser besteht aus dem Hohlraumresonator 2, an dessen eine Stirnseite eine Koppereinrichtung 4 in den Hohlraumresonator 2 hineinragt. An die eine Koppereinrichtung 4 ist ein Phasenschieber 30 angeschlossen, der über eine variable Impedanz 32 mit der Mikrowellenquelle 34, beispielsweise einem Magnetron, verbunden ist. Auf der anderen Stirnseite des Hohlraumresonators 2 ist ebenfalls eine Koppereinrichtung 4 vorgesehen, die über einen Phasenschieber 30 an einer variablen Impedanz 32 liegt. Einer der Phasenschieber 30 ist elektronisch steuerbar ausgebildet. Der Resonator wird im E_{01n} -Modus betrieben, so dass das Mikrowellenfeld Zylindersymmetrie besitzt. Die Feldverteilung entlang der Zylinderachse kann mit Hilfe der Phasenschieber 30 innerhalb von wenigen hundert Millisekunden so verändert werden, dass entweder die beiden Suszeptorscheiben 10 oder das Brenngut 20 in einem Feldstärkemaximum liegen. Phasenschieber 30 und variable Impedanz 32 werden als Stellmittel bezeichnet und wirken in dem dargestellten Beispiel auf die Koppereinrichtung 4 des Hohlraumresonators 2 ein, um die Feldkonfiguration in der gewünschten Weise zu verändern. Alternativ können die Stellmittel auch direkt auf die Mikrowellenquelle und/oder auf die geometrische Konfiguration des Hohlraumresonators 2 oder auf andere Elemente einwirken, die im Hohlraumresonator 2 zum Zwecke der Feldkonfigurationsänderung vorgesehen sind.

[0017] Mit Hilfe der Pyrometer 22, 24 werden die entsprechenden Oberflächentemperaturen des Brennguts 20 und der Suszeptorelemente 10 erfasst. Die Betriebsintervalle, nahe derer die Suszeptorelemente 10 bzw. das Brenngut 20 aufgeheizt wird, werden zeitlich so gesteuert, dass stets die gewünschte Temperaturdifferenz zwischen den Suszeptorelementen 10 und dem Brenngut 20 aufrechterhalten wird.

[0018] Die Koppereinrichtungen 4 enthalten in den Hohlraumresonator 2 hineinragende Antennen, die bevorzugt innen hohl sind und in ihrem Hohlkanal die Zuführung oder Ableitung von Ofengas ermöglichen oder eine In-Situ-Messung von Eigenschaften des Brenngutes oder der Suszeptorelemente während der Mikrowellenerwärmung zulassen. Durch zusätzliche Fenster ist eine weitere Prozessüberwachung beispielsweise durch CCD-Kameras möglich.

Patentansprüche

1. Mikrowellenofen zum Aufheizen von Brenngut, mit mindestens einer Mikrowellenquelle, einem Hohlraumresonator, der eine Einkoppelvorrichtung zum Ein- und Auskoppeln eines Mikrowellenfeldes in

- den Hohlraumresonator enthält,
dadurch gekennzeichnet, dass in vorgegebenem Abstand und Ausrichtung zu dem Brenngut (20) mindestens ein Mikrowellen-Suszeptorelement (10) angeordnet ist, welches sich unter der Wirkung des Mikrowellenfeldes volumemäßig aufheizt und Wärmeenergie an das Brenngut (20) abstrahlt, und dass auf die Mikrowellenquelle (34) und/oder den Hohlraumresonator (2) einwirkende Stellmittel (30, 32) vorgesehen sind, welche an der Position des Brenngutes (20) und/oder an der Position des/der Suszeptorelemente (10) ein starkes Mikrowellenfeld erzeugen.
2. Mikrowellenofen nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass die Stellmittel (30, 32) auf die Einkoppelvorrichtung (4) einwirken, um an der Position des Brenngutes (20) und/oder an der Position mindestens eines Suszeptorelements (10) ein starkes Mikrowellenfeld zu erzeugen.
3. Mikrowellenofen nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass die Stellmittel (30, 32) auf die Einkoppelvorrichtung (4) des Mikrowellenfeldes entsprechend der mittels eines Pyrometers (22) der erfassten Temperatur des Brenngutes derart einwirken, dass an der Position eines Suszeptorelementes (10) ein Mikrowellenfeld vorherrscht, welches die gewünschte Temperatur an der Position des Brenngutes (20) erzeugt.
4. Mikrowellenofen nach Anspruch 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet, dass die Stellmittel gleichzeitig oder nacheinander an der Position des Brenngutes (20) an der Position des/der Suszeptorelemente(s) (10) ein Maximum des Mikrowellenfeldes erzeugen.
5. Mikrowellenofen nach Anspruch 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass die Stellmittel in dem Hohlraumresonator eine erste Mikrowellenmode, welche an der Position des/der Suszeptorelemente (10) ein Feldstärke-Maximum aufweist, und anschließend eine zweite Mikrowellenmode erzeugen, welche an der Position des Brenngutes (20) ein Feldstärke-Maximum aufweist.
6. Mikrowellenofen nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass die Stellmittel zwischen der Mikrowellenquelle (1) und der Einkoppelvorrichtung (4) einen Phasenschieber (30) und ggf. eine variable Impedanz (32) enthalten.
7. Mikrowellenofen nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass der Hohlraumresonator (2) eine Zylinderform besitzt und an seinen gegenüberliegenden Stirnseiten je eine Koppelvorrichtung (4) aufweist, dass eine Koppelvorrichtung (4) über einen Phasenschieber (30) und eine variable Impedanz (32) an der Mikrowellenquelle (1) liegt, und dass die andere Koppelvorrichtung (4) über einen Phasenschieber (30) mit einer variablen Impedanz (32) verbunden ist.
8. Mikrowellenofen nach Anspruch 6 oder 7,
dadurch gekennzeichnet, dass der Phasenschieber (30) elektrisch steuerbar ist.
9. Mikrowellenofen nach einem der vorstehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch ein erstes Pyrometer (22), welches **durch** ein Fenster (6) in der Wandung des Hohlraumresonators (2) die Temperatur des Brenngutes (20) misst.
10. Mikrowellenofen nach einem der vorstehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch ein zweites Pyrometer (24), welches **durch** ein Fenster (6) in der Wandung des Hohlraumresonators (2) die Temperatur eines Suszeptorelementes (10) misst.
11. Mikrowellenofen nach einem der vorstehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch eine Wärmeisolierung (8) an der inneren Oberfläche des Hohlraumresonators (2).
12. Mikrowellenofen nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass das Brenngut (20) in der Mitte des Hohlraumresonators (2) positioniert ist, und dass die Suszeptorelemente (10) als Scheiben ausgebildet sind, die in vorgegebenem Abstand vom Brenngut (20) positioniert sind.
13. Mikrowellenofen nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass ein zusätzliches Fenster in der Wandung des Hohlraumresonators (2) vorgesehen ist, und dass außerhalb des Hohlraumresonators (2) eine Strahlungsheizung angeordnet ist, welche das Brenngut (20) durch das Fenster hindurch mit Wärmeenergie beaufschlagt.

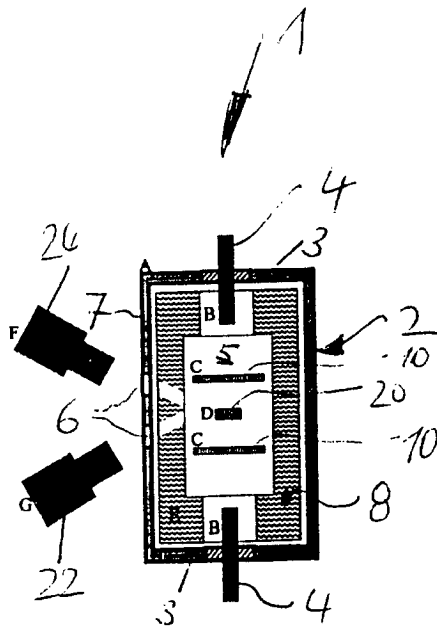


Fig. 7

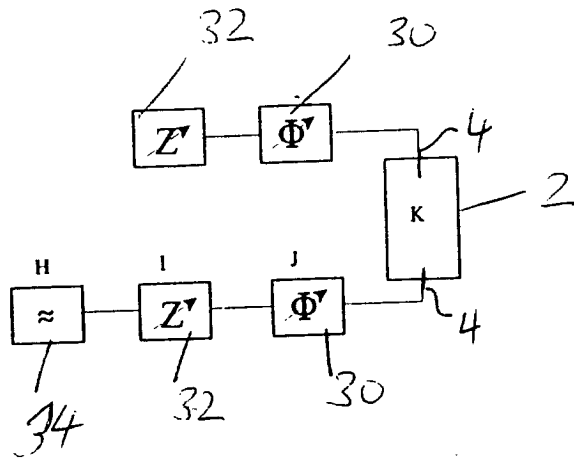


Fig. 2