



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 950 341 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
18.12.2002 Patentblatt 2002/51

(21) Anmeldenummer: **98904027.4**

(22) Anmeldetag: **02.01.1998**

(51) Int Cl.7: **H05B 6/80, F27D 23/00**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP98/00003

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 98/030068 (09.07.1998 Gazette 1998/27)

(54) **BRENNOFEN FÜR DIE HOCHTEMPERATURBEHANDLUNG VON MATERIALIEN MIT
NIEDRIGEM DIELEKTRISCHEM VERLUSTFAKTOR**

BAKING OVEN FOR THE HIGH-TEMPERATURE TREATMENT OF MATERIALS WITH A LOW
DIELECTRIC LOSS FACTOR

FOUR POUR LE TRAITEMENT A HAUTE TEMPERATURE DE MATERIAUX A FAIBLE FACTEUR
DE PERTE DIELECTRIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH DE FR GB IT LI NL SE

(30) Priorität: **04.01.1997 DE 19700141**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
20.10.1999 Patentblatt 1999/42

(73) Patentinhaber: **GERO Hochtemperaturöfen
GmbH
75242 Neuhausen (DE)**

(72) Erfinder:
• **BARTUSCH, Wolfgang
D-70839 Gerlingen (DE)**

• **MÜLLER, Günter
D-73635 Rudersberg (DE)**

(74) Vertreter: **Lutz, Johannes Dieter, Dr. et al
Patentanwälte Wolf & Lutz
Hauptmannsreute 93
70193 Stuttgart (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-A- 0 178 217 EP-A- 0 500 252
DE-A- 4 200 101 DE-C- 19 633 245**

EP 0 950 341 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Brennofen für die Hochtemperaturbehandlung von Materialien mit relativ niedrigem dielektrischem Verlustfaktor unter Erwärmung des Materials durch Absorption von Mikrowellenenergie in einem Hohlraumresonator und mit den weiteren, im Oberbegriff des Patentanspruchs 1 genannten gattungsbestimmenden Merkmalen.

[0002] Ein derartiger Brennofen ist durch die WO95/05058 PCT/GB94/01730 bekannt.

[0003] Der bekannte Brennofen hat in einer Gestaltung, in der er zum Sintern von keramischen Materialien in einem während des Sinterns ruhenden Stapel geeignet ist, einen quaderförmigen Hohlraumresonator, innerhalb dessen durch eine quaderförmig gestaltete Wärmedämm-Einrichtung der wiederum etwa quaderförmige Stapelraum abgegrenzt ist, der demjenigen Bereich innerhalb des Resonators entspricht, in dem von einer hinreichend homogenen Verteilung der elektrischen Feldstärke ausgegangen wird. Die Gleichmäßigkeit der elektrischen Feldstärke bzw. des Quadrats derselben ist Voraussetzung dafür, daß das Sintergut hinreichend "gleichmäßig" thermisch behandelbar ist. Um hierbei dem Effekt entgegenzuwirken, daß mit zunehmender Erwärmung des Sintergutes die Wärmeabstrahlung aus den randnahen Bereichen des Sinterstapels dazu führt, daß im Inneren desselben eine höhere Temperatur herrscht als in den genannten Randbereichen, ein Effekt, der für Mikrowellen-Brennöfen charakteristisch ist, ist eine Heizeinrichtung vorgesehen, die es erlaubt, die Randbereiche des Sinterstapels konventionell, z.B. mittels einer Widerstandsheizung zusätzlich zu erwärmen, um auf diese Weise ein ausgeglichenes Temperaturprofil innerhalb des Sinterstapels zu erzielen.

[0004] Der bekannte Brennofen ist zwar geeignet, in einem relativ kleinen Behandlungsbereich etwa gleiche thermische Verhältnisse im gesamten Behandlungsvolumen zu erreichen, ist jedoch mit dem Nachteil behaftet, daß die der Mikrowellenstrahlung ausgesetzte Wärmedämm-Einrichtung den überwiegenden Anteil der eingestrahnten Mikrowellenenergie absorbiert, was zwangsläufig zu einem hohen Verbrauch an Mikrowellenenergie führt, die nicht für die erwünschte thermische Behandlung des Sintergutes zur Verfügung steht. Dies ergibt sich daraus, daß in praktischen Fällen das Gesamtvolumen an Isolationsmaterial deutlich größer ist als das Volumen des Sintergutes. Der bekannte Brennofen ist daher als industriell nutzbarer Ofen nicht geeignet, da eine effiziente Ausnutzung der Mikrowellenenergie nicht gegeben ist, deren Erzeugung jedoch sehr viel kostenaufwendiger ist als die "konventionelle" Erwärmung mittels einer elektrischen Widerstandsheizung.

[0005] Zwar ist durch die WO95/05058 auch ein als Durchlaufofen ausgebildeter Brennofen bekannt, der als Tunnelofen mit Heizzonen unterschiedlicher Tempe-

ratur ausgebildet ist, durch den das Sintergut über Transportrollen hindurchbewegt wird, wobei die zusätzliche Heizung außerhalb des Behandlungsraumes angeordnet ist und die Wärmedämmung, die die Umgebung gegen den Hochtemperatur-Bereich isoliert, den Ofen außenseitig umschließt. Bei diesem Ofen handelt es sich jedoch um eine Anlage mit zwangsläufig ungenügender Feld-Homogenität, d.h. einer Ofengestaltung, die dann möglich ist, wenn relativ kleine Gegensände seriell gesintert werden, und es aufgrund des Hindurchbewegens durch inhomogene Bereiche nicht auf eine homogene Feldverteilung ankommt.

[0006] Der bekannte Tunnelofen ist zwar für Materialien mit hohen dielektrischen Verlusten geeignet, die Mikrowellenenergie stark absorbieren, nicht jedoch für eine Behandlung von Sintergut mit relativ schwachen dielektrischen Verlusten, die praktisch nur in nennenswerten Stückzahlen in einem Hohlraumresonator mit hoher Feldhomogenität behandelt werden können.

[0007] Der bekannte Röhrenofen wäre für Materialien mit niedrigem dielektrischem Verlustfaktor, die technisch jedoch von hohem Interesse sind, nicht geeignet.

[0008] Aufgabe der Erfindung ist es daher, einen Brennofen der eingangs genannten Art anzugeben, der eine Hochtemperaturbehandlung von Sintermaterial mit niedrigem dielektrischem Verlustfaktor in einem großen Behandlungsvolumen erlaubt, der aufgrund seiner Abmessungen als Industrieofen einsetzbar ist und dabei gleichwohl mit einem hohen Nutzungsgrad der Energie betreibbar ist. Des weiteren soll der Brennofen für Anwendungen innerhalb eines weiten Temperaturbereiches bis 1800°C geeignet sein.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die kennzeichnenden Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst.

[0010] Hierdurch erzielte funktionelle Eigenschaften und Vorteile des erfindungsgemäßen Brennofens sind zumindest die folgenden:

Durch die Einhaltung der Dimensionierungsrelationen gemäß Merkmal a) ergibt sich bezogen auf die äußeren Abmessungen des Resonators eine für ein großes Behandlungsvolumen, in dem bei gleichmäßiger Beladung mit dem Sintergut eine hohe Anzahl von Sinter-Objekten behandelt werden kann, geeignete Homogenität der Feldverteilung.

Durch die Verlagerung des Isoliermantels nach außen wird sichergestellt, daß der überwiegende Anteil der erzeugten Mikrowellenstrahlung auch zum jeweils gegebenen Behandlungszweck genutzt werden kann. Hierdurch ist ein wirtschaftlicher Betrieb des erfindungsgemäßen Brennofens als Industrieofen erst möglich.

Durch die Verwendung von Graphit oder Material auf Graphit basis als Wandungsmaterial für den Hohlraumresonator wird nicht nur der Temperatur-

bereich, innerhalb dessen eine Hochtemperaturbehandlung von Sintergut möglich ist, drastisch erhöht, sondern es wird auch, verglichen mit einem konventionell in Stahl-Bauweise erstellten Hohlraumresonator auch dessen Gewicht und damit die elektrische Heizleistung der Zusatzheizeinrichtung verringert, die für die Erzielung des erwünschten Temperaturprofils erforderlich ist. Auch dadurch wird die Wirtschaftlichkeit des Betriebs eines als Industrieofen ausgebildeten erfindungsgemäßen Brennofens erhöht.

[0011] In bevorzugter Gestaltung des Brennofens ist als Mikrowellen-Strahlungsquelle mindestens ein Magnetron vorgesehen, das um eine Mittenfrequenz innerhalb einer Bandbreite B , die durch die Beziehung $B = \Delta f/f$ gegeben ist, in der mit Δf der Frequenzhub bezeichnet ist, von etwa $1/100$ durchstimmbar ist.

[0012] Ein solches Magnetron kann z.B. eine Mittenfrequenz von 2,45 GHz haben, was einem Durchstimmbereich von zwischen 2,438 GHz bis 2,462 GHz entspricht.

[0013] Dadurch sind in dem Hohlraumresonator eine hohe Anzahl von Schwingungstypen anregbar, die bei einem Durchstimmen des Magnetrons, z.B. zeitperiodisch zwischen den Grenzfrequenzen, zeitlich nacheinander fortlaufend angeregt werden.

[0014] Die vorteilhafte Folge hiervon ist, daß zu verschiedenen Zeiten verschiedene räumliche Verteilungen der Feldstärke vorliegen, die im zeitlichen Mittel ein weitgehend homogenes Feld im Behandlungsbereich ergeben.

[0015] In zweckmäßiger Gestaltung ist die Strahlungsquelle so ausgelegt, daß die Zeit für einen Frequenzhub zwischen den Grenzfrequenzen im Zehntel-Sekundenbereich liegt, z.B. zwischen 0,05 und 1 Sekunde, d.h. innerhalb einer Zeitspanne, die klein ist gegen die thermische Relaxationszeit des Sintergutes.

[0016] Diese Maßnahme ist günstig, um innerhalb des Sintergutes thermische Spannungen zu vermeiden. Derartige Spannungen könnten sich aufbauen, wenn als Folge einer zu geringen Änderungsrate der Frequenz die einer bestimmten Frequenz entsprechende Feldverteilung, die notwendigerweise inhomogen ist, über zu lange Zeit hinweg aufrechterhalten bliebe.

[0017] Im Sinne einer effektiven Verbreiterung des Frequenzbandes, innerhalb dessen der Hohlraumresonator anregbar ist, kann es auch vorteilhaft sein, wenn eine Anzahl n von Magnetrons als Mikrowellenstrahlungsquellen vorgesehen sind, die bei verschiedenen Mittenfrequenzen f_i ($i = 1$ bis n) betreibbar und innerhalb ihrer jeweiligen Bandbreiten Δf_i durchstimmbar sind.

[0018] Ein quasikontinuierlicher "lückenloser" Durchstimmbereich der Frequenz ergibt sich, wenn die Frequenzabstände einander in der Frequenzskala benachbarter Mittenfrequenzen des Magnetrons der Beziehung $(\Delta f_i + \Delta f_{i+1})/2$ genügen.

[0019] In bevorzugter Gestaltung des Brennofens ist

dessen Hohlraumresonator quaderförmig gestaltet, vorzugsweise so, daß die Kantenlängen l_x , l_y und l_z der Hohlraumbegrenzung mindestens dem 10-fachen der Wellenlänge λ der Mikrowellenstrahlung entsprechen.

[0020] Alternativ hierzu kann der Hohlraumresonator, wie gemäß Anspruch 7 vorgesehen, in derjenigen Richtung gesehen, in der ebene Begrenzungswände des Hohlraumresonators entlang paralleler Eckkanten aneinander angrenzen, eine polygonale Form hat, d.h. die Form eines prismatischen Hohlprofils. In diesen Gestaltungen ist der Resonator auf einfache Weise aus plattenförmigen Elementen zusammensetzbar, insbesondere auch, wie gemäß Anspruch 8 vorgesehen, aus plattenförmigem Graphit-Material.

[0021] Diese Ausbildung des Hohlraumresonators hat den Vorzug, daß der Brennofen bei sehr hohen Temperaturen betreibbar ist, so daß Sinterprozesse in Temperaturbereichen bis zu 1800°C möglich werden.

[0022] Bei entsprechend vielzähliger Polygonalität und ggf. regelmäßig-polygonaler Gestaltung des Hohlraumresonators ist auch der Grenzfall des zylindrisch-rohrförmigen Resonators in guter Näherung erreichbar.

[0023] Diese Gestaltung hat unter konstruktiven Gesichtspunkten den Vorteil, daß die Bauform des Resonators besser an ein üblicherweise zylindrisches Außengefäß angenähert werden kann, das evakuierbar ist und/oder mit Schutzgas spülbar ist.

[0024] Um die z.B. für ein Sintern des Behandlungsgutes erforderliche hohe Mikrowellenleistung in einer gleichmäßigen räumlichen Verteilung in den Hohlraumresonator einkoppeln zu können, ist es vorteilhaft, eine Antennen-Anordnung zu wählen, die gemäß Anspruch 9 eine Rundstrahlcharakteristik hat, d.h. eine Richtwirkung weitgehend vermeidet. Eine derartige Antenne ist gemäß den Merkmalen des Anspruchs 10 als ein mehrere Einzelstrahler umfassender Gruppenstrahler ausgebildet, dessen Einzelstrahler in einer statistisch verteilten Phasenlage speisbar sind.

[0025] Ein solcher Gruppenstrahler ist in bevorzugter Gestaltung des Ofens gemäß Anspruch 11 als Schlitzstrahler ausgebildet, der eine Mehrzahl von Abstrahlschlitzten einer Schlitzlänge zwischen $\lambda/4$ und $\lambda/2$ und einer verglichen mit dieser kleinen Schlitzweite w umfaßt, die, in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im speisenden Hohlleiter gesehen, über dessen Länge derart verteilt angeordnet sind, daß pro Schlitz gleiche oder annähernd gleiche Beträge, von Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator einkoppelbar sind, wobei, in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter gesehen, die Ausdehnung der **einzelnen** Schlitzte zwischen w und $\lambda/2$ beträgt, des weiteren der in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter gemessene Abstand aufeinanderfolgender Schlitzte der Schlitzantenne zwischen $\lambda/2$ und $3\lambda/4$ beträgt und, bezogen auf die in der Ausbreitungsrichtung verlaufende Längsmittlebene des Hohlleiters, der seitliche Abstand der Schlitzte von dieser Mittlebene, über die Länge des Hohlleiters hinweg, schrittweise zu-

nimmt, und daß eine statistische Verteilung der Längsschlitze, die die einzelnen Abstrahlelemente bilden, bezüglich der Längsmittlebene des Hohlleiters vorgesehen ist

[0026] Bei dieser Gestaltung der Schlitzantenne wird eine sehr gute Rundstrahlcharakteristik schon dann erzielt, wenn mindestens 20 Einzelschlitze vorgesehen sind, wobei sich mit zunehmender Anzahl der Schlitze eine immer effektivere Annäherung der Antennencharakteristik an die Rundstrahlcharakteristik ergibt.

[0027] In der gemäß Anspruch 13 vorgesehenen, speziellen Gestaltung des Schlitzstrahlers können mindestens einzelne seiner Schlitze auch schräg zur Ausbreitung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter verlaufen.

[0028] Unter dem Gesichtspunkt eines gleichmäßigen Energieeintrages in den Hohlraumresonator kann es auch vorteilhaft sein, wenn mehrere Gruppenstrahler der vorgenannten Art vorgesehen sind, wobei sich zum einen statistisch eine gleichmäßigere Verteilung der Phasenlagen der über die einzelnen Antennenelemente eingekoppelten Mikrowellenenergie erzielen läßt und zum anderen auch ein entsprechend erhöhter Energieeintrag möglich wird, der zur Aufheizung eines großvolumigen Sinterstapels geeignet ist.

[0029] Sowohl aus konstruktiven Gründen als auch aus Gründen der Abstrahlcharakteristik ("Horn"-Wirkung der Resonatorwände) kann es besonders zweckmäßig sein, wenn die Antenne(n) in streifenförmigen Randbereichen ebener Teile der Resonatorwände angeordnet ist/sind, die in unmittelbarer Nähe von Kanten der Resonatorwandung verlaufen, entlang derer ebene Resonator-Innenflächen aneinander anstoßen.

[0030] Die den Resonator und den bzw. die Hohlleiter, über den/die die Antenne(n) gespeist wird/werden, umgebende Zusatzheizung ist als eine elektrisch steuerbare Widerstandheizung ausgebildet, die, entsprechend einem durch ein Programm vorgegebenen Temperaturverlauf angesteuert wird, der dem Temperaturverlauf im Sintergut entsprechen soll, der seinerseits mittels eines Temperatursensors, vorzugsweise einem Pyrometer, überwacht wird und zum Soll-Ist-Wert-Vergleich für die Heizung der Resonatorwand herangezogen wird, deren Temperatur im Sinne einer Nachlaufregelung an die Temperatur des Sintergutes angeglichen wird, die im wesentlichen durch die eingestrahlte Mikrowellenleistung bestimmt wird.

[0031] Hierbei ist es zweckmäßig, daß Temperatursensoren für verschiedene Wandbereiche des Resonators vorgesehen sind, mittels derer die gegebenenfalls verschiedenen Resonatorwand-Temperaturen erfaßbar sind, und daß die Heizung den individuell überwachten Wandbereichen zugeordnete Heizelemente umfaßt, die ihrerseits individuell ansteuerbar sind, wobei es zweckmäßig ist, im Fall des quaderförmigen Resonators jeder der Resonatorwände ein eigenes Heizelement und einen eigenen Temperatursensor zuzuordnen.

[0032] Bei der erfindungsgemäß vorgesehenen Anordnung der wärmedämmenden Isolation außerhalb

des Resonator-Hohlraumes und auch außerhalb der Heizelemente ist die Isolation selbst aus Graphit oder aus einem Material auf Graphitbasis gebildet, z.B. Graphitfilz und vermittelt dann, eine Anordnung an der Innenseite des den Resonator umgebenden Gehäuses vorausgesetzt, aufgrund der Leitfähigkeit des Graphitmaterials eine wirksame Unterdrückung jeglicher Mikrowellen-Leckstrahlung nach außen.

[0033] Weitere Einzelheiten des erfindungsgemäßen Brennofens ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines speziellen Ausführungsbeispiels und möglicher Abwandlungen desselben anhand der Zeichnung. Es zeigen:

15 Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Brennofens für eine Hochtemperaturbehandlung von keramischem Sintergut mit niedrigem dielektrischem Verlustfaktor, das innerhalb eines quaderförmigen Hohlraumresonators des Brennofens durch Absorption von Mikrowellenenergie aufheizbar ist, in schematisch vereinfachter Blockschaltbild-Darstellung,

25 Fig. 1a eine schematisch vereinfachte, perspektivische Ansicht des Hohlraumresonators und der Anordnung der Behandlungs-Toleranzen;

30 Fig. 2 Einzelheiten einer zur Einkopplung von Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator des Brennofens gemäß Fig. 1 vorgesehenen Schlitzantennenanordnung, in schematisch vereinfachter, teilweise abgebrochener perspektivischer Ansichtsdarstellung und

35 Fig. 2a die Schlitzantenne gemäß Fig. 2 in vereinfachter Draufsicht.

40 **[0034]** Der in der Fig. 1 insgesamt mit 10 bezeichnete Brennofen ist für eine Temperatufurbehandlung, insbesondere zum Sintern, lediglich schematisch angedeuteter Werkstücke 11 gedacht, die durch diese thermische Behandlung erst ihre für einen bestimmungsgemäßen Gebrauch der fertigen Werkstücke erforderlichen Materialeigenschaften und/oder räumliche Abmessungen erlangen.

45 **[0035]** Typische Werkstücke 11, die auf der Basis von nitrid-keramischem Material, insbesondere Si_3N_4 hergestellt sind, z.B. Kugellager, Ventilkörper- und Gehäuse, Düsen, oder auf der Basis von oxid-keramischem Material herstellbar sind, z.B. Dichtscheiben und -Ringe, und einer sinternden Behandlung bedürfen, sollen in dem Brennofen 10 dieser thermischen Behandlung aussetzbar sein.

50 **[0036]** Hierbei handelt es sich um Materialien mit relativ niedrigem dielektrischem Verlustfaktor ($\tan \delta < 0.01$), die in einem insgesamt mit 12 bezeichneten Sta-

pel angeordnet sind.

[0037] Die Erwärmung des durch die Werkstücke 11 insgesamt gebildeten Sintergutes erfolgt durch Absorption von Mikrowellen-Energie, die von einer Mikrowellenquelle 13 erzeugt wird und über eine insgesamt mit 14 bezeichnete Antennen-Anordnung mit Rundstrahl-Charakteristik in einen insgesamt mit 16 bezeichneten Hohlraumresonator mit elektrisch leitenden Wänden 16₁ bis 16₆ eingekoppelt wird, der beim dargestellten, speziellen Ausführungsbeispiel die Form eines Quaders hat, dessen Abmessungen l_x , l_y und l_z signifikant, z.B. etwa 10 mal größer sind als die Wellenlänge λ der mittels der Mikrowellenquelle 13 erzeugbaren Mikrowellen, und jeweils in der Größenordnung

$$\sqrt[3]{V_{\text{res}}}$$

liegen, wobei mit V_{res} das Volumen des Hohlraumresonators 16 bezeichnet ist ($V_{\text{res}} = l_x \cdot l_y \cdot l_z$). Der Behandlungsraum, innerhalb dessen das Sintergut stapelförmig als dielektrische Beladung des Hohlraumresonators 16 auf nicht eigens dargestellte Weise gehalten wird, ist in der Fig. 1a schematisch als mit dem Inneraum des Hohlraumresonators 16 geometrisch ähnlicher, zentraler Teilraum 17 repräsentiert, dessen zur thermischen Behandlung des Sintergutes 11 nutzbares Volumen ca. 1/3 des Resonatorvolumens V_{res} betragen kann.

[0038] In einem solchen Resonator 16 lautet die Resonanzbedingung für die Wellenlänge der Mikrowellenstrahlung, die in dem Resonator 16 resonant ist

$$\lambda_r = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{o}{L_z}\right)^2}} \quad (1)$$

wobei mit m , n und o die ganzzahligen Quanten-Zahlen bezeichnet sind, mit denen die Beziehung (1) erfüllbar ist.

[0039] Die in einem solchen Hohlraumresonator resonant anregbaren Schwingungstypen ergeben innerhalb des Hohlraumresonators einen in den drei Koordinatenrichtungen x , y und z einen periodisch variierenden Feldverlauf, wobei das Quadrat (E^2) der elektrischen Feldstärke (E) des im Hohlraumresonator erzeugten elektrischen Feldes zwischen 0 und einem Maximalbetrag variiert, d.h. eine Feldverteilung, die räumlich extrem inhomogen ist.

[0040] Die für eine qualitativ gleichwertige Behandlung eines über den Behandlungs-Teilraum 17 verteilten Sintergutes erforderliche gleichmäßige Verteilung der elektrischen Feldenergie ist in guter Näherung erreichbar, wenn der Hohlraumresonator in einer hohen Zahl resonanter Schwingungstypen anregbar ist und diese Schwingungstypen zumindest im zeitlichen Mittel überlagerungsfähig sind, wobei die Anzahl ΔN der anregba-

ren Schwingungstypen durch die Beziehung

$$\Delta N = \frac{8 \cdot \pi \cdot V_{\text{res}}}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{Q_{\text{gesamt}}} \quad (2)$$

gegeben ist, in der mit V_{res} das Volumen des Hohlraumresonators, mit λ die Vakuumwellenlänge der Mikrowellenstrahlung und mit Q_{gesamt} die Gesamtgüte der insofern erläuterten Anordnung 10, 11, 12, 13, 14 bezeichnet ist, die ihrerseits durch die Beziehung

$$\frac{1}{Q_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{Q_{\text{res}}} + \frac{1}{Q_{\text{ant}}} + \frac{1}{Q_{\text{diel}}} + \frac{1}{Q_{\text{quelle}}} \quad (3)$$

gegeben ist. In dieser Beziehung ist mit Q_{res} die Güte der Resonatorwand bezeichnet, die durch die Beziehung

$$Q_{\text{res}} = \frac{3 \cdot V_{\text{res}}}{2 \cdot A_{\text{res}} \cdot e} \quad (4)$$

gegeben ist, mit Q_{ant} die Güte der Antennenanordnung, für die die Beziehung

$$Q_{\text{ant}} = \frac{8 \cdot \pi \cdot V_{\text{res}}}{A_{\text{ant}} \cdot \lambda} \quad (5)$$

gilt, mit Q_{diel} die Güte des dielektrischen Sintergutes, für welche die Beziehung

$$Q_{\text{diel}} = \frac{V_{\text{res}}}{V_{\text{diel}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan \delta} \quad (6)$$

gilt und mit Q_{quelle} die Güte der Mikrowellenquelle (13) bezeichnet ist, die durch die Beziehung

$$Q_{\text{quelle}} = 1/B \quad (7)$$

gegeben ist.

[0041] In den Beziehungen (4), (5), (6) und (7) sind mit

A_{res} die Fläche der Resonatorwand insgesamt,

e die Eindringtiefe in die Resonatorwand

A_{ant} die abstrahlenden Flächen der Antennenanordnung 14, mit

V_{diel} das Volumen des dielektrischen Behandlungsgutes 11, mit

ϵ_r die Dielektrizitätszahl des Sintergutes 11, mit
 $\tan \delta$ der dielektrische Verlustfaktor des Sintergutes und mit
 B die Bandbreite der Mikrowellenquelle 13

bezeichnet.

[0042] Bei dem zur Erläuterung gewählten Brennofen 10 ist als Mikrowellen-Strahlungsquelle 13 ein Magnetron mit einer Grundfrequenz von 2,45 GHz vorgesehen. Das Resonatorvolumen V_{res} beträgt $1,4 \text{ m}^3$, so daß das Verhältnis V_{res}/λ^3 einen Wert von etwa 770 hat. Für den Wert A_{res} der Gesamtfläche der Resonatorwände 16_1 bis 16_6 ist ein Wert von $7,6 \text{ m}^2$ angenommen. Die Resonatorwände 16_1 bis 16_6 bestehen aus plattenförmigem Graphit-Material, so daß sich bei der angegebenen Frequenz der Mikrowellenquelle eine Eindringtiefe e von $32 \mu\text{m}$ ergibt, was einer Güte der Resonatorwand von etwa 8600 entspricht.

[0043] Für die "strahlende" Antennenfläche ist ein Wert A_{ant} von 60 cm^2 angenommen, was einer Güte Q_{ant} der Antennen-Anordnung von etwa 48000 entspricht. Für das vom Sintergut 11 eingenommene Volumen von ca. $0,03 \text{ m}^3$ ergibt sich ein Wert der Güte Q_{diel} des Sintergutes von 2100, wenn für dessen Dielektrizitätszahl ein Wert von 8 und ein Verlustfaktor von 0.008 angesetzt wird. Bei einem Betrieb des Magnetrons 13 bei fester Frequenz ist die Bandbreite B der von dem Magnetron erzeugten Mikrowellenstrahlung kleiner als 10^{-6} , was einer Quellengüte Q_{quelle} von mehr als 10^6 entspricht. Bei dielektrischer Beladung des Hohlraumresonators im angegebenen Umfang entspricht die Gesamtgüte Q_{ges} ungefähr der Güte Q_{diel} des dielektrischen Gutes und die Zahl der anregungsfähigen Schwingungstypen ΔN etwa einen Wert von 9. Hieraus ergibt sich, daß eine genügende Zahl von Schwingungstypen, die für eine hinreichend gleichmäßige Verteilung des elektrischen Feldes im Hohlraumresonator notwendig sind, sich nur durch eine breitbandige Mikrowellenquelle erreichen läßt.

[0044] Demgemäß ist der Brennofen 10 dahingehend ausgelegt, daß die folgende Beziehung gilt:

$$V_{\text{res}} \cdot B/\lambda^3 \geq 20 \quad (8).$$

[0045] Die Antennenanordnung 14, mittels derer von dem Magnetron 13 erzeugte Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator 16 einkoppelbar ist, ist als Schlitzstrahler ausgebildet, der eine Mehrzahl von Abstrahlschlitzen 18 umfaßt, deren jeder ein Antennenelement bildet, dessen strahlende Antennenfläche der lichten Schlitzfläche entspricht. Diese Abstrahlschlitze 18 sind in einer gleichzeitig auch einen Innenwandbereich des Hohlraumresonators bildenden Längswand 19 eines Rechteck-Hohlleiters 21 (Fig. 2) angeordnet, in dem die von dem Magnetron 13 erzeugte, am einen Ende des

Hohlleiters 21 in diesen eingespeiste Mikrowellenenergie nur in der TE_{10} -Mode (Grundschiwingungstyp) beim dargestellten Anordnungs-Beispiel in der z-Richtung ausbreitungsfähig ist, derart, daß der elektrische Feldvektor rechtwinklig zu der mit den Schlitzen 18 versehenen Hohlleiter-Längswand 19 verläuft und die Feldverteilung des elektrischen Feldes im Innenraum des Rechteck-Hohlleiters im wesentlichen symmetrisch zu dessen Längsmittlebene 23 verläuft, die sich ihrerseits in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter 21 erstreckt. Diese Abstrahlschlitze 18 sind, über die Länge l_z des Rechteck-Hohlleiters 21 derart verteilt angeordnet, daß pro Abstrahlschlitz 18 jeweils gleiche oder annähernd gleiche Beträge von Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator 16 einkoppelbar sind, und daß die Phasenlagen der durch die Abstrahlschlitze in den Hohlraumresonator 16 eingekoppelten elektromagnetischen Felder in einer statistischen Folge verschieden sind.

[0046] In Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter 21 gesehen, beträgt der Abstand d (Fig. 2a) aufeinanderfolgender Schlitze der Schlitzantenne 14 zwischen $\lambda/2$ und $3\lambda/4$, wobei abweichend von der zur Erläuterung gewählten Darstellung, in der die längeren Schlitzränder parallel zur Längsmittlebene 23 des Hohlleiters 21 verlaufen, auch Schlitzkonfigurationen mit schräg zu dieser oder gar rechtwinklig zu dieser verlaufenden Längsrändern möglich sind. Bei der dargestellten Konfiguration der Schlitzantenne 14, bei der die Abstrahlschlitze parallel zu dieser Längsmittlebene 23 verlaufen, beträgt die Länge l der einzelnen Schlitze 18 zwischen $\lambda/4$ und $\lambda/2$ und ist signifikant größer als die rechtwinklig zur Längsmittlebene 23 bzw. der Ausbreitungsrichtung der Mikrowellenenergie im Rechteck-Hohlleiter gemessene Weite w der Schlitze. Über die Länge des Rechteck-Hohlleiters 21 hinweg gesehen, an dessen einem Ende die von dem Magnetron 13 erzeugte Mikrowellenenergie eingespeist wird, nimmt der seitliche Abstand a der Abstrahlschlitze von der Längsmittlebene 23 des Rechteck-Hohlleiters 21 schrittweise zu.

[0047] Die Anordnungsfolge der jeweils auf einer Seite der Längsmittlebene angeordneten Abstrahlschlitze $18'$ und $18''$ (Fig. 2a) entspricht im Abstandsraaster der Schlitzabstände d , gesehen in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Rechteck-Hohlleiter 21, einer "binären" Zufallsfolge von Schlitz-Paarungen (1,0) und (0,1), wobei (1,0) bedeutet, daß ein Schlitz $18'$ auf der einen, "linken" Seite der Längsmittlebene 23 des Rechteck-Hohlleiters 21 vorhanden ist, jedoch nicht ein zu diesem symmetrisch angeordneter Schlitz $18''$ und die Kombination (0,1), daß auf der anderen "rechten" Seite der Längsmittlebene 23 ein Abstrahlschlitz $18''$ vorhanden ist, nicht jedoch auf der der gegenüberliegenden, "linken" Seite. Die Kombination (1,1), die einem Phasenunterschied des über einander genau gegenüberliegend angeordnete Abstrahlschlitze $18'$ und $18''$ abgestrahlten Feldes von $\pi/2$ entsprechen würde, sowie

die Kombination (0,0) sind bei dem zur Erläuterung gewählten Ausführungsbeispiel, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, ausgeschlossen. Die insoweit ihrem prinzipiellen Aufbau nach erläuterte Schlitzantenne wirkt als Gruppenstrahler, dessen durch die Schlitze 18 bzw. 18' und 18" gebildeten Einzelstrahler mit statistisch verteilter Phasenlage speisbar sind, wodurch die Abstrahicharakteristik der Antennen-Anordnung 14 in sehr guter Näherung eine Rundstrahlcharakteristik ist.

[0048] Der zur Speisung der Abstrahlschlitze 18 der Anennenanordnung 14 vorgesehene Rechteck-Hohlleiter 21 ist, entsprechend der schematischen Darstellung der Fig. 1 in einen prismatischen Graphitkörper 24 integriert, dessen äußere Querschnittskontur derjenigen eines gleichschenkligh-rechtwinkligen Dreiecks entspricht, durch dessen Hypothenuse 26 in der Darstellung der Fig. 1 eine Resonatorhohlraum-Begrenzungsfläche repräsentiert ist, die in einem Eckbereich des Hohlraumresonators 16 zwischen den im Bereich der Antennenanordnung 14 rechtwinklig aneinander angrenzenden Resonatorwänden 16₂ und 16₄ vermittelt, wobei die den Hohlleiter-Innenraum 22 begrenzenden Wellenleiter-Flächen paarweise parallel bzw. senkrecht zu der schrägen inneren Längebegrenzungsfläche 26 des Hohlraumresonators 16 verlaufen, die durch die "Hypothenusen"-Fläche des Graphitkörpers 24 gebildet ist.

[0049] Um zur Erhöhung der Anzahl der im Hohlraumresonator anregbaren Schwingungstypen, was der Gleichmäßigkeit der Feldverteilung im Hohlraumresonator zugute kommt, die "effektive" Güte Q_{Quelle} des als Energiequelle vorgesehenen Magnetrons zu verringern, ist eine Gestaltung des Magnetrons 13 vorgesehen, bei der dessen Schwingungsfrequenz innerhalb einer Bandbreite von 1/100 der Grundfrequenz f von 2,45 GHz variierbar ist. Die Zykluszeiten der Frequenzvariation, die mittels einer elektronischen Steuereinheit 27 steuerbar ist, sind auf das thermische Relaxationsverhalten des Sintergutes 11 dahingehend abgestimmt, daß sie klein gegen die thermische Relaxationszeit des jeweils zu behandelnden Sintergutes sind. Demgemäß ist die elektronische Steuereinheit 27 so ausgelegt, daß die Zykluszeiten zwischen 0,05 und 1 Sekunde betragen können.

[0050] Dem Zweck einer - im zeitlichen Mittel - Reduzierung der Quellengüte Q_{Quelle} kann, was nicht eigens dargestellt ist, auch die Maßnahme dienen, daß mehrere Magnetrons als Mikrowellen-Strahlungsquelle vorgesehen sind, die bei verschiedenen Grundfrequenzen f_i ($i = 1 \dots n$) betreibbar sind und jeweils entsprechende charakteristische Bandbreiten B_i haben, wobei es dann zweckmäßig ist, daß die Frequenzabstände Δf_i der einander in der Frequenzskala benachbarten Magnetron-Schwingungsfrequenzen, zumindest annähernd dem Wert

$$\frac{\Delta f_i + \Delta f_{i+1}}{2}$$

entsprechen.

[0051] Wenn zur Einstrahlung von Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator 16 zwei oder mehr Antennen Anordnungen 14 vorgesehen sind, so ist es zweckmäßig, wenn diese azimuthal etwa äquidistant um eine parallel zu den Polygonkanten des Resonator-Hohlraumes verlaufende "zentrale" Achse gruppiert sind, um eine gleichmäßige Einstrahlung von Mikrowellenenergie in den Behandlungsraum 17 des Hohlraumresonators zu erzielen.

[0052] Der Brennofen 10 ist mit einer insgesamt mit 28 bezeichneten Heizeinrichtung versehen, die entsprechend der Anzahl der großflächigen Wandelemente 16₁ bis 16₆ des Hohlraumresonators 16 ihrerseits sechs elektrische Widerstands-Heizelemente 28₁ bis 28₆ umfaßt (Die Widerstands-Heizelemente 28₅ und 28₆ sind nicht dargestellt, weil Figur 1 einen Querschnitt zeigt), deren Heizleistungen individuell steuerbar sind, so daß die Temperatur der Wandelemente 16₁ bis 16₆ individuell beeinflussbar ist. Die Wandelemente 16₁ bis 16₆ sind mit mindestens je einem Temperatursensor 29₁ bis 29₆ bestückt (Die Temperatursensoren 29₅ und 29₆ sind nicht dargestellt, weil Figur 1 einen Querschnitt zeigt), die für die Istwerte der Wandtemperaturen charakteristische elektrische Ausgangssignale erzeugen.

[0053] Des weiteren ist ein insgesamt mit 32 bezeichnetes Pyrometer vorgesehen, mittels dessen die Temperatur des Sintergutes 11 erfaßbar ist. Dieses Pyrometer 32 umfaßt einen an geeigneter Stelle im Stapel 12 angeordneten Probekörper 33 und einen elektronisch-optischen Sensor 34, mittels dessen die Strahlungstemperatur des Probekörpers 33 erfaßbar ist, so daß ein hierfür charakteristisches elektrisches Ausgangssignal des Sensors 34 ein genaues Maß für die Temperatur des Sintergutes 11 ist. Die elektronische Steuereinheit 31 der Heizeinrichtung 28 vermittelt eine vergleichende Verarbeitung der Istwert-Ausgangssignale der Pyrometer-Anordnung 32 sowie der Temperatursensoren 29₁ bis 29₆ und vermittelt auch eine Ansteuerung der Heizelemente 28₁ bis 28₆ sowie der Leistungs-Steuerung der Mikrowellenquelle 13 in dem Sinne, daß die Wandtemperatur des Hohlraumresonators 16 insgesamt möglichst exakt der Temperatur des Sintergutes 11 entspricht. Der zeitliche Verlauf der Ofentemperatur, d.h. sowohl der Temperatur des Sintergutes als auch der Resonator-Wandtemperatur(en) wird nach einem Programm gesteuert, das unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften und der geometrischen Abmessungen der Werkstücke 11 ein qualitativ gutes Behandlungsergebnis ergibt.

[0054] Der Hohlraumresonator 16 und die zur Beheizung seiner Wände 16₁ bis 16₆ vorgesehenen Heizelemente 28₁ bis 28₆ der Heizeinrichtung 28 sind innerhalb eines stabilen Stahlgehäuses 36 angeordnet, das zum Zweck der Möglichkeit einer Schutzgas-Spülung seines Innenraumes 17 einschließlich des Resonator-Hohlraumes oder einer Evakuierung derselben gasdicht ausgeführt ist. Das Stahlgehäuse 36 ist zum Zweck der Wär-

meisolierung seines Innenraumes gegenüber dem Umgebungsraum des Brennofens 10 innenseitig mit einer Wärmedämmschicht 38 ausgekleidet, die aus einem hochtemperaturfesten Isolationsmaterial, z.B. Graphitfilz besteht.

Patentansprüche

1. Brennofen (10) für die Hochtemperaturbehandlung von Materialien mit relativ niedrigem dielektrischen Verlustfaktor ($\tan \delta$) unter Erwärmung des Materials durch Absorption von Mikrowellenenergie in einem Hohlraumresonator, in dem das Behandlungsgut innerhalb eines zentralen Teilbereiches des Resonators angeordnet ist, in dem, z.B. durch breitbandige Einstrahlung von Mikrowellenenergie und/oder durch zeitliche Variation der Frequenz der eingestrahlten Mikrowellenenergie, gleichmäßige Energiedichte des Mikrowellenfeldes gegeben ist, derart, daß in jedem Volumenelement des Behandlungsbereiches das Quadrat der elektrischen Feldstärke des Mikrowellenfeldes zumindest im zeitlichen Mittel innerhalb eines geringen Toleranzbereiches denselben Betrag hat, wobei eine elektrische Heizeinrichtung vorgesehen ist, mittels derer die Resonatorwand auf die im Behandlungsgut herrschende Temperatur aufheizbar ist, z.B. im Sinne einer Nachlaufregelung der Temperatur des Behandlungsgutes nachführbar ist, und wobei ein wärmeisolierender wärmedämm mantel (38) vorgesehen ist, der die Wärmeabfuhr aus dem Brennofen in die Umgebung dämmt, **gekennzeichnet durch** die folgenden Merkmale:

a) Der Hohlraumresonator (16) und eine die Mikrowellenenergie erzeugende Strahlungsquelle (13) sind dahingehend aufeinander abgestimmt, daß die Relation:

$$\frac{V}{\lambda^3} \cdot B \geq 20$$

erfüllt ist, worin mit V das Volumen des Hohlraumresonators (16), mit λ die Wellenlänge der Mikrowellenstrahlung und mit B deren Bandbreite bezeichnet sind, des weiteren die Größe V/λ^3 einen Wert von mindestens 300 hat und die lichten Abmessungen l_x , l_y und l_z des Hohlraumresonators (16) in den Koordinatenrichtungen x, y und z jeweils einen Wert um

$$\sqrt[3]{V}$$

haben;

b) die Heizeinrichtung (28) ist außerhalb des Hohlraumresonators (16), die Resonatorwand unmittelbar umgebend angeordnet, und der Wärmedämmmantel (38) ist die den Hohlraumresonator (16) und die Heizeinrichtung (28) umfassende Baugruppe außenseitig umschließend angeordnet;

c) die Resonatorwand (16₁ bis 16₆) besteht aus Graphit oder aus temperaturbeständigem und elektrisch leitfähigem Material auf Graphitbasis.

2. Brennofen nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** als Mikrowellen-Strahlungsquelle (13) ein Magnetron vorgesehen ist, das bei einer Grundfrequenz f innerhalb einer Bandbreite $B = \Delta f/f$ von vorzugsweise 1/100 durchstimmbar ist.
3. Brennofen nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** Zeitspannen, innerhalb derer eine kontinuierlich oder schrittweise Variation einer Schwingungsfrequenz der Mikrowellen-Strahlungsquelle (13) erfolgt, zwischen 0,05 und 1s, vorzugsweise um 100ms betragen.
4. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** eine Anzahl n von Magnetrons als Mikrowellen-Strahlungsquelle vorgesehen sind, die bei verschiedenen Mittenfrequenzen f_i ($i = 1$ bis n) betreibbar sind und jeweils charakteristische Bandbreiten B_i haben.
5. Brennofen nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** Frequenzabstände der einander in einer Frequenzskala benachbarten Magnetron-Mittenfrequenzen annähernd und vorzugsweise den Wert $(\Delta f_i + \Delta f_{i+1})/2$ haben.
6. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Hohlraumresonator (16) quaderförmig gestaltet ist, wobei die abmessen oder Kantenlängen l_x , l_y und l_z der Hohlraum-Begrenzung mindestens dem 10-fachen Wert der Wellenlänge der Mikrowellenstrahlung entsprechen.
7. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Hohlraumresonator (16) einen polygonalen Querschnitt hat.
8. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Hohlraumresonator (16) aus vorzugsweise plattenförmigem Graphit-Material (16₁ bis 16₆) zusammengesetzt ist.
9. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** zur Einkopplung der

Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator (16) eine Antennenanordnung (14) vorgesehen ist, die eine Rundstrahlcharakteristik hat.

10. Brennofen nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Antennen-Anordnung (14) als Gruppenstrahler ausgebildet ist, der eine Mehrzahl von Einzelstrahlern umfaßt, die mit einer statistisch verteilten Phasenlage speisbar sind.
11. Brennofen nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Gruppenstrahler als Schlitzstrahler ausgebildet ist, der eine Mehrzahl von Abstrahlschlitzen (18) einer Schlitzlänge zwischen $\lambda/4$ und $\lambda/2$ und einer hiergegenüber kleinen Schlitzweite w umfaßt, die, in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes in einem speisenden Hohlleiter (21) gesehen, über dessen Länge derart verteilt angeordnet sind, daß pro Schlitz (18) gleiche oder annähernd gleiche Beträge von Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator (16) einkoppelbar sind, wobei, in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter gesehen, die Ausdehnung der einzelnen Schlitze (18) zwischen w und $\lambda/2$ beträgt, des weiteren der in Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter gemessene Abstand aufeinanderfolgender Schlitze der Schlitzantenne zwischen $\lambda/2$ und $3\lambda/4$ beträgt und, bezogen auf die in der Ausbreitungsrichtung verlaufende Längsmittlebene (23) des Hohlleiters (21), der seitliche Abstand der Schlitze von dieser Mittlebene (23), über die Länge des Hohlleiters hinweg, schrittweise zunimmt, und daß eine statistische Verteilung der Längsschlitze, die die einzelnen Abstrahlelemente bilden, bezüglich der Längsmittlebene (23) des Hohlleiters vorgesehen ist.
12. Brennofen nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, daß** über die Länge des zur Speisung der Antennenschlitze (18) vorgesehenen Hohlleiters (21) mindestens 20 Einzelschlitze vorgesehen sind.
13. Brennofen nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, daß** mindestens einzelne der Einkoppelschlitze schräg und/oder rechtwinklig zur Ausbreitungsrichtung des Mikrowellenfeldes im Hohlleiter (21) verlaufen.
14. Brennofen nach einem der Ansprüche 9 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, daß** zur Einkopplung der Mikrowellenenergie in den Hohlraumresonator (16) mindestens zwei Gruppenstrahler, insbesondere Schlitzantennen-Anordnungen (14, 18) vorgesehen sind.
15. Brennofen nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Gruppenstrahler (14) symmetrisch bezüglich einer ausgezeichneten Achse des

Hohlraumresonators angeordnet sind.

16. Brennofen nach einem der Ansprüche 9 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, daß** die jeweilige Antennenanordnung (14) in einem streifenförmigen Randbereich der Resonatorwand angeordnet ist, die in unmittelbarer Nähe einer Innenkante der Resonatorwand verläuft.
17. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, daß** die zur Einstellung eines erwünschten Temperaturprofils im Behandlungsbereich des Hohlraum-Resonators vorgesehene Heizeinrichtung (28) als elektrische Widerstandsheizung ausgebildet ist, die die Temperatur der Resonatorwände (16_1 bis 16_6) auf einem Wert hält, der dem Wert der Temperatur in einem zentralen Bereich des Sintergut-Stapels (12) entspricht, der, vorzugsweise mittels eines Pyrometers (32), als Temperatur-Istwert erfaßt wird, und seinerseits programmgesteuert einer vorgegebenen Zeitabhängigkeit folgend, einstellbar ist.
18. Brennofen nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet, daß** verschiedenen Wandbereichen (16_1 - 16_6) des Hohlraumresonators (16) einzeln zugeordnete Temperatursensoren (29_1 bis 29_6) vorgesehen sind, mittels derer die ggf. verschiedenen Resonatorwand-Temperaturen erfaßbar sind, und daß die Heizeinrichtung (28) den hinsichtlich der Temperatur individuell überwachten Wandbereichen zugeordnete Heizelemente (28_1 bis 28_6) umfaßt, die ihrerseits individuell ansteuerbar sind.
19. Brennofen nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet, daß** der zur Wärmeisolation des Hohlraumresonators (16) gegenüber der äußeren Umgebung des Brennofens (10) vorgesehene Wärmedämmmantel als eine an der Innenseite eines den Hohlraumresonator (16) und die Heizeinrichtung (28) aufnehmenden Ofen-Gehäuses (36) angeordnete, ihrerseits auf der Basis eines Graphit-Materials, insbesondere Graphitfilz hergestellte, mit einer Mindest-Leitfähigkeit behaftete Auskleidungsschicht (38) ausgebildet ist.

Claims

1. Baking oven (10) for the high-temperature treatment of materials with relatively low dielectric loss factor ($\tan \delta$) by heating the material by absorption of microwave energy in a resonant chamber, in which the material to be treated is arranged within a central area of the resonator, wherein a uniform energy density of the microwave field is achieved, for example, by irradiating with broadband microwave energy and/or by varying the frequency of the

irradiated microwave energy over time, so that in each volume element of the treatment area the square of the electric field strength of the microwave field has the same value, at least over time, within a minor tolerance, wherein an electric heating device is provided, with which the resonator wall can be heated to the same temperature as within the material to be treated, for example, in the sense of a servo control the temperature of the material to be treated can be followed, and wherein a heat insulating envelope (38) is provided, which insulates the baking oven against heat loss into the environment, **characterized by** the following features:

a) the resonator chamber (16) and a the microwave energy generating radiation source (13) are sufficiently attuned to each other, so that the relation

$$\frac{V}{\lambda^3} \cdot B \geq 20$$

is satisfied, wherein V is the volume of the resonator chamber (16), λ is the wavelength of the microwave radiation and B is their band width, further the amount V/λ^3 has a value of at least 300 and the transparent dimensions l_x , l_y and l_z of the resonator chamber (16) in the coordinate directions x, y and z have a value of

$$\sqrt[3]{V}$$

each;

b) the heating device (28) is arranged outside of the resonator chamber (16) in the immediate vicinity of the resonator wall, and the heat insulating envelope (38) is arranged so that it encompasses the resonator chamber (16) and the heating device (28) from the outside,

c) the resonator wall (16₁ through 16₆) consists of graphite or of temperature maintaining and electrically conductive material based on graphite.

2. Baking oven according to claim 1, thereby **characterized, that**, as microwave radiation source (13) a magnetron is provided, which is tunable about a basic frequency f within a band width $B = \Delta f/f$ of preferably 1/100.
3. Baking oven according to claim 1 or claim 2, thereby **characterized, that** time intervals in which within a continuous or stepwise variation of an oscillation

frequency of the microwave radiation source (13) occurs, lies between 0.05 and 1s, preferably around 100ms.

4. Baking oven according to one of claims 1 through 3, thereby **characterized, that** an amount n of magnetrons are provided, which are operable at various central frequencies f_i (i = 1 through n) and each have characteristic band widths B_i .
5. Baking oven according to claim 4, thereby **characterized, that** frequency separations of the center frequencies of the magnetrons which are next to each other in a frequency scale satisfy the equation $(\Delta f_i + \Delta f_{i+1})/2$.
6. Baking oven according to one of claims 1 through 5, thereby **characterized, that** the resonator chamber (16) has a cuboidal design, such that the dimensions or edge lengths l_x , l_y and l_z of the resonant chamber boundary correspond at least to the 10-fold of the wavelength of the microwave radiation.
7. Baking oven according to one of claims 7. through 5, thereby **characterized, that** the resonator chamber (16) has a polygonal cross-section.
8. Baking oven according to one of claims 1 through 7, thereby **characterized, that** the resonator chamber (16) is assembled of preferably plate-shaped graphite material (16₁ through 16₆).
9. Baking oven according to one of claims 1 through 8, thereby **characterized, that** for introduction of the microwave energy into the resonator chamber (16) an antenna-arrangement (14) is provided, which has an omnidirectional characteristic.
10. Baking oven according to claim 9, thereby **characterized, that** the antenna-arrangement (14) is formed as a group emitter comprising multiple individual emitters, which the individual emitters can be supplied by a statistically distributed phase position.
11. Baking oven according to claim 10, thereby **characterized, that** the group emitter is designed as a slit emitter, which includes a plurality of radiation slits with a slit length of between $\lambda/4$ and $\lambda/2$ and, in comparison thereto, a small slit width w, which viewed in the direction of radiation of the microwave field in the feeding wave guide, are distributed in such a manner over the length thereof, that per slit the same or approximately similar amount of microwave energy can be introduced into the resonant chamber, wherein, viewed in the direction of propagation of the microwave field in the wave guide, the extension of the individual slits corresponds to

between w and $\lambda/2$, of which further in the distance measured in the direction of radiation of the microwave field in the wave guide sequential slits of the slit antenna have a value of between $\lambda/2$ and $3\lambda/4$, and, with reference to the center plane of the wave guide running in the direction of propagation, the sideways separation of the slits from this center plane, over the length of the wave guide, increases stepwise, and wherein a statistic distribution of the longitudinal slits, which form the individual radiation elements, is provided with respect to the longitudinal center plane of the wave guide.

12. Baking oven according to claim 11, thereby **characterized, that** over the length of the wave guide (21) provided to feed the antenna slits (18) at least 20 individual slits are provided.

13. Baking oven according to claim 12, thereby **characterized, that** at least some of its slits run perpendicular to the direction of propagation of the microwave field in the wave guide.

14. Baking oven according to one of claims 9 through 13, thereby **characterized, that** for introduction of the microwave energy into the resonator chamber (16) at least two group emitters are provided, preferably with slit-antenna arrangement (14, 18).

15. Baking oven according to claim 14, thereby **characterized, that** the group emitters (14) are arranged symmetrically with regard to a significant or distinct axis of the resonator chamber.

16. Baking oven according to one of claims 9 through 15, thereby **characterized, that** the corresponding antenna-arrangement (14) is arranged in a strip-shaped edge area of the resonator wall, which runs very close to the inner edge of the resonator wall.

17. Baking oven according to one of claims 1 through 16, thereby **characterized, that** for the adjustment of a controllable heating device (28) for achievement of equalization of the temperature profile within the resonator chamber, preferably constructed as an electric resistance heater, which maintains the temperature of the resonator walls (16₁ through 16₆) at a value which corresponds to the value of the temperature-value in a central area of pile of material being sintered (12), which is sensed as actual value, preferably via a pyrometer (32), and which for its part in accordance with a control program follows a specific temperature profile over time.

18. Baking oven according to claim 17, thereby **characterized, that** various wall areas (16₁-16₆) of the resonator chamber (16) are provided with associat-

ed temperature sensors (29₁ through 29₆), by means of which the possibly varying resonator wall temperatures may be sensed, and that the heating device (28) includes various heater elements (28₁ through 28₆) for heating the various walls being monitored, which are individually controllable.

19. Baking oven according to one of claims 1 through 18, thereby **characterized, that** the heat insulating envelope intended for heat insulation of the resonator chamber (16) against the outer surroundings of the baking oven (10) is formed internal to oven housing (36) for receiving the resonator chamber (16) and to the heating device (28), and for its part is made of graphite material, in particular graphite felt, with a minimally conductive outer layer.

Revendications

1. Four (10) pour le traitement à haute température de matériaux avec un facteur de perte diélectrique relativement faible ($\tan \delta$), avec chauffage du matériau par absorption de l'énergie des micro-ondes dans un résonateur à cavité, dans lequel le produit à traiter est disposé à l'intérieur d'une zone partielle centrale du résonateur, dans lequel, par exemple par un rayonnement à large bande de l'énergie des micro-ondes et/ou par une variation dans le temps de la fréquence de l'énergie des micro-ondes propagée, on obtient une densité d'énergie homogène du champ de micro-ondes, de telle sorte que, dans chaque élément volumique de la zone de traitement, le carré de l'intensité du champ électrique des micro-ondes présente la même valeur au moins dans une moyenne de temps à l'intérieur d'une étroite fourchette de tolérances, un dispositif de chauffage électrique étant prévu pour chauffer la paroi du résonateur à la température régnant dans le produit à traiter, à commander par exemple dans le sens d'un réglage par poursuite de la température du produit à traiter, et une chemise d'isolation thermique (38) étant prévue pour arrêter la fuite de chaleur hors du four vers l'environnement, **caractérisé par les caractéristiques suivantes :**

a) le résonateur à cavité (16) et une source de rayonnement (13) générant l'énergie des micro-ondes sont ajustés l'un à l'autre de manière à satisfaire à la relation suivante :

$$\frac{V}{\lambda^3} \cdot B \geq 20,$$

dans laquelle V désigne le volume du résonateur à cavité (16), λ la longueur d'onde du rayonnement de micro-ondes et B la largeur de

bande de celui-ci, par ailleurs, la valeur V/λ^3 est égale à 300 et les dimensions intérieures l_x , l_y et l_z du résonateur à cavité (16) dans les directions des coordonnées x , y et z sont égales chacune à une valeur autour de

$$\sqrt[3]{V} ;$$

b) le dispositif de chauffage (28) est disposé à l'extérieur du résonateur à cavité (16), entourant directement la paroi du résonateur, et la chemise d'isolation thermique (38) est disposée en enveloppant extérieurement le groupe formé par le résonateur à cavité (16) et le dispositif de chauffage (28) ;

c) la paroi du résonateur (16_1 à 16_6) est réalisée en graphite ou dans un matériau à base de graphite électro-conducteur et résistant aux températures.

2. Four selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la source de rayonnement des micro-ondes (13) est formée par un magnétron, que l'on peut faire varier de préférence de l'ord de $1/100$ autour d'une fréquence de base f à l'intérieur d'une largeur de bande $B = \Delta f/f$.

3. Four selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** les intervalles de temps, à l'intérieur desquels on effectue une variation continue ou progressive d'une fréquence d'oscillation de la source de rayonnement des micro-ondes (13), sont compris entre 0,05 et 1 seconde, de préférence autour de 100 ms.

4. Four selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce qu'il** est prévu un nombre n de magnétrons destinés à former la source de rayonnement des micro-ondes, lesquels peuvent être exploités à différentes fréquences centrales f_i ($i = 1$ à n) et présentent chacun une largeur de bande B_i caractéristique.

5. Four selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** les distances entre les fréquences centrales du magnétron, voisines dans une gamme de fréquences, ont pratiquement et de préférence la valeur $(\Delta f_i + \Delta f_{i+1})/2$.

6. Four selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** le résonateur à cavité (16) est conçu en forme de parallélépipède, les dimensions ou longueurs d'arêtes l_x , l_y et l_z , délimitant la cavité, correspondent au moins à 10 fois la valeur de la longueur d'onde du rayonnement de micro-ondes.

7. Four selon l'une des revendications 1 à 5, **caracté-**

risé en ce que le résonateur à cavité (16) présente une section polygonale.

8. Four selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** le résonateur à cavité (16) est formé de préférence par un matériau de graphite en forme de plaques (16_1 à 16_6).

9. Four selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** pour introduire l'énergie des micro-ondes dans le résonateur à cavité (16), il est prévu un système d'antenne (14) qui présente une caractéristique omnidirectionnelle.

10. Four selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** le système d'antenne (14) est formé par un réseau d'antennes rayonnantes, qui comprend une pluralité d'antennes rayonnantes individuelles, qui sont alimentées avec une position de phase répartie statistiquement.

11. Four selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** le réseau d'antennes rayonnantes est conçu sous la forme d'une antenne rayonnante à fentes, qui comporte une pluralité de fentes de rayonnement (18) avec une longueur de fente comprise entre $\lambda/4$ et $\lambda/2$ et une faible largeur de fente w comparée à la longueur, lesquelles, par référence au sens de propagation du champ de micro-ondes dans le guide d'ondes d'alimentation (21), sont réparties sur toute la longueur de celui-ci, de telle sorte qu'il est possible d'introduire à travers chaque fente (18) les mêmes valeurs ou des valeurs approximativement identiques d'énergie de micro-ondes dans le résonateur à cavité (16), sachant que, par référence au sens de propagation de l'énergie des micro-ondes dans le guide d'ondes, la longueur de chaque fente (18) est comprise entre w et $\lambda/2$, en outre la distance entre deux fentes successives de l'antenne rayonnante à fentes, mesurée dans le sens de propagation de l'énergie des micro-ondes dans le guide d'ondes, est comprise entre $\lambda/2$ et $3\lambda/4$, et, par rapport au plan médian longitudinal (23) du guide d'ondes (21) s'étendant dans le sens de propagation, la distance latérale des fentes avec ce plan médian (23), sur toute la longueur du guide d'ondes, augmente progressivement, et **en ce qu'il** est prévu que les fentes longitudinales, qui forment les différents éléments de rayonnement, sont réparties statistiquement par rapport au plan médian longitudinal (23) du guide d'ondes.

12. Four selon la revendication 11, **caractérisé en ce qu'il** est prévu au moins 20 fentes individuelles sur toute la longueur du guide d'ondes (21) prévu pour alimenter les fentes d'antenne (18).

13. Four selon la revendication 12, **caractérisé en ce**

qu'au moins certaines fentes sont orientées en oblique et/ou perpendiculairement au sens de propagation du champ de micro-ondes dans le guide d'ondes (21).

5

14. Four selon l'une des revendications 9 à 13, **caractérisé en ce qu'il** est prévu au moins deux réseaux d'antennes rayonnantes, en particulier des systèmes d'antennes à fentes (14, 18), pour propager l'énergie des micro-ondes vers l'intérieur du résonateur à cavité (16).

10

15. Four selon la revendication 14, **caractérisé en ce que** les réseaux d'antennes rayonnantes (14) sont disposés symétriquement par rapport à un axe marqué du résonateur à cavité.

15

16. Four selon l'une des revendications 9 à 15, **caractérisé en ce que** chaque système d'antenne (14) est disposé dans les zones de bordure en forme de bandes de la paroi du résonateur, qui s'étend à proximité immédiate d'une arête intérieure de la paroi du résonateur.

20

17. Four selon l'une des revendications 1 à 16, **caractérisé en ce que** le dispositif de chauffage (28), prévu pour régler un profil de température souhaité dans la zone de traitement du résonateur à cavité, est conçu sous forme de chauffage électrique par effet Joule, qui maintient la température des parois (16₁ à 16₆) du résonateur à une valeur qui correspond à la valeur de la température dans la zone centrale de l'empileme à fritter (12), qui est enregistrée en tant que valeur effective, de préférence au moyen d'un pyromètre (32), et qui peut être régulée par un programme de commande en fonction d'une période prédéfinie.

25

30

35

18. Four selon la revendication 17, **caractérisé en ce qu'il** est prévu d'associer individuellement chacune des différentes zones des parois (16₁ à 16₆) du résonateur à cavité (16) à des capteurs de température (29₁ à 29₆), qui sont destinés à enregistrer les températures éventuellement différentes de chaque paroi du résonateur, et **en ce que** le dispositif de chauffage (28) comporte des éléments de chauffage (28₁ à 28₆) associés individuellement sur le plan de la température aux zones de parois surveillées, lesquels peuvent eux aussi être commandés individuellement.

40

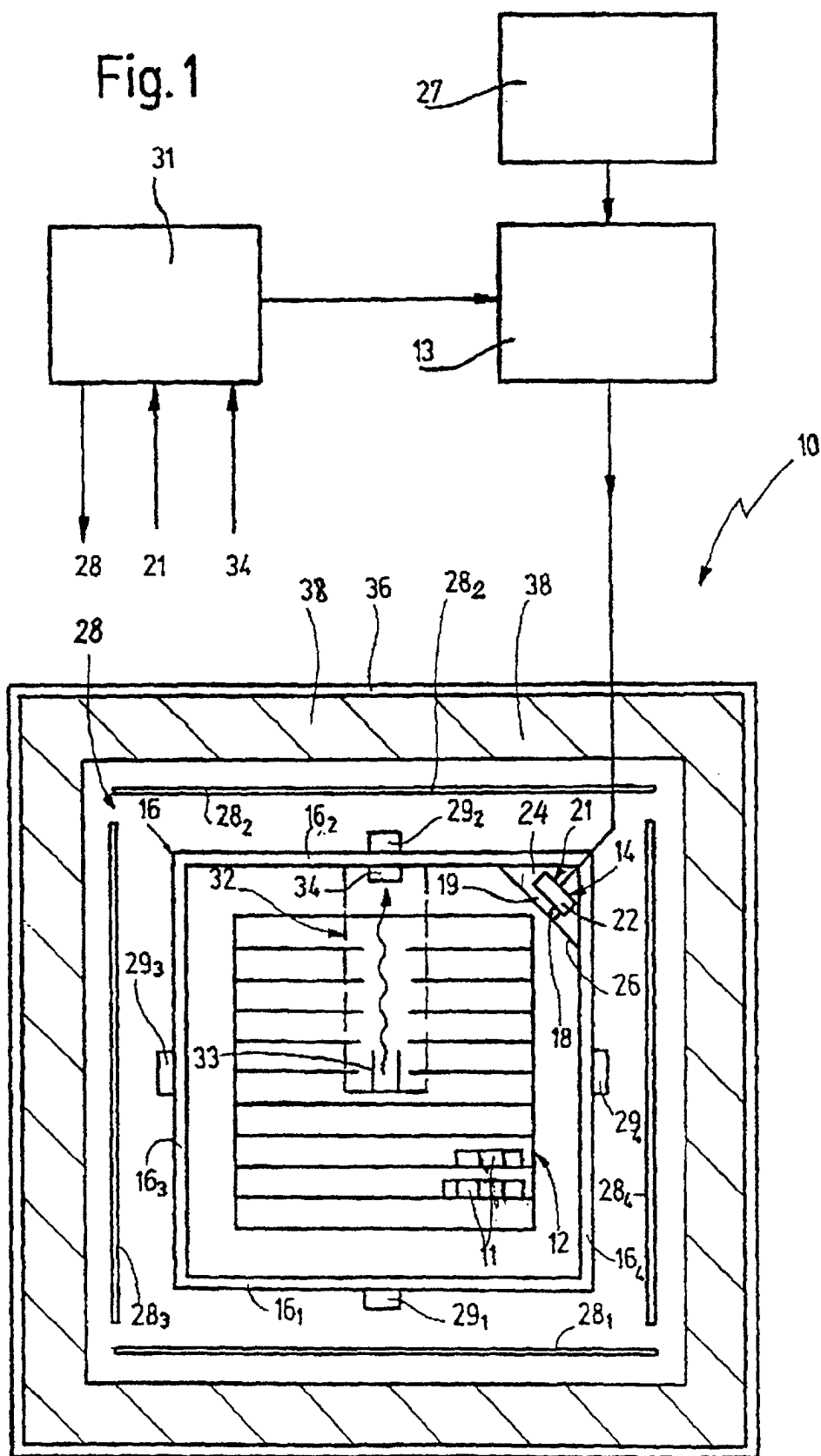
45

50

19. Four selon l'une des revendications 1 à 18, **caractérisé en ce que** la chemise d'isolation thermique, prévue pour isoler thermiquement le résonateur à cavité (16) par rapport à l'environnement extérieur du four (10), est conçue sous forme de couche de revêtement (38), posée sur la face intérieure d'un carter (36) enveloppant le résonateur à cavité (16)

55

et le dispositif de chauffage (28), réalisée à base d'un matériau de graphite, en particulier un feutre graphitique, et dotée d'une conductibilité minimum.



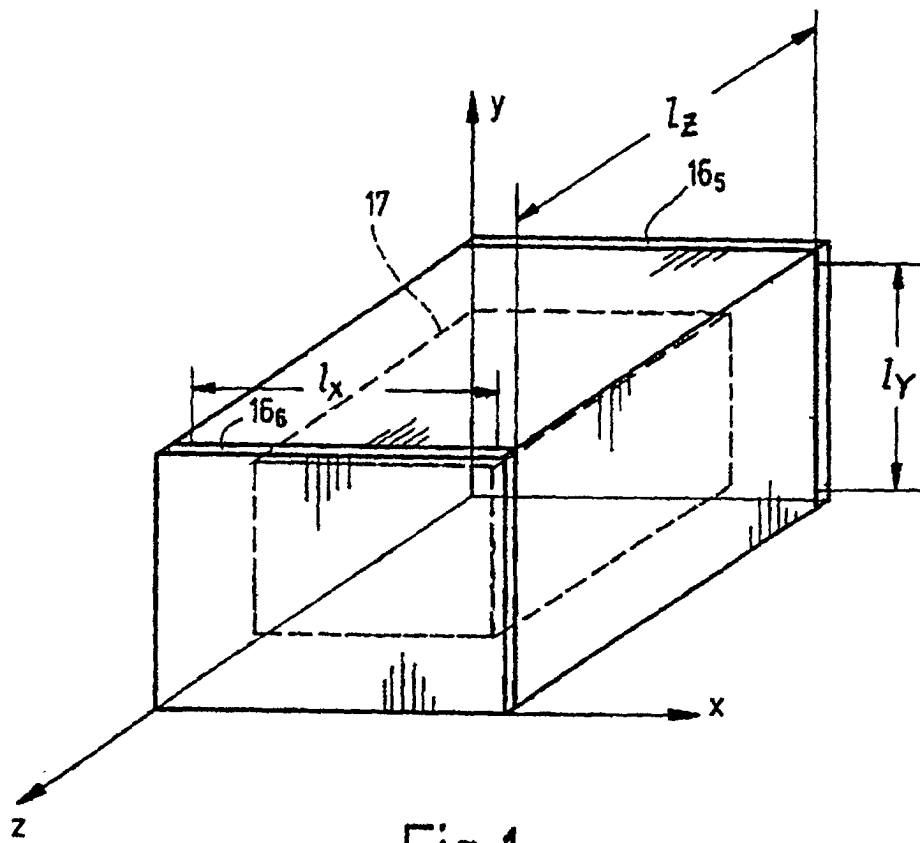


Fig.1a

