

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 494 506 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

05.01.2005 Patentblatt 2005/01

(51) Int Cl.7: **H05B 6/80**

(21) Anmeldenummer: **04007895.8**

(22) Anmeldetag: **01.04.2004**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL HR LT LV MK

(71) Anmelder: **Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
76133 Karlsruhe (DE)**

(72) Erfinder:

• **Feher, Lambert, Dr.
76297 Stutensee (DE)**

• **Link, Guido, Dr.
75045 Walzbachtal (DE)**

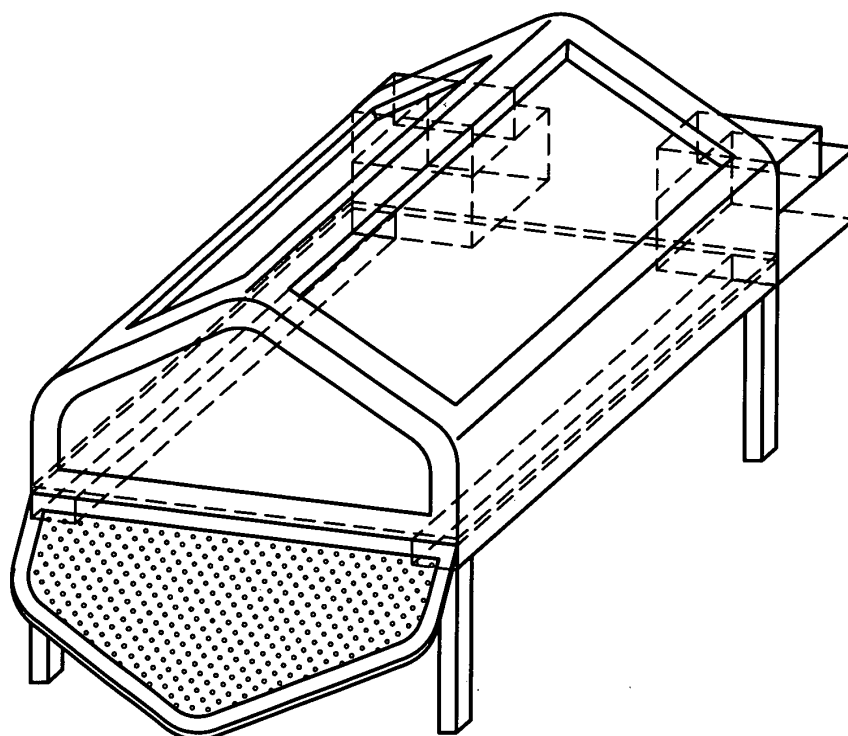
(30) Priorität: **01.07.2003 DE 10329412**

(54) **Hochmodiger Mikrowellen-resonator zur thermischen Prozessierung**

(57) Ein hochmodiger Mikrowellenresonator für die thermische Prozessierung von Werkstoffen hat prismatisch säulenförmig Gestalt mit pentagonalem Querschnitt. Parallel zu den beiden Mantelkanten einer der fünf Mantelwände befinden sich in derselben mindestens zwei gleichartig linienförmige Einkopplungsvorrichtungen für eine Mikrowelle, über die die Mikrowelle jeweils in Form eines Linienstrahlbündels in den Reso-

nator eingekoppelt wird. Die Strahlebene des jeweiligen Linienstrahlbündels ist so gerichtet, dass sich die eingekoppelten Mikrowellenlinienstrahlenbündel im Resonator auffächern und sich in einem vorgegebenen zentralen Volumen um und entlang der Längsachse des Resonators zu einer zumindest weitestgehend homogenen Verteilung des elektromagnetischen Feldes überlagern. Weitere einfache bauliche Maßnahmen eröffnen diesem Resonatorprinzip ein weites Anwendungsfeld.

Fig. 2



EP 1 494 506 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen modularen Mikrowellenresonator und einen daraus gebildeten thermischen Bereich einer Prozessstrasse. Der Mikrowellenresonator ist bezüglich seiner Frequenz geometrisch derartig dimensioniert, dass sich durch die eingekoppelte Mikrowelle, ausgehend von der Grundmode, hinreichend viele Moden ausbilden, die eine Überlagerung in der Art ermöglichen, dass die im Resonatorvolumen wirksame Intensität einem zur industriellen Prozessierung erforderlichen Gleichmass ausreichend nahe kommt. Wahl der Frequenz, Geometrie des Applikators, sowie der Einkopplung determinieren die Art des sich überlagernden Wellenfeldes. Bei einem monomodigen Resonator wird eine scharfe, reine geometrische Mode angeregt, die im allgemeinen eine sehr inhomogene Verteilung aufweist. Um mehr Moden zuzulassen muss das Applikatorvolumen deutlich vergrößert werden. Im Grenzfall sehr großer Abstände besteht der Übergang zur klassischen geometrischen Optik. Wie in Feher, L., et al.: Sintering of Advanced Ceramics Using a 30-GHz, 10-kW, CW Industrial Gyrotron, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 27, No. 2, April 1999, pp.547-554 gezeigt wurde, führt die Überlagerung von vielen Moden nicht zwangsläufig zu einer Gleichverteilung oder Homogenisierung, sondern zu fokalen Überlagerungen. Der vorliegende Applikator hat charakteristische Abmessungen von mindestens $L > 2\lambda$ für jede räumliche Dimension und bleibt in seiner Maximalausdehnung unterhalb des klassischen optischen Grenzfalles (Feher et al.: Theoretical aspects for microwave ray tracing calculations in screened structures, Proc. Latsis Symposium 1995 on Computational Electromagnetics, ETH Zürich, Switzerland, 1995, pp. 236-241). In diesem Bereich zwischen reiner modalen Anregung und klassischer Optik ist eine optimierte Feldformung durch die beschriebenen technischen Voraussetzungen Geometrie, Einkopplungsgestaltung in erforderlicher Weise möglich und zu lösen. In einem solchen mehr-/vielmodigen Mikrowellenresonator werden elektrisch sehr schlecht leitende Materialien im weiten Sinne, entsprechend der Prozess- und Nutzungsanforderung erwärmt. Im Gegensatz zu dielektrischen, mikrowellenpermeablen Materialien (z.B. Aluminiumoxidkeramiken, Porzellan, Glasfasern), für die die Beziehung $\tilde{n} = \sqrt{\epsilon_r}$ gilt, sind bei diesen Materialien die Abhängigkeiten der elektrischen Leitfähigkeit nach

$$\tilde{n}^2 = \sqrt{\epsilon_r^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_0^2}}$$

zu berücksichtigen. Zu denken ist einerseits an polymer-gebundene Graphitplatten (Brennstoffzellmembranen), an Kohlefaserverstärkte Verbundwerkstoffe, die

aus einem forminstabilen Grünzustand heraus in einen ausgehärteten, formstabilen Zustand gebracht werden sollen, durch den sie für die weitere technische Verwendung ausgezeichnete Eigenschaften aufweisen. Oder aber das Brennen/Sintern von keramischen Grünkörpern. Andererseits aber auch weniger mit hohen Temperaturen ist an die Erwärmung von Speisen zu denken. Bei all diesen Prozessvorhaben ist gemeinsam, dass in dem Resonatorvolumen ein vorgebbares Teilvolumen bestehen muss, in dem bei eingekoppelter Mikrowelle ein vorgegeben höherer Grad an elektromagnetischer Feldhomogenität besteht, damit darin kontrolliert gleichmäßig auf die Prozesssubstanz eingewirkt werden kann.

[0002] In der DE 43 13 806 wird eine Vorrichtung zum Erhitzen von Materialien durch Mikrowellen beschrieben. Die Vorrichtung besteht aus einer Heizkammer, durch die hindurch das zu prozessierende Material transportiert wird. Die Heizkammer hat ein Wandteil, das konkav gekrümmt ist. An dieser wird die eingekoppelte Mikrowelle reflektiert und auf das zu erwärmende Materialvolumen fokussiert.

Eine vergleichbare Einrichtung zeigt die WO 90/03714. Dort dient die Heizkammer zur Speisenerwärmung, um zu versuchen das zu erwärmende Speisenvolumen mit einem Volumen, in dem ein elektromagnetisches Feld mit noch tolerabler Homogenitätsabweichung besteht, zu umgeben, damit ein gleichmäßigeres Temperaturfeld zustande kommt.

[0003] In der JP 4-137391 ist die Heizkammer um eine der ersten Reflexionswand gegenüber liegende zweite Reflexionswand erweitert, womit angestrebt wird das Prozessvolumen mit einem verstärkten, gleichmäßigen Feld zu erfüllen, um damit eine gleichmäßige Aufheizung des Gegenstands zu erreichen.

[0004] In der US 5,532,462 wird ein zylindrisches Reaktionsgefäß beschrieben, dessen Inneres mit Mikrowellenenergie geheizt wird. Hierzu wird die Multimod-Mikrowelle in das Gefäß derart eingekoppelt, dass sie an der Innenwand absorbiert und reflektiert wird, und zwar derart, dass die Absorption und Reflexion helikal fortschreitend erfolgen. Das Kesselinnere soll so gleichmäßig geheizt werden.

[0005] Inhomogene Feldverteilungen führen beim Sintern von Keramiken zu unterschiedlichen Dichten innerhalb einer Charge und zu inhomogenen Verdichtungen in einzelnen Proben, die letztlich mechanische Spannungen hervorrufen, die die Formteile deformieren oder gar zertrümmern. Diese Problematik und die daraus gezogene Erkenntnis, dass eine gleichmäßige Volumenheizung u. a. bei Sinterprozessen von bedeutendem Vorteil und großer Bedeutung bei der thermischen Materialprozessierung sind, werden in dem Aufsatz "Microwave Sintering of Zirconia-Toughened Alumina Composites" von H. D. Kimrey et al. abgehandelt (Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 189, 1991 Material Research Society, Seiten 243 bis 255). Es werden zwei hochmodige, zylindrische Mikrowellen" beschrieben, der ei-

ne bei 2.45 GHz und der andere bei 28 GHz. Erfolgreich war der Sinterprozess nur bei der hohen Frequenz.

[0006] Anlässlich des MRS Spring Meeting in San Francisco, April 11th, 1996 (Symp. Microwave Processing of Materials V) berichteten L. Feher et al. unter dem Titel "The MiRa/THESIS 3D-Code Package for Resonator Design and Modelling of Millimeter-Wave Material Processing" Über die Simulation der Feldverteilung in einem vom IAP in Nizhny Novgorod benutzten Design eines hochmodigen, zylindrischen Resonators mit sphärischem Deckel. Es wird darin gezeigt, dass Resonatoren mit kreiszylindrischer oder sphärischer Geometrie eine durchweg verbesserungsbedürftige Feldverteilungen haben. Aufgrund ihrer Topologie treten Fokussierungen des Feldes im Resonatorinnern zwangsläufig auf, so dass im Vergleich zum Resonatorvolumen nur ein verhältnismäßig kleines Arbeitsvolumen mit einigermaßen homogener Feldverteilung bleibt. Zusätzliche technische Maßnahmen wie Modenrührer und diffuse Flächen (Streuflächen) bringen zwar Verbesserung, die aber für die gewerbliche bzw. industrielle Anwendung mit zu hohem Aufwand verbunden sind.

[0007] In der DE 196 33 245 wird ein prismatischer, bezüglich seiner Längsachse symmetrischer Hohlraum mit geradzahlig polygonalem Querschnitt als Resonator beschrieben. Alle Flächensegmente des Resonators sind eben flach. Dadurch bleibt der eingekoppelte Mikrowellenstrahl bei Reflexionen an der Resonatorwand stets divergent und wird nicht wie bei kreiszylindrischen und sphärischen Geometrien immer wieder fokussiert. Der Mikrowellenstrahl wird durch eine Einkoppelöffnung in einer der beiden Stirnwände eingekoppelt, seine Strahlachse ist zu der Längsachse geneigt, und zwar so, dass bei der ersten Reflexion eine symmetrischer Strahlaufteilung erfolgt. Die theoretischen Befunde für die Feldaufteilung wurden rechnerisch als auch experimentell in gutem Masse bestätigt. Eine gleichmäßige Verarbeitung mehrerer zu glühender oder zu brennender Körper kann mit verringertem Ausschuss durchgeführt werden.

[0008] Die bislang vorgestellten, bestehenden technischen Vorrichtungen lösen das Problem durch monomodige oder optische Ansätze, beschränkt in einer endlichen Geometrie, und sind hinsichtlich der technischen Nutzung unter den Anforderungen großflächiger, membranartiger Strukturen und Beladungen in ihren Ausbildungen insbesondere zur Realisierung von linienförmigen Prozessstrassen nicht zweckmäßig oder verwendbar.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Erwärmung, Temperierung und Prozessierung ausgehärter flächiger Materialien in der Form für die industrielle Anwendung zu ermöglichen, dass, durch außerordentliche Feldhomogenität bedingt, durch die bauliche Geometrie, die Art der Quellen- und Wellenleiter-einkopplung sowie der Abstimmung Frequenz und Größe des Applikators selbst sensible polymere Strukturen zu hochqualitativen Produkten mit bisher nicht erreich-

baren Materialeigenschaften thermisch prozessiert und damit ausgehärtet werden können. Die Beschickung soll dabei in einer Ausbildung stapelartig, also durch Vollpacken des Applikators, oder in der andern Ausbildung im Durchflussverfahren möglich sein.

[0010] Die Aufgabe wird durch einen hochmodigen Mikrowellenresonator gemäss den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1, in dem sich insbesondere neben der Grundmode hinreichend viele höhere Moden ausbilden können, gelöst.

[0011] Der Resonator hat prismatisch säulenförmige Gestalt mit pentagonalem, nach außen gewölbtem (konvexem) Querschnitt. Die Mikrowelle wird über Einkoppelöffnungen in einer der fünf Mantelseiten in den Resonator eingekoppelt. Diese Einkoppelöffnungen sind Linienstrahler und liegen parallel zu der Kante der Mantelwand. Dadurch tritt aus jeder Einkoppelöffnung ein divergenter Mikrowellenstrahl mit einer Strahlebene statt Strahlachse, ein Linienstrahlbündel, aus. Die Strahlebenen sind so gerichtet, dass sich die eingekoppelten Mikrowellenlinienstrahlenbündel im Resonator auffächern und sich in einem vorgegebenen zentralen Volumen um und entlang der Längsachse des Resonators zu einer zumindest weitestgehend homogenen Verteilung des elektromagnetischen Feldes darin überlagern.

[0012] In den Unteransprüchen 2 bis 10 werden vorteilhafte und für den Betrieb zweckmäßige Ausgestaltungen des Resonators beschrieben:

Eine spezielle, symmetrische Querschnittsform des Resonators ist die zur Seitenhalbierenden der Grundseite symmetrische Querschnitt (Anspruch 2), insbesondere wenn die beiden Seitenwände auch noch senkrecht auf der Grundplatte/Rückwand stehen (Anspruch 3). Der letztere Fall insbesondere ergibt sich aus rechnerischen Feldbetrachtungen, Felduntersuchungen und Symmetriebetrachtungen an einem Resonator mit hexagonalem Querschnitt (siehe DE 196 33.245). Aus diesen Untersuchungen und den Ableitungen aus Symmetriegründen darin wird dieser spezielle Querschnitt des Resonators gemäss Anspruch 4 als semihexagonal bezeichnet, weil er sich durch den mittigen Schnitt durch die jeweilige Längsmittte zweier paralleler und einander senkrecht gegenüberliegender Wände des Mantels eines Resonators mit hexagonalem Querschnitts ergibt.

[0013] Bezüglich der geforderten Qualität der elektromagnetischen Feldverteilung im Innern des Resonators hat sich experimentell gezeigt, dass der Anbau der zur Einkopplungsvorrichtung gehörigen Mikrowelle an der einen oder andern Stirnseite, und damit bei Betrachtung beider Einkopplungsvorrichtungen gleichartig oder auf unterschiedlicher Stirnseite - im einen oder andern Fall messbare, im allgemeinen jedoch nicht stark ausgeprägte Verbesserungen bringt (Anspruch 5).

[0014] Ablagerungen in den Einkoppelöffnungen würden die Auskopplung der Mikrowelle und damit die Feldverteilung im Resonator nachteilig beeinträchtigen. Es ist deshalb sinnvoll und zweckmäßig die Einkoppelöffnungen mikrowellentransparent, umgebungs- und prozessinert mit einem Dielektrikum zu verschließen / abzudecken (Anspruch 6). Das kann beispielsweise einen Teflonfolie sein aber auch sonst eine , eventuell zusätzlich mechanisch belastbare Abdeckung/Lage.

[0015] In Anspruch 7 wird der stirnseitige Zugang zum Resonator hervorgehoben. Das kann von einer Stirnseite aus sein, es wird dann von da aus mit Prozessgut beschickt und dasselbe daraus entnommen. Der Resonator kann aber auch im Durchlauf benutzt werden, wenn über beide Stirnseiten Zugang besteht. Ein derartig benutzter Resonator wird dann im allgemeinen auf einer der fünf Mantelwände stehen, wobei die Mantelwand mit den Einkoppelöffnungen je nach Bedarf exponiert werden kann. Sitzt der Resonator auf einem Gestell beispielsweise, könnte diese Mantelwand gleichzeitig Bodenwand sein. Bei geforderter leichter Zugänglichkeit zu den mikrowellentechnischen Einrichtungen, kann diese Mantelwand auch zur Seite oder nach oben exponiert sein. Das aber wird schließlich durch Prozessgegebenheiten bestimmt.

[0016] In Anspruch 8 ist beschrieben, dass der Zugang ins Resonatorinnere über mindestens eine der übrigen vier Mantelwände außer der Mantelwand mit den Einkoppelöffnungen eingerichtet ist, vorzugsweise über eine dieser Mantelwand mit Einkoppelöffnungen gegenüberliegende oder beide. Bei dieser Forderung könnte dann der Resonator auf eine Stirnwand gestellt und schrankartig zugänglich sein. Steht er in dieser Art auf Rollen oder einem Rollengestell, ist er darüber hinaus noch mobil. In welche Richtung, von der Resonatorbeschickung und -entnahme aus gesehen, die Mantelfläche mit den Einkoppelöffnungen exponiert wird, ist wie oben angemerkt, von den weiteren Prozessgegebenheiten abhängig. Beispielhaft ist der Zugang zu einem Schrank mit Klapptür oder Klapptüren mit den mikrowellentechnischen Anbauten auf der Rückwand.

[0017] Neben den beiden entlang der Mantelwandkante sitzenden Einkoppelvorrichtungen besteht nach Anspruch 9 eine weitere, gleichartig dazwischenliegende, über die zusätzlich elektromagnetisch eingekoppelt werden kann, um die Feldhomogenität im Nutzvolumen innerhalb des Resonators hinsichtlich der Verteilungscharakteristik fein zu manipulieren. Das Hauptfeld wird über die beiden äußeren Einkopplungen eingestellt.

[0018] Über die Zahl der Einkoppelvorrichtungen kann grundsätzlich auch eine andere elektromagnetische Feldverteilungen als die hier um die zentrale Längsachse des Resonators ausgebildete eingestellt werden. Die ausgekoppelten Mikrowelle/n reflektieren an den Innenwänden des Resonators aufweitend und nicht fokussierend. Das ist für eine homogene Feldverteilung eine grundlegende Voraussetzung, weil fokale Feldüberhöhungen, Kaustiken, wie bei runder Mantel-

wand nicht auftreten können.

[0019] Schließlich ergibt sich aus mikrowellentheoretischen Betrachtungen, dass bei einfachen Strukturen eine Welligkeit mit frequenzberücksichtigender Dimension für den Grad der Gleichmäßigkeit des elektromagnetischen Feldes in Teilvolumen des Resonators vorteilhaft ist. Experimentell bestätigte sich das für den Resonator, wenn die Welligkeit w sich in dem Band.

$$\lambda/16 < w < \lambda/2$$

bewegt (Anspruch 10).

[0020] Orientiert an dem Prozess, der gefahren, und dem Material, das prozessiert werden soll, sowie dem monetären Aufwand, der für eine solche mikrowellentechnologische Einrichtung aufgewandt werden muss, wird man zum Bau auf Mikrowellenkomponenten/quellen zugreifen, die ab 100 MHz bis in den Bereich von 25 GHz Standard sind. Für die Speisenerwärmung beispielsweise ist die Haushaltsmikrowelle eine bekannte Einrichtung. Sie arbeitet mit einem Magnetron als Mikrowellenquelle und erzeugt eine Hochfrequenz von 2,45 GHz. Bei der Keramiksinterung ist die thermische Prozessierung bei dieser Frequenz aber auch bei etwa 24,5 GHz sinnvoll. Hier spielt die Ankopplungseigenschaft der Prozesssubstanz eine gewichtige Rolle, die zudem noch temperaturabhängig ist. Aus der Homogenitätsforderung an das elektromagnetische Feld in mindestens einem Teilvolumen des Resonatorinnern und der Prozesskörperdimensionen ergibt sich die Frequenzwahl und Geometrie des Resonators, wobei der Durchmesser des Resonatorquerschnitts und die Länge des Resonators aus den Feldrechnungen und -betrachtungen heraus zur Einstellung des geforderten Grades an Feldhomogenität im notwendigen Teilvolumen stets größer als die Wellenlänge λ der angewandten Mikrowelle, vorzugsweise 2λ ist.

[0021] Das Durchführungsbeispiel ist ein Resonator in der geometrischen Form gemäß Anspruch 4 mit pentagonalem Querschnitt, speziell, da aus einem regelmäßig hexagonalen Querschnitt durch Halbierung hervorgehend, semihexagonalem Querschnitt. Diese spezielle, beispielhafte Geometrie wird im folgenden noch näher erläutert. Die Zeichnung dazu besteht aus den Figuren 1 bis 4:

Figur 1 die Erzeugung des Resonatorquerschnitts, Figur 2 der Resonator mit semihexagonalem Querschnitt perspektivisch, Figur 3 die Energiedichteverteilung über dem Querschnitt, Figur 4 die mittige Energiedichteverteilung über der Resonatorlänge.

[0022] Der Resonator mit semihexagonalem Querschnitt ist in Rahmenbauweise aus Aluminiumprofilen aufgebaut, wie Figur 2 zeigt. Er ist ein Laboraufbau. Die Mantelwände bestehen aus Aluminiumblech, das von

innen an den Rahmen befestigt ist. Die beiden Stirnseiten sind hier perforierte Bleche, die am Bodenrahmen über ein Scharnier schwenkbar sind. Entlang der beiden Mantelkanten der Bodenwand sitzen die beiden Längseinkopplungen, siehe Figur 1. Die rechte Einkoppeleinrichtung hat an ihrer hinteren Stirn, an der hinteren Resonatorstirnwand die Mikrowellenquelle, ein Magnetron, mit Abstimmereinheit (Schieber sitzen) zum Abgleich sitzen. In Figur 2 deutet sich das durch die Schlauchzuführungen und sichtbaren Rechteckteile an. Die Mikrowellenquelle der parallel gegenüberliegenden Einkoppelvorrichtung sitzt vorne an der in der Figur linken unteren Ecke entsprechend. Der Aufbau ist notwendigerweise hochfrequenzdicht, wie an den Stirnkanten durch das anliegende, gewebeartige Metallband ersichtlich. In der Bodenwand liegt innen eine Teflonplatte aus, die den gesamten Boden abdeckt und die beiden band-/linienförmigen Einkoppelöffnungen entlang der jeweiligen Mantelwandkante verdeckt. Figur 1 zeigt ihre Lage im Resonatorquerschnitt. Der Resonatorquerschnitt ist konvex pentagonal und lässt durch Spiegelung an der Grundkante zu einem regelmäßigen Hexagon vervollständigen, wie in Figur 1 dargestellt.

[0023] In Figur 1 ist an der in der Figur linken Quelle der Strahlengang des auskoppelnden Mikrowellenstrahls mit seiner punktgestrichelten Strahlachse, richtiger Strahlebene, angedeutet. Die im Bild linke Strahlrepräsentierung reflektiert zweimal, an der Seitenwand und linken Dachwand, die rechte nur an dieser Dachwand. Mehr führe zur Unübersichtlichkeit und ist deshalb unterlassen.

[0024] Die Betriebesdaten und die Geometrie des Resonators mit semihexagonalem Querschnitt sind:

Die Betriebsfrequenz ist 2,45 GHz und damit eine Wellenlänge λ im Vakuum von etwa 12 cm. Als Mikrowellenquelle wird pro Einkoppelvorrichtung ein Magnetron verwendet. Die beiden Magnetronen sind pulsbar mit steuerbarem Puls-Breiten-Verhältnis, so dass kontinuierlich eine Mikrowellenleistung von null bis zum Nennmaximum eingestellt werden kann. Das Resonator hat die zehnfache Vakuumwellenlänge, also etwa 1,2 m, die Seitenwand hat eine Innenhöhe von etwa 30 cm und die beiden Dachmantelwände sind jeweils 60 cm breit.

[0025] Die technischen Daten sind beispielhaft. In diesem Resonator wurden und werden Platten und bandförmige Grünkörper in homogener oder verbundtechnische Form über die Einwirkung der eingekoppelten Mikrowelle je nach Ausdehnung in kurzer Zeit zur Formstabilität und gegebenenfalls zur mechanischen Stabilität ausgehärtet. Eine Grünplatte aus CFK-Material, 3 mm dick und 20 cm² kann so über Querschnitt und Fläche in weniger als 20 Minuten. gleichmäßig ausgehärtet werden, Brennstoffzellmembranen in weniger als 5 Minuten. Das gelingt in einem klassischen Autoklaven bei rein thermischer Einwirkung über die Gegenstand-

soberfläche nur in mehreren Stunden.

[0026] Die ausgezeichneten Prozesszeiten werden anhand der Figuren 3 und 4 mit den dargestellten Feldverteilungen erklärt. Figur 3 zeigt die Energiedichteverteilung über den mittigen Querschnitt. hervortritt in der oberen Hälfte im zentralen Bereich ein verhältnismäßig gleichmäßig gleichdunkle Verteilung, die in diesem zentralen Bereich von nur geringen Schwankungen bekleidet ist. Stark treten auch die beiden unmittelbaren Einkoppelbereiche mit dem jeweils angeschlossenen Rechteckhohlleiterquerschnitt hervor.

In Figur 4 ist die Verteilung senkrecht dazu in der Mittelebene zur Grundplatte entlang der Längsmittlinie dargestellt. Prozessgegenstände, die in dem Teilvolumen des Resonators, in dem diese brauchbaren, wenig schwankenden Feldverhältnisse bestehen, exponiert und der Mikrowelle ausgesetzt werden, werden in den vergleichbar kurzen Prozesszeiten gleichmäßig formverfestigt.

In beiden betrachteten Ebenen ist die größte Schwankung kleiner als 5%.

Patentansprüche

1. Hochmodiger Mikrowellenresonator für die thermische Prozessierung von Werkstoffen, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Resonator (1) prismatisch säulenförmig Gestalt pentagonalem Querschnitt hat, dass sich parallel zu den beiden Mantelkanten einer der fünf Mantelwände in derselben mindestens zwei gleichartig linienförmige Einkopplungsvorrichtungen für eine Mikrowelle befinden, über die die Mikrowelle jeweils in Form eines Linienstrahlbündels in den Resonator eingekoppelt wird, dass die Strahlebene des jeweiligen Linienstrahlbündels so gerichtet ist, dass sich die eingekoppelten Mikrowellenlinienstrahlenbündel im Resonator auffächern und sich in einem vorgegebenen zentralen Volumen um und entlang der Längsachse des Resonators zu einer zumindest weitestgehend homogenen Verteilung des elektromagnetischen Feldes überlagern.
2. Mikrowellenresonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Querschnitt des Resonators zur Seitenhalbierenden der Grundlinie des Querschnitts spiegelsymmetrisch ist.
3. Mikrowellenresonator nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die beiden an der Grundfläche des Resonators ansetzenden Seitenwände senkrecht auf dieser stehen.
4. Mikrowellenresonator nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Querschnitt des Resonators die symmetrische Hälfte eines hexagonalen

Querschnitts - semihexagonal - ist.

5. Mikrowellenresonator nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die jeweilige Mikrowellenquelle der beiden außenliegenden Einkopplungsvorrichtungen an der gleichen oder an entgegengesetzten Stirnseite des Resonators angebaut ist. 5
6. Mikrowellenresonator nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einkoppelöffnungen für die Mikrowelle mit einem mikrowellentransparenten, umgebungs- und prozesssinerten Dielektrikum verschlossen / abgedeckt sind. 10
7. Mikrowellenresonator nach 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** dieser über mindestens eine seiner beiden Stirnwände zugänglich ist. 15
8. Mikrowellenresonator nach 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** er über mindestens eine der beiden Mantelwände, die der Mantelwand mit den Einkoppelöffnungen gegenüberliegen, zugänglich ist. 20
9. Mikrowellenresonator nach den Ansprüchen 7 und 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwischen den beiden aussenliegenden Einkoppelöffnungen eine weitere, parallele liegt, über die ebenfalls eine Mikrowelle einstellbarer Leistung zur Anpassung der Feldhomogenität eingekoppelt wird. 25
30
10. Mikrowellenresonator nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Innenwände des Resonators eine Welligkeit w im Bereich

$$\lambda/16 < w < \lambda/2$$

aufweisen.

35

40

45

50

55

Fig. 1

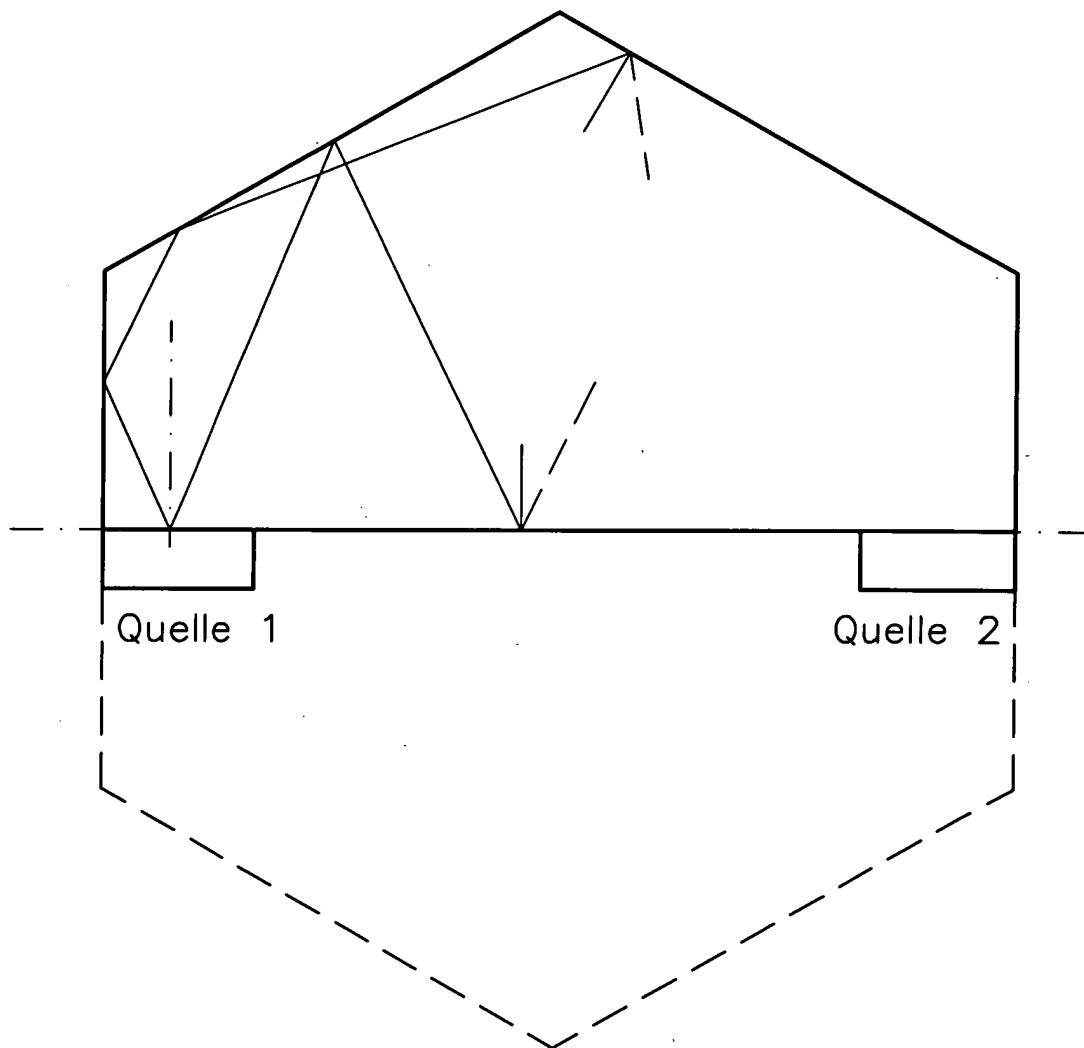


Fig. 2

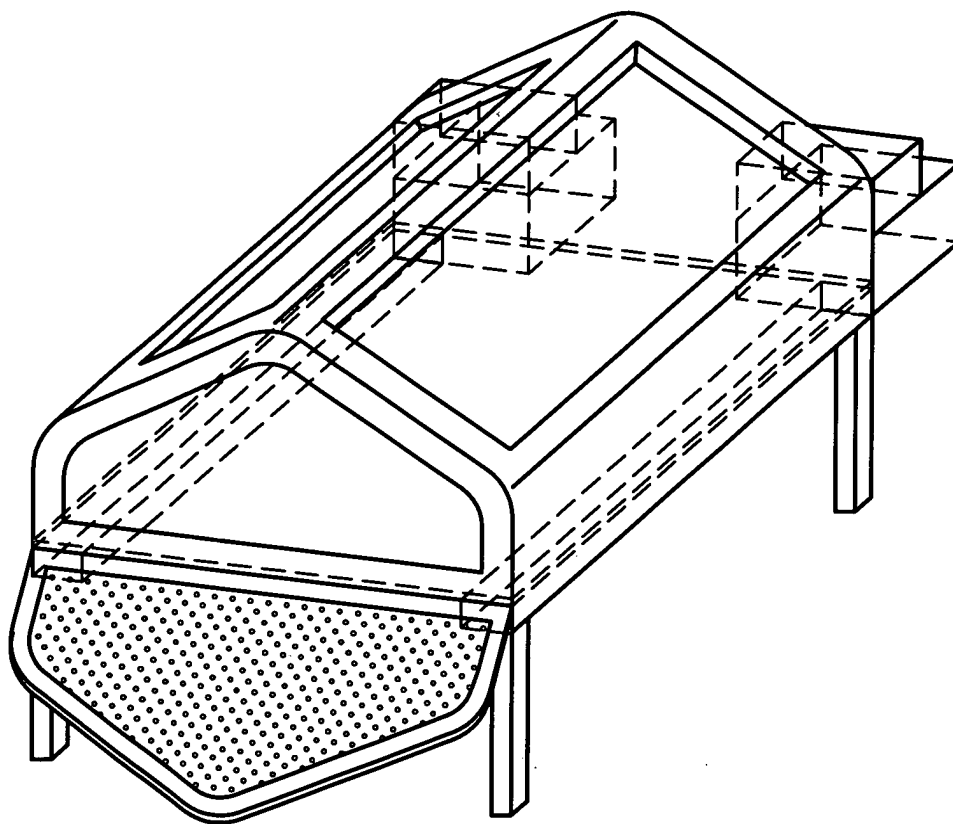


Fig. 3



Fig. 4

